

VARIAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN BUSCAN REDUCIR EL CONSUMO DE ENERGÍA Y LAS EMISIONES DE CO₂ EN EL FERROCARRIL

El reto de la eficiencia energética

JAVIER R. VENTOSA.

Mejorar la eficiencia energética del sistema ferroviario es una prioridad para el sector, dado que contribuye a reducir tanto los costes financieros como el impacto medioambiental de esta actividad, base del atractivo del tren como modo de transporte sostenible. Compañías ferroviarias e industria despliegan todo tipo de medidas y desarrollos tecnológicos para afrontar ese reto en la actualidad y en el corto-medio plazo. Un estudio del Área de I+D+i de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles describe las actuaciones y proyectos con mayor impacto en la reducción del consumo de energía y en la sostenibilidad del sistema.

Que el ferrocarril es el modo de transporte más eficiente en términos de consumo de energía y más limpio en cuanto a emisiones de CO₂ a la atmósfera es un hecho incontrovertible. Esta superioridad se fundamenta en ventajas competitivas tales como la velocidad, la alta capacidad, la electrificación y la conexión permanente a la red eléctrica, que, bien conjugadas, hacen del tren un modo atractivo capaz de captar pasajeros y mercancías desde otros modos menos eficientes. Algo especialmente perceptible en el tren de alta velocidad, más eficiente y sostenible no solo que el automóvil y el avión, sino incluso que el ferrocarril convencional.

El ferrocarril mantiene este liderazgo desde hace décadas, pero en los últimos años los otros modos de transporte han aplicado avances tecnológicos destinados a mejorar su eficiencia energética y sostenibilidad ambiental que han reducido las distancias. Y estas pueden reducirse aún más como consecuencia del compromiso alcanzado en la Cumbre del Clima (París, diciembre

de 2015) para que el mundo camine hacia una economía baja en emisiones de gases de efecto invernadero, que dibuja un futuro no muy lejano de vehículos eléctricos y energías limpias. En ese escenario, el tren puede perder parte de sus actuales ventajas.

No obstante, el ferrocarril tiene potencial para mantener el liderazgo si profundiza en estas ventajas, de acuerdo al estudio *Technologies and potential developments for energy efficiency and CO₂ reductions in rail systems*, elaborado por el Área de I+D+i de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles para la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC). Según este informe, el ferrocarril debe incrementar su eficiencia energética para reducir los costes operativos y propiciar así un modo de transporte público más atractivo, competitivo y rentable, capaz de limitar sus emisiones de CO₂ entre un 20 y un 30% en 2030. Para ello, el estudio detalla las medidas implementadas por las operadoras para elevar la eficiencia energética del sistema, así como los avances tecnológicos enfocados hacia ese fin. Estas medidas abarcan todo el ciclo de vida del proyecto ferro-

viario y se agrupan en cuatro bloques: diseño de la infraestructura, las instalaciones y el material rodante; tracción; sistemas auxiliares; y gestión inteligente de la energía. Se desgranar a continuación.

.\ Diseño de la infraestructura, las instalaciones y el material rodante

El diseño del trazado es básico para reducir el consumo de energía. Un trazado eficiente es aquel que permite velocidades homogéneas, sin aceleraciones o deceleraciones bruscas, limitando el uso del freno y, por tanto, las pérdidas de energía por la fricción rueda-carril. Como ejemplo de las ventajas de un perfil de velocidades homogéneas se cita la comparativa entre un AVE y un tren convencional en un viaje a 200 km/h, con el mismo kilometraje y paradas: la energía perdida por el primero es un 58% menor que la del segundo. Evitar las restricciones puntuales de velocidad, la existencia de pendientes a la entrada de una estación y las pendientes adaptadas a la velocidad máxima permitida también reducen el consumo y las emisiones de CO₂. Y se puede ahorrar a más velocidad: en 2007, la elevación de la velocidad máxima de 280 a 300 km/h en el tramo Madrid-Camp de Tarragona de la LAV Madrid-Barcelona redujo el consumo de energía un 3% y rebajó el tiempo de viaje.

La arquitectura de los trenes es otra medida de impacto en la eficiencia energética del sistema ferroviario. Desde hace años se ha generalizado el diseño aerodinámico, que reduce la resistencia del vehículo al aire más de un 25% y exige hasta un 15% menos de energía de tracción, con mayor estabilidad, acortando los tiempos de viaje dada la mayor capacidad de aceleración. En el futuro crecerá el uso de estos diseños. Igualmente es efectiva la reducción de la masa del tren (a través del menor peso de los componentes o mediante trenes articulados o de doble piso), lo que disminuye la energía necesaria para superar la resistencia al avance. Ejemplo de ello es el AGV de Alstom (360 km/h), con menos peso y más capacidad, que consume un 15% menos de energía que los TGV existentes a 300 km/h. Como tendencia futura se apuntan los diseños basados en la biónica, que desarrollarán trenes aún más estables y con un menor consumo de energía.

