

Simulador de eventos discretos para la evaluación de políticas ferroviarias frente a incidencias

Miguel Ortega Mier, Álvaro García Sánchez³⁸

Grupo de Investigación Ingeniería de Organización y Logística. ETSI Industriales. UPM. c/ José Gutiérrez Abascal, 2. Madrid.28006

Resumen

En este trabajo se presenta un modelo de simulación de eventos discretos desarrollado en un entorno comercial. Se ha adoptado un enfoque modular que facilita la construcción de modelos de simulación de distintos sistemas ferroviarios. Un aspecto clave es que además de los movimientos de los trenes también se modela el comportamiento de los pasajeros. El simulador se ha utilizado para estudiar dos políticas diferentes que se pueden llevar a cabo ante pequeñas incidencias en el sistema. Se presenta un caso de estudio basado en un subsistema de la red de Cercanías de Madrid (España).

Palabras clave: simulación de eventos discretos, ferrocarril, políticas, incidencias.

1. Introducción. Antecedentes

Uno de los problemas que se plantean en la gestión de redes ferroviarias es la gestión de incidencias en el sistema que son de duración breve pero que se producen con frecuencia relativamente alta (en comparación con otras incidencias de mayor envergadura).

Una forma de evaluar diferentes políticas frente a dichas incidencias consiste en desarrollo de modelos de simulación. Mediante un modelo se pueden analizar off-line las consecuencias de la aplicación de dichas políticas.

En la literatura se pueden encontrar numerosos trabajos en los que se presentan simuladores para la gestión ferroviaria. Algunos de estos trabajos presentan pequeños simuladores o de juguete: (Ojeda-Zapata, 2001), (Caprino, 2003).

Existen otros simuladores de sistemas ferroviarios, en los que la simulación se utiliza para gestión de los aspectos de potencia eléctrica de la red ferroviaria (Busco et al., 2003), (Mellitt y Goodman, 1978), (Kawashima, 1992), (Stephan, 2008).

En concreto, la simulación de eventos discretos se ha utilizado para gestionar el control del sistema con enfoques relacionados con la señalización de vías: (Astengo, 1998), (Hill & Yates, 1992), (Gomez-Rey, 2008), (Maixner et al., 2004).

Hay otro conjunto de simuladores que utilizan la DES para la planificación o la gestión del sistema: creación de horarios, estudio de su cumplimiento (Middelkoop & Bouwman, 2000)(Mera, 2000) (Koelemeijer, 2000) (Hooghiemstra, 1998) (Galaverna, 1992) (Galaverna, 1992)(Dorfman y Medanic, 2004).

³⁸ Este trabajo se debe a la participación de lo autores en el proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Fomento, titulado “Modelos de optimización aplicados a la planificación robusta y la gestión de los servicios metropolitanos de transporte público en caso de emergencia” (Código: PT-2007-003-08CCPP).

Estos últimos se pueden diferenciar por el lenguaje informático en el que se han desarrollado; siendo preferentemente escritos mediante:

- lenguaje de bajo nivel como C++ (Mera, 2000), (Galaverna, 1992), (Paloucci y Pesenti, 1999), o
- entornos profesionales de simulación: DONS-Simulator hecho con Arena© (Hooghiemstra, 1998), SIMONE hecho con Enterprise Dynamics© (Middelkoop y Bouwman, 2000); ambos desarrollados para la gestión del sistema ferroviario holandés.

En general todos los simuladores encontrados en la literatura, y en particular estos últimos, tienen un desarrollo modular que permite aprovechar una serie de ventajas: reducción del tiempo de desarrollo, separación entre diseño e implementación, facilidad de verificación del modelo, etc. (Hooghiemstra, 1998).

Se han encontrado tres objetivos perseguidos por estos simuladores: comprobar la robustez de horarios hechos con otra herramienta (Gronberg, 2002) (Hooghiemstra, 1998) (Koelemeijer, 2000) (Middelkoop y Bouwman, 2000); crear la programación de los trenes (Dorfman y Medanic, 2004) o prestar ayuda para la toma de decisiones relativas a las operaciones de *shunting* (Miao, 2000).

