

Operación mixta de una línea de ferrocarril. Análisis de capacidad y gestión de material rodante.

David Canca¹

¹ Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Av. De los Descubrimientos s/n, 41092. Sevilla.
dco@us.es

Keywords: Transporte por ferrocarril, Transporte mixto, Scheduling, Capacidad.

1. Introducción

La política de la UE en materia de transporte muestra una decidida apuesta por la utilización del transporte ferroviario. Esta línea de acción es consecuencia de los problemas de congestión, emisiones y consumo energético derivados del transporte por carretera. La revisión de seguimiento de 2006 del plan de acción publicado en 2001 (véase Política de Transporte de la UE 2001-2010), señalaba como acciones prioritarias el incremento de la competitividad del ferrocarril, la introducción de una política portuaria, el desarrollo de sistemas inteligentes de transporte, el cobro por el uso de infraestructuras, el aumento de la producción de biocombustibles y el estudio de medidas de descongestión de las ciudades.

En España, la puesta en marcha de la liberalización del transporte por ferrocarril se ha traducido en la separación de la prestación de servicios de transporte y el mantenimiento de las infraestructuras. En los dos últimos años, numerosas empresas estudian la posibilidad de entrar a formar parte de este negocio, ofertando servicios de transporte. Se presentan entonces nuevos retos que van dirigidos a la posibilidad de transporte mixto (pasajeros y mercancías en las mismas unidades rodantes) o simultáneo (pasajeros y mercancías compartiendo la red de manera entrelazada y simultánea) en un ambiente multi-proveedor.

El presente trabajo, a partir de un modelo mixto de rescheduling y diseño de horarios, analiza la capacidad real de las infraestructuras compartidas por diferentes proveedores de servicios desde el punto de vista de un nuevo operador que desea diseñar la oferta de nuevas líneas de transporte*.

2. Análisis del problema

La literatura sobre mejora de procesos de reprogramación de trenes es amplia. Feng Li (2008) describe el proceso de reprogramación a un nivel abstracto basado en información global del tren. Mazzarello y Ottaviani (2005) van un paso más allá, analizando un proceso de reprogramación para un sistema de dirección de tráfico en tiempo real. Wegele y Schnieder (2004) proponen un sistema automático de dispatching. Algunos otros artículos describen la arquitectura de nuevos sistemas de gestión o se centran en el desarrollo de modelos matemáticos y algoritmos de optimización para la resolución de conflictos entre unidades rodantes Gely (2006), D' Ariano et al. (2007, 2008), Peetersa et al. (2008).

La mayoría de los trabajos publicados se concentran en algoritmo para generar nuevos lanzamientos, sin considerar cuándo y cómo se debe reiniciar el proceso de reprogramación. Tampoco, excepto Abril (2008), se recoge un análisis de capacidad de las infraestructuras que sirvan de base a la toma de decisiones de nuevos lanzamientos.

El trabajo presenta un conjunto de modelos de optimización que permiten el estudio de la capacidad de las infraestructuras basados en modelos de rescheduling y diseño de horarios. El interés inicial radica en conocer qué número potencial de trenes pueden ser programados en los intervalos libres existentes. Se presentan varias formulaciones que proponen modelos cada vez más complejos. Se analiza la conveniencia de modificaciones en las infraestructuras de las estaciones con el objeto de permitir solapamientos y adelantamientos de trenes detenidos.

Los resultados se ilustran con diversos experimentos y se analiza el impacto sobre la capacidad de posibles modificaciones en las infraestructuras. Se propone finalmente un modelo que combina el análisis de la capacidad con la gestión del material rodante (rolling stock)

3. Conceptos básicos

Tren fijo: llamamos así a los trenes cuyo scheduling ha sido fijado a priori (Normalmente pertenecerán a otros proveedores de servicio). Para estos trenes se conoce su origen, destino, velocidades en cada tramo, estaciones de parada. Los trenes fijos pueden la totalidad de la línea o sólo una parte de ella con los servicios que se desea introducir. El modelo no puede tomar ninguna decisión sobre estas unidades.

Tren no fijo: llamamos así a los trenes que se deben programar. Usualmente son los trenes de la compañía que desea prestar nuevos servicios en esa línea. Estos trenes deberán ocupar las holguras de tiempo libre sobre las líneas de la red.

Tipo de tren: se considerarán diversos tipos de trenes, tanto en el caso de trenes fijos como no fijos. Básicamente la diferencia en los trenes se centra en la velocidad de crucero. Cada tipo vendrá caracterizado por un rango de velocidades.

