

Documento de posicionamiento

Gestión energética sostenible e inteligente en el ámbito ferroviario

Noviembre, 2016



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: fuepu18@ffe.es
www.ptferroviaria.es

I. INTRODUCCIÓN

Algunas de las prioridades más destacadas en los documentos estratégicos españoles y europeos del sector ferroviario hacen referencia a aspectos como la internacionalización, los elementos económicos (eficiencia en la gestión, en el uso de las infraestructuras), pero también a las prioridades energéticas y ambientales, dado que nuestro patrón de crecimiento, pese a sus éxitos, ha demostrado ser profundamente insostenible. Así, contribuir a la consecución de los objetivos que tiene adquiridos nuestro país en materia de mejora de la eficiencia energética, energías renovables y otras tecnologías bajas en carbono, constituye un marco de referencia para el desarrollo de la I+D+i del sector ferroviario. Dadas sus especiales características, el ferrocarril es más eficiente, energética y ambientalmente, que otros modos de transporte con los que compite, y ello tanto en lo que refiere al consumo de energía primaria y, en concreto, la procedente de fuentes no renovables como en emisiones gases de efecto invernadero (GEI). Igualmente son menos perniciosas sus emisiones de efecto local, tanto por la menor cuantía de las mismas, como por la deslocalización de las emisiones. Añadir la ventaja competitiva social que el ferrocarril tiene respecto a los otros modos: es percibido por la sociedad como un modo sostenible. La encuesta realizada por la PTFE sobre percepción pública del transporte ferroviario en España destaca, entre otros resultados, que el ferrocarril se percibe como un transporte que contribuye al cuidado del medio ambiente, en especial por su baja contaminación atmosférica, impacto visual y generación de residuos.

Desde hace varios años, las administraciones y compañías ferroviarias han establecido como una línea prioritaria de su estrategia la gestión sostenible de la energía, debido, en gran parte, al elevado coste económico, pero también a la necesidad de los operadores ferroviarios de potenciar y promocionar el transporte ferroviario como “transporte ecológico”, reforzando el mensaje de que el consumo energético se puede reducir intensificando el uso del ferrocarril en detrimento de otros modos. En este ámbito, la eficiencia energética a través de una gestión sostenible en la operación, el desarrollo de la tecnología de almacenamiento de energía a bordo y la regulación e implantación de redes eléctricas inteligentes, entre otros, son retos clave que continúan vigentes a pesar de los logros alcanzados en los últimos años.

La Plataforma Tecnológica Ferroviaria (PTFE), tiene entre sus objetivos principales crear las herramientas necesarias para contribuir a la mejora de los avances científicos y tecnológicos que permitan la competitividad, la internacionalización y la sostenibilidad del Sector Ferroviario, aplicando las directrices indicadas desde el Ministerio de Economía y Competitividad, órgano de tutela de la PTFE. Por ello, la PTFE ha entendido que la gestión energética, sostenible e inteligente en el ámbito de la investigación e innovación en el sector ferroviario, es un factor clave para favorecer la competitividad y asegurar el liderazgo de la industria ferroviaria. En este contexto se enmarca el presente “*Documento de posicionamiento sobre: Gestión energética sostenible e inteligente en el ámbito ferroviario*” documento que pretende recoger el pulso de la innovación en la gestión energética en la infraestructura, en el materia móvil y en la operación, así como las tendencias y aplicaciones futuras. Bajo la coordinación del área de Investigación, Desarrollo e Innovación de la Dirección de Ingeniería e Innovación de ADIF, y con la participación de empresas, centros tecnológicos y grupos de investigación de diferentes universidades, entidades todas de la PTFE, ha sido posible la realización de este documento oportunamente estratégico en el que se recogen, asimismo, una serie de retos y recomendaciones para seguir consolidando los elementos diferenciadores y competitivos del ferrocarril respecto al resto de los modos.

II. ESTADO DEL ARTE. CASO CONCRETO DE ESPAÑA

Desde hace varios años, las administraciones y compañías ferroviarias han establecido como una línea prioritaria de su estrategia la gestión sostenible de la energía, muy especialmente la que es destinada a la tracción de sus vehículos. Este hecho es debido en gran parte al elevado coste económico que esta energía representa, concretamente en el entorno del 15% de los costes fijos de explotación. En menor medida, la necesidad de los operadores ferroviarios de potenciar y promocionar el transporte ferroviario como “transporte ecológico”, refuerza el mensaje de que se debe reducir el consumo energético del ferrocarril.

En el caso de España, en los últimos diez años, se han llevado a cabo un gran número de proyectos para la reducción del consumo de energía eléctrica de tracción. De lo comentado anteriormente es fácil intuir que la motivación de los operadores ferroviarios para emprender proyectos de reducción del consumo energético es eminentemente económica, tratándose de proyectos que deben venir acompañados de un retorno de la inversión. Este retorno de la inversión sólo será posible si los ahorros de kilovatios hora se ven transformados en ahorros en euros.

De manera general, se han llevado a cabo proyectos encaminados a la implantación de procedimientos y equipos que permitan reducir las pérdidas eléctricas en los diferentes elementos de la infraestructura eléctrica ferroviaria, a la implantación de planes de conducción económica¹ y de nuevas tecnologías que permitan aprovechar la energía eléctrica generada con el freno regenerativo de los vehículos. Precisamente el aprovechamiento de esta energía se ha convertido en la actualidad en una de las principales técnicas de gestión y aprovechamiento de la energía en redes con tracción eléctrica, sobre todo en corriente continua minimizando con ello el uso del freno eléctrico reostático. Existen diversos estudios en los que se afirma que los trenes son capaces de regenerar entre el 30 y el 40% de la energía que consumen, por lo que la reducción del consumo en contadores derivada de la aplicación de este tipo de frenado debería idealmente alcanzar este valor. Sin embargo, por diversos motivos, en gran parte de las líneas metropolitanas, se observan pérdidas en reóstatos que rondan el 10-12% del consumo en contadores, lo cual limita el ahorro real conseguido por el frenado regenerativo. Para ello tecnologías de acumulación (en tierra y principalmente embarcada) y convertidores en subestaciones que las conviertan en reversibles han comenzado a penetrar de manera importante en las redes ferroviarias.