Salvo algún simulador que representa con bastante detalle el sistema ferroviario (Miao, 2000) el resto tiene un nivel de detalle intermedio.

Una carencia que se observa tras la revisión de la literatura es que los simuladores estudiados se centran en todo lo relativo a los movimientos de los trenes (vías, estaciones, semáforos, reglas de paso, etc.) dejando de lado la situación de los pasajeros. Lo que impide estudiar diferentes actuaciones o políticas que mejoren criterios que afecten a los pasajeros y no sólo al retraso de los convoyes, por ejemplo.

En esta comunicación se presenta un simulador desarrollado para el estudio de un sistema ferroviario concreto. Este simulador está elaborado a partir de un conjunto de módulos que, combinados de forma adecuada, pueden permitir estudiar una amplia variedad de sistemas.

La inclusión de la lógica del sistema (funcionamiento de semáforos, velocidades de los convoyes en función de las señales, etc.) es habitual en la literatura correspondiente; así como el registro de los servicios de los trenes en un periodo de tiempo determinado. Una novedad respecto a otros modelos encontrados en la literatura es la incorporación de la información relativa a la llegada de los pasajeros y sus posteriores movimientos por la red.

El simulador construido se ha utilizado para estudiar, fuera de línea, las distintas políticas que se pueden utilizar cuando ocurre una incidencia en el sistema. Por el momento, el tipo de incidencias que se han analizado son aquellas en las que se un tren se detiene durante un periodo relativamente breve (varios minutos) pero que puede alterar el funcionamiento de otros trenes en el sistema.

Queda fuera del alcance de esta comunicación otras incidencias de mayor entidad, como las que pueden obligar a cortar un tramo de vía durante varias horas a lo largo de un día. Introduciendo algunas modificaciones sería posible evaluar también este tipo de incidencias mediante el simulador.

Adicionalmente, dadas las características del simulador, también se podría utilizar para validar políticas de gestión de material rodante obtenidas mediante modelos de otros tipos (de programación lineal). Como el simulador incluye un nivel de detalle mucho mayor permite representar de forma más fiel el sistema y, por lo tanto, puede servir como herramienta con la que validar políticas obtenidas con modelos que incorporan menor detalle.

2. Descripción del sistema

El trabajo que se presenta en esta comunicación se centra en una línea de Renfe Cercanías Madrid, la línea C5. En particular, y a modo de experiencia piloto, el estudio se circunscribe a una parte de esa línea (desde Móstoles-El Soto hasta Atocha), pero se podría extender el análisis al conjunto de toda la línea. Esta línea está relativamente aislada del resto de líneas, con lo que su modelización es más sencilla que la de otras líneas y, además, ha permitido evaluar la idoneidad de este enfoque.

Se ha construido un prototipo que representa una parte de la línea C5 de Cercanías Madrid, desde Móstoles-El Soto hasta Atocha. Este modelo tiene las siguientes características: 41 km de recorrido, dos estaciones de inicio y final del recorrido de los trenes (Atocha, Móstoles-El Soto), 10 estaciones intermedias, 50 trenes diarios (modificación de los horarios reales), llegada de pasajeros a las estaciones siguiendo diferentes pautas en función de la estación y del momento del día (actualmente se utilizan distribuciones exponenciales negativas).

Este modelo se ha construido reflejando el sistema real (lógica de los semáforos, velocidades, estaciones, vías de estacionamiento, cambios de vías, convoyes, etc.)

Entre otros elementos, existen semáforos que gobiernan el movimiento de los trenes para garantizar la seguridad de los convoyes, de manera que no se permite que los trenes circulen demasiado cerca de otros trenes.

3. Características del simulador

La herramienta se ha desarrollado mediante el software de simulación de eventos discretos Witness PwE 2.00© de la empresa Lanner. Este software se ha considerado apropiado para representar las características del sistema. Se han diseñado diferentes módulos a partir de los elementos básicos de Witness. Estos módulos, que luego que una vez creados se han repetido a lo largo del modelo son: cantones, finales de cantones, cantones de doble sentido, estaciones y estaciones finales. Algunos de estos módulos se han desarrollado en términos generales y se puede utilizar sin modificar nada, pero otros tienen un código específico que representa el funcionamiento lógico del elemento en el sistema.