Orden de los trenes: El orden hace referencia a la secuencia temporal del instante de salida de los trenes en la estación origen. Si no se considera la posibilidad de adelantamiento (por ejemplo debido a la inexistencia de infraestructuras adecuadas en las diferentes estaciones), el orden permanece invariable durante todo el trayecto. Como se discutirá posteriormente, el análisis del orden en que se secuencian las unidades rodantes afecta a la comparación entre cada tren no fijo y la totalidad de trenes fijos. Se justificará la no necesidad de analizar ordenaciones diferentes entre trenes no fijos. Esta consideración elimina un importante número de variables y restricciones en el modelo.

Estación: es el único lugar de la red ferroviaria en el que los trenes pueden parar, solapar con otros trenes, y adelantar o ser adelantados. En el caso en que se desee, en el modelo que se presenta, es posible permitir que determinados trenes no se detengan en una estación si de esta manera se mejora el rendimiento global en la línea en cuanto a capacidad. En ciertos casos, la estructura de un tramo vial dispone de aparcaderos que permiten que un tren sea rebasado por otro o que una misma vía sea utilizada en ambos sentidos de circulación. A todos los efectos, este tipo de infraestructuras podrán ser consideradas como estación.

Segmento: es el trozo de vía de la red ferroviaria que une dos estaciones. Cada segmento se caracteriza por su origen, destino y longitud.

Solape: situación que se presenta cuando dos (o más) trenes coinciden en una estación durante cierto intervalo de tiempo, de forma que las llegadas y salidas de la estación siguen una disciplina FIFO.. Para que pueda existir solape es indispensable que la estación disponga de andenes suficientes, es decir, que existan tantas vías como sean necesarias para albergar los trenes en paralelo mientras están detenidos.

Un solape múltiple de n trenes equivale a $\binom{n}{2}$ solapes individuales.

Adelantamiento: Situación que se produce entre dos trenes, en una determinada estación, cuando ambos coinciden durante un cierto intervalo de tiempo de forma que se sigue un comportamiento LIFO. Para que pueda haber adelantamiento es indispensable que en la estación haya andenes de espera suficientes.

Es posible que de manera simultánea se produzca solape entre dos trenes y alguno o ambos sean adelantados por un tercero.

4. Modelo matemático del problema.

4.1. Parámetros.

La definición de cada línea en estudio necesita la especificación de un conjunto de parámetros. Concretamente el número de estaciones, los diferentes segmentos, las características de las estaciones, tiempo de seguridad en la llegada y salida de los trenes, tiempos mínimo y máximo de parada para la recogida de pasajeros (nótese que nos encontramos en fase de diseño y por tanto puede ser interesante retrasar un tren para permitir el paso de otro, de ahí que este tiempo se considere variable).

Parámetros globales.

TM	Límite del horizonte temporal de programación expresado en minutos.
N	Conjunto de trenes no fijos a secuenciar.
NF	Conjunto de trenes fijos definidos en la línea/s en estudio.
Cte	Constante de valor indeterminado mayor que TM.

Parámetros y datos asociados a estaciones.

ESP _i	Posibilidad de solape o adelantamiento en la estación i (1=Sí, 0=No).
NTESP _i	Parámetro de valor entero que representa el número máximo de trenes que pueden estacionar en paralelo, simultáneamente, en la estación i .
TSEG _i	Tiempo de seguridad mínima entre trenes al entrar/salir de la estación i .
TSTP _i	Tiempo mínimo de parada de un tren en la estación i .
TMAXSTOP _i	Tiempo máximo de parada de un tren en la estación i .

Parámetros y datos asociados a trenes.

ORF _s /OR _s	Estación de origen tren fijo/tren no fijo s .
DES _s /DES _s	Estación de destino tren fijo/tren no fijo s .
HSALF _s	Hora de salida de tren fijo s desde estación de inicio de su recorrido.
TIPOF _s /TIPO _s	Tipo de tren fijo/no fijo s . En realidad, en el modelo propuesto, la elección del tipo para trenes no fijos se realiza a posteriori en una segunda etapa, a partir de los resultados, si bien este parámetro condiciona la velocidad de recorrido.
MAXNOPAR _s	Nº máximo permitido de estaciones en las que un tren no fijo puede no detenerse.

