

Enfoque al ahorro de energía en la conducción de ferrocarriles utilizando el método múltiple de restricción de la optimización

J.M. Mera Sánchez de Pedro

CITEF, Centro de Investigación en Tecnologías Ferroviarias de la Universidad Politécnica de Madrid, España

Manuel Soler Nicolau, Emilia Rodrigo, Santiago Tapia,

CITEF, Centro de Investigación en Tecnologías Ferroviarias de la Universidad Politécnica de Madrid, España

Resumen

El ahorro de la energía consumida no es un tema menor en el sector ferroviario. Las infraestructuras ferroviarias y los planes operativos implicados en distintos sistemas como el metropolitano, trenes locales, larga distancia y alta velocidad, deben ser realizados teniendo en cuenta las múltiples alternativas para alcanzar un sistema de optimización en el ahorro de energía. Para conseguir alcanzar la mejor solución final, las alternativas deben recoger y trabajar con el máximo de variables asociadas al movimiento del tren y a los planes de operación. El método presentado aquí usa una solución semianalítica que conlleva una discretización del problema, para posteriormente aplicar el método de los Multiplicadores de Lagrange para resolver la optimización de las n-tuplas de velocidad. Con esta alternativa propuesta, es posible incluir todos los detalles sobre las operaciones del tren, como restricciones en el horario o tipos de frenado.

1. Introducción

Las infraestructuras ferroviarias se encuentran en todas partes hoy en día. En grandes ciudades suponen una importante estrategia para mover masas a lo largo de la red que forman, ya sea a través de suburbanos o trenes ligeros, de esta forma se logra descongestionar el tráfico que sufren las ciudades. Obviamente, no debemos olvidar mencionar que las líneas de larga distancia o Alta Velocidad suponen una alternativa a los aviones y tráfico de carreteras para grandes distancias. Una de las características que hacen la opción ferroviaria atractiva, es el tipo de energía que consume.

El principal impacto de la red ferroviaria se produce en el consumo y sostenibilidad es evaluado a través del Proyecto ElecRail (2007); los datos que proporciona este estudio suponen una gran motivación para realizar este estudio. El frenado, reostático o regenerativo, será la clave de este estudio pues se centrará en la forma de optimizar el frenado. El freno regenerativo actúa mediante el uso de energía cinética y potencial, y la absorción de estas, y después, si es apropiado, devolviendo esta energía a la línea o bien siendo utilizada para recargar los acumuladores (SMES, volantes de inercia, etc...). Por el contrario, el freno reostático utiliza la energía existente en resistencias sin consumirla.

En Peña et al. (2010), uno de los estudios en esta línea de trabajo, indica que una vez se ha modelado la corriente continua, la idea es actuar en la modelización del horario, concretamente las llegadas y salidas de las estaciones, para que de esta forma, las

aceleraciones y frenados del tren puedan estar sincronizados, y así establecer una función objetivo para optimizar un MIP (Mixed Integer Problem).

Existen muchas formas para optimizar la energía consumida, pero esto dependerá de la disposición del problema, mediante la utilización de una función objetivo o algorítmica. En Acýkbas et al. (2008), una red neuronal es capaz de modelar los patrones de rendimiento de la dinámica del tren mediante el estudio de la red ferroviaria de Estambul.

Otro enfoque fue desarrollado por Chang y Sim (1997). Este algoritmo divide los tramos entre estaciones en zonas. A cada zona se le asigna un genotipo, cuya codificación contiene los parámetros básicos de la misma, distancia y acción que se ha producido, son asignados a su zona correspondiente (frenado, tracción o deslizamiento).

Chang et al. (1999) parametriza la función objetivo a través de la salida, tiempo de llegada a la estación, energía consumida y las operaciones de seguridad. Las cuestiones a tener en cuenta son ATP (Automatic Train Protection), frenos regenerativos, energía consumida y características de la línea.

Una aproximación matemática se puede obtener mediante Howlett et al (2005) (2007). Éste método utiliza estrategias de control óptimo basado en el cálculo variacional y proporciona una herramienta de optimización.

2. Exposición del problema

Con el fin de resolver el problema de optimización como uno distinto, este tema debe ser resuelto o bien seleccionado para alcanzar la solución. Se han tratado los siguientes temas:

- Discretización. Lo primero será transformar el problema original (en el dominio del control óptimo) en una optimización R^n que supone una discretización del movimiento del tren. Se va a usar n-tuplas de velocidad como variable independiente para la función objetivo.
- Modelo de Consumo y Restricciones. Se va a deducir la forma más adecuada de las ecuaciones de la dinámica, usando los esfuerzos y resistencia del tren para lograr un modelo de consumo y por lo tanto una función objetivo. Se utilizará la planificación operacional para deducir las restricciones.
- Finalmente, se va a utilizar multiplicadores de Lagrange, para obtener un perfil de velocidad con un consumo mínimo.