Es de reseñar que, entre los años 2.007 y 2.009, un grupo de empresas e instituciones españolas desarrollaron el proyecto de investigación *“Análisis sistemático del consumo energético en líneas ferroviarias metropolitanas, de cercanías y de alta velocidad, con la*

¹ Este tipo de conducción, definida como aquella que permite obtener el máximo aprovechamiento de la energía de tracción, evita en lo posible la utilización de los frenos pues trata de aprovechar al máximo la marcha en deriva, es decir, la energía cinética y potencial del tren con objeto de recorrer el mayor número de kilómetros sin aplicar la tracción.

valoración del impacto energético y del resultado económico, incluyendo el desarrollo de modelos y simuladores parametrizables²". En dicho proyecto se estimó que para un año tipo, los trenes que circulan por las redes ferroviarias españolas disipan anualmente en el freno unos 1.200 GWh de energía. De esta cantidad de energía sólo se aprovecha en la actualidad algo menos del 50%. El resto se pierde: O bien porque algunos trenes no tienen freno regenerativo, o bien por la imposibilidad de devolver energía eléctrica desde de la red ferroviaria de corriente continua a la red eléctrica general. Este proyecto asentó sin lugar a dudas las bases para el desarrollo posterior de las tecnologías necesarias para el aprovechamiento de esa energía.

En el caso del material móvil, los operadores y los fabricantes también han realizado en estos últimos años importantes esfuerzos para optimizar su consumo en operación. Se estima que una adecuada gestión energética del material móvil puede producir ahorros de hasta el 20% del consumo total de energía, ahorros que puede afirmarse se han ido materializando en los últimos años con la progresiva implantación de trenes más eficientes.

III. POLÍTICA Y MARCO NORMATIVO

El primer mandato europeo relacionado con el uso inteligente de la energía en todos los sectores fue el M/441 en 2009, con el que se buscaba un estándar europeo donde se acceda a un mínimo nivel de funcionalidad para la medición inteligente de la energía y donde ya se empiezan a mencionar las Smart Grid. Es en 2011 cuando se crea el mandato de las Smart Grid M/490, que tiene como objetivo el desarrollo de una serie de estándares dentro del marco europeo, desarrollando distintos procesos para alcanzar la interoperabilidad y facilitar la implementación en Europa de los distintos niveles del Smart Grid con sus funcionalidades dependiendo del sector de aplicación. Bajo estos mandatos, y con documentos de referencia de CEN/CENELEC, el proyecto "MERLIN" lleva las Smart Grid a un ámbito ferroviario, en el que se propone una serie de recomendaciones técnicas para tener un mejor y más estandarizado manejo de la energía en los sistemas ferroviarios, analizando la arquitectura de su sistema de control.

En cuanto a la normativa española, con el Real Decreto 1110/2007 se aprueba el reglamento unificado de puntos de medida del sistema eléctrico. Ya con el Real Decreto 1011/2009 se da un gran paso en beneficio del ahorro energético al regular la posibilidad de verter de vuelta a la red la energía que los consumidores con sistemas de ahorro y eficiencia energética no consuman en sus propias instalaciones, como es el caso de la energía obtenida por el frenado regenerativo en el ámbito ferroviario. En el ámbito político existen programas de ayuda y planes nacionales de acción de eficiencia energética que establecen acciones concretas que garanticen el cumplimiento de los objetivos propuestos para el año 2020 por la Unión Europea, desarrollados por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

² Proyecto de investigación ELECRAIL, financiado por el Ministerio de Fomento a través de CEDEX.

Existen también distintos ajustes en el mercado, como es el caso del servicio de interrumpibilidad, en el que los grandes consumidores son retribuidos por dejar de consumir en momentos donde la red eléctrica necesite más energía de la disponible. A través de la Orden IET/2013/2013 y sus siguientes modificaciones se indican las normativas para la participación en el mecanismo competitivo de asignación a este servicio a través de subastas.

IV. INFRAESTRUCTURA

La infraestructura ferroviaria tiene y tendrá un papel fundamental en la gestión energética sostenible e inteligente del sistema ferroviario en su conjunto. Algunos estudios han concluido que las principales mejoras y ahorros futuros en el ámbito energético provendrán de la aplicación de medidas por esta parte habida cuenta de la alta eficiencia que alcanza actualmente el material móvil de tracción eléctrica.

En el capítulo de Infraestructura se debe considerar, no sólo a los elementos que posibilitan el funcionamiento de un ferrocarril con tracción eléctrica³, sino también otras medidas relacionadas con el diseño inicial de la plataforma. En efecto, el cómputo total de la energía consumida por un vehículo en una línea ferroviaria está muy influenciado con las características geométricas de su trazado, por lo que el **análisis y diseño de trazados energéticamente eficientes** es una medida a tener muy en cuenta.

Las inversiones en la construcción de nuevas líneas ferroviarias y en la mejora de las existentes se justifican en muchas ocasiones por la reducción del consumo y de las emisiones del conjunto del sistema de transporte. Para que esta hipótesis sea cierta es necesario que el diseño de las infraestructuras ferroviarias se realice, además de con los criterios utilizados hasta el momento, desde una perspectiva y criterios energéticos.

Para poder alcanzar este objetivo es necesario partir de una base sólida en cuanto a conocimientos del consumo energético, así como la utilización de herramientas de modelización robustas que faciliten la toma de decisiones durante el diseño y redacción de los proyectos, con el fin de obtener una mejor eficiencia energética para los diferentes tipos de trenes, líneas y servicios.

Así pues, una parte del consumo energético de un tren se debe a la energía necesaria para vencer las resistencias mecánicas al avance, donde el trazado juega un papel fundamental. Por ello, el diseño energéticamente eficiente de trazados ferroviarios debe considerar aspectos como la armonización de las pendientes con las velocidades, potenciando el uso de la conducción económica del tren, ya sea manual o automática.