$AF(s,i)/A(s,i)$	Matrices auxiliares binarias de datos de dimensión el número de trenes fijos/no fijos (respectivamente) por el número de estaciones, cuyos elementos toman valor 1 si la trayectoria del tren pasa físicamente por la estación. Mediante estas matrices se define el poso de trenes por estaciones. Estas matrices se usan exclusivamente para facilitar la formulación del problema. Se pueden obtener de manera trivial a partir de los parámetros ORF/OR y DESF/DES.
$x_{AF}(s, i)$	Instante de llegada del tren fijo s a la estación i , medido en minutos.
$x_{DF}(s, i)$	Instante de salida del tren fijo s de la estación i , medido en minutos.
$PARAF_i^s$	Parámetro binario que toma el valor 1 si el tren fijo s se detiene en la estación i .
$TSTOPF_i^s$	Es el tiempo real de parada (diferencia entre x_{DF} y x_{AF}) del tren fijo s en la estación i (Éste valor estará acotado por el tiempo mínimo de parada TSTP y el tiempo máximo TMAXSTOP).
V_m^s	Velocidad media del tren fijo s en el segmento m , medida en km/h. En este trabajo se considerará constante en cada segmento y variable a lo largo de la vía.

Obsérvese que para cada tren no fijo se impone de manera global el número máximo de estaciones en que éste puede no detenerse. Posiblemente hubiera resultado más real imponer la condición de manear aislada estación por estación, de esta manera se podría imponer la obligación de detenerse en alguna estación concreta. No obstante, la situación modelada puede ser reducida a la propuesta de manera sencilla mediante un vector binario de de datos que obligue a la detención. Este punto se comentará posteriormente.

4.2. Variables.

En este epígrafe se relacionan las variables del modelo.

$x_A(s, i)$	Instante de llegada del tren no fijo s a la estación i , medido en minutos.
$x_D(s, i)$	Instante de salida del tren no fijo s de la estación i , medido en minutos.
$PARA(s, i)$	Variable binaria que toma el valor 1 si el tren no fijo s se detiene en la estación i .
$TSTOP(s, i)$	Tiempo de parada (diferencia entre x_D y x_A) del tren no fijo s en la estación i . TSTOP variará entre TSTP y TMAXSTOP, propiedades definidas para cada estación.
V_m^s	Inversa de la velocidad media del tren no fijo s en el segmento m , medida en h/km. Toma valores entre un máximo y un mínimo, según el tipo de tren de que se trate.
B_j^{st}	Binaria: Toma valor 1 si el tren fijo s ha llegado antes que el no fijo t a la estación, y toma valor 0 en caso contrario o en caso de que el tren no fijo no pase por dicha estación.
$SOLAPEF_j^{st}$	Binaria: Toma valor 1 si hay solape entre el tren fijo s y el no fijo t en la estación j , y toma valor cero en caso contrario.
$SOLAPE_j^{st}$	Binaria: Toma valor 1 si hay solape entre el tren no fijo s y el otro no fijo t en la estación j , y toma valor cero en caso contrario.

$ADEL F_j^{st}$

Binaria: Toma valor 1 si hay adelantamiento entre el tren fijo s y el no fijo t (puede haber adelantamiento del tren fijo al no fijo y viceversa, según qué tren haya llegado antes, lo cual viene reflejado en la variable B), y toma valor 0 si no hay adelantamiento entre ambos trenes.

 L_s

Variable binaria que tomará el valor 1 si el tren no fijo s se programa para su inclusión en el scheduling de nuevos trenes y cero en caso contrario.

4.3. Restricciones.

A continuación se expone el modelo matemático, comenzando por las restricciones, ordenadas según diferentes casos, seguidas de la función objetivo.

Restricciones tipo 1. Ordenación de trenes no fijos.

$$x_D(s, i) \geq x_D(s-1, i) \quad s_{no\ fijo} > 1, \quad i = 1 \quad (1.1)$$

Restricciones tipo 2- Control de la VARIABLE de programación de trenes no fijos L_s :

$$\begin{aligned} x_A(s, i) - TM &\leq Cte(1 - L_s) \quad \forall s_{no\ fijo} \in N, \forall i \\ x_D(s, i) - TM &\leq Cte(1 - L_s) \quad \forall s_{no\ fijo} \in N, \forall i \end{aligned} \quad (2.1)$$

Restricciones tipos 3,4,5- Condiciones de solape y adelantamiento:

Restricciones 3.1.- solape y adelantamientos:

Las siguientes restricciones se cumplen

$$\forall k_{fijo} \in N, \forall s_{no\ fijo} \in N, \forall j \mid PARAF_j^k = 1$$

A) Si k va delante de s . Es decir, $B_j^{ks} = 1$ para los siguientes casos:

A.1) Si NO hay solape ni Adelantamiento. $SOLAPEF_j^{ks} = 0$ y $ADEL F_j^{ks} = 0$:

$$\begin{aligned} x_{DF}(k, j) + TSEG_j &\leq x_A(s, j) + Cte(1 - B_j^{ks}) + \\ &+ Cte(SOLAPEF_j^{ks}) + Cte(ADEL F_j^{ks}) \end{aligned} \quad (3.1)$$

A.2) Si existe solape. $SOLAPEF_j^{ks} = 1$. No puede haber adelantamiento,

$$ADEL F_j^{ks} = 0:$$

$$\begin{aligned} x_{AF}(k, j) + TSEG_j &\leq x_A(s, j) + Cte(1 - B_j^{ks}) + \\ &+ Cte(1 - SOLAPEF_j^{ks}) + Cte.ADEL F_j^{ks} \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} x_{DF}(k, j) + TSEG_j &\leq x_D(s, j) + Cte(1 - B_j^{ks}) + \\ &+ Cte(1 - SOLAPEF_j^{ks}) + Cte.ADEL F_j^{ks} \end{aligned} \quad (3.3)$$

A.3) Si existe adelantamiento, entonces no hay solape. $ADEL F_j^{ks} = 1$ y

$$SOLAPEF_j^{ks} = 0:$$

$$\begin{aligned} x_{AF}(k, j) + TSEG_j &\leq x_A(s, j) + Cte(1 - B_j^{ks}) + \\ &+ Cte.SOLAPEF_j^{ks} + Cte(1 - ADEL F_j^{ks}) \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned}
x_D(s, j) + TSEG_j &\leq x_{DF}(k, j) + Cte(1 - B_j^{ks}) + \\
&+ Cte SOLAPEF_j^{ks} + Cte(1 - ADEL F_j^{ks})
\end{aligned} \tag{3.5}$$

B) Si K va detrás de S. Es decir, $B_j^{ks} = 0$, para los siguientes casos:

B.1) Si NO hay solape ni adelantamiento. $SOLAPEF_j^{ks} = 0$ y $ADEL F_j^{ks} = 0$:

$$\begin{aligned}
x_D(s, j) + TSEG_j &\leq x_{AF}(k, j) + Cte B_j^{ks} + \\
&+ Cte SOLAPEF_j^{ks} + Cte ADEL F_j^{ks}
\end{aligned} \tag{3.6}$$

B.2) Si existe solape. $SOLAPEF_j^{ks} = 1$. No puede haber adelantamiento, $ADEL F_j^{ks} = 0$:

$$\begin{aligned}
x_A(s, j) + TSEG_j &\leq x_{AF}(k, j) + Cte B_j^{ks} + \\
&+ Cte(1 - SOLAPEF_j^{ks}) + Cte ADEL F_j^{ks}
\end{aligned} \tag{3.7}$$

$$\begin{aligned}
x_D(s, j) + TSEG_j &\leq x_{DF}(k, j) + Cte B_j^{ks} + \\
&+ Cte(1 - SOLAPEF_j^{ks}) + Cte ADEL F_j^{ks}
\end{aligned} \tag{3.8}$$

B.3) Si SÍ hay adelantamiento, entonces no hay solape. $ADEL F_j^{ks} = 1$ y $SOLAPEF_j^{ks} = 0$:

$$\begin{aligned}
x_A(s, j) + TSEG_j &\leq x_{AF}(k, j) + Cte B_j^{ks} + \\
&+ Cte SOLAPEF_j^{ks} + Cte(1 - ADEL F_j^{ks})
\end{aligned} \tag{3.9}$$

$$\begin{aligned}
x_{DF}(k, j) + TSEG_j &\leq x_D(s, j) + Cte B_j^{ks} + \\
&+ Cte SOLAPEF_j^{ks} + Cte(1 - ADEL F_j^{ks})
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Relaciones 3.2. entre variables binarias para restricciones tipo 3.

$$\begin{aligned}
1 - B_j^{ks} &\leq L_s \\
SOLAPEF_j^{ks} &\leq ESP_j \\
ADEL F_j^{ks} &\leq ESP_j \\
SOLAPEF_j^{ks} + ADEL F_j^{ks} &\leq 1
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Restricciones tipo 4.1.- SOLAPE entre 2 trenes no fijos:

Las restricciones 4 se cumplen

$$\forall s_{no\ fijo} \in N, t_{no\ fijo} > s_{no\ fijo}, \forall j$$

1) Si NO hay solape:

$$x_D(s, j) + TSEG_j \leq x_A(t, j) + Cte SOLAPE_j^{st} \tag{4.1}$$

2) Si existe solape:

$$x_A(s, j) + TSEG_j \leq x_A(t, j) + Cte(1 - SOLAPE_j^{st}) \tag{4.2}$$

$$x_D(s, j) + TSEG_j \leq x_D(t, j) + Cte(1 - SOLAPE_j^{st}) \quad (4.3)$$

Restricciones tipo 4.2.- Relaciones entre variables binarias:

$$SOLAPE_j^{st} \leq ESP_j \quad (4.4)$$

Restricciones tipo 5.1.- Limitación del número de trenes que solapan en estaciones.