2.1 Discretización

La primera decisión fue elegir el esquema de modelado. La conclusión final fue que el problema requería una discretización que minimizara la función objetivo (consumo de tracción), que tan solo dependerá de la velocidad que alcanza el tren en cada punto discretizado. Estos puntos son establecidos para que el tren consuma siempre el mismo tiempo de viaje entre dos puntos consecutivos a la velocidad máxima.

La ecuación del movimiento uniformemente acelerado (UAM) es usada para este caso, en el que el incremento del tiempo es fijado, y la posición del siguiente punto en la línea, y por tanto, se puede hallar su radio de curvatura, altura, etc. Por lo tanto, se ha transformado

un problema de control óptimo, siendo la solución de este la estrategia del control de la conducción, la función objetivo integra una función de consumo de energía en el trayecto del tren y las restricciones debidas a la planificación de los horarios, otro problema que surge es la discretización del movimiento del tren.

Dividiendo el trayecto del tren en intervalos utilizando una secuencia de puntos fijos, la estrategia de control (una función continua a lo largo del tiempo) puede ser fijada como la forma que tiene los valores de la velocidad, n-tuplas.

2.2 Modelo de Consumo

Teniendo en cuenta la discretización ya comentada anteriormente, en (1) se define el trabajo de tracción entre dos puntos consecutivos, que tendrá la siguiente forma:

$$T_{T_{j-1,j}} = \Delta E_{C_{j-1,j}} + T_{R_{j-1,j}} \quad (1)$$

Donde $T_{T_{j-1,j}}$ es la tracción o conducción desde el punto $j-1$ al punto j

$T_{R_{j-1,j}}$ trabajo de la resistencia desde el punto $j-1$ al punto j

$\Delta E_{C_{j-1,j}}$: aumento de la energía cinética entre los puntos $j-1$ y j

Y para toda la línea:

$$T_T = \sum T_{T_{j-1,j}} = \sum (\Delta E_{C_{j-1,j}} + T_{R_{j-1,j}}) = \sum \Delta E_{C_{j-1,j}} + \sum T_{R_{j-1,j}} \quad (2)$$

Como se puede ver, existe una Resistencia dependiente de la velocidad (T_{R_V}) y otra parte que no lo es (T_{R_S}).

Una vez definida la función de la resistencia y la energía cinética, se muestra ahora el aspecto que tendrá la función objetivo, tanto la que determina el trabajo realizado entre dos puntos consecutivos como la que determina el trabajo total. Además, son integradas todas las variables evaluadas excepto la velocidad, que es la que determina el consumo. Sin embargo, esta debe ser establecida a través de la simulación y bajo las condiciones marcadas por los ensayos y especificaciones. Finalmente, se llega a la función que determina el trabajo, como se puede ver a partir de (3) y (4).

$$\begin{aligned} T_{T_{j-1,j}} &= \Delta E_{C_{j-1,j}} + T_{R_{j-1,j}} = \Delta E_{C_{j-1,j}} + T_{R_{S_{j-1,j}}} + T_{R_{V_{j-1,j}}} = \\ &= \frac{1}{2} \cdot (M + m_r) \cdot (v_j^2 - v_{j-1}^2) + P \cdot (h_j - h_{j-1}) + \frac{k_c}{R_{j-1}} \cdot P + \\ &\quad + (1 + k_{t_{j-1}}) \cdot \left[A + \frac{B}{2} \cdot (v_j + v_{j-1}) + \frac{C}{2} \cdot (v_j^2 + v_{j-1}^2) \right] \cdot (s_j - s_{j-1}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} T_T &= \sum_{j=2}^n T_{T_{j-1,j}} = \sum_{j=2}^n (\Delta E_{C_{j-1,j}} + T_{R_{j-1,j}}) = \sum_{j=2}^n (\Delta E_{C_{j-1,j}} + T_{R_{S_{j-1,j}}} + T_{R_{V_{j-1,j}}}) = \\ &= \sum_{j=2}^n \left\{ \frac{1}{2} \cdot (M + m_r) \cdot (v_j^2 - v_{j-1}^2) + P \cdot (h_j - h_{j-1}) + \frac{k_c}{R_{j-1}} \cdot P + \right. \\ &\quad \left. + (1 + k_{t_{j-1}}) \cdot \left[A + \frac{B}{2} \cdot (v_j + v_{j-1}) + \frac{C}{2} \cdot (v_j^2 + v_{j-1}^2) \right] \cdot (s_j - s_{j-1}) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

