

Sincronización de arranques y paradas en metropolitanos para el uso eficiente del frenado regenerativo

Antonio Fernández, Paloma Cucala, Maite Peña, Andrés Ramos

Instituto de Investigación Tecnológica, Universidad Pontificia Comillas, España

Carlos Rodríguez

Metro de Madrid, España

RESUMEN

El trabajo que se presenta en esta ponencia se enmarca dentro del proyecto de investigación EFIREG “Reducción de costes de operación mediante el uso eficiente del frenado regenerativo”, realizado por el Instituto de Investigación Tecnológica en colaboración con Metro de Madrid. El objeto es el desarrollo de modelos y herramientas de optimización de horarios que permitan reducir el consumo de energía de tracción maximizando los periodos de coincidencia del frenado regenerativo de unos trenes con periodos de arranque de otros (en el mismo sector eléctrico). Se ha formulado un modelo de programación matemática que genera automáticamente horarios maximizando estos periodos, respetando las restricciones operativas que fija el explotador. El modelo se ha implementado y ensayado para el caso de Línea 3 de Metro de Madrid, obteniendo un aumento de los periodos de sincronización del 47% respecto del horario nocturno actual.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad está extendido el uso del frenado regenerativo en las explotaciones ferroviarias, como en Metro de Madrid y en el ADIF (tanto en largo recorrido como en cercanías). El principal problema en su aprovechamiento reside en que la energía regenerada en catenaria no puede ser devuelta directamente a la red de distribución en la mayoría de las líneas de continua, y todavía no están suficientemente maduros los sistemas de acumulación de energía. Por lo tanto, la energía regenerada en los frenados debe ser simultáneamente consumida por otra unidad traccionando en el mismo sector eléctrico (salvo autoconsumo en los servicios auxiliares del propio tren). La energía que no puede ser consumida por otros trenes se disipa en resistencias eléctricas. No existen en la actualidad modelos de optimización de horarios ferroviarios orientados a maximizar los periodos de coincidencia de freno y tracción para favorecer la transferencia de energía entre trenes, ni es habitual que los explotadores ferroviarios incorporen estos criterios a la hora de planificar los horarios.

Estado del arte

Es conocido hace tiempo que el frenado regenerativo tiene un impacto importante en el consumo energético de líneas ferroviarias. Las publicaciones científicas del Adinolfi y equipo [Adinolfi 1998], justifican el uso del freno regenerativo en operaciones en metropolitano a partir de estudios realizados en el Metro de Roma. Según estos investigadores, existe poca información y es difícil cuantificar el ahorro energético asociado al frenado regenerativo, y este hecho ha limitado su uso eficiente. Metro de Madrid ya ha acometido acciones dirigidas a incrementar el aprovechamiento de la energía regenerada, aumentando la longitud de los sectores eléctricos conectando las subestaciones en paralelo para incrementar. Se ha estimado en un 12% el ahorro de energía total debido al frenado regenerativo.

La estrategia de sincronizar horarios para maximizar los periodos de coincidencia de arranque y freno está menos estudiada en la literatura científica. La publicación [Guo 1999] estudia la generación de horarios de trenes que maximice los periodos de coincidencia arranque-freno, y presenta estimaciones del ahorro energético basadas en simulaciones, concluyendo en el interés de este tipo de estrategias. En este artículo también se propone un procedimiento simple de cálculo de horarios, y se apunta el poco aprovechamiento que se está realizando de estas técnicas, motivadas principalmente por la complejidad de los modelos matemáticos de optimización necesarios para abordar el problema debido a su naturaleza fuertemente combinatorial y sometido a múltiples restricciones.

Las técnicas utilizadas para la optimización de horarios ferroviarios son fundamentalmente dos: programación matemática y búsquedas heurísticas. Dentro del primer grupo, [Bussieck 1997] y [Nielsen 2006] utilizan programación entera mixta, la misma técnica empleada en el trabajo aquí descrito. Dentro del segundo grupo, trabajos recientes como [Godwin 2006] utilizan algoritmos genéticos, mientras que [Semet 2005] y [Rodriguez 2007] utilizan fundamentalmente programación por restricciones.

Objetivos y justificación del trabajo

El objetivo final del proyecto de investigación EFIREG es el desarrollo y validación de una herramienta de optimización de horarios ferroviarios para la sincronización de periodos de frenado y arranque en líneas de metro, que permita evaluar el ahorro energético que conllevaría el rediseño de los horarios nocturnos actualmente en servicio en Metro de Madrid. El proyecto incluye la implantación en pruebas de nuevos horarios sincronizados y toma de medidas de energía para analizar y validar el estudio.