También los materiales con que se fabrica el tren inciden en la eficiencia energética. Habitualmente son aleaciones de aluminio, acero y titanio, aunque la experimentación con composites apunta grandes ventajas: una carrocería a base de composites reduce el peso del vehículo un 20-30%, lo que se traduce en un menor consumo energético para moverlo y en un 5% menos de emisiones de CO₂. Los composites, además, son más versátiles, más resistentes a corrosión y fatiga, reducen los costes de

operación y mantenimiento, y el coste de su ciclo de vida es un 16% más bajo. La industria ferroviaria fabrica hoy componentes estructurales mixtos y Alstom ultima un prototipo de coche multimaterial con partes fabricadas íntegramente en composites.

Otra medida de ahorro en el campo del diseño es la aplicación de la ingeniería mecatrónica (simbiosos de ingenierías mecánica, electrónica, de control e informática) para controlar y guiar el tren de rodaje, como forma de mejorar el rendimiento de las ruedas convencionales, además de propiciar una menor fricción en las curvas (y por tanto, menos necesidad de energía de tracción, menos desgaste y menos mantenimiento) y reducir las vibraciones. Los *bogies* Flexx de Bombardier son un exponente práctico de esta tecnología.

Por otro lado, el estudio afirma que los fabricantes, al diseñar un tren, deben considerar todo su ciclo de vida como forma de ahorrar energía e impulsar la sostenibilidad, especialmente en su fase final, el reciclado. Tres grandes fabricantes reciclan hoy el 95% de los materiales de algunos de sus modelos de trenes y metros.

El empleo de energías renovables (solar, eólica y geotérmica) en instalaciones ferroviarias y trenes es una medida adicional con impacto en el coste energético del ferrocarril, al reducir la energía importada y las emisiones de CO₂, haciendo del tren un modo más verde. Existen experiencias de instalaciones alimentadas por aerogeneradores (estaciones de Llançà y L'Aldea de Adif), paneles solares (talleres de FGV en Valencia y Alicante) y una combinación mixta (subestaciones eléctricas de SNCF en Francia), con notables ahorros energéticos; en India se ensayan paneles solares sobre trenes diésel para su iluminación y ventilación.

.\ Sistemas de tracción

Entre los dos sistemas de tracción del ferrocarril más generalizados, el eléctrico es el que aporta mayores ventajas en términos de eficiencia energética y de impacto medioambiental, además de otras (uso de energías renovables y exportación de energía), respecto al diésel. La electrificación de una línea es una de las actuaciones más decisivas en la imagen verde del ferrocarril ya que reduce el uso de locomotoras propulsadas por combustible diésel, disminuyendo drásticamente los costes de energía consumida (50-60%) y las emisiones de CO₂ (19-33%). No obstante, la inversión inicial (subestaciones, catenaria) es elevada. Pese a sus ventajas, la mayor parte de la red ferroviaria mundial no está electrificada: 50% del total en Europa (61% en España, 60% en Alemania, 32% en Reino Unido), 43% en Asia, 18% en África y apenas el 0'50% en Estados Unidos y Canadá. Son porcentajes que reflejan un importante margen de mejora.

Hoy existen otras alternativas de combustible, en distintas fases de desarrollo, energéticamente más eficien-

Renfe, Adif y la eficiencia energética

Renfe, la compañía de servicios española que tiene los mayores costes de energía, desarrolla desde hace años políticas destinadas a mejorar la eficiencia energética y medioambiental de su actividad, que inciden a su vez en el ahorro de costes. Su hoja de ruta es el Plan de Sostenibilidad Energética, con objetivos económicos, energéticos y ambientales, así como las medidas para alcanzarlos. Entre ellas figuran la consolidación de la eficiencia energética en la cultura corporativa, el uso preferente de las energías renovables (40% del total en 2014), la incorporación de medidores para reducir el consumo, el impulso a la conducción inteligente, la colaboración con Adif (acuerdo marco por la sostenibilidad y la eficiencia energética) o la innovación tecnológica (proyectos piloto de tracción ferroviaria con gas natural licuado y con hidrógeno).

La estrategia de eficiencia se plasma en resultados relevantes, como refleja el estudio anual de costes externos, ahorro de huella de carbono y ahorro de consumo energético de la operadora, presentado en diciembre por una consultora holandesa. Según este estudio, Renfe transportó 465,2 millones de pasajeros y 20,8 millones de toneladas de mercancías en 2015, que de no viajar en tren habrían generado 348 millones de circulaciones de automóviles, 4 millones de circulaciones de camiones y 104.500 vuelos. Traducido en costes, la actuación de Renfe al captar esos tráficos ahorró a la sociedad 1.703 M€ en términos de sostenibilidad, evitando además la emisión de 3,5 millones de toneladas de CO₂ y el incremento en el consumo energético de más de un millón de toneladas equivalentes de petróleo.