- $T_{T_{j-1,j}} > 0 \Rightarrow$ El motor está traccionando. Esto significa que la energía proveniente de la catenaria está siendo consumida

- $T_{T_{j-1,j}} = 0 \Rightarrow$ El motor ni frena ni tira. Este tipo de conducción se denomina *deriva*, y de esta forma, la energía cinética y la resistencia se compensan mutuamente.
- $T_{T_{j-1,j}} < 0 \Rightarrow$ El motor está frenando.

2.2.1 Freno regenerativo y reostático

Regenerativo

Aquí la energía generada por el motor en el frenado es enviada de nuevo a la catenaria. Pero si en ese momento no existe otro tren cerca que está traccionando, esa energía se desperdicia, se asume que si van a haber trenes cerca para aprovechar la energía.

$$\begin{aligned}
 q(v_1, v_2, \dots, v_n) &= \Delta E_C + \sum_{j=2}^n T_{Rv_{j-1,j}} = \\
 &= \frac{1}{2} \cdot (M + m_r) \cdot (v_n^2 - v_1^2) + \\
 &\quad + \sum_{j=2}^n \left\{ (1 + k_{t_{j-1}}) \cdot \left[\frac{B}{2} \cdot (v_j + v_{j-1}) + \frac{C}{2} \cdot (v_j^2 + v_{j-1}^2) \right] \cdot (s_j - s_{j-1}) \right\}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Reostático

En este caso, la energía que proviene del frenado del motor se pierde por completo debido a la presencia de las resistencias. El tren no ha demandado energía a la catenaria para desarrollar el trabajo necesario para desplazarse de $j-1$ a j .

$$\begin{aligned}
 q(v_1, v_2, \dots, v_n) &= T_T = \sum_{j=2}^n T_{T_{j-1,j}} = \sum_{j=2}^n (\Delta E_{C_{j-1,j}} + T_{R_{j-1,j}}) = \\
 &= \sum_{j=2}^n (\Delta E_{C_{j-1,j}} + T_{R_{S_{j-1,j}}} + T_{R_{v_{j-1,j}}}) = \\
 &= \sum_{j=2}^n \left\{ \frac{1}{2} \cdot (M + m_r) \cdot (v_j^2 - v_{j-1}^2) + P \cdot (h_j - h_{j-1}) + \frac{k_c}{R_{j-1}} \cdot P + \right. \\
 &\quad \left. + (1 + k_{t_{j-1}}) \cdot \left[A + \frac{B}{2} \cdot (v_j + v_{j-1}) + \frac{C}{2} \cdot (v_j^2 + v_{j-1}^2) \right] \cdot (s_j - s_{j-1}) \right\} \\
 &\text{when } j \text{ is } T_{T_{j-1,j}} > 0
 \end{aligned} \tag{6}$$

Como se puede observar, solo los valores positivos, que demandan energía, serán considerados.

En esta ocasión, la función objetivo T_{R_S} , no puede ser ignorada, ya que los factores R_S son invariables en esta suma global, la resistencia total se debe a la posición del tren en la línea y no permanecerá constante, debido a que la suma correspondiente a j como a $T_{T_{j-1,j}} < 0$ no aparecen, y por tanto, pueden ayudar a minimizar el consumo.

2.2.2 Restricciones

En el análisis y desarrollo teórico del método, se tienen en cuenta las siguientes restricciones:

- **Conocer el horario para establecer la ruta**
- **Conocer los límites de velocidad**
- **Conocer las restricciones de aceleración**

- **Conocer las restricciones de tracción**

2.3 Optimización del modelo

Además de la modelización del sistema y la discretización que se han tomado y que incluye todas las restricciones, el método de optimización es seguramente el más importante del trabajo, ya que debe reunir toda la información previa y encontrar el método para obtener el gráfico del consumo óptimo y finalmente debe éste tener una complejidad temporal aceptable, dependiendo todo de v_j , que es la velocidad.

El método elegido ha sido los Multiplicadores de Lagrange (Bertsekas 1982).

