

Sistema soporte para la optimización de la electrificación de líneas ferroviarias

José M. García¹, Juan Pavón¹, Ricardo Galán²

¹ Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. C/ Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla. jmgs@esi.us.es

² Aguas y Estructuras, S.A.. Isla de la Cartuja s/n, 41092, Sevilla. rgalan@ayesa.es

Resumen

Este proyecto trata la optimización de la electrificación de líneas ferroviarias. El objetivo es encontrar una configuración en la que queden definidas las posiciones de las subestaciones, las catenarias, transformadores, etc; para alcanzar un coste de operación y fabricación óptimo. Para ello, se utiliza un sistema experto junto con un procedimiento de búsqueda local y un motor de cálculo; que conforman la aplicación "Eukratos". Desde ella se diseña la electrificación ferroviaria restringiendo las características de esta. A su vez, "Eukratos" optimiza el diseño y aumenta la rentabilidad de la electrificación.

Palabras clave: Optimización, sistema soporte, sistemas expertos.

1. Introducción

En la configuración de una línea ferroviaria, es necesario establecer la posición y el número de subestaciones en función del trazado y del tráfico de material rodante que vaya a existir en la misma. En este trabajo describimos una aplicación para dar soporte al proceso global de planificación y optimización energética de líneas ferroviarias.

El objeto del sistema es calcular las pérdidas energéticas que se producen en una línea para una configuración determinada de subestaciones, y a partir de esa información tratar de optimizar la posición y el número de subestaciones, autotransformadores, conductores, longitud y sección de conductores, etc, para minimizar los costes de las instalaciones y los costes energéticos.

El sistema realizará todos los cálculos cinemáticos y dinámicos de los trenes que van a usar la línea, y posteriormente obtendrá las pérdidas eléctricas a partir de una configuración determinada de la línea. Para el cálculo de las pérdidas es necesario realizar una simulación del trayecto de los diferentes trenes por la vía. En cada instante de la simulación se van obteniendo y acumulando los consumos y las pérdidas energéticas que se van produciendo.

Como se ha comentado, con el sistema se pretende optimizar la línea. Ello se consigue mediante procedimientos de búsqueda local en un espacio de soluciones determinado por la posición y número de las subestaciones. Además de ello, el sistema intenta actuar como un sistema experto, utilizando normas de posicionamiento y datos históricos que ayuden a aproximarnos a una configuración idónea.

El trabajo está estructurado de la siguiente forma. En el punto 2 del documento describimos los cálculos cinemáticos necesarios para obtener la velocidad exacta que debe llevar cada tren durante su trayecto por la línea. En el punto 3 presentamos los cálculos de la potencia que necesita cada tren durante el trayecto (cálculos dinámicos) y que se obtienen a partir de los cálculos cinemáticos. Estos cálculos son la base para poder establecer la demanda energética de cada tren en cada instante de la simulación y posteriormente calcular las pérdidas energéticas que se van produciendo, lo cual se describe en el punto 4. En el punto 5 se describe la estructura del proceso de optimización, y en el apartado 6 se presentan las conclusiones más relevantes que hemos extraído hasta el momento de esta investigación.

2. Cálculos cinemáticos

El módulo cinemático se divide en tres etapas. Un primer proceso de simplificación de tramos para depurar los datos del trazado. A continuación se realiza el cálculo de la velocidad máxima permitida en cada tramo del trazado y finalmente se calcula el perfil de circulación (Alberto García Álvarez, 2007).

2.1. Simplificación de tramos

Los trazados de líneas vienen estructurados por tramos, según un formato general establecido por RENFE y denominado ISPOL. Es frecuente encontrar entre los datos correspondientes del trazado tramos consecutivos con las mismas características. Por ello, es necesario depurar estos archivos para simplificar y reducir la información de los trazados. Con ello se mejora el coste computacional global.

2.2. Velocidad máxima permitida

La velocidad máxima permitida es impuesta mediante una doble restricción, una primera debida a las características del trazado y una segunda debida a las características del material rodante.

