

Reducción del consumo energético en el ferrocarril

Palabras clave: Ferrocarril, consumo energético, operación de tráfico, infraestructura, vehículo.

Key words: Railways, energy consumption, traffic operation, infrastructure, vehicle.

Resumen:

El transporte por ferrocarril es hoy en día uno de los más eficientes desde el punto de vista del consumo energético, sin embargo, sigue siendo necesario reducir el consumo energético también en este modo de transporte. Las estrategias para ello se centran en la infraestructura, en el diseño del vehículo y en la operación del tráfico.

Las estrategias asociadas a la infraestructura incluyen el diseño eficiente del trazado de la vía, la instalación de subestaciones reversibles en líneas alimentadas en corriente continua y la instalación de acumuladores de energía en tierra, para mejorar el aprovechamiento de la energía regenerada en los frenados. Algunos de los aspectos de mejora relacionados con el vehículo que tienen un impacto directo sobre el consumo energético son la aerodinámica, el rendimiento del sistema de tracción y la masa (uso de materiales ligeros), la instalación de acumuladores, o la reducción del consumo de los equipos auxiliares.

Las estrategias de ahorro en la operación de tráfico son medidas que se pueden aplicar en el corto plazo y en general con inversiones reducidas. Ejemplo de ello son el diseño de horarios eficientes que tengan en cuenta tanto criterios de puntualidad como de eficiencia energética, el diseño de conducciones económicas que se puede optimizar para trenes equipados con sistemas de conducción automática y para conducción manual. También en la fase de control de tráfico en tiempo real se puede reducir el consumo energético mediante el control embarcado de la conducción y el control centralizado de la línea.

Abstract:

The railways is an efficient mode of transport, however, a more efficient railway system is possible. Strategies to reduce energy consumption can be focused on infrastructure, vehicle design and traffic operation.

Infrastructure design during strategic planning should consider the efficient design of the track, the installation of reversible traction substations for DC feed railways, the use of energy accumulation devices, etc. The design of the vehicle – such as the train aerodynamics, the efficiency of the traction system and the reduction of the mass by modifying the train design or by using new light materials, the installation of accumulation devices, the auxiliary systems – has a direct impact on energy consumption.

On the other hand, different strategies focused on rail traffic operation can be applied in the short term or even in real time and with relatively low investments. Some examples are the efficient design of timetables considering not only the punctuality but also the energy efficiency criteria, the design of ecodriving both for manual driving and for automatic driving. In addition, reduction of energy consumption is possible in real time traffic operation of a railway line, by means of the on-board control of the train and the centralized control of the traffic.



Paloma Cucala García

Dr. Ingeniero Industrial del ICAI (2003), promoción 1995. Profesora del Dpto. de Sistemas Informáticos, Coordinadora del Área de Sistemas Ferroviarios del IIT y Coordinadora del Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios, en la E.T.S. de Ingeniería (ICAI), de la Universidad Pontificia Comillas.



Antonio Fernández Cardador

Licenciado en CC. Físicas por la Universidad Complutense de Madrid (1991) y Dr. Ingeniero Industrial del ICAI (1997). Profesor del Dpto. de Ingeniería Mecánica, Investigador del Área de Sistemas Ferroviarios del IIT y Director del Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios, en la E.T.S. de Ingeniería (ICAI), de la Universidad Pontificia Comillas.



Ramón Rodríguez Pecharromán

Dr. Ingeniero Industrial del ICAI (2000), promoción 1992. Director del Dpto. de Electrónica y Automática e Investigador del Área de Sistemas Ferroviarios del IIT, en la E.T.S. de Ingeniería (ICAI), de la Universidad Pontificia Comillas.

El transporte por ferrocarril es hoy en día uno de los más eficientes desde el punto de vista del consumo energético gracias al bajo rozamiento del contacto rueda-carril que permite aplicar derivas prolongadas, a la tracción eléctrica, a su alta capacidad de transporte y a la posibilidad de adaptar el número de coches a la demanda.

No sólo son eficientes los trenes metropolitanos, los de cercanías y los trenes de largo recorrido, sino también los nuevos trenes de alta velocidad, ya que estos últimos, a pesar de su mayor potencia, reducen el tiempo de recorrido (y por tanto el tiempo que los equipos auxiliares están consumiendo energía), y la velocidad de viaje es más regular y con menos paradas comerciales.

Sin embargo, existe hoy en día una importante necesidad de reducir el consumo energético también en el ferrocarril. Las estrategias para ello se centran en la infraestructura, en el diseño del vehículo y en la operación del tráfico.