Para un trazado dado (sea o no energéticamente eficiente) el **análisis y diseño de la infraestructura eléctrica para el aprovechamiento óptimo de la energía regenerada** es otra medida que debe ser potenciada para una gestión energética sostenible e inteligente. Esta medida tendrá por lo general más importancia en *líneas alimentadas en corriente continua*.

³ Principalmente *Subestación de Tracción Eléctrica, Línea Aérea de Contacto y conductores de alimentación*.

En general, desde el punto de vista de la infraestructura eléctrica, una línea ferroviaria en corriente continua será mejorable en términos de eficiencia energética si presenta excesivas pérdidas de conducción (efecto Joule), o pérdidas por frenado reostático. Esta última fuente de pérdidas comienza a percibirse como un claro problema desde el punto de vista de la eficiencia energética según se ha comentado.

En esta medida cabe hacer una distinción entre acciones sin coste (o muy bajo coste), basadas principalmente en la mejor utilización de los elementos disponibles en la infraestructura, y acciones que requieren de una mayor inversión económica.

Las primeras deberían aplicarse a todos aquellos elementos de la infraestructura en los que una simple maniobra previa puede llevar asociada una mejor utilización de la energía regenerada. Como principales ejemplos se encuentra la utilización de la regulación de los transformadores de la subestación para operar una línea con una tensión de vacío optimizada, que evite tener tensiones excesivamente bajas en pantógrafo pero que reduzca a la vez las pérdidas en reóstatos. Otro ejemplo es la desconexión de algunas subestaciones en hora valle con objeto de reducir la frecuencia de eventos en los que la presencia de una subestación activa entre trenes que intercambian energía, limite la receptividad. Líneas con alta densidad de tráfico – líneas de metro y cercanías normalmente – serán las más beneficiadas de este tipo de acciones. Ello es debido al alto número de paradas que los trenes realizan en estas explotaciones, lo que implica frecuentes procesos de aceleración y frenado (se ha estimado que se está llegando a recuperar entre el 15 y el 30% de la energía consumida).

Dentro de las acciones con alto coste asociado, las principales tendencias a nivel mundial son las subestaciones reversibles y sistemas de almacenamiento de energía. A día de hoy, debido a su mayor fiabilidad y vida útil y al mejor coste por MW (siempre que se remunere la devolución de potencia a la red eléctrica de compañía), la tendencia principal es instalar subestaciones reversibles. Sin embargo, la investigación intensiva en la mejora de las tecnologías de almacenamiento, permite adivinar que en un futuro a medio plazo los almacenadores de energía se convertirán en una tecnología plenamente competitiva, considerando además que tiene otras posibles aplicaciones además de la propia de ahorro.

Es importante destacar que el coste de los convertidores reversibles no es despreciable. Una vez que se ha detectado que las pérdidas en reóstatos en una línea son elevadas, y que sería interesante por tanto instalar subestaciones reversibles, es preciso realizar estudios cuidadosos para hacer posible que los administradores y operadores puedan recuperar la inversión en un tiempo razonable. En general, no será viable económicamente instalar convertidores reversibles en todas las subestaciones, sino que se estudiará el número y la localización óptima de los mismos. También la potencia de los convertidores instalados tendrá influencia en la eficacia para reducir los reóstatos. Se hará por tanto necesario abordar la mejora de la infraestructura eléctrica como un problema de optimización.

Este problema, que generalmente se resuelve con métodos de simulación, debe ser tratado con modelos precisos para evitar que las conclusiones del estudio de mejora de la infraestructura sean erróneas en términos de ahorro energético. Además de la precisión en el modelado de los elementos habituales en la infraestructura eléctrica y el material móvil, otros aspectos como la influencia de las variables estocásticas del tráfico en las pérdidas en reóstatos se están teniendo en cuenta en los optimizadores más completos recientemente desarrollados. A este último respecto, es destacable que la casi totalidad de los estudios en la literatura incluyen sólo un escenario de tráfico simplificado, con tiempos

de parada fijos, que se ha demostrado insuficiente para representar las complejas interacciones energéticas entre los trenes en una línea urbana o metropolitana.

El aprovechamiento óptimo de la energía regenerada en *líneas alimentadas en corriente alterna monofásica* suele tener un menor impacto estratégico si se considera que la devolución de energía a la red de compañía es algo que se hace por las propias características técnicas del sistema, al no emplear subestaciones rectificadoras. No obstante, en estos casos podrá ser interesante analizar el impacto derivado del empleo de sistemas de almacenamiento con el objeto de mejorar la calidad del suministro eléctrico (por ejemplo disminuyendo posibles caídas de tensión excesivas).

Como es de esperar, en el capítulo de Infraestructura también debe tenerse en cuenta todos aquellos **elementos externos al circuito de tracción que también consumen energía** y que deben ser objeto de análisis energéticos para optimizar su consumo. De estos elementos destacan por su alta demanda de energía los equipos de calefacción de aguja, siendo adecuada la promoción de sistemas más eficientes, no solo en lo relativo a los componentes empleados, sino al proceso de conexión y desconexión.

En general, el empleo de lámparas de bajo consumo en estaciones y túneles, de farolas autónomas alimentadas por energía solar para múltiples usos y la utilización de focos con tecnología LED en las señales fijas luminosas, son medidas que ayudarán a mejorar la sostenibilidad energética de la infraestructura. Cabe destacar que este tipo de acciones ya están siendo potenciadas por los administradores y compañías ferroviarias en España.

Por último, debe también reseñarse la necesidad de actuar sobre aquellos elementos que tienen un consumo de energía residual aun en situaciones de no operatividad. Este consumo residual no es de gran cuantía ni se considera muy significativo de forma independiente, pero si se suma el conjunto de todos estos elementos a largo de una línea ferroviaria, el total puede suponer una cantidad que sí es significativa, tanto desde el punto de vista económico como técnico. Entre los ejemplos más representativos cabe señalar que uno de los componentes detectados que presenta este consumo residual de energía, aun en caso de no estar operativo, son los transformadores existentes en los centros de auto transformación de las líneas de corriente alterna monofásica con sistema 2x25 kV (caso de líneas de alta velocidad en España). Y es que en ciertas circunstancias operativas de la línea ferroviaria, se podría considerar aceptable su desconexión con el fin de eliminar estos consumos residuales asociados y así mejorar el aprovechamiento efectivo de la energía realmente consumida por las subestaciones de tracción.