La primera se debe a la señalización de circulación del trazado (estaciones, límites de velocidad en determinadas zonas, etc) y al propio trazado (radio de curvas, pendientes y rampas y túneles), mientras que la segunda se debe a la potencia máxima desarrollable por el material rodante dada la velocidad a la cuál circula.

2.3. Cálculo del perfil de circulación.

El perfil de circulación es el resultado de la incapacidad del material rodante para acelerar y decelerar instantáneamente, dando lugar a la existencia de rampas de aceleración y deceleración. Para obtener el perfil de circulación se calculan los puntos kilométricos que determinan dichas rampas para una circulación en la que el material rodante intente circular siempre a la máxima velocidad permitida, a la vez que respete los límites de confort de los pasajeros. La figura 1 muestra un ejemplo ilustrativo del cálculo del perfil de circulación y cotas de velocidad máxima de un trazado.

3. Cálculos dinámicos

En el módulo dinámico se calcula la potencia que consume el material rodante, que depende a su vez de las propias características del material rodante (potencia del material rodante, aerodinámica del mismo, caudal de aire para la refrigeración de los motores y ventilación del pasaje, masa, longitud, etc), de las características del trazado (radio de las curvas, rampas y pendientes, túneles, etc) y también de las características atmosféricas (densidad del aire, presión y temperatura atmosférica) (Alberto García Álvarez, 2007).

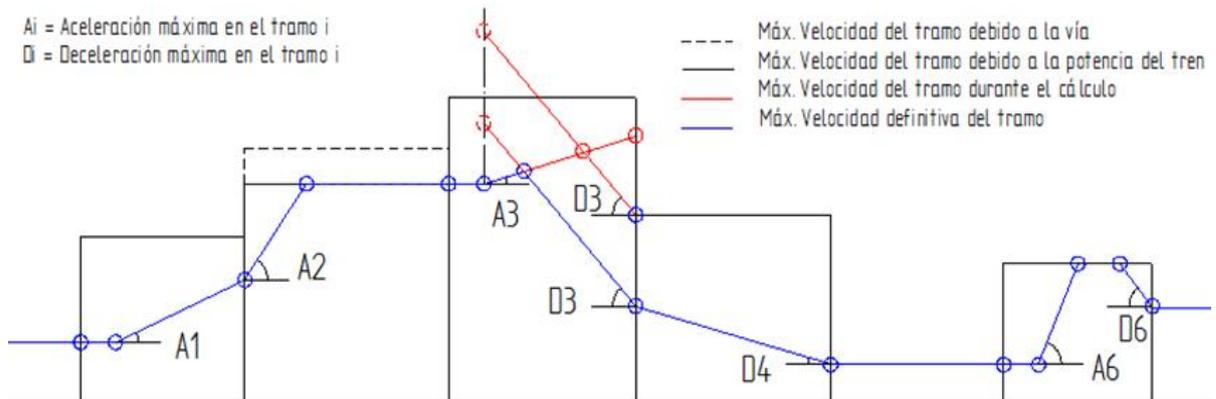


Figura 1. Ejemplo de perfil de circulación.

Para su cálculo, se utiliza el perfil de velocidad de cada uno de los trenes y el perfil del trayecto obtenidos en el punto anterior. Ambos perfiles se recorren para obtener los datos en cada paso durante la simulación y posteriormente se introducen en las expresiones que generan los resultados de este módulo, la potencia consumida por cada tren en el instante y punto kilométrico que se consume.

4. Módulo eléctrico

En el módulo eléctrico se obtienen las pérdidas energéticas a partir de los cálculos cinemáticos y dinámicos del material rodante simulado para la línea, y de la configuración de los componentes eléctricos, con especial importancia a la ubicación de subestaciones y lo que dicha ubicación conlleva (longitud, número y sección de los conductores, valor de las intensidades a transportar, etc). Los cálculos se obtienen mediante una simulación eléctrica con periodo de cálculo constante t , es decir, se simula la electrificación y se obtienen los datos de potencia y consumo tras cada periodo de tiempo t . El módulo se puede estructurar en cuatro procedimientos:

1. Establecimiento de parámetros eléctricos.
2. Simulación eléctrica: En cada instante de cálculo de la simulación es necesario realizar los siguientes procesos: Ubicación de los puntos de consumo; Montaje y resolución; Post-procesado y almacenamiento de datos (detallados en las siguientes secciones).