Aplicando las ecuaciones de frenado dadas se obtienen las ecuaciones (7) y (8) a utilizar en el método:

$$\begin{aligned}
L(v_1, \dots, v_n, \lambda_1, \dots, \lambda_{4n-2}) = & \frac{1}{2} \cdot (M + m_r) \cdot (v_n^2 - v_1^2) + \\
& + \sum_{j=2}^n \left\{ (1 + k_{t_{j-1}}) \cdot \left[\frac{B}{2} \cdot (v_j + v_{j-1}) + \frac{C}{2} \cdot (v_j^2 + v_{j-1}^2) \right] \cdot (s_j - s_{j-1}) \right\} \\
& + \lambda_1 \cdot \left(\frac{1}{t_C} - \frac{\sum_{j=1}^n v_j - \frac{v_1 + v_n}{2}}{(s_n - s_1) \cdot (n-1)} \right) + \sum_{k=2}^{n+1} \lambda_k \cdot (v_{\max k-1} - v_{k-1}) + \\
& + \sum_{j=2}^n \lambda_{n+j} \cdot \left(a_r - \frac{v_j - v_{j-1}}{\Delta t} \right) + \sum_{j=2}^n \lambda_{2n+j-1} \cdot \left(-a_F + \frac{v_j - v_{j-1}}{\Delta t} \right) + \\
& + \sum_{j=2}^n \lambda_{3n+j-2} \cdot \left\{ P \cdot \Delta t - \frac{1}{2} (M + m_r) \cdot (v_j^2 - v_{j-1}^2) - \right. \\
& - P \cdot (h_j - h_{j-1}) - \frac{k_c}{R_{j-1}} \cdot P - (1 + k_{t_{j-1}}) \cdot [A + \\
& \left. + \frac{B}{2} \cdot (v_j + v_{j-1}) + \frac{C}{2} \cdot (v_j^2 + v_{j-1}^2) \right] \cdot (s_j - s_{j-1}) \left. \right\}
\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
L(v_1, \dots, v_n, \lambda_1, \dots, \lambda_{4n-2}) = & \sum_{j=2}^n \left\{ \frac{1}{2} \cdot (M + m_r) \cdot (v_j^2 - v_{j-1}^2) + \right. \\
& + P \cdot (h_j - h_{j-1}) + \frac{k_c}{R_{j-1}} \cdot P + \\
& \left. + (1 + k_{t_{j-1}}) \cdot \left[A + \frac{B}{2} \cdot (v_j + v_{j-1}) + \frac{C}{2} \cdot (v_j^2 + v_{j-1}^2) \right] \cdot (s_j - s_{j-1}) \right\} \\
& + \lambda_1 \cdot \left(\frac{1}{t_C} - \frac{\sum_{j=1}^n v_j - \frac{v_1 + v_n}{2}}{(s_n - s_1) \cdot (n-1)} \right) + \sum_{k=2}^{n+1} \lambda_k \cdot (v_{\max k-1} - v_{k-1}) + \\
& + \sum_{j=2}^n \lambda_{n+j} \cdot \left(a_r - \frac{v_j - v_{j-1}}{\Delta t} \right) + \sum_{j=2}^n \lambda_{2n+j-1} \cdot \left(-a_F + \frac{v_j - v_{j-1}}{\Delta t} \right) + \\
& + \sum_{j=2}^n \lambda_{3n+j-2} \cdot \left\{ P \cdot \Delta t - \frac{1}{2} (M + m_r) \cdot (v_j^2 - v_{j-1}^2) - \right. \\
& - P \cdot (h_j - h_{j-1}) - \frac{k_c}{R_{j-1}} \cdot P - (1 + k_{t_{j-1}}) \cdot [A + \\
& \left. + \frac{B}{2} \cdot (v_j + v_{j-1}) + \frac{C}{2} \cdot (v_j^2 + v_{j-1}^2) \right] \cdot (s_j - s_{j-1}) \left. \right\}
\end{aligned} \tag{8}$$

2.3.1 Consumo de energía

La siguiente función es la última, pero no por ello es la menos importante, esta función representa el ahorro de energía producido por la optimización obtenida por el algoritmo explicado antes. En los ensayos sucesivos permite obtener una medida válida para cuantificar la mejora llevada a cabo por la optimización del consumo. Esto se realizará tomando el *coeficiente de eficiencia de energía* (9).

$$\varepsilon = \frac{\Delta(T_T - T_{Rs})}{(T_T - T_{Rs})_{initial}} \cdot 100 (\%) \quad (9)$$

3. Pruebas

Las pruebas llevadas a cabo en el simulador proporcionarán dos aspectos: primero, la verificación de que el algoritmo escogido es correcto mediante la comparación con el dato actual, y segundo, obvio, el dato que ayuda a interpretar el impacto de los modos de optimización, tomados del trabajo realizado por los frenos reostáticos y regenerativos, tal y como se ha diseñado el algoritmo.