Identificación de retos y desarrollos tecnológicos actualmente en marcha o futuros

Hasta la fecha la infraestructura eléctrica ferroviaria se ha basado en el concepto de una red eléctrica convencional, con flujos de energía y sistemas de comunicación unidireccionales sin intercambio de información entre los diferentes elementos. En condiciones normales de funcionamiento los vehículos reciben energía de la subestación de tracción a través de la línea de transmisión eléctrica en contacto con el tren, constituyendo un proceso continuado en el tiempo. Sólo la existencia de fallos o posibles limitaciones de la potencia demandada hacen interrumpir la alimentación al tren.

Con el objeto de optimizar esta situación, un gran número de agentes del sector (administradores, compañías ferroviarias, universidades, centros tecnológicos y fabricantes) están identificando las ventajas que podrían derivarse de la conversión de la red eléctrica ferroviaria tradicional a una **red eléctrica ferroviaria inteligente**, tanto en corriente continua como en corriente alterna monofásica. En este sentido debe reseñarse que a finales de 2015 concluyó el proyecto de investigación europeo MERLIN⁴ y en el que se ha definido y asentado los conceptos generales que deben regir en este nuevo tipo de redes.

El objetivo general de esta red inteligente sería en todo caso realizar una gestión óptima de la energía eléctrica del sistema ferroviario produciendo mejoras en su funcionamiento e incluyendo un mayor ahorro de energía. Conceptualmente los diferentes componentes del sistema eléctrico se agruparían en nodos de control susceptibles de recibir y entregar energía a la red. Los nodos serían supervisados por un gestor central programado con los algoritmos correspondientes. Una posibilidad interesante se basaría en la optimización del coste de la energía, ya que la eficiencia no se consigue sólo reduciendo el consumo de energía, sino reduciendo la importación de la red eléctrica de compañía en los momentos en los que la producción de energía es más ineficiente (lo que se refleja en su mayor precio). Por ello, según la situación instantánea del mercado eléctrico, podría ser más interesante almacenar energía, devolverla a la red, producir parte de la electricidad dentro del sistema, circular en deriva, etcétera.

El desarrollo de esta red llevará asociado los siguientes avances tecnológicos en la infraestructura:

- *Producción de electricidad en la propia infraestructura*, previéndose una micro generación renovable cerca del ámbito donde va a ser consumida (edificios técnicos, instalaciones auxiliares, etcétera).
- *Penetración de los sistemas de almacenamiento* pues como se ha indicado, aportan gran flexibilidad al funcionamiento del sistema en su conjunto. Cabe destacar aquí que los sistemas de almacenamiento ofrecen otras ventajas aparte de los posibles ahorros de energía derivados de su uso. Así permiten mejorar la estabilidad eléctrica del sistema alisando la curva de carga de la subestación o por ejemplo entregando potencia al tren en puntos de la línea con problemas de subtensiones. Esta mayor penetración en el ferrocarril también permitirá desarrollar nuevas tecnologías distintas a las tradicionales (baterías, supercondensadores y volantes de inercia) como es el caso de las baterías de flujo que, por su elevada capacidad, pueden ser muy efectivas para la infraestructura eléctrica ferroviaria.

Como paso previo a una futura red inteligente, desarrollo que actualmente debe ser enmarcado a largo plazo, la infraestructura eléctrica ferroviaria sí debe poder experimentar mejoras a corto y medio plazo en lo relativo a la **gestión de energía en media y baja tensión**. Actualmente los centros de telecontrol de energía de tracción se encargan de centralizar la información procedente de los elementos de campo con el fin de poder garantizar la explotación de la línea en condiciones de seguridad y eficiencia operativa. Esta información se suele circunscribir a la situación topológica de la red en todo momento pero es insuficiente si se quiere emplear para incorporar objetivos de eficiencia y calidad energética, objetivos que deberían ser considerados por los

⁴ Proyecto financiado por el VII Programa Marco de la Unión Europea.

explotadores en todo caso. Es por ello que sería necesario dotar a las instalaciones de instrumentación adicional que permita recabar información que, conjuntamente con la descripción topológica de la red en todo momento, permita analizar la bondad de cada configuración desde un punto de vista de eficiencia y calidad energética.

Según se comentó, el **diseño de nuevos trazados** (o mejoras sobre los ya existentes) debe incorporar aspectos energéticos que, hasta el momento, no han sido tomados en consideración. Para ello es necesario ampliar el conocimiento existente en cuanto al consumo energético de los diferentes tipos de trenes sobre cada trazado, de tal forma que sea posible entender con precisión el problema y ampliar los modelos existentes para adaptarlos a estas necesidades específicas. Con esto se plantean diferentes retos como definir y desarrollar indicadores de eficiencia que permitan evaluar cuánto de eficiente es un trazado, permitiendo mejorar y reducir el consumo de los vehículos que circularán por él.

No debería descuidarse el desarrollo tecnológico de **nuevos elementos y esquemas de conexión** que permitan mejorar la eficiencia del sistema por reducción de pérdidas eléctricas y consumos. Cabe destacar los trabajos que actualmente se realizan para el desarrollo de cables superconductores para ser empleados en líneas de corriente continua. Respecto a nuevos esquemas de conexión, se debe plantear potenciar el desarrollo definitivo de un sistema de alimentación doble a catenaria para corriente continua a la tensión de 3 kV (sistema 2 x 3000 V), habida cuenta de las mejoras experimentadas en la electrónica de potencia que deben equipar los convertidores requeridos. En el caso de líneas de corriente alterna monofásica alimentadas a frecuencia industrial, la tendencia actual⁵ se encamina a desarrollar nuevas configuraciones de subestaciones eléctricas de tracción conectadas a las tres fases de la red, con conexión en paralelo en la línea aérea de contacto y con una menor rotación de fases en la operación. Esta nueva conexión permitiría reducir la demanda de potencia de las redes de suministro y por tanto la conexión de este tipo de ferrocarriles a líneas con potencias de cortocircuito más bajas.