4.1. Establecimiento de parámetros eléctricos

En esta primera parte se calculan los parámetros por unidad de longitud de las catenarias utilizadas en la simulación, es decir, los valores por unidad de longitud de las

impedancias que las modelan. Así mismo, se carga al sistema la ubicación de las subestaciones, autotransformadores, límites de los subsectores, etc.

Además, el sistema soporte debe distinguir la configuración del trazado. En este sentido se presentan diferentes alternativas:

- Trazado alimentado por corriente alterna o corriente continua.
- En caso de corriente alterna, sistema de transporte eléctrico 1x25 kv ó 2x25 kv.
- Trazado de una sola vía o doble vía.

El establecimiento de los valores de estas características implica un modelado diferente del circuito eléctrico y un algoritmo de resolución también específico de cada situación (Eduardo Pilo de la Fuente, 2003).

4.2. Ubicación de los puntos de consumo

En cada instante de paso t de la simulación, los datos necesarios para el cálculo del coste energético son el consumo (potencia demandada por el material rodante) y la posición de cada uno de ellos (Punto Kilométrico en el que se encuentra). En esta primera parte, dichos consumos se ordenan mediante su posición, asignándose al subsector al que corresponden y en el caso de una simulación en doble vía en su correspondiente vía. Estos datos junto con los datos cargados al sistema en el punto 4.1 definen el circuito a resolver.

4.3. Diseño del circuito y resolución

Una vez obtenido el consumo y posición en el trazado de cada tren en el instante de paso de la simulación, es necesario modelar el circuito eléctrico que se configura en la línea y resolverlo.

Cada subsector de una subestación forma un circuito, o bien cada pareja de subsectores análogos (configuración de doble vía). Por otro lado, en corriente continua (los anteriores son corriente alterna) existiendo un único circuito. Por ello, el modelo del circuito dependerá de la configuración eléctrica del trazado.

Para la resolución de los circuitos, en la mayoría de los casos, se necesita la aplicación de métodos matemáticos para la resolución de sistemas no lineales que se encuentran intercalados en subrutinas de algoritmos iterativos. En el proyecto hemos utilizado como método de resolución para sistemas no lineales el método “H-Newton”, (N. S. Hoang, A. G. Damm, 2009). Sin embargo, aunque la rutina del algoritmo “H-Newton” no varíe con el circuito, si lo hace el sistema a resolver y también las matrices que utiliza dicho método para resolver el sistema no lineal.

4.4. Post-procesado y almacenamiento de datos

En la última fase de cada paso de la simulación, se procesan los resultados obtenidos de la resolución de los circuitos; cálculo de pérdidas eléctricas (efecto Joule, acoplamiento magnéticos, inducciones, etc), rendimiento eléctrico, factor de potencia en las subestaciones, temperatura de funcionamiento de los conductores, autotransformadores (para 2x25 kv) y transformadores, tensiones de contacto, corrientes de paso, etc, y se calculan otros datos derivados de éstos últimos como las puestas a tierra.

5. Optimización

El módulo de optimización se encarga de minimizar el coste global de la electrificación, es decir, el coste de fabricación (número y posición de subestaciones, subsectores, autotransformadores, conductores, etc) y el coste de funcionamiento (pérdidas en el transporte, desequilibrios introducidos en la red de transporte, inducciones generadas a líneas paralelas, etc). La metodología utilizada es la propia de un método heurístico de búsqueda local (Díaz et al, 1996).

5.1. Estructura del optimizador

Visualizando de una forma esquemática la estructura del optimizador, esta se compone de una memoria o inteligencia, un motor y una base de datos referente con las referencias y características de los componentes de la red eléctrica ferroviaria (subestaciones tipo, catenarias, conductores, autotransformadores, etc).