Otro informe presentado en el Congreso Nacional de Medio Ambiente CONAMA 2016 sostiene que el 89% del transporte de Renfe se desarrolla por redes electrificadas y está, por tanto, parcialmente descarbonizado en base al actual mix eléctrico (53% sin emisiones y 33% renovables). Además, desde 1990, la compañía ha reducido su huella de carbono un 56%, hasta situarse en 24,2 gr de CO₂ por unidad transportada.

Adif y Adif Alta Velocidad, gestores de la infraestructura ferroviaria pública, también incorporan la eficiencia energética en su ADN de la mano de los Planes Directores de Ahorro y Eficiencia Energética. Los objetivos del Plan 2014-2020 son la mejora de la eficiencia energética, la implantación de la cultura de eficiencia energética, la contribución al fortalecimiento de la marca mediante iniciativas sostenibles y la ayuda a la consecución de los objetivos nacionales en esta materia. Para ello se implementan tres tipos de medidas: de gestión (gestión de la demanda y de los consumos, concienciación del personal, formación y herramientas para una gestión eficaz), técnicas (nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia y reducir las pérdidas) y la implantación de sistemas de generación de energía renovable. Como objetivo final, se pretende alcanzar un ahorro anual de 56,88 millones de kWh/eq. en 2020 y años sucesivos, lo que supone una significativa reducción de la factura energética, del consumo de energía y de las emisiones de gases de efecto invernadero.

tes y sostenibles que el diésel. Como los trenes híbridos (con motores diésel y eléctricos), que aportan mayor versatilidad, reducen el kilometraje recorrido con tracción diésel y ofrecen numerosas ventajas: menos energía importada por el uso del freno regenerativo, más energía exportada por la posibilidad de devolverla a la red, aumento de la energía renovable y reducción de emisiones para trenes de pasajeros (disminuyen cuando la línea está electrificada un 3%) y de mercancías. Exponente de esta tecnología es la transformación de los trenes S 130 a la nueva serie S 730 de Renfe, que prestan el servicio Alvia al norte de España.

El desafío medioambiental del sistema ferroviario es limitar las emisiones de CO₂ a la atmósfera entre un 20 y un 30% para el año 2030

En fase de desarrollo se encuentran los trenes alimentados por celdas de hidrógeno, que generan electricidad a partir de un proceso químico que combina hidrógeno y oxígeno. Se trata de una máquina simple de cero emisiones (solo emite vapor y agua condensada), alta eficiencia energética en la cadena de tracción (50%), recarga rápida, silenciosa, fiable y con un ciclo de vida largo, características que la convierten en una alternativa prometedora al diésel. El prototipo de estos trenes es el Coradia iLint de Alstom, que circulará en Alemania en 2018, aunque en Qingdao (China) funciona ya un tranvía movido por este tipo de tracción.

Más incipiente aún es el tren propulsado por gas natural licuado (GNL), un combustible menos contaminante que el diésel (70% de NO_x y 30% de CO₂ menos), más económico y de fácil almacenamiento. También es más silencioso. Algunos estudios auguran que tendrá un papel creciente en las locomotoras de mercancías, con experiencias prácticas ya en Estados Unidos y Rusia. En Asturias, Renfe, Gas Natural Fenosa y Enagás preparan la primera prueba piloto del mundo con un tren de pasajeros propulsado por GNL.

Otras medidas que aumentan la eficiencia energética del ferrocarril, relacionadas con la tracción eléctrica, son el freno regenerativo y la subestación reversible de corriente continua. El primero es un tipo de freno a bordo de trenes eléctricos que, al ser accionado, convierte la energía cinética en eléctrica, permitiendo ser almacenada, usada por otros trenes o devuelta a la red, en vez de disiparse como calor. Es decir, es una fuente de energía renovable que reduce las emisiones de CO₂ y la energía importada. Su aplicación está muy extendida. La subestación reversible, por su parte, es un tipo de instalación situada junto a una línea férrea y equipada

con inversores que recoge hasta el 99% de la energía de frenado de los trenes y la exporta a la red, con notables ahorros de energía (7-15%) y sin lanzar emisiones contaminantes. Ejemplos españoles de esta tecnología son la subestación de La Comba (Málaga) de Adif y las subestaciones del metro de Bilbao.