De modo se ha tratado que los ensayos sean consistentes y seguros, siendo el tren y la línea ferroviaria reales. La línea pertenece a una línea metropolitana en Europa, y el material rodante es el que circula en dicha línea.

A continuación se mostrará un ejemplo de análisis usando el algoritmo para tipo de frenado regenerativo, y posteriormente en otro ensayo la gráfica resultado para un ejemplo con frenado reostático para el mismo trayecto.

Ensayo 1

Los datos para este ensayo están en la tabla 1

Acel. máxima	Decel. máxima	Δt	Pk inicial	Vel. inic.	Pk final	Vel. final	Tipo frenado
1m/s ²	-1m/s ²	1s	14324m	0m/s	16205m	0m/s	Regenerativo

Tabla 1 características

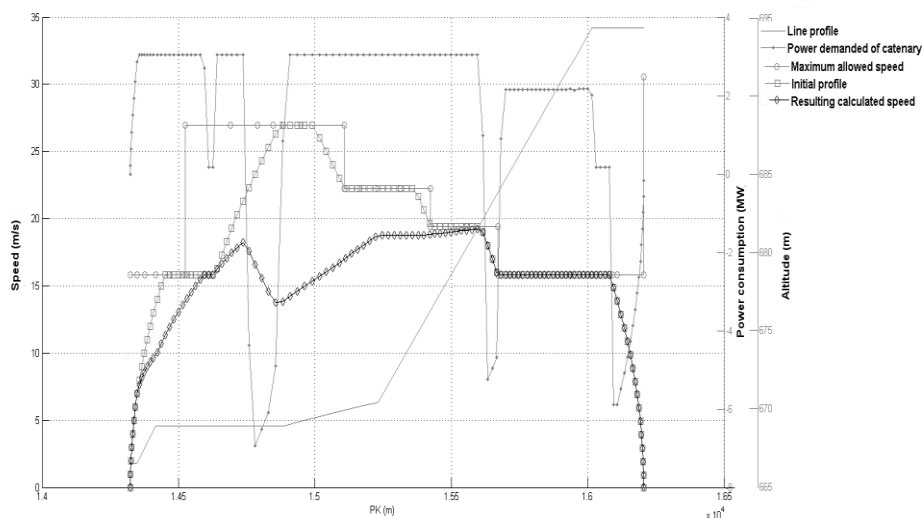


Figura 1 perfil de resultados ensayo 2

Así para el gráfico *figura 1*, este puede ser visto como el perfil inicial creado por el algoritmo, que da lugar al perfil calculado, mostrando en la optimización, que la máxima velocidad permitida, nunca se excede, una vez que se han identificado los límites. También se puede ver que el consumo nunca sobrepasa el máximo permitido (en este caso 3.04 MW). Es necesario señalar que, cuando el tren frena el valor es de -3.04MW que es el máximo para los motores del tren. Sin embargo, esto se ha tenido en cuenta en la función objetivo que solo acepta el máximo que los frenos eléctricos producen el resto de los frenos del tren, por tanto, no forma parte de los términos de optimización.

El resultado y característica más importante revelada por el gráfico es cómo se muestra que el tren acelera inicialmente desde el máximo, debido a que el tren se encuentra en una superficie plana, para luego aplicar la menor tracción posible cuando el tren se encuentra en una rampa y mantiene la velocidad que permite el programa. El tren frena para recuperar energía antes de la rampa y después aplica la máxima tracción hasta que éste comienza a frenar para entrar en la estación. Un análisis a los datos obtenidos, se observa que el trabajo de las fuerzas de resistencia que dependen exclusivamente de la posición del tren se conservan también. Esto no es así para las fuerzas que varían con la velocidad, una vez que la velocidad ha disminuido y por tanto hay una caída de 2MJ en el trabajo realizado, que es aproximadamente, el 23% del trabajo inicial. Sin embargo, esta caída no se aprecia en el trabajo de la tracción total, ya que el orden de magnitud es de cientos en la rampa para superar y permanecer sombreado en la figura.

Ensayo 2

Se realizaron diversos ensayos, tanto en distintos trayectos de la línea como con datos iniciales diversos. Otro ejemplo se puede ver en la figura 2, cuya característica de ensayo principal es que se usó el frenado reostático.