-Memoria o inteligencia

La memoria o inteligencia proporciona la capacidad de aprendizaje al optimizador y se compone de una base de datos y un conjunto de funciones y subfunciones con la que cotejar datos. La base de datos está formada por los resultados de líneas ferroviarias ya calculadas y optimizadas y dispone de información diversa al respecto como la disposición de las subestaciones, subsectores y autotransformadores, tipo de las catenarias utilizadas y sus propiedades, tipo de conductores usados, perfiles de consumo y velocidad de las cargas en ejes espacio-tiempo, etc. Por su parte, las funciones para cotejar resultados se encargan de trazar el camino más rápido hasta la solución óptima.

-Motor

El motor del optimizador lo forman varios módulos componentes de la aplicación; módulos cinemático, eléctrico y módulos de resolución de circuitos eléctricos ferroviarios, así como otros auxiliares a estos. Su función es la de generar datos a partir de una configuración propuesta por la inteligencia, posible solución óptima.

El usuario podrá interactuar con el motor mediante la modificación de los parámetros que controlan los errores admisibles de cálculo y de esta manera disminuir el tiempo computacional sacrificando la exactitud de los resultados. Existe además la opción de variar el valor de los errores admisibles, haciendo que éstos sean mayores al comienzo de la simulación y menores al final, provocando el efecto de una exploración superficial al comienzo y una exploración en detalle al final.

-Base de datos referente

Dispone de todos los datos, características y propiedades de las subestaciones de tracción, catenarias, subsectores, autotransformadores, conductores, trenes, geometría del trazado, etc. Su función es la de proporcionar esta información a la inteligencia y al motor.

5.2. Forma de operar del optimizador

Para encontrar una solución óptima o suficientemente cercana a la óptima, el optimizador sigue la siguiente rutina.

1.-Obtiene las características básicas generales de la línea ferroviaria a calcular, es decir, perfiles de consumo y velocidad, posibles lugares para disponer las subestaciones de tracción, tipos de catenarias, conductores y autotransformadores disponibles, etc.

2.-Coteja los resultados obtenidos en el paso 1 con la base de datos de la memoria, obteniendo como resultado una configuración inicial propuesta por la memoria en base a similitudes con una simulación ya optimizada. La configuración de dicha propuesta se obtiene en parte de la base de datos referente (características y propiedades de subestaciones de tracción, catenarias, conductores, etc) y en parte a partir de una extrapolación de los datos de esa simulación ya calculada (posición de las subestaciones, autotransformadores, etc). Además, se contempla la posibilidad de utilizar varias soluciones de partida en el proceso de búsqueda, de forma que el espacio de soluciones chequeadas sea más amplio.

3.-El motor resuelve la configuración propuesta. Es importante resaltar que los cálculos de una configuración determinada pueden implicar un tiempo de proceso elevado, dependiendo de la longitud del trazado, el número de trenes y sobre todo, del tamaño del periodo de cálculo t en la simulación.

4.-La inteligencia verifica la optimalidad de la configuración resuelta y en su defecto propone una nueva configuración. En el caso de ser óptima la configuración ya resuelta en el paso 3, se la rutina continúa en el paso 5. En caso contrario se vuelve al caso 3.

En caso de volver al paso 3, en el paso 4 se propone un procedimiento sencillo de búsqueda local para el paso de una solución a otra, siguiendo un criterio de vecindad ligado al movimiento/ incorporación o eliminación de subestaciones, cambios en las catenarias usadas, cambios en los conductores, etc. Esta vecindad es una posible configuración de la electrificación y deberá estar entre aquellas configuraciones compatibles y viables según un conjunto de normas establecidas en el sistema soporte.

Criterios para la generación de vecindades.

El sistema experto tendrá en cuenta las vecindades ya simuladas, evitando la simulación de vecindades similares a aquellas que generaron un valor de la función objetivo inferior al óptimo actual en un determinado porcentaje que fija el usuario de "Eukratos". El criterio usado para comparar las vecindades atiende a todas las características de la vecindad.