Durante la fase de planificación de nuevas líneas o bien a la hora de mejorarla, el diseño de la infraestructura debe tener en cuenta aquellos factores que contribuyen a la reducción de pérdidas, al incremento del uso de la energía regenerada durante los frenados así como el impacto que los distintos tipos de señalización y su capacidad de comunicación asociada tienen en la posible reducción de consumos durante la operación del tráfico.

Las estrategias utilizadas para reducir el consumo incluyen la instalación de subestaciones reversibles en líneas alimentadas en corriente continua (como en Metro de Bilbao), interconexión de las secciones eléctricas y la instalación de acumuladores de energía en tierra, como en Metro de Madrid. El diseño eficiente del trazado de la vía es también fundamental, para evitar en lo posible reducciones de velocidad, por ejemplo por paso por curva. En el número anterior de la revista Anales se publicó un artículo dedicado a la reducción de consumo en líneas metropolitanas titulado "Aprovechamiento de la energía procedente del frenado regenerativo en

ferrocarriles metropolitanos", donde se analizaba el impacto de mejoras en la infraestructura orientadas a maximizar el uso de la energía regenerada en los frenados.

El diseño del vehículo tiene un impacto directo sobre el consumo energético, en particular la aerodinámica, el rendimiento del sistema de tracción y la reducción de la masa mediante el uso de materiales ligeros. También se ha de tener en cuenta la contribución del consumo de los sistemas auxiliares del tren, que suponen del orden del 10% del consumo total del tren en un servicio comercial según medidas realizadas en líneas de alta velocidad españolas. Estos consumos se pueden reducir por ejemplo mediante la optimización del control de temperatura del aire acondicionado o la instalación de un modo específico de estacionamiento sin viajero de trenes.

Otra estrategia de ahorro asociada al vehículo es la instalación de acumuladores de energía embarcados, especialmente en tranvías como el de Zaragoza o Sevilla. En estos sistemas la instalación de acumuladores permite tramos de circulación sin catenaria. Para analizar la eficiencia energética total hay que tener en cuenta el incremento de masa transportada debido a los acumuladores, y por tanto de consumo.

Por otro lado, los sistemas de comunicación y control del tren permiten mejorar, además de la calidad del servicio, el consumo de energía. Así, los sistemas embarcados de ayuda a

la conducción, y los sistemas de conducción automática ATO (Automatic Train Operation), si se configuran adecuadamente, contribuyen a ejecutar conducción económica como se describirá más adelante. En España son numerosas las líneas metropolitanas equipadas con conducción automática, en las que progresivamente se van programando perfiles de conducción optimizados. La última tecnología en sistemas de señalización es el CBTC (Communication Based Train Control), que proporciona una comunicación continua y bidireccional entre el puesto central y los trenes. Esto permite realizar conducciones económicas más eficientes y adaptadas al estado del tráfico. En España disfrutan de esta tecnología varias líneas de Metro de Madrid y la línea 9 de Metro de Barcelona, única en la península completamente automatizada (sin conductor). En líneas de largo recorrido, especialmente en líneas de alta velocidad, empiezan a surgir los primeros sistemas capaces de ejecutar de forma automática conducciones económicas supervisadas por el maquinista.

Finalmente, la tendencia en el diseño de nuevos trenes es a aumentar el número de asientos por coche, aumentando su capacidad y por tanto mejorando el consumo por viajero transportado.

Tanto las estrategias asociadas a la infraestructura como las asociadas al vehículo son estrategias a medio o largo plazo, que requieren generalmente



una alta inversión económica. Por otro lado, cuando el objetivo es la reducción del consumo utilizando las instalaciones y los vehículos en servicio, las estrategias a aplicar están dirigidas a optimizar la operación del tráfico, que son estrategias a corto plazo y de baja inversión.