En la mayoría de las líneas de Metro de Madrid solo se explota por horario planificado a partir de las 22 horas. Durante el resto del día no existe un horario de referencia, el sistema de regulación tiene como objetivo mantener un intervalo regular de paso de trenes por estación.

En estos periodos con un alto número de trenes en circulación es frecuente estadísticamente que ya se produzcan coincidencias arranque-freno en el mismo sector eléctrico, que unido a que en estos periodos la prioridad es proporcionar un intervalo regular, hace en principio menos viable y útil forzar coincidencias arranque-freno en tiempo real.

En cambio, en periodos valle nocturnos en los que el número de trenes en circulación es relativamente bajo, y la circulación planificada en general se cumple (salvo pequeños retrasos o incidencias), las sincronizaciones arranque-freno que se producen se pueden planificar previamente al diseñar los horarios. Además, los márgenes de tiempo con los que se diseñan los horarios nocturnos son relativamente altos (tanto en tiempos de recorrido como en tiempos de parada), lo que proporciona las holguras necesarias para incluir criterios energéticos en su diseño sin degradar significativamente la calidad del servicio.

Para que la estrategia basada en sincronizaciones tenga éxito es fundamental el efectivo cumplimiento conforme a lo planificado de los periodos de arranque y freno. Los equipos de conducción automática ATO, en servicio en todas las líneas de Metro de Madrid, aseguran que las circulaciones se realizan de forma predecible y con la precisión suficiente en todos los recorridos (no perturbados por la señalización). Para obtener una precisión adecuada en el instante de arranque de estación, que se realiza de forma manual, es importante disponer de dispositivos descontadores que preparen y marquen al maquinista la salida de estación conforme al horario planificado, como ocurre en Metro de Barcelona o en algunas líneas de Metro de Madrid. No se trata de eliminar por completo los retardos en el arranque del tren respecto de la indicación de salida, sino de habilitar procedimientos que homogenicen el valor de los retardos para incluirlos en los modelos.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Se han identificado los requisitos que actualmente cumplen los horarios comerciales en líneas metropolitanas de explotación circular, tomando como referencia Metro de Madrid. Se trata de definir claramente las restricciones operativas a que debe estar sometido el horario, buscando su vez las holguras disponibles que permitan el juego necesario para poder forzar arranques y frenados.

En esta tarea, se han considerado dos modos de uso del modelo, distinguiendo entre la modificación de un horario actual en servicio para forzar sincronizaciones y la generación de un nuevo horario sin referencia previa alguna. El primer modo es útil en la fase de pruebas del estudio para facilitar la comparación entre ambos horarios (el actual y el sincronizado), limitando las diferencias máximas permitidas entre ambos horarios. El segundo modo aprovecharía al máximo las posibilidades de sincronización, incluyendo solo las restricciones absolutas definidas por el explotador para un horario genérico.

El modelo distingue además el caso en que se optimizan simultáneamente los instantes de llegada y salida de estación del caso en que solo se optimiza el instante de salida de estación. El primer caso requiere que el sistema de regulación en tiempo real admita como referencia el

tiempo de llegada a estación, y que seleccione en la estación anterior la marcha de ATO que mejor se adapta para cumplir el próximo tiempo de llegada. El segundo caso considera que el sistema de regulación solo admite como referencia la salida de estación, como ocurre actualmente en Metro de Madrid. En este caso el tiempo de llegada a estación se calcula en el modelo incluyendo la misma ley de control que implementa el sistema de regulación para seleccionar la marcha ATO (y por lo tanto el tiempo de recorrido), y que en Metro de Madrid es el tiempo de recorrido más lento (más económico) compatible con el cumplimiento del tiempo de salida en la siguiente estación.

Restricciones

Las restricciones operativas que se han modelado son las siguientes:

- Tiempos mínimos y máximos permitidos de parada de cada estación
- Tiempos mínimos y máximos de recorrido en cada interestación, que se corresponden con las marchas ATO más rápida y más lenta disponibles.
- Tiempo máximo de viaje permitido de cabecera a cabecera de línea
- Tiempos mínimos y máximos de la maniobra de retorno en estaciones cabeceras
- Máximo retraso y máximo adelanto permitido respecto de un horario de referencia

La última restricción permite imponer al horario que no se retrase en estaciones en las que es preciso respetar un horario de correspondencia entre distintas líneas, en el caso de Metro de Madrid para el último tren del día en ciertas estaciones. Además, esta restricción permite limitar las diferencias del nuevo horario respecto del de referencia en servicio.