La disponibilidad de gran cantidad información relativa al comportamiento eléctrico del sistema, y de igual forma que ha ocurrido en otros ámbitos, va a provocar con toda seguridad la aparición de nuevos servicios de valor añadido asociados a esta información. El desarrollo de este tipo de medidas deberán considerar con toda seguridad elementos de almacenamiento de información “en la nube” así como herramientas de análisis masivo de datos que con tanto éxito se están empleando en otras aéreas técnicas y de optimización de procesos (**BIG DATA**).

⁵ En 2015 se inició el proyecto de investigación europeo IN²RAIL (financiado por el Programa H2020 de la Unión Europea) en el que se desarrolla, entre otras muchas investigaciones, el diseño de este nuevo tipo de subestaciones.

V. MATERIAL MÓVIL

Si bien el material móvil ferroviario que actualmente suministra la industria está caracterizado por su alta eficiencia energética, sobre todo aquel que emplea tracción eléctrica, se continúa realizando un esfuerzo tecnológico importante para mejorarlo aún más.

Focalizando el análisis en la *tracción eléctrica*, el desarrollo experimentado en los últimos años por la electrónica de potencia ha permitido, sin lugar a dudas, mejorar la eficiencia energética de los vehículos. Así, el motor trifásico asíncrono se ha impuesto totalmente sobre el motor de colector, e incluso sobre el motor síncrono, no sólo por su robustez y sencillez, sino también por su gran eficiencia. No obstante, en la actualidad se está observando que, incluso la máquina de tracción asíncrona, puede ser superada en eficiencia por la máquina síncrona con rotor a imanes permanentes, siendo ya el tipo de motor empleado en algunos trenes en operación. Esta máquina, al igual que la asíncrona, no tiene ningún elemento desnudo bajo tensión en su interior y tampoco precisa de elementos de conmutación o de contacto por fricción, por lo que se puede afirmar que tiene todas las ventajas que ofrecía la máquina asíncrona, con costes de mantenimiento reducidos, pero con unos rendimientos bastante superiores. Los valores de rendimiento de estas máquinas a imanes permanentes, oscilan entre el 97,2% y el 97,6%, superando incluso los valores de los transformadores de potencia.

El ondulador PWM con transistores IGBT y controlado con microprocesadores, se ha impuesto sobre los demás tipos de onduladores, a causa de sus mejores prestaciones y también por su menor peso y volumen. El convertidor de entrada es diferente según el tipo de tracción eléctrica. En el caso de catenarias con corriente alterna, se utiliza el convertidor 4QS debido a sus mejores prestaciones y permitir el freno eléctrico por recuperación. En el caso de catenarias con corriente continua, se ha conseguido eliminar el chopper de entrada, siendo conectado directamente el ondulador PWM a la catenaria a través del filtro de entrada, resultando así la cadena de tracción más sencilla en la actualidad (ondulador directo).

Adicionalmente a la mejora experimentada en los componentes de la cadena de tracción, este tipo de material se ha visto influido de manera positiva por el **desarrollo de la tecnología de almacenamiento de energía a bordo** (principalmente basada en tecnología de baterías y supercondensadores). La disponibilidad a bordo de un sistema capaz de absorber la potencia regenerada por el tren durante las etapas de frenado permite, en general, reducir notablemente las pérdidas por envío de potencia regenerada a reóstatos. Se aprovecha directamente esta energía en lugar de tratar de reintroducirla en la catenaria, evitando así el consiguiente incremento de la tensión en pantógrafo. Sin embargo, a pesar de que esta tecnología permite reducir las pérdidas por transmisión de potencia en la red, es preciso ponderar hasta qué punto afecta el incremento de la masa del tren derivado de la instalación de los almacenadores embarcados.

Un estudio riguroso de optimización de estos equipos no debe realizarse analizando un tren aislado. Las interacciones con otros trenes en el sistema y con las propias subestaciones eléctricas de tracción pueden hacer posible obtener diseños más ligeros de los almacenadores que deriven en un mayor rendimiento energético a nivel global. Por lo tanto, para maximizar el impacto beneficioso de estos equipos en el sistema, se hace preciso no sólo optimizar la estrategia de gestión energética del almacenador, su potencia

y capacidad de almacenamiento, sino también modelar adecuadamente el resto de elementos presentes en la infraestructura eléctrica, incluyendo aspectos operativos como el tráfico, que puede tener una influencia nada despreciable en los resultados obtenidos. Un optimizador completo hará uso de todos estos elementos para obtener la solución globalmente óptima en términos de ahorro energético.

Aparentemente no existe la gestión óptima para todos los escenarios. Para cada caso habrá que diseñar el control óptimo y seguir investigando en las características de cada tecnología para aumentar su vida útil. Debido a las características de cada tecnología, la hibridación es prioritaria, combinando tecnologías de respuesta rápida (supercondensadores o volantes de inercia por ejemplo) y lenta (baterías o pilas de combustible) con diversas características. Los escenarios a considerar serán principalmente dos: Escenarios con catenaria donde el objetivo es reducir los picos de consumo que se producen; Escenarios sin catenaria donde el objetivo del sistema de almacenamiento es cubrir en todo momento el 100% de la potencia demandada por el tren (tracción y auxiliares).

Además de los sistemas de recuperación de la energía de frenado como son los sistemas de almacenamiento, actualmente se desarrollan otras tecnologías de ahorro energético en el material móvil como sistemas de conducción eficiente, sistemas de planificación del consumo energético, sistemas de gestión del consumo de servicios auxiliares de trenes aparcados y sistemas inteligentes de climatización. En todo caso, debe considerarse que la base de cualquier iniciativa de reducción del consumo energético pasa por conocer en detalle el patrón de consumo energético, por lo que es fundamental la implantación de sistemas de medición de energía en los vehículos ferroviarios.