A.- Para trenes NO FIJOS:

Estaciones con $NTESP_i=0$ ó 1 :

$$\sum_k SOLAPEF_i^{ks} + \sum_k ADELFI_i^{ks} + \sum_t SOLAPE_i^{st} = 0 \quad (5.1)$$

$$\forall s_{no\ fijo} \in N, \forall i \mid NTESP_i = 0, 1$$

Estaciones con $NTESP_i \geq 2$:

$$\sum_k SOLAPEF_i^{ks} + \sum_k ADELFI_i^{ks} + \sum_t SOLAPE_i^{st} \leq NTESP_i - 1 \quad (5.2)$$

$$\forall s_{no\ fijo} \in N, \forall i \mid NTESP_i \geq 2$$

B.- Para trenes FIJOS:

Estaciones con $NTESP_i=0$ ó 1 :

$$\sum_s SOLAPEF_i^{ks} + \sum_s ADELFI_i^{ks} = 0 \quad (5.3)$$

$$\forall k_{fijo} \in N, \forall i \mid NTESP_i = 0, 1$$

Estaciones con $NTESP_i \geq 2$:

$$NTESP(i) - 1 \geq \sum_s SOLAPEF_i^{ks} + \sum_s ADELFI_i^{ks} \quad (5.4)$$

$$\forall k_{fijo} \in N, \forall i \mid NTESP_i \geq 2$$

Restricciones 5.2. de simetría en los solapes.

$$SOLAPE_i^{st} = SOLAPE_i^{ts}; \forall s_{no\ fijo} \in N, \forall t_{no\ fijo} \neq s_{no\ fijo}, \forall i \quad (5.5)$$

Restricciones tipo 6.- Reducción de las variables de orden.

Restricciones 6.1.- Para las estaciones i por las que pasa el tren fijo k y en las que no haya andén de espera, no puede haber adelantamiento y, por tanto, el orden no puede cambiar:

$$B_i^{ks} = B_{i-1}^{ks} \quad (6.1)$$

$$\forall k_{fijo} \in N, \forall s_{no\ fijo} \in N, DESF_k > i > ORF_k, i \mid ESP_i = 0$$

Restricción 6.2.- Para las estaciones por las que no pasa el tren k, obligamos a que las variables de orden se anulen.

Para las estaciones antes de la de origen del tren fijo k:

$$B_i^{ks} = 0; \forall k_{fijo} \in N, \forall s_{no\ fijo} \in N, ORF_k > i \geq 1 \quad (6.2)$$

Para las estaciones después de la de destino del tren fijo k:

$$B_i^{ks} = 0; \forall k_{fijo} \in N, \forall s_{no_fijo} \in N, I_{m\acute{a}x} \geq i > DESF_k \quad (6.3)$$

Restricciones tipo 7.- Condiciones de velocidad de trenes no fijos en cada segmento:

$$\left(\frac{1}{V_{MAX}(TIPO^s)} \right) \leq V_m^s \leq \left(\frac{1}{V_{MIN}(TIPO^s)} \right) \quad \forall s_{no_fijo} \in N, \forall i, m = i - 1 \quad (7.1)$$

Restricciones tipo 8.- Condiciones sobre tiempo de llegada y de salida de los trenes no fijos:

8.1. En la estación de origen de cada tren S:

$$\begin{aligned} x_D(s, i) &= x_A(s, i) + TSTOP(s, i) \\ TSTOP(s, i) &\geq TSTP_i PARA_i^s \\ TSTOP(s, i) &\leq TMAXSTOP_i PARA_i^s \end{aligned} \quad (8.1)$$

$$\forall s_{no_fijo} \in N, i = OR_s$$

8.2. Para el resto de estaciones de cada tren S (todas menos la de origen).

$$\begin{aligned} x_A(s, i) &= x_D(s, i - 1) + 60(LONG_m V_m^s) \\ x_D(s, i) &= x_A(s, i) + TSTOP(s, i) \\ TSTOP(s, i) &\geq TSTP_i PARA_i^s \\ TSTOP(s, i) &\leq TMAXSTOP_i PARA_i^s \end{aligned} \quad (8.2)$$

$$\forall s_{no_fijo} \in N, DES_s \geq i > OR_s, m = i - 1:$$

Restricciones tipo 9.- PARADAS:

Restricciones 9.1- Condición de que PARE en la estación de ORIGEN y de DESTINO de cada tren:

$$PARA_j^s = 1; \forall S_{no_fijo} \in N, j = OR_s, DES_s \quad (9.1)$$

Restricciones 9.2.- El número de estaciones máximas que un tren puede pasar sin parar está fijado por la propiedad MAXNOPAR del tren:

$$\begin{aligned} I_{m\acute{a}x} - MAXNOPAR_s &\leq \sum_j PARA_j^s \leq I_{m\acute{a}x} \\ \forall s_{no_fijo} \in N, I_{m\acute{a}x} &\geq j \geq 1 \end{aligned} \quad (9.2)$$

4.4. Función objetivo.

$$Max \sum_s L_s$$

5. Experimentos

El análisis del modelo propuesto ha supuesto la realización de numerosos experimentos. La tabla 1 recoge la batería final de experimentos. En esta primera aproximación al problema se ha optado por un conjunto de casos centrados en el análisis de los efectos de sólo tres de los parámetros: **ESP**, el número de estaciones en las que los trenes pueden solapar o adelantarse. **NTESP**, el número de andenes que permiten solape o adelantamiento y **MAXNOPAR**, es decir, el número máximo de estaciones en las que un tren no programado puede no detenerse a lo largo de la línea en que presta servicio. Para la resolución de las diferentes instancias se ha usado como solver ILOG CPLEX v.10. sobre un procesador Intel ® Core 2 Duo CPU. T6400 @2.00GHz, 4.00 GB de RAM. Se ha estudiado cada parámetro por separado, utilizando la suma de los valores obtenidos a lo largo de las diferentes estaciones de la línea.

	ΣESP	ΣNTESP	ΣMAXNOPAR	Runtime (s)	Nº Trenes Fijos	Nº Trenes No Fijos	FO	Rendimiento original de la línea (%)	Mejora de rendimiento alcanzada (%)
Ex1	7	17	10	485	5	7	7	41,7	140,0
Ex2	7	17	10	267	6	7	7	46,2	116,7
Ex3	6	14	12	6,41	8	12	5	61,5	62,5
Ex4	5	12	12	134,86	8	12	6	57,1	75,0
Ex5	6	12	12	858	8	12	9	47,1	112,5
Ex6	7	12	12	5324	8	12	9	47,1	112,5
Ex7	4	12	12	50,14	8	12	5	61,5	62,5
Ex8	3	12	12	37,11	8	12	5	61,5	62,5
Ex9	5	12	17	490,9	8	12	7	53,3	87,5
Ex10	2	12	12	0,39	8	12	5	61,5	62,5
Ex11	1	12	12	0,22	8	12	3	72,7	37,5
Ex12	0	12	12	0,17	8	12	3	72,7	37,5
Ex13	5	12	15	58,42	8	12	6	57,1	75,0
Ex14	5	12	20	910	8	12	7	53,3	87,5
Ex15	5	12	23	659,98	8	12	9	47,1	112,5
Ex16	5	12	25	658,57	8	12	9	47,1	112,5
Ex17	5	12	28	56,58	8	12	10	44,4	125,0
Ex18	5	12	30	1079,54	8	12	10	44,4	125,0
Ex19	5	12	36	15446	8	12	10	44,4	125,0
Ex20	5	12	14	16,41	8	12	7	53,3	87,5
Ex21	5	12	10	0,92	8	12	4	66,7	50,0
Ex22	5	12	10	12	8	12	5	61,5	62,5
Ex23	5	12	7	0,39	8	12	3	72,7	37,5
Ex24	5	12	3	0,23	8	12	3	72,7	37,5
Ex25	5	12	0	0,19	8	12	3	72,7	37,5
Ex26	5	10	12	94,6	8	12	6	57,1	75,0
Ex27	5	8	12	0,51	8	12	3	72,7	37,5
Ex28	5	8	12	3,65	8	12	5	61,5	62,5
Ex29	5	8	12	26,4	8	12	5	61,5	62,5
Ex30	5	6	12	0,28	8	12	3	72,7	37,5
Ex31	5	5	12	0,25	8	12	3	72,7	37,5
Ex32	5	14	12	13,6	8	12	8	50,0	100,0
Ex33	5	16	12	6,85	8	12	8	50,0	100,0
Ex34	5	18	12	2,2	8	12	8	50,0	100,0
Ex35	5	20	12	2,17	8	12	8	50,0	100,0

Tabla 1. Resumen de experimentos.