Función objetivo

La función objetivo a maximizar se expresa como segundos totales de sincronización del horario, es decir, cuánto tiempo de frenado regenerativo ocurre solapado con el periodo de arranque de otro tren en el mismo sector eléctrico (sumado para todos los frenados del horario). Para realizar este cálculo, se introduce en el modelo como dato de configuración la duración de periodo de arranque y del periodo de frenado en cada estación.

Grado de aprovechamiento de la sincronización. Factores de acople

El modelo permite tener en cuenta que es preferible sincronizar arranques y frenados en estaciones cercanas, fundamentalmente para considerar las pérdidas en catenaria. Para ello, se define una matriz de factores de “acople” entre todas las estaciones, que vale entre 0 cuando no se aprovecha en absoluto la sincronización (no hay continuidad eléctrica entre estaciones) y 1 en el caso de aprovechamiento máximo (sincronización en la misma estación, un tren llega y otro sale).

Los valores intermedios de los factores de acople son proporcionales a la distancia eléctrica entre estaciones, y permiten además considerar condiciones particulares en que está penalizada

la transferencia de energía. Este es el caso por ejemplo si el tren que arranca está cerca de una subestación, y parte de la energía de tracción la aporta la subestación en detrimento de la energía regenerada. La estimación de los factores de acople en estos casos se debe realizar utilizando un simulador eléctrico detallado que tenga en cuenta las potencias de tracción y regenerada, la tensión en vacío de la subestación y la tensión máxima de catenaria permitida en el punto de regeneración por el equipo eléctrico del tren. Si se alcanza esta tensión máxima en catenaria, el tren desvía parte de la energía regenerada a resistencias para evitar elevar la tensión.

Formalización y resolución del problema de optimización

El problema de maximización de los tiempos de sincronización se plantea como un problema de optimización lineal entera mixta, es decir, con variables binarias para detectar las coincidencias entre arranques y frenados y variables continuas para contabilizar los tiempos de coincidencia. Para este tipo de problemas existen métodos muy eficientes de solución implantados en optimizadores comerciales. Se ha utilizado CPLEX como optimizador y GAMS como lenguaje de modelado para su implementación.

3. CASO EJEMPLO

Para evaluar las ventajas de diseñar horarios ferroviarios según el modelo propuesto, se ha configurado como caso de aplicación la modificación del horario nocturno actual en servicio en Línea 3 de Metro de Madrid, aplicando valores realistas fijados por esta compañía a los distintos parámetros de configuración del modelo.

Para facilitar la puesta en servicio en pruebas del nuevo horario sincronizado se ha aplicado el modo de uso que acota las diferencias entre el nuevo horario y el actual en servicio, limitando a 120 s el retraso máximo del nuevo en todas las estaciones. No se permiten adelantos del nuevo horario respecto del actual en servicio. De esta forma, si se mantiene el horario publicado actual y se ejecuta el nuevo horario, los usuarios no pierden ningún tren (al no permitirse adelantos), mientras que el retraso máximo percibido será de 1 min, ya que hasta 60 s no se considera retraso comercial al entrar dentro del minuto publicado. Se facilitan así las pruebas y mediciones energéticas asociadas al nuevo horario, ya que no es necesario alterar el horario publicado, sino sustituir el horario técnico que utiliza el sistema de regulación de tráfico. A cambio, el horario de pruebas no explota al máximo las posibilidades de sincronización, pero se ha comprobado que con este ejemplo realista es suficiente para obtener conclusiones.