Tanto para la construcción como para la posterior modificación del modelo y explotación se ha desarrollado un interfaz VBA. Este interfaz se alimenta con hojas de cálculo, tras su lectura se modifica el código asociado de diversos elementos del sistema. De esta forma muchas de las modificaciones del sistema son sencillas y se realizan en poco tiempo.

El modelo se alimenta a partir de hojas de cálculo en donde se indican los distintos trenes con sus características (número, estación origen, estación final, horarios, etc.). Los datos de salida que se quieren estudiar se recogen también en hojas de cálculo (tiempos medios de viaje de los viajeros, retrasos de los trenes, etc.).

En términos generales, el simulador está compuesto por un conjunto de módulos que representan el comportamiento de: las estaciones y los cantones o secciones de vía que comunican las estaciones.

3.1. Estaciones

Las estaciones pueden ser o bien estaciones terminales o estaciones finales, según se encuentren o no en el extremo de la línea.

En cualquier caso, las estaciones incorporan la llegada de pasajeros, con la información correspondiente al destino de los mismos. A medida que los trenes llegan a las estaciones, y

de acuerdo con los horarios previstos, los pasajeros embarcan en el tren correspondiente e inician su trayecto.

3.2. Cantones

Los cantones son secciones de vía que comunican las estaciones. Cada dos estaciones suelen estar comunicadas por varios cantones. Los cantones permiten gobernar el tráfico de los trenes y las velocidades de los mismos. Al comienzo de cada cantón existe un semáforo que permite o no el paso de los trenes y la velocidad máxima con la que pueden circular, de acuerdo con las normas de seguridad del sistema.

Existen diversos tipos de cantones, para cada uno de los cuales se han desarrollado módulos específicos. Combinando adecuadamente diferentes tipos de módulos es posible representar una gran variedad de conexiones entre cada dos estaciones.

3.3. Otros elementos

Además de las estaciones y los cantones, es necesario representar otros elementos que permiten representar el comportamiento del sistema y recoger la información necesaria con la ejecución del modelo.

Por ejemplo, existen elementos específicos para representar los trenes y a los pasajeros, su espera en las plataformas de las estaciones, la subida al tren, etc.

3.4. Archivos de entrada

Hay tres tipos de archivos de entrada:

- Uno que permite introducir las **características de los módulos**. Es un único archivo con diferente información: inicialización, estaciones y características trenes. Toda esta información es transmitida al modelo creado con Witness, mediante una combinación de Visual Basic y código VCL.
- Otro archivo que se utiliza es el que nos permite introducir en el modelo la **distribución de llegada de los pasajeros**. La llegada de los pasajeros depende del intervalo del día. En el simulador se ha utilizado un intervalo de tiempo de 30 minutos (cada 30 minutos se cambia la distribución de llegada de los pasajeros a la estación).
- Un tercer archivo de texto, donde se **almacenan los servicios** que se tienen que realizar a lo largo del día y el instante en el que tiene que hacerse., para el estudio que vamos a realizar y que será comentado en los siguientes apartados, todos los servicios se van a tener que realizar independiente del retraso que estos acumule.