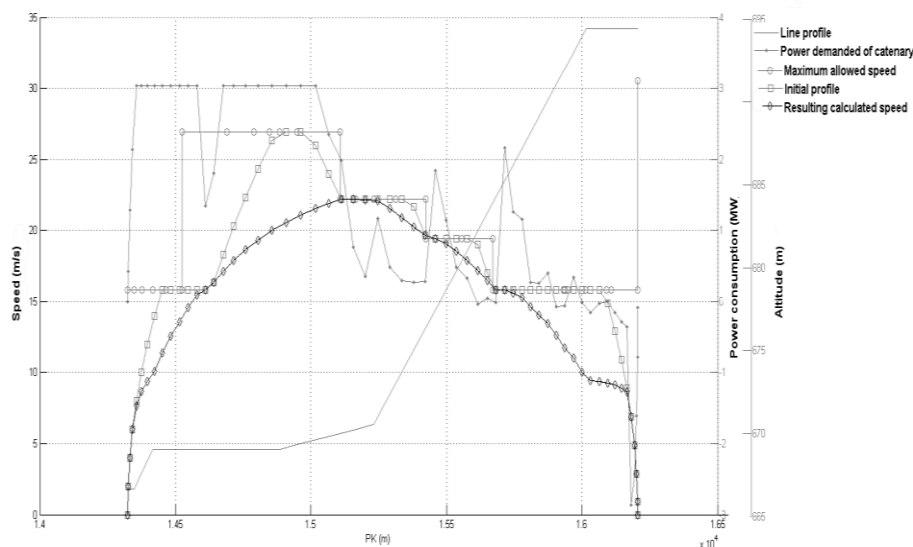


Figura 2. Perfil de resultados ensayo 2

Destaca la suavidad obtenida del perfil de velocidad y el ahorro que se alcanza en el consumo de energía.

Conclusiones

El proceso de ensayo fue amplio y se intentó determinar como la operación de la línea se veía afectada por la topología y los límites de velocidad en las secciones con estrategia de control de conducción con el frenado optimizado. A lo largo de las pruebas realizadas, se ha mencionado el contraste existente cuando se evalúan las mejoras con frenos regenerativos, desde que uno de los factores a ser estudiados debería ser como coordinar la generación de energía cuando hay trenes cerca o la acumulación de dicha energía en el tren o en sistemas en tierra. Sin embargo, a pesar de esto, los porcentajes obtenidos de la estrategia de control de conducción, y particularmente con el método presentado, proporciona en gran medida una información muy valiosa para las políticas de ahorro de energía, cuyas consecuencias la hacen menos dependientes de la generación de energía y el ahorro de costes.

Referencias

- GARCÍA, A. (2007). Análisis sistemático del consumo de energía en líneas ferroviarias metropolitanas, de cercanías y de alta velocidad, con valoración del impacto energético y del resultado económico, incluyendo el desarrollo de modelos y simuladores parametrizables. Proyecto ElecRail.
- ACYKBAS, S. y SOYLEMEZ, M.T. (2008). Coasting point optimisation for mass rail transit lines using artificial neural networks and genetic algorithms. Electrical and electronics Faculty, Istanbul Technical University.
- CHANG, C.S. y SIM, S.S. (1997). Optimising train movements through coast control using genetic algorithms. Dept. of electrical engineering, National University of Singapore.
- PEÑA, M., FERNÁNDEZ, A.P. y CUCALA RAMOS, R.R (2010). Optimal underground timetable design based on power flow for maximizing the use of regenerative-braking energy. Institute for Research in Technology, Comillas Pontifical University, Madrid, Spain.
- CHANG, C.S., XU,D.Y y H.B.Quek (1999). Pareto-optimal set based multiobjective tuning of fuzzy automatic train operation for mass transit system. Dept. of electrical engineering, National University of Singapore.
- HOWLETT, P., PUDNEY, P. y Vu, X. (2005). Calculation of optimal driving strategies for freight trains. Centre for Industrial and Applied Mathematics, University of South Australia.
- HOWLETT, P., PUDNEY, P. y Vu, X. (2007). Freightmiser: An energy-efficient application of the train control problem. Centre for Industrial and Applied Mathematics, University of South Australia. TMG Rail Technology, Sydney, Australia.
- BERTSEKAS, D.P. (1982). Constrained Optimization and Lagrange Multipliers Methods. Academic Press.