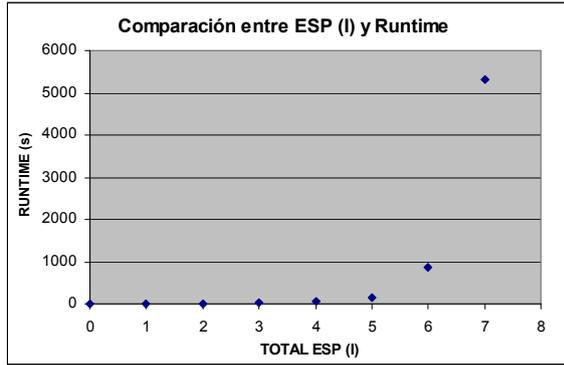


Figura 1. Experimentos 4 a8, 10 a 12.. Efecto del número de estaciones no servidas (línea) sobre tiempo de resolución.

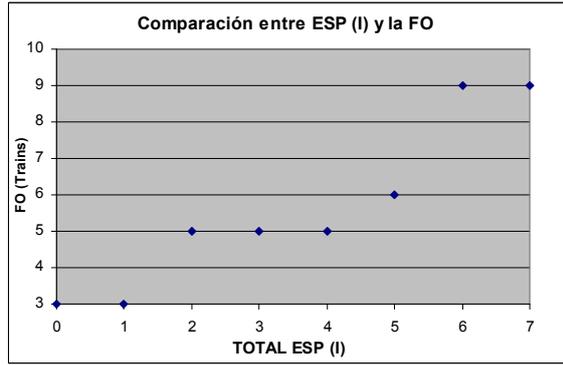


Figura 2. Experimentos 4 a8, 10 a 12. Efecto del número de estaciones no servidas (línea) sobre tiempo de resolución.

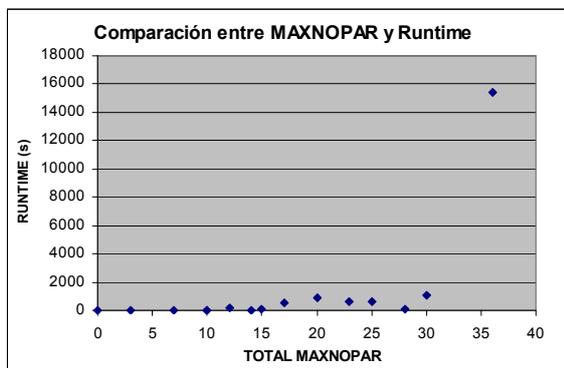


Figura 3. Experimentos 9,13a 25. Efecto del número de estaciones no servidas (línea) sobre tiempo de resolución.

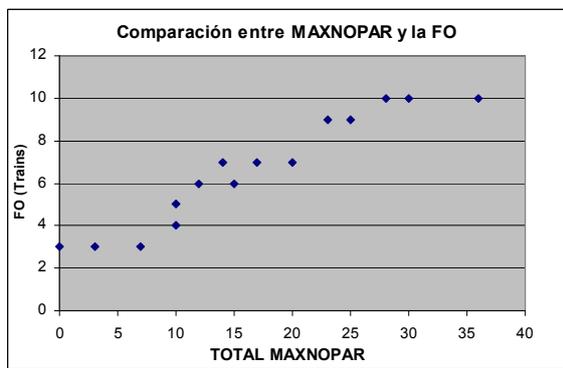


Figura 4. Experimentos 9,13a 25. Efecto del número de estaciones no servidas (línea) sobre función objetivo.

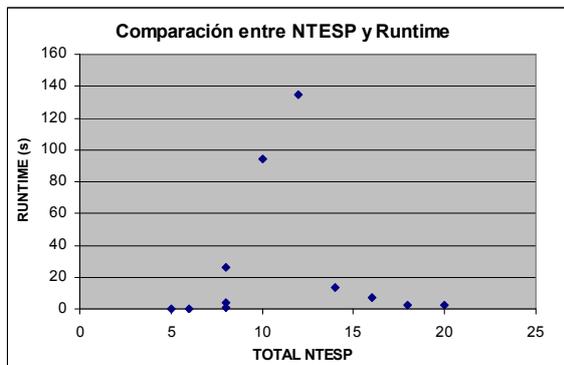


Figura 5. Experimentos 5, 26-35. Efecto del número de vías en paralelo (línea) sobre tiempo de resolución.