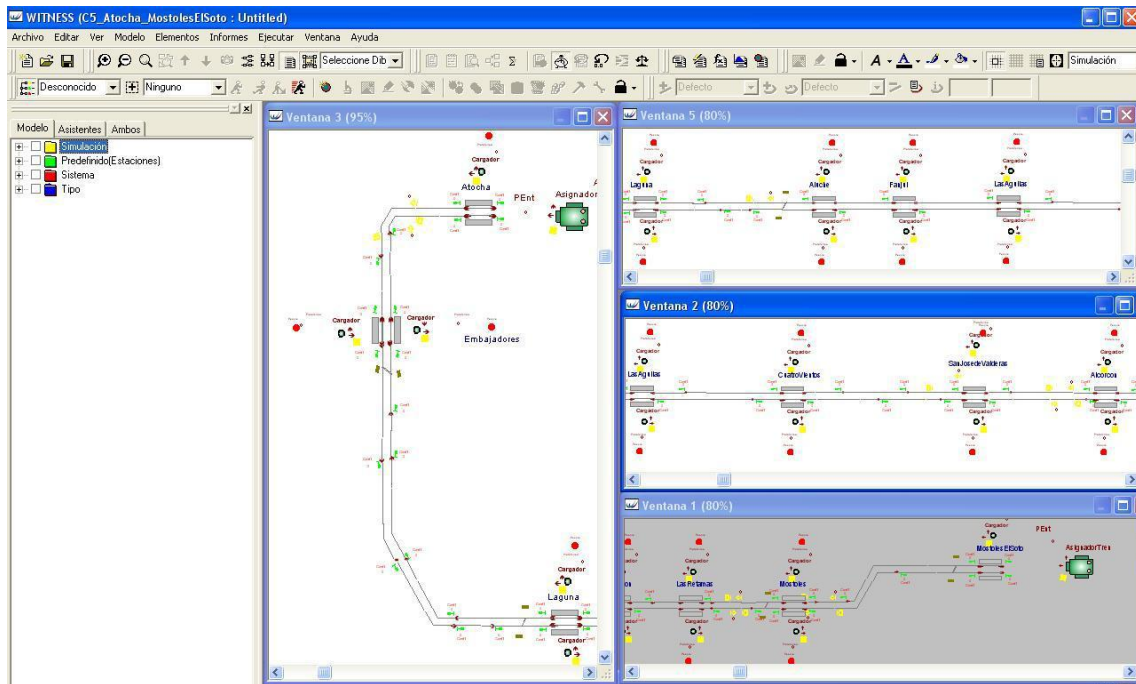


Figura 1. Vista general del modelo construido (MostolesElSoto-Atocha, parte de la línea C5)

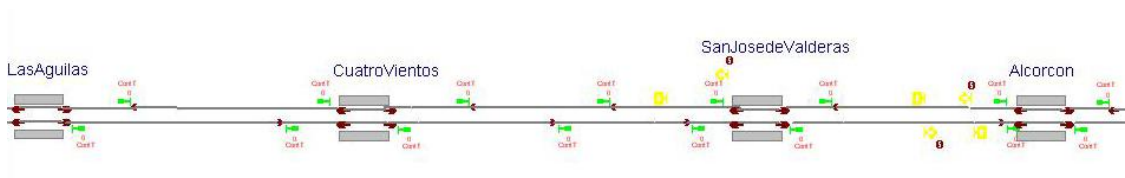


Figura 2. Vista parcial de la línea C5 (tramo Las Águilas - Alcorcón)

3.5. Archivos de salida

Cada vez que un convoy sale de una estación se escribe en un archivo de texto la siguiente información: código de servicio, tiempo medio de espera de los pasajeros que estaban en el andén esperando para subirse al tren, estación en la que se encuentra el tren, tiempo de llegada del tren a la estación, tiempo de salida del tren, número de pasajeros que se dirigen (incluidos los que acaban de subir) desde la estación actual al resto de estaciones del servicio.

Cálculo del tiempo de viaje medio

Una vez finalizada la simulación, como se dispone de la información indicada en el apartado anterior, se puede calcular el tiempo medio de viaje de los usuarios. Este indicador se utilizará después para estudiar la bondad de las distintas políticas.

Es sencillo calcular en cada servicio el tiempo de viaje de cara pasajero, pues se conoce el tiempo de espera en los andenes y los tiempos de viaje entre todos los pares de estaciones por las que pasa el convoy en ese servicio.

Una vez conocido los tiempos de viaje medios para cada servicio, si se ponderan con el número de pasajeros que iban en cada servicio, se puede obtener el tiempo de viaje medio de los pasajeros en ese día.

4. Caso de estudio. Resultados computacionales.

En esta sección se presenta un sistema específico el cual se ha analizado utilizando el modelo de simulación. Se ha elegido la línea C5 del sistema de Cercanías Madrid. La línea C5 consiste en 23 estaciones, dos de ellas estaciones finales: Móstoles el Soto y Fuenlabrada. Como prototipo se ha realizado un modelo que representa la mitad de la línea desde Móstoles el Soto hasta Atocha.