Estrategias de ahorro

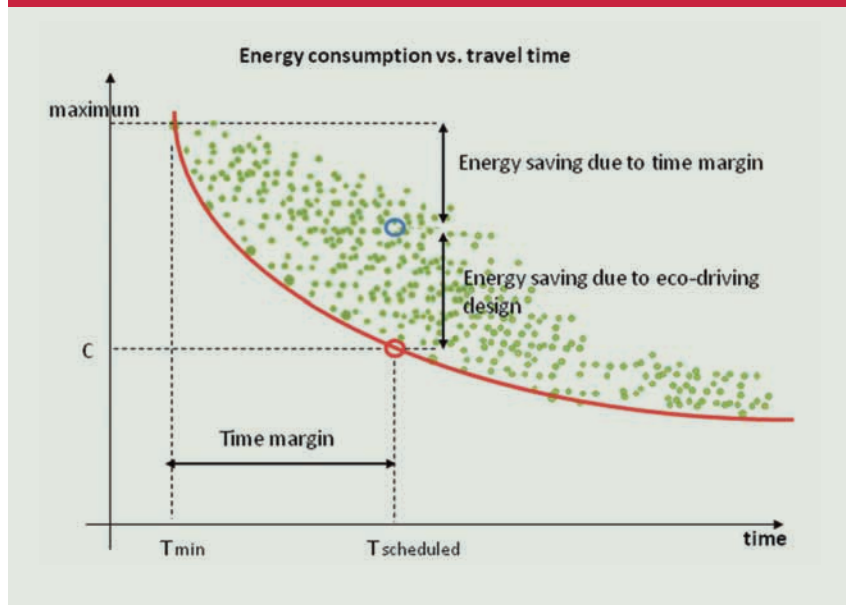
Las estrategias de ahorro asociadas a la operación se dividen en tres tipos: planificación de servicios, conducción económica y regulación del tráfico en tiempo real.

- En la fase de planificación de los servicios ferroviarios es importante ajustar la oferta de trenes a la demanda real para obtener un nivel de ocupación adecuado de los trenes, teniendo en cuenta los periodos punta y valle y los distintos tipos de día. Además, el diseño eficiente de los horarios ferroviarios permite también reducir los consumos. Cuando se diseña un horario, el tiempo mínimo de recorrido (el que se tendría con el tren circulando a la velocidad máxima permitida en la línea) se incrementa en un margen de tiempo necesario para poder recuperar los retrasos que se produzcan en el recorrido. Cuando no hay retrasos, este tiempo sobrante se puede emplear para realizar conducciones más lentas y económicas cumpliendo el horario comercial.

La distribución de estos márgenes de tiempo a lo largo del recorrido condiciona no solo el nivel de puntualidad de una línea, sino también el consumo de energía.

- La relación entre el tiempo de viaje y el consumo depende del tipo de conducción, y se puede representar gráficamente. En la Figura 1, cada punto representa una marcha de tren simulada entre dos estaciones, y se caracteriza por su tiempo de recorrido y su consumo energético. La marcha tendida es la de menor tiempo de recorrido y máximo consumo. Se puede ver que distintas marchas con consumos muy diferentes proporcionan aproximadamente el mismo tiempo de recorrido, dependiendo del estilo de conducción aplicado. Las conducciones de mínimo consumo para cada tiempo se sitúan

Figura 1. Relación entre tiempo de viaje y consumo energético



en la envolvente de la nube de puntos, que se conoce como curva óptima de Pareto.

A la hora de diseñar un horario comercial, se fija el tiempo de recorrido entre cada dos estaciones, y con el margen de tiempo asociado se obtienen los ahorros por conducción económica. La conducción económica consiste en la aplicación de una sucesión de consignas eficientes: deriva (circulación por inercia con tracción nula), regulación de velocidad y regulación de velocidad sin freno (mantenimiento de velocidad siempre que haya que aplicar tracción, y deriva en otro caso). El cálculo de la secuencia más eficiente de consignas es un problema complejo que requiere habitualmente de simulación de la marcha del tren y algoritmos de optimización.

- Este diseño eficiente off-line de la conducción y el horario debe ir seguido de un sistema de control de tráfico en tiempo real también eficiente desde el punto de vista energético. El sistema de control de tráfico permite la replanificación de horarios y de las marchas de conducción en tiempo real cuando se producen retrasos, de forma que se ejecutan nuevas conducciones económicas con tiempos de recorrido diferentes.

Se pueden distinguir tres niveles en el control de tráfico ferroviario: la

regulación local de un solo tren según lo planificado, el re-cálculo de la marcha en tiempo real y el sistema de regulación de tráfico centralizado. En la regulación de un solo tren es necesario el control embarcado del tren de forma que se ejecute la conducción planificada para cumplir con el horario. Sin embargo, cuando los retrasos son significativos, debido por ejemplo a limitaciones temporales de velocidad, retrasos en la salida por subida y bajada de viajeros, etc., es necesario recalcular la conducción para cumplir el horario. Por último, el sistema de regulación centralizado permite la optimización global del tráfico de la red ferroviaria, minimizando los retrasos y el consumo energético de toda la red.