.\ Sistemas auxiliares

La instalación de sistemas eficientes y dispositivos inteligentes para regular la climatización y la iluminación, tanto en trenes como en estaciones, contribuye asimismo a reducir el consumo de energía. En los trenes, los sistemas auxiliares (altavoces, puertas automáticas, iluminación y, sobre todo, climatización) consumen del 10 al 50% de la energía total, porcentaje rebajable con medidas de bajo coste ya en servicio. Entre estas destacan dos: la gestión inteligente de la climatización mediante sensores de CO₂, que monitorizan la calidad del aire y regulan la temperatura y el aire, con ahorros de energía del 15 al 30%; y el uso de refrigerantes líquidos que rebajan el nivel de ozono. Una simulación de la Universidad de Basilea sobre estas medidas en los ferrocarriles suizos arroja un potencial de ahorro del 40%. En cuanto a los sistemas de iluminación de a bordo, las lámparas Led combinadas con circuitos inteligentes suponen un sustancial ahorro (40-60%) respecto a los tubos fluorescentes. Otras ventajas de esta tecnología, que se está imponiendo como standard, son el bajo mantenimiento, la reducción de costes de su ciclo de vida y que no emite rayos ultravioleta.

En las estaciones y naves ferroviarias, con un consumo de energía mayor, se reproduce la misma situación. En estas instalaciones, donde la climatización es el gran consumidor (68% de la energía total), los sistemas inteligentes pueden gestionar la temperatura más eficientemente y reducir la factura energética, haciéndolas más sostenibles. Entre estos figuran la gestión inteligente de la climatización mediante sensores de CO₂ (regula el aire fresco y reduce los niveles de CO₂, en servicio en el suburbano de Singapur), la gestión automática de la planta de refrigeración (con ahorros del 30%) y la instalación de equipos más eficientes. La gestión inteligente de la iluminación, mediante lámparas Led y sensores de movimiento, contribuye a reducir el consumo hasta un 28%. Y el ahorro con escaleras mecánicas de velocidad regulable puede alcanzar el 30%.

.\ Gestión inteligente de la energía

Las estrategias de gestión de la energía que mueve el material móvil son también decisivas en la optimización del consumo y la sostenibilidad del sistema. Una práctica extendida es el *eco-driving* o conducción efi-

ciente, es decir, la conducción de trenes con el menor consumo de energía y de emisiones de CO₂, lo que se consigue mediante un aprovechamiento inteligente de la inercia de los trenes, de la energía cinética acumulada y de la orografía del terreno, con lo que se logra que el tren circule sin consumir energía durante parte del recorrido. Con este tipo de conducción, ensayada en simuladores, las reducciones en el consumo energético pueden ser del 8 al 22%. Por otro lado, diversos fabricantes europeos han desarrollado el *software* Sistema de Ayuda a la Conducción (DAS, en su acrónimo inglés), que, combinando datos del estado del tren y de la línea, indica la estrategia óptima de conducción, llegando a la estación a tiempo. Además, reduce el coste de energía y de emisiones hasta un 20%.

La introducción de sistemas de almacenamiento de la energía de frenado a bordo de trenes es igualmente una interesante fuente de eficiencia energética, particularmente en el transporte urbano (tranvías, trenes-tram). Desde la pasada década proliferan en Europa y Japón tecnologías a base de volantes de inercia, supercapacitores o baterías que permiten la circulación autónoma de vehículos por tramos sin catenaria, con importantes ahorros de energía (15-30%) y de picos de potencia. El sistema ACR de la empresa CAF, con supercapacitores que recargan el vehículo en las paradas, es un ejemplo de esta tendencia.

Finalmente, la propia operación de los trenes se configura como otra estrategia de ahorro. Esto se consigue, por ejemplo, mediante la compatibilidad de horarios de los trenes, combinando las ventajas del freno regenerativo con la sincronización de las salidas y llegadas de trenes a la misma estación, para evitar picos de potencia y aprovechar la energía de frenado de los trenes que llegan para alimentar a los que salen. Con esta estrategia se consiguen ahorros de energía del 5-30%. Otra práctica es la conexión del *software* DAS con el Centro de Tráfico de Control (CTC), lo que ajusta la estrategia de conducción para ahorrar energía y elevar la puntualidad. Los trenes daneses la aplican con buenos resultados desde 2012. Una tercera práctica es la integración de todas las medidas de gestión de energía en una red inteligente eléctrica que controla el sistema, como propone el proyecto comunitario Merlin (con estimaciones de ahorro del consumo del 10%) o ensaya la compañía nipona JR-East. El incremento de la carga también incide en la eficiencia energética: la reducción en el consumo específico de energía (kWh/plaza.km) puede variar del 14 al 17% dependiendo del tipo de tren (longitud del convoy, anchura de coches, doble piso). Por último, el empleo de dispositivos para monitorizar todos los sistemas del tren ayuda a evaluar su comportamiento y reducir el consumo de energía, como demostró FGV en una prueba realizada en 2014. ■