El registro de datos en equipos embarcados plantea ciertos retos como la necesidad de desarrollar una metodología de registro y transmisión de datos entre el vehículo y el centro de control que permita analizar, procesar, tratar y filtrar adecuadamente el volumen de información obtenida. Además, los diseños deben realizarse teniendo en cuenta la posible evolución tecnológica de los sistemas de comunicaciones. Con ello, se pretende abordar la necesidad de definir un método homogéneo y comúnmente aceptable que permita atribuir a cada tren, en cada tipo de servicio e infraestructura, sus consumos de energía y las emisiones de CO₂ asociadas en el caso del material de tracción diésel. Actualmente diferentes normativas europeas regulan la manera de realizar este proceso y especifican el equipo medidor de energía que deben instalar los vehículos para poder conocer su consumo y posibilitar la facturación de los distintos operadores ferroviarios según el consumo real de los trenes.

Identificación de retos y desarrollos tecnológicos actualmente en marcha o futuros

Los retos están orientados tanto al desarrollo de tecnologías y metodologías que permitan maximizar la eficiencia energética, y por tanto el consumo de combustible por kilómetro, como en el uso de tecnologías que permitan el suministro de la energía requerida con mínimas emisiones de CO₂. Se plantean en este escenario varios campos de actuación principales entre los que destaca la introducción de combustibles alternativos en el ámbito de la tracción diésel.

En efecto, estos **combustibles alternativos al diésel** se refieren a combustibles que contienen mayor densidad energética al tiempo que permiten reducir las emisiones contaminantes propias de los motores diésel, típicamente partículas. En el medio plazo se plantean el diseño y adaptación de metodologías para el uso de Gas Natural Licuado (GNL) o Bioetanol. A largo plazo se plantearían combustibles como mezclas hidrógeno metano y biocarburantes de segunda generación.

La utilización de GNL en vehículos con tracción diésel constituye una oportunidad de mejora de la eficiencia energética por disminución de las emisiones de CO₂/km y del impacto de las emisiones contaminantes de óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas e inquemados a la atmósfera. Actualmente debe destacarse la existencia de proyectos tecnológicos en esta materia destacando el *Proyecto GNL* en el que se desarrolla una prueba piloto real con este tipo de combustible sobre un vehículo. El proyecto consta de verificar la viabilidad técnica, legal y económica de la tracción ferroviaria con GNL en la red ferroviaria española, para poder concluir sobre la posibilidad de extender esta nueva solución de tracción al ámbito comercial en España.

La aplicación de GNL en el vehículo ferroviario también puede ir asociada a la adaptación de los motores existentes, en dos vías de actuación específicas. Con un grado de intervención menor sobre el motor, se trabaja en adaptaciones basadas en inyección indirecta del gas en el colector de admisión con procesos de combustión del gas de tipo premezclado animados por un primer golpe de combustión de gasóleo. También, en este caso con adaptaciones de mayor calado, se estudian procesos de inyección directa en la cámara de combustión del gas junto al gasóleo con procesos de combustión por difusión más apropiados para evitar el cortocircuito de gas en motores de dos tiempos. Ambos tipos de planteamientos están siendo analizados desde el grado de sustitución de gas por gasóleo obtenible, las emisiones contaminantes, el consumo específico y la fiabilidad en operación.

La utilización de pilas de combustible para este tipo de tracción es otro reto que actualmente se está evaluando. Países como Alemania y Japón disponen de importantes planes de implantación en esta materia. La mejora en la eficiencia de uso, la desaparición de las emisiones contaminantes en servicio y la orientación hacia la tracción eléctrica de este tipo de tecnologías hacen prever un importante margen de aplicación en el sector del ferrocarril.

Como proyecto tecnológico más significativo, esta tecnología ha sido la empleada para la transformación de un vehículo tranviario en España, que finalmente ha desembocado en la primera experiencia de vehículo ferroviario en Europa que utiliza un sistema de propulsión basado en pila de combustible hibridado con baterías y supercondensadores. El vehículo desarrollado es un banco de ensayos rodante que permite evaluar el comportamiento de distintas hibridaciones de las pilas de combustible con las baterías, los supercondensadores o con ambos sistemas a la vez. Los sistemas han sido diseñados para el cumplimiento de la normativa vigente, principalmente las relacionadas con hidrógeno y el sector ferroviario. La estrategia de gestión se basa en que los supercondensadores controlan la tensión de bus, las baterías apoyan a los supercondensadores en los picos de potencia (aceleración y frenada) y las pilas de combustible, funcionando en modo cuasi estacionario, se encargan de mantener la carga de las baterías y de aportar toda la energía que precisa el tranvía. En términos generales el proyecto persigue, mediante la realización de ensayos sobre este vehículo, obtener información de su comportamiento, necesidades

de mantenimiento, consumos, prestaciones, autonomías, eficiencia, puntos de mejora, etc. para la optimización en el diseño y operativa de las infraestructuras futuras.

Diferentes agentes del sector coinciden en afirmar que otro campo de actuación o reto en el capítulo de Material Móvil estriba en el **mantenimiento predictivo orientado a la gestión energética**. Este aspecto plantea una nueva variable en el mapa de decisión de los protocolos de mantenimiento, introduciendo la eficiencia energética del sistema como variable técnico económico ambiental en la decisión del momento y tipo de actuación requerida por el mantenimiento de una unidad. Se deben desarrollar algoritmos de aprendizaje alimentados con señales telemonitorizadas que permitan aislar la influencia del estado de mantenimiento de los sistemas con su consumo energético. El desarrollo de sistemas inteligentes de mantenimiento predictivo en el que se considere también el consumo y la eficiencia energética, permitirá el desarrollo de nuevas metodologías, árboles de decisión y equipos auxiliares.

Según se comentó, el **almacenamiento a bordo** se continuará potenciando, para lo cual es previsible el desarrollo tecnológico de nuevas tecnologías como por ejemplo baterías de alta densidad de energía recargables basadas en químicas novedosas (metal aire) y nuevos sistemas híbridos.

VI. OPERACIÓN

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.