El sistema experto evitará vecindades semejantes a otras ya simuladas. El criterio de similitud usado para la comparación de las vecindades será definido por el usuario pudiendo ser exclusivamente referido a la posición de las subestaciones por ejemplo, a la configuración de la catenaria sobre la longitud del trazado, etc; quedando el criterio abierto respecto el número de características a comparar entre las vecindades.

5.-La última configuración resuelta cumple los criterios de optimalidad prefijados. Se muestran por pantalla los datos y gráficos que el usuario demanda y se almacenan en la base de datos de la memoria todos los datos, propiedades y características de la solución final para disponer de ellos en futuras optimizaciones.

También, en caso de desearse; es posible acceder a otras vecindades calculadas en la simulación, que aún no siendo óptimas generan un valor de la función objetivo cercano al valor de la vecindad óptima. Esta opción deberá ser notificada a "Eukratos" antes de ejecutar la simulación. Además, en el caso de elegirse como electrificación óptima (elección del equipo de diseño) una vecindad que resultó no ser la óptima, se ofrece la posibilidad de incorporarla en la base de datos de la memoria con una notificación que indique la causa por la que se eligió dicha electrificación frente a la óptima. En cualquier caso, la vecindad óptima encontrada por "Eukratos" se mantendrá en dicha base de datos para posteriores simulaciones.

6. Conclusiones

En este trabajo se presenta un proyecto de investigación en el que estamos actualmente trabajando para la optimización de costes globales en líneas ferroviarias. Para el cálculo de costes, referidos a costes de instalaciones y energéticos, es necesario obtener los valores de velocidad y potencia de los trenes que participan en la simulación de tráfico en la línea, y en una segunda fase, obtener los cálculos de pérdidas energéticas, según una configuración preestablecida de los parámetros eléctricos de la línea.

La principal conclusión extraída hasta el momento en la investigación se dirige a la magnitud y complejidad en cada uno de los módulos de cálculo que es necesario realizar para obtener el coste de una simulación, que van desde cálculos cinemáticos, dinámicos y fundamentalmente, eléctricos.

Además de todo ello, la optimización obliga a iterar estos cálculos un número indefinido de iteraciones, determinado por un procedimiento de búsqueda local. Actualmente nos encontramos en la fase de establecer los movimientos más adecuados para la definición de vecindad de una solución.

El trabajo supone un reto para los investigadores que trabajamos en el mismo, puesto que además de utilizar herramientas de optimización, tenemos que utilizar bastantes conocimientos de otras disciplinas de la ingeniería.

Agradecimientos

Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en el proyecto de investigación “Nuevas metodología para el ahorro energético en la planificación de líneas ferroviarias”, de referencia 84.13.14, financiado por la agencia IDEA, perteneciente a la Conserjería de Innovación, Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía, y realizado en colaboración con la empresa Agua y Estructuras S.A. (AYESA).

Referencias

Diaz A., Glover F. Ghaziri H.M., Gonzalez J.L., Laguna M., Moscato P. and Tseng F.T. (1996), Optimización heurística y Redes neuronales en Dirección de operaciones e Ingeniería. Editorial Paraninfo. ISBN: 84-283-2269-4.

Eduardo Pilo de la Fuente, (2003). Tesis doctoral: Diseño óptimo de la electrificación de ferrocarriles de alta velocidad, Universidad Pontificia Comillas de Madrid, 2003.

Alberto García Álvarez, (2007). Dinámica de los trenes de alta velocidad. ISBN: 978-84-89649-18-7.

Hoang, N. S., Damm, A. G. (2009). Dynamical Systems Gradient Method for Solving Nonlinear Equations with Monotone Operators. ISSN 0167-8019, Vol. 106, N° 3.

Hwang H. S, (1998). Control strategy for optimal compromise between trip time and energy consumption in high-speed rail way. IEEE Transactions on systems, Man and Cybernetics, Part A 28 (No 6): 791-802.

UIC Union des Chemins de Fer, (2002). Characteristics of a.c. overhead contact systems for high-speed lines worked at speeds over 200 km/h. (UIC-799).