La solución óptima es la automatización de la regulación y de la ejecución de consignas enviadas a los trenes, supervisada por el sistema embarcado de señalización de los trenes que garantizan la seguridad en la circulación. En líneas de metro con sistema centralizado de regulación y trenes equipados con ATO (Automatic Train Operation) capaces de ejecutar conducciones eficientes, es posible lograr ahorros importantes a la vez que se mejora la puntualidad y regularidad de los servicios. En trenes de alta velocidad también es necesario adaptar la

conducción económica diseñada off-line a las situaciones cambiantes, tal y como las limitaciones temporales de velocidad. Esto se puede realizar manualmente con la ayuda de dispositivos embarcados de ayuda a la conducción, o bien mediante sistemas de conducción automática eficientes.

Líneas de Metro

En líneas metropolitanas equipadas con sistemas ATO los trenes reciben los parámetros que definen la conducción a ejecutar automáticamente. Estos parámetros definen la conducción entre cada dos estaciones y corresponden a un conjunto de marchas preprogramadas específicas para cada interestación. El sistema de regulación centralizado selecciona en tiempo real la marcha adecuada a enviar a cada tren a la salida de cada estación. En consecuencia, tanto la eficacia del sistema de regulación como el consumo total de energía, depende fuertemente del conjunto de marchas ATO pre-diseñadas.

El primer diseño óptimo de marchas ATO minimizando el consumo energético, además de respetar los criterios de tiempo de viaje y confort, fue en la línea 3 de Metro de Madrid, con ahorros medidos del 12%. Posteriormente se ha realizado el diseño óptimo de marchas en Metro de Bilbao y actualmente se encuentran en instalación nuevas marchas económicas en las líneas 2 y 5 de Metro de Barcelona. Estos trabajos se han enmarcado dentro de una de las líneas de investigación del Área de Sistemas Ferroviarios del IIT que ha concluido recientemente con una tesis doctoral.

En tiempo real, cuando el sistema de regulación centralizado decide que un tren debe ser retenido le envía una marcha más lenta que la nominal, ya que el pasajero percibe como más confortable una marcha lenta en recorrido que una detención larga en la estación. Además esta estrategia de regulación tiene asociado un ahorro energético, ya que las marchas más lentas tienen un menor consumo de tracción.

Cuando se implantó el sistema de regulación centralizado en Metro de

Madrid la calidad del servicio (medida como puntualidad y regularidad) se incrementó en un 50%. Además, el consumo de energía se redujo un 18% por la ejecución de marchas de regulación.

Como ya se mencionó, la nueva tecnología de señalización CBTC facilita el control de los trenes mediante la comunicación continua con el tren. Esta capacidad de comunicación se puede aprovechar para mejorar la eficiencia energética de la operación del tráfico. Por un lado se pueden diseñar marchas ATO con menor consumo energético y por otro lado la comunicación continua permite modificar los órdenes de marcha en cualquier momento, no sólo a la salida de estación, adaptándolas a las necesidades del tráfico. Esto supone un reto futuro a explorar en las nuevas generaciones de sistemas de regulación de tráfico.

Líneas de alta velocidad

Las líneas de alta velocidad son especialmente adecuadas para la ejecución de conducciones económicas debido a los altos márgenes de tiempo incluidos en el horario, necesarios para proporcionar los niveles de puntualidad requeridos. Además, la baja interferencia con otros trenes hace que habitualmente se puedan emplear estos márgenes para realizar conducción económica.

Se realizaron pruebas de conducción manual económica con diversos trenes de alta velocidad: S-102 en Madrid-Barcelona (tramo Madrid-Zaragoza), S-120 en Madrid-Barcelona (tramo Madrid-Plasencia de Jalón), S-103 en Madrid-Barcelona, S-102 en Madrid-Málaga y S-100 en Madrid-Sevilla. En dichas pruebas se comparó la conducción habitual de los maquinistas con la ejecución de las marchas económicas diseñadas off-line mediante técnicas de simulación y optimización. Las medidas mostraron un ahorro medio del 21% en el consumo energético.

Existen hoy en día además sistemas embarcados de ayuda a la conducción que muestran en el display del maquinista la consigna propuesta de conducción para ser ejecutada manualmente. Sin embargo, la tendencia actual es el desarrollo de nuevos sistemas de conducción automática, específicos para trenes de alta velocidad que permitan la ejecución de consignas eficientes desde el punto de vista energético para minimizar el consumo a la vez que se supervisa el horario para garantizar la puntualidad. Estos trabajos se han enmarcado en la línea de investigación de alta velocidad del Área de Sistemas Ferroviarios del IIT que ha concluido recientemente con una tesis doctoral. ■