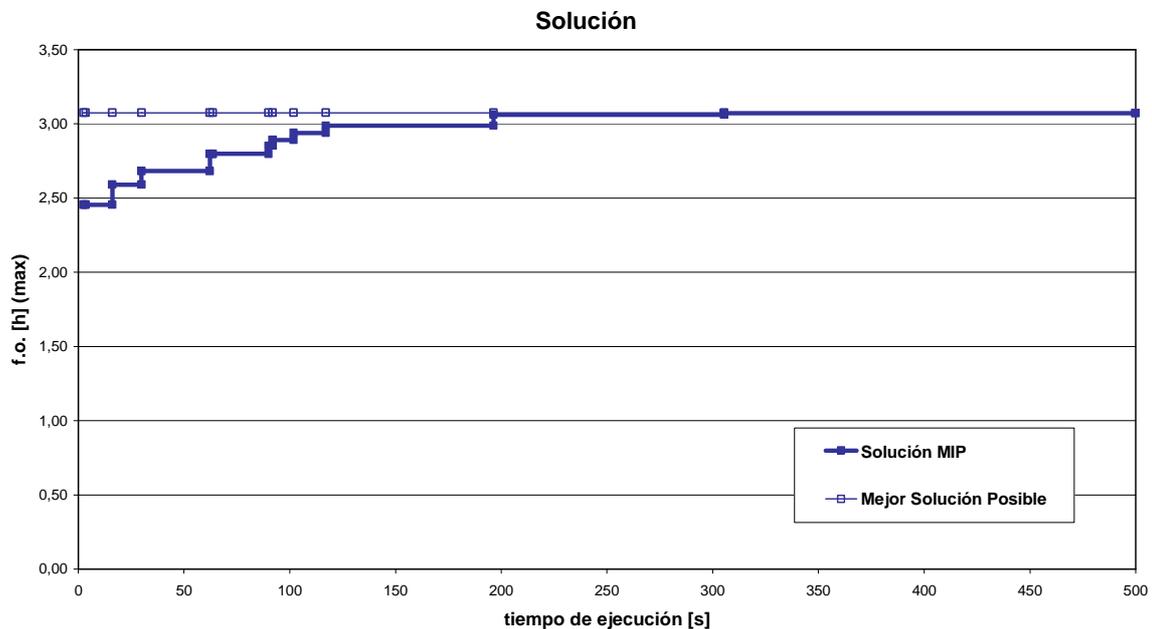
El horario actual en servicio en Línea 3 tiene un tiempo de parada mínimo, medio y máximo de 20, 32 y 79 s, respectivamente. En el modelo de optimización se permiten tiempos de parada entre 20 y 81 s. El sistema de regulación en servicio permite optimizar solo los tiempos de salida de estación, y el tiempo de llegada está condicionado por un tiempo de recorrido constante en cada interestación (misma marcha ATO). De esta forma, las medidas energéticas

asociadas a ambos horarios serán directamente comparables en términos de sincronización y frenado regenerativo, al no estarán afectadas por los distintos consumos energéticos de cada marcha ATO disponible en cada interestación.

Se han configurado los factores de acople entre estaciones como 1 entre estaciones conectadas eléctricamente y 0 entre estaciones aisladas. En el caso de prueba se busca calcular el valor máximo de los tiempos de sincronización, por lo que no se han penalizado sincronizaciones por distancia u otros motivos.

Como resultado de la ejecución del modelo de optimización, se consigue sincronizar un total de 2,93 horas (el 78% de los tiempos de frenado final) entre las 23 y las 2 de la mañana. El horario actual en servicio contiene 1,99 horas de sincronización (el 53% de los tiempos de frenado), luego el nuevo horario incrementa las sincronizaciones en un 47% respecto del horario original. El tiempo de parada medio en estación del nuevo horario sincronizado es de 35 segundos, es decir, aumenta en 3 segundos el tiempo medio de parada actual.

Por último, para mostrar la eficacia en la resolución del modelo de optimización la siguiente gráfica muestra el tiempo de ejecución. La solución descrita se ha obtenido en los 100 primeros segundos de la ejecución del modelo. La máxima sincronización la encuentra a los 300 s, y a partir de este momento no mejoran significativamente las soluciones.



Tiempo de sincronización obtenido frente a tiempo de ejecución

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen el apoyo del Ministerio de Educación y Ciencia al proyecto, que tiene financiación del Programa de Fomento de la Investigación Técnica 2007 del Plan Nacional de i+d+i 2007.

BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

Adinolfi, A., Lamedica, R., Modesto, C., Prudenzi, A., and Vimercati, S. (1998) “Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line”. IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 13, Issue 4, Oct. 1998 Page(s):1536 – 1542

Bussieck, M.R., Winter, T., Zimmermann U.T. (1997), “Discrete optimization in public rail transport”. Mathematical Programming, 79(3), (1997), 415-444

T. Godwin, Ram Gopalan, T. T. Narendran (2006), “Locomotive assignment and freight train scheduling using genetic algorithms”. International Transactions in Operational Research 13 (4), 299–332

Guo, H. Ohashi, O. Ichinokura (1999). “DC electric train traffic scheduling method considering energy-saving-combination of train traffic parameters for larger regenerative power”. In Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Part D Nov. 1999, vol.119-D, no.11, pp. 1337-44, Journal Paper

Nielsen M. N., Hove, B., and Clausen J. (2006), “Constructing periodic timetables using MIP - a case study from DSB S-train”. International Journal of Operational Research Volume 1, Number 3 / 2006 Pages: 213 – 227

Rodriguez, J. (2007). “A constraint programming model for real-time train scheduling at junctions”. Transportation Research, Part B (Methodological) Feb. 2007, vol.41, no.2, pp. 231–45.

Semet, Y. and Schoenauer (2005). An efficient memetic, permutation-based evolutionary algorithm for real-world train timetabling. The 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation, Volume 3, 2-5 Sept. 2005 Page(s): 2752 - 2759.