Así, los **sistemas de ayuda al conductor** son cada vez más habituales, debido a su potencial de ahorro de energía, sobre todo en recorridos de alta distancia con pocas paradas. Sólo ajustarse al tiempo comercial y no llegar antes a las estaciones puede suponer gran ahorro energético. Además, si se aplican estrategias para conducción eficiente durante el recorrido, los ahorros pueden ascender hasta 20% del consumo total.

En los últimos años, los sistemas off-line de ayuda a la conducción son muy habituales. Se trata de sistemas con perfiles calculados mediante herramientas de predicción de perfiles eficientes y guardados en el tren para mostrar al maquinista las consignas necesarias. Además del perfil óptimo, se suelen calcular perfiles más rápidos y lentos para poder hacer frente a retrasos y adelantos. Sin embargo, estos perfiles pre calculados no suelen contemplar situaciones de cambios de horario o estados degradados del tren, esto es, no pueden recalculan los perfiles en función de las condiciones del entorno.

Para ello se están extendiendo los sistemas con motor de cálculo dinámico embarcado y conectados con el sistema de tráfico. Así, el sistema y el tren conocen el nuevo horario de llegada, por lo que el sistema podrá considerar el perfil de conducción más eficiente. La arquitectura de estos sistemas es conocida. Cuentan con el motor de cálculo embarcado, con una base de datos que contiene todos los parámetros que describen las condiciones de contorno y un sistema de comunicación con tierra, para poder conocer las actualizaciones de horarios y velocidades de vía y poder actualizar la base de datos. La interfaz de usuario será el encargado de crear las consignas a partir de los perfiles calculados por el motor.

Cabe destacar que España ha sido pionero en el desarrollo de diversos proyectos de investigación centrados en valorar el impacto de la conducción económica en el consumo energético asociado a la operación de trenes de alta velocidad. Se ha mostrado que las líneas de alta velocidad son adecuadas para la implantación de este tipo de conducción con un amplio margen de ahorro debido a ser líneas generalmente dedicadas con pocas perturbaciones y márgenes de regularidad que pueden ser aprovechados para reducir el consumo. Es clave tener en cuenta los requisitos de puntualidad del operador para poder garantizar la recuperación de retrasos de una manera eficiente.

También se están desarrollando proyectos de conducción eficiente en líneas de metro y cercanías. Concretamente en líneas de metro equipadas con CBTC se han desarrollado nuevos modelos de optimización capaces de aprovechar la comunicación y el control continuo del tren, y está pendiente la transferencia de dichos modelos de control eficientes a las líneas CBTC en servicio, y que los fabricantes de equipos ATO incorporen las características de regulación de la conducción más adecuadas.

Identificación de retos y desarrollos tecnológicos actualmente en marcha o futuros

Al igual que en el capítulo de Infraestructura, el desarrollo de la **red eléctrica ferroviaria inteligente** representa también uno de los principales retos tecnológicos del capítulo de Operación. Hay que considerar que esta nueva red deberá integrar el sistema eléctrico ferroviario con los sistemas de control y planificación de tráfico, debiendo desarrollar aplicaciones que puedan establecer consignas de operación eficientes de circulación de los trenes en función de las diferentes características del sistema eléctrico (por ejemplo, estado de las subestaciones de tracción de una línea concreta). La optimización de la eficiencia energética no sólo se deberá realizar en las condiciones de funcionamiento planificadas sino también ante perturbaciones imprevistas. Por ejemplo, será posible recalcular la conducción de un tren cuando se haya producido una parada no prevista o, incluso, prever que dicha parada se va a producir y modificar la conducción para ahorrar energía.

Una estrategia que debe ser potenciada por los administradores y operadores ferroviarios es el **diseño óptimo de horarios** desde un punto de vista de la eficiencia energética. Así, en líneas alimentadas en corriente continua el diseño de horarios eficientes puede contribuir a mejorar el aprovechamiento de la energía regenerada en los frenados, haciéndolos coincidir con la tracción de otros trenes que puedan consumir esta energía. Este tipo de estrategias es especialmente útil en líneas de metro y cercanías, con frecuentes frenados y arranques, y han de ser tenidas en cuenta al valorar otras estrategias de recuperación de energía regenerada como las que se indicaron en el capítulo de Infraestructura.

Según se acaba de indicar, en líneas metropolitanas la conducción automática está generalizada, lo que ha facilitado la implantación de sistemas de regulación automática centralizada y conducción eficiente optimizados en función de las características del equipo ATO y del tipo de explotación. Por el contrario, en las líneas equipadas con **sistemas de señalización ETCS**, normalmente en España líneas de alta velocidad, este tipo de estrategias de conducción eficiente apenas se dan. Sí se están abordando proyectos que tratan de aprovechar la comunicación que proporcionan estos sistemas para desarrollar sistemas ATO eficientes.

A diferencia de los sistemas metropolitanos, los equipos ATO en líneas de largo recorrido han de actualizar la conducción entre estaciones para adaptarse a retrasos o situaciones imprevistas, utilizando algoritmos de cálculo en tiempo real que se ejecutan en el tren o en el puesto central. El objetivo de estos algoritmos es cumplir el horario comercial minimizando el consumo.

En esta línea de trabajo, *UNISIG* y el *ERTMS Users Group* han especificado los requisitos de un nuevo sistema ATO interoperable (*AoE (ATO over ERTMS)*), con el objetivo de que formen parte de las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad. Este ATO pretende mejorar la operación de trenes, tanto la regularidad del tráfico (al controlar los trenes automáticamente desde un puesto centralizado) como la eficiencia energética de la conducción automática (implementando algoritmos embarcados que minimicen el consumo). El sistema está formado por el subsistema de vía (*ATO-TS*) y el embarcado (*ATO-OB*). *ATO-TS* está conectado con el sistema de gestión de tráfico (*TMS*), calcula los retrasos de los trenes, y envía al *ATO-OB* de cada tren (a través del RBC o balizas) los siguientes *timing points* que ha de cumplir el tren, es decir, a qué hora ha de pasar el tren por los siguientes puntos de referencia (ya sean estaciones o puntos de paso intermedios). Cuando hay incidencias que requieren recalcular la marcha de los trenes, los horarios, o incluso la ruta, el *ATO-TS* recalcula en tiempo real los *timing points* y los envía a los trenes. El *ATO-OB* tiene como objetivo principal conducir el tren de forma eficiente para cumplir con los *timing points* que le envía el sistema de tierra. Optimiza en tiempo real la conducción de menor consumo que se ajusta a los tiempos de recorrido que imponen los siguientes *timing points*.