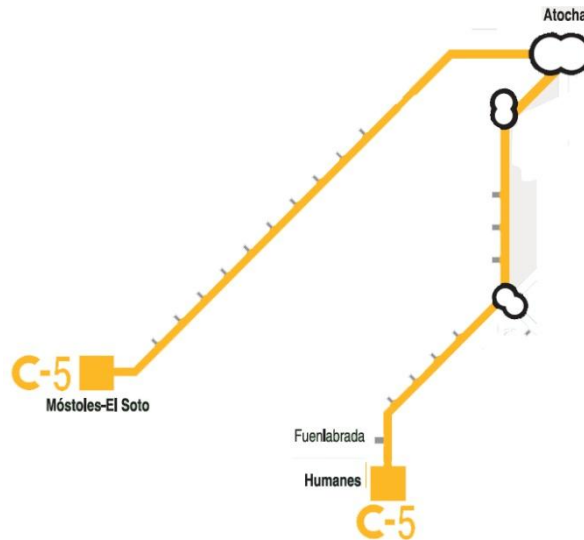


Figura 3. Línea C5.

4.1. Comportamiento de los pasajeros

Los pasajeros llegan a las estaciones de uno en uno. La llegada de pasajeros a cada estación sigue una distribución exponencial cuya media depende del momento del día y de la estación. Se han dividido las 24 horas del día en intervalos de 30 minutos; existiendo momentos en los que no llegan pasajeros (cuando están cerradas las estaciones) u otros con más de 10000 pasajeros (o más) en media hora.

4.2. Horarios

Un día regular en este sistema implica el funcionamiento de 160 trenes que salen de cada extreme de la línea en direcciones opuestas. La frecuencia varía a lo largo del tiempo de forma consistente al patrón de demanda.

4.3. Modelo de simulación de la línea C5

Se han necesitado diversos módulos para construir el modelo de simulación: 11 módulos estación, 88 módulos de vías y 2 módulos parking.

El modelo se ha ejecutado en un ordenador Intel Core Duo 6320 1.86 GHz 2Gb RAM bajo Windows XP. Para simular un día entero se necesitan 40 segundos. Este resultado es muy esperanzador, ya que las ampliaciones del sistema con más líneas pueden acarrear tiempos de simulación razonables.

4.4. Incidencias y políticas. Análisis.

El objetivo de este trabajo es el estudio de incidencias cortas caracterizadas por la parada del tren, pero no durante mucho tiempo, de forma que los pasajeros no pueden abandonar el tren.

Las incidencias pueden ser de varios tipos en función de tres factores: el tiempo de la incidencia, el instante del día en el que ocurre y el lugar de la línea donde para el convoy.

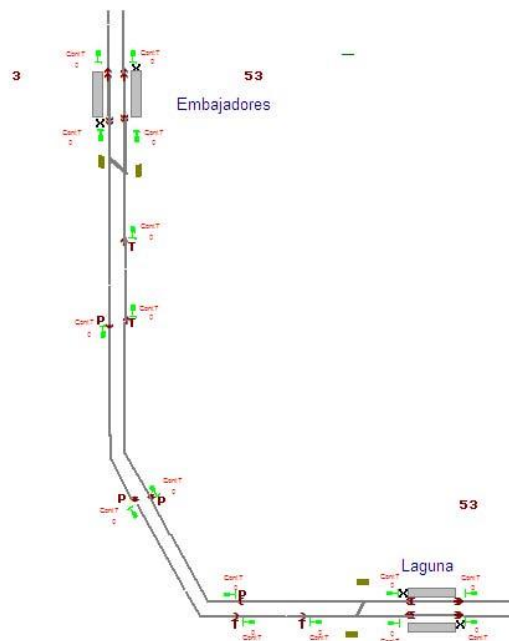


Figura 4. Parte del sistema del caso de estudio.