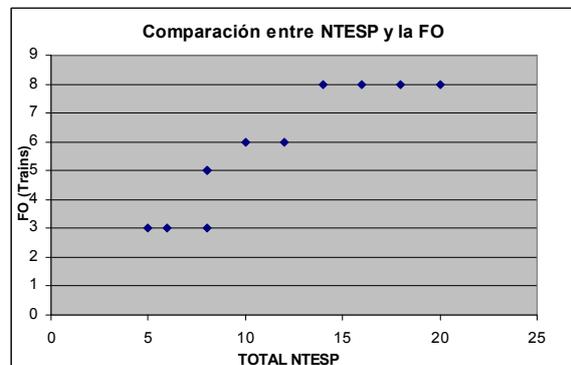


Figura 6. Experimentos 5, 26-35. Efecto del número de vías en paralelo (línea) sobre función objetivo.

En cuanto al tiempo de resolución, se aprecia un escaso efecto del parámetro MAXNOPAR. En algunos experimentos se observa un comportamiento aparentemente anómalo, con elevados tiempos de ejecución. Sin duda aparecen efectos cruzados de diferentes parámetros que exigirán un diseño experimental más preciso. No obstante, en línea generales, el aumento en cuanto al número de no detenciones y el aumento en cuanto a la posibilidad de solapes y adelantamientos (ESP), aumentan las posibilidades de elección y suponen un aumento en el tiempo de resolución. En cuanto a la variación con respecto al número de andenes de espera de las estaciones (NTESP), el tiempo de ejecución parece seguir una variación no lineal en

forma de campana de Gauss. Por una parte el aumento de NTESP conlleva un aumento de las posibilidades de resolución con el consiguiente aumento del número de variables, por lo que también aumenta el runtime. Sin embargo, en algunas ocasiones, cuando la línea está realmente saturada (el número de trenes fijos es alto y por tanto queda poca capacidad para trenes no fijos), el aumento de NTSTEP permite encontrar rápidamente la solución óptima.

En cuanto al valor de la función objetivo, como era de esperar, se produce un aumento de su valor a medida que se aumenta la variabilidad del problema.

6. Conclusiones

Este trabajo abre una línea de trabajo que puede ser de gran interés por sus posibles aplicaciones en la mejora del rendimiento de la red de ferrocarriles, especialmente en redes de cercanías y en transporte simultáneo de pasajeros y mercancías en redes de media y larga distancia. El modelo presentado, siendo conceptualmente simple, fruto de un trabajo en fase inicial, resulta ya técnica y computacionalmente complejo. No obstante es necesario realizar un esfuerzo por modelar situaciones de mayor complejidad en el sentido del realismo aportado, por ejemplo la inclusión de la gestión de material rodante y la inclusión de aspectos de demanda. Previamente resulta imprescindible profundizar en la explicación de los fenómenos observados en la experimentación. Se observa ya la necesidad de utilización de técnicas heurísticas y metaheurísticas diseñadas a partir la experiencia en problemas de secuenciación, enriquecidas con las características de este tipo de problemas.

Referencias

- Abril M., Barbera F., Ingolotti L., Salido M.A., Tormos P., Lova A. An assessment of railway capacity. *Transportation Research Part E* 44 (2008) 774–806
- D’Ariano A., Pacciarelli D., Pranzo M. A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network. *European Journal of Operational Research* 183 (2007) 643–657
- D’Ariano A., Pacciarelli D., Pranzo M. Assessment of flexible timetables in real-time traffic management of a railway bottleneck. *Transportation Research Part C* 16 (2008) 232–245
- Feng Li, Ziyou Gao, Keping Li, Lixing Yang. Efficient scheduling of railway traffic based on global information of train. *Transportation Research Part B* 42 (2008) 1008–1030
- Gely L., G. Dessagne and C. Lerin. Modeling Train Re-scheduling with Optimization and Operations Research Techniques: Results and Applications at SNCF. In *Proceedings of 7th World Congress on Railway Research*, Montreal, 2006.
- Mazzarello, M. and E. Ottaviani. A Traffic Management System for Real-Time Traffic Optimisation in Railways. In *Proceedings of the 1st International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*, Delft, 2005.
- Peeters M., Kroon L., Circulation of railway rolling stock: a branch-and-price approach *Computers & Operations Research* 35 (2008) 538 – 556
- Política de transporte de la UE. http://europa.eu/pol/trans/overview_es.htm#top © EC.
- Wegele S. and E. Schnieder. Automated dispatching of train operations using genetic algorithms. In *Computers in Railways IX*, WIT Press, Southampton, 2004, pp. 775-784.