El reto es el desarrollo de los algoritmos a implementar tanto en el *ATO-TS* como en el *ATO-OB* para el cálculo de los tiempos de paso óptimos y para el cálculo de la conducción eficiente que cumpla los tiempos impuestos.

El mercado apunta ahora a integrar toda la flota de un sistema ferroviario con un sistema de tierra que permite optimizar la operación de la flota con la reducción del consumo de energía de los picos de potencia en subestaciones, pero siempre respetando el horario comercial establecido.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

Un reto actual y futuro del ferrocarril debe ser su mejora continuada en el campo de la gestión energética sostenible e inteligente. Si bien otros modos están mejorando su eficiencia energética, existe todavía una brecha notable a favor del ferrocarril en comparación con el transporte por carretera y por avión. Aun así, el ferrocarril no debe descuidar en su ventaja competitiva y debe continuar innovando, tanto desde un punto de vista tecnológico como de procesos, para reducir su consumo energético de tracción y de otros usos distintos.

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

1. Incentivar la inclusión del factor energético en el diseño de trazados ferroviarios (por ejemplo, puntuación adicional en las evaluaciones técnicas sometidas a licitación pública).
2. Potenciar la implantación de sistemas de medida y facturación de energía eléctrica a bordo de los vehículos. Los administradores de infraestructuras deben prepararse para este escenario. Es importante destacar que esta acción ya está contemplada y recogida en la Especificación Técnica de Interoperabilidad del subsistema de Material Rodante.
3. Continuar potenciando e incentivando por parte de las distintas administraciones la devolución de la energía regenerada a la red pública desde los sistemas ferroviarios de corriente continua, habida cuenta que ello favorecería a la implantación de más subestaciones reversibles, disponiendo cada vez más de un sistema eléctrico ferroviario más sostenible.
4. Continuar desarrollando nuevos modelos de gestión de energía y herramientas de predicción de consumo de energía (redes neuronales, algoritmos genéticos, etc.).
5. Desarrollar el marco normativo que defina los umbrales de los niveles de calidad de la energía eléctrica que han de suministrarse al tren y a los puntos de suministro de alta tensión en las subestaciones de tracción eléctrica. La proliferación de nuevos equipos electrónicos está afectando a la calidad de la energía ocasionando una distorsión en su forma de onda que provoca efectos como el calentamiento de los equipos y transformadores de distribución a la vez que suponen interrupciones del suministro con afección a la producción. Cabe destacar que hasta la fecha se ha desarrollado un importante paquete de normas, internacionalmente aceptadas, relativas a la identificación de los parámetros que definen la calidad de la energía y la forma de medirla para poder estandarizar las mismas. También se han desarrollado distintos dispositivos electrónicos inteligentes que miden determinados parámetros de la onda de energía y calculan la calidad de la misma con una precisión más que aceptable. Las administraciones, por su parte, que regulan el desarrollo del sector eléctrico, también han definido los límites que han de cumplirse por los suministradores de energía eléctrica para garantizar esta calidad del suministro recibido por el cliente final. Sin embargo, y como se ha indicado, en el sector ferroviario no se dispone de un marco normativo de calidad de la energía eléctrica.

6. Incorporar las técnicas de BIG DATA a la optimización del sistema eléctrico ferroviario. Aspectos como topologías actualmente empleadas, potencias actualmente utilizadas en los parámetros de contratación de energía eléctrica e incluso la utilización de elementos redundantes de cara a garantizar la continuidad del servicio, pueden ser reconsiderados una vez realizado el análisis “en funcionamiento” de las actuales líneas eléctricas.
7. Elaborar el marco legal que permita la futura explotación de la red eléctrica inteligente (por ejemplo en lo relativo a que la red ferroviaria pueda tener otros usos como permitir a terceros que la usen para verter la energía que producen, etc.)
8. Formar específicamente en materia de conducción eficiente a los conductores de trenes.
9. Desarrollar un plan de implementación en la red ferroviaria española del GNL, incluyendo el marco legal, inexistente hasta la fecha, para su empleo como combustible en el ferrocarril.
10. Continuar potenciando el desarrollo de proyectos de I+D+i en el área de gestión energética sostenible e inteligente del sistema ferroviario, con apoyo de las administraciones nacionales y regionales. En esta medida es fundamental la coordinación entre todos los agentes para no duplicar esfuerzos y desarrollar líneas de trabajo ya iniciadas, debiendo tener una visión continuista de todos los desarrollos. Es importante reseñar aquí que en la esfera internacional, y más concretamente en Europa, el programa de investigación ferroviario Shift2Rail no potencia de una manera destacable la gestión energética sostenible e inteligente (así por ejemplo, en ningún caso se plantea nuevos desarrollos tecnológicos sobre sistemas ferroviarios de corriente continua).
11. Potenciar la investigación básica en nuevas tecnologías de almacenamiento tanto para almacenamiento embarcado como en tierra.

Coordinación Científico - Técnica:



Documento elaborado por:

José Conrado Martínez



Alberto Montes
Gonzalo García



Eduardo Pilo

BOMBARDIER

Enrique Vila



Alfonso Horrillo



Félix Marín



Amador Robles



Antonio Berrios



Juan Manuel Martín



Antonio Fernández
Paloma Cucala
Ramón Rodríguez
Álvaro López



Ricardo Insa
Pablo Salvador Zuriaga
Ignacio Villalba



Alberto García
Daniel Briceño



Ruth Arregui



Sergio González-Cachón
Angel Bobes

Coordinación y Secretaría Técnica:

Angeles Táuler, M^a Mar Sacristán, Eduardo Prieto, Aida Herranz, Sarah Whalley