Se han considerado el estudio de dos políticas a ejecutar cuando ocurran incidencias de este tipo con la idea de estudiar *off-line* cuál de las dos políticas es mejor o en qué situaciones. Son las siguientes:

- Política “*dejar ir*”. Consiste en permitir que el resto de trenes de la línea sigan moviéndose por ella hasta que encuentren un semáforo que los pare. Si la incidencia no es muy corta puede ocurrir que una parte de la línea tenga muchos trenes y otra esté casi vacía.
- Política “*parar*”. Consiste en parar todos los trenes durante el mismo tiempo que dura la parada del tren que sufre la incidencia. La idea que hay detrás de esta política es que los trenes sigan repartidos de forma equilibrada en la línea pudiendo mantener las frecuencias entre trenes que había antes de la incidencia.

La variable de salida que se ha estudiado en este experimento ha sido la duración media del viaje de los pasajeros. Para ello se han hecho dos análisis. Primero, para cada incidencia se ha estudiado si una de las políticas es significativamente mejor que la otra. Segundo, un diseño factorial con tres factores.

4.5. Resultados computacionales.

Para analizar la influencia de los diversos factores sobre el funcionamiento del sistema se han utilizado los siguientes valores:

- Factor 1. Dos duraciones de la incidencia: 5 (nivel -) y 15 minutos (nivel +).
- Factor 2. La incidencia ocurre durante las horas pico (nivel - para este factor) en el minuto 540 (9 am), o en horas valle (nivel +) en el minuto 1080 (4 pm).

- Factor 3. Se han considerado dos posibles sitios en los que ocurren incidencias: la estación de Embajadores sentido Atocha, al final de un servicio (nivel -) y la estación de Fanjul, en el medio de la línea (nivel +).

En lo que sigue, los resultados que se muestran se han obtenido después de 10 replicaciones obteniéndose intervalos de confianza de un 97.5%.

Política “dejar ir”

Para esta política todos los actores y sus combinaciones tienen un efecto relevante en los tiempos medios de los viajes de los pasajeros. Lógicamente cuanto mayor es la incidencia, mayores son los retrasos. También los tiempos medios son mayores si la incidencia ocurre durante las horas valle que si ocurren en horas pico. Si la incidencia ocurre al final de la línea aumentan las duraciones de los trayectos.

Política “parar”

En este caso solo son relevantes los factores de duración de la parada e instante del día. No es relevante el lugar donde ocurre la incidencia (lógico, pues todos los trenes se paran).

Tabla 1. Comparación de políticas

Factor 1	Factor 2	Factor 3	Media (dif.)	Varianza (dif.)	L. Sup.	L. Sup.	Mejor política
5 min	Pico	Extremo	-2.44	0.00	-2.52	-2.36	<i>Dejar ir</i>
15 min	Pico	Extremo	-2.65	0.04	-3.08	-2.22	<i>Dejar ir</i>
5 min	Valle	Extremo	-2.49	0.01	-2.71	-2.27	<i>Dejar ir</i>
15 min	Valle	Extremo	-0.72	0.01	-0.96	-0.47	<i>Dejar ir</i>
5 min	Pico	Medio	-2.26	0.01	-2.53	-1.98	<i>Dejar ir</i>
15 min	Pico	Medio	-1.77	0.04	-2.21	-1.34	<i>Dejar ir</i>
5 min	Valle	Medio	-3.29	0.01	-3.47	-3.11	<i>Dejar ir</i>
15 min	Valle	Medio	-1.42	0.01	-1.69	-1.15	<i>Let-go</i>

Comparación de políticas

Por último se han comparado las dos políticas para todas las combinaciones de factores. La tabla 1 muestra que la política “dejar ir” ofrece mejores resultados en todas las situaciones. La explicación de esto es que, a pesar de que esta política hace que el material rodante se reparta de forma no uniforme por la línea, las incidencias no son tan duraderas como para que sea problemático. Luego, si los trenes de una línea no paran hasta que un semáforo en rojo les impida seguir, el retraso que sufre el conjunto de los pasajeros es menor que si pararan todos los trenes durante la incidencia.

5. Conclusiones

En este trabajo se muestra cómo la simulación puede ser una herramienta muy útil para analizar en detalle los sistemas ferroviarios, estudiar distintas políticas ante incidencias *off-*

line. Para ello se ha desarrollado un conjunto de módulos que permite la construcción tanto del sistema ferroviario específico como el modelado del comportamiento de los pasajeros.

El modelo que se ha desarrollado representa parte de un sistema real. Sobre este sistema se ha hecho un análisis de dos políticas diferentes ante pequeñas incidencias en un tren: “dejar ir” y “parar”. Del estudio se desprende que la mejor política es la primera de las dos.

Este trabajo se está enriqueciendo con la realización de estudios de otro tipos de incidencias (de mayor duración) y el establecimiento de nuevas frecuencias si la incidencia es muy larga. Por ejemplo cuando se bloquea durante horas una vía y se puede utilizar la otra vía para envíos de trenes en ambas direcciones.

El modelo construido y otros más se están utilizando para el estudio de modificaciones de servicios de los trenes y la creación de nuevos servicios en el mismo sistema.

Referencias

Astengo, G. (1998). A new approach to model signalling systems on railway networks. *Computers in Railways VI*, Vol. 2, pp. 1077-1084.

Busco, B., Marino, P., Porzio, M., Shiavo, R. y Vasca, F. (2003). Digital control and simulation for power electronic apparatus in dual voltage railway locomotive. *IEEE Transactions on Power Electronics*, No. 18, pp. 1146-1153.

Caprino, G. (2003). *Manual of Train Director*.

Dorfman, M. y Medanic, J. (2004). Scheduling trains on a railway network using a discrete event model of railway traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*, No. 38, pp. 81-98.

Galaverna, M. (1992). A railway operation simulator for line traffic capacity evaluation. *Computers in Railways III*, Vol. 1: Management, pp. 15-24.

Galaverna, M. (1992). Object-oriented programming in a new railway-operation simulator for personal computers. *Computers in Railways III*, Vol 1: Management, pp. 501-508.

Gomez-Rey, I. (2008). Simulation of the ASFA system in an ERTMS simulator. *Computers in Railways XI*, No. 103, pp. 853-864.

Gronberg, F. (2002). An integrated tool for stepwise construction of timetables, through simulation, and subsequent use in traffic control systems. *Computers in Railways VIII*, No. 13, pp. 937-942.

Lanner Group (2010). *WITNESS, Visual Interactive Simulation Software*. WITNESS, Visual Interactive Simulation Software.

Hill, R., & Yates, T. (1992). Modelling Railway Block Signalling Systems Using Discrete-event Simulation, *Joint ASME/IEEE Railroad Conference*, Atlanta (GA), pp. 1-9.

Hooghiemstra, J. S. (1998). The use of simulation in the planning of the Dutch Railway services. *1998 Winter Simulation Conference Proceedings*, Vol. 1 y 2, pp. 1139-1145.

Kawashima, H. (1992). A total railway system simulator and its application to the evaluation of energy-saving train operation. *Computers in Railways III*, Vol. 1: Management, pp. 85-95.

Koelemeijer, G. (2000). PETER, a performance evaluator for railway timetables. *Computers in Railways VII*, No. 7, pp. 405-414.

- Maixner, V., Mocek, H., Taufer, J., Bazant, L., & Filip, A. (2004). The Simulator of Train Position Locator. *Computers in Railways IX*; Dresden; Germany, 2004 , pp. 477-486.
- Mellitt, B., Goodman, C. J., & M., R. I. (1978). Simulator for studying operational and power-supply conditions in rapid-transit railways. *Institution of Electrical Engineers, Proceedings* , No. 125, pp. 298-303.
- Mera, J. M. (2000). Railway lines operation simulator: GifTren. *Computers in Railways VII* , No. 7, pp. 997-1006.
- Miao, J. R. (2000). Simulation system of train and shunting operation. *Traffic and Transportation Studies* , pp. 246-250.
- Middelkoop, D., & Bouwman, M. (2000). Train network simulator for support of network wide planning of infrastructure and timetables. *Computers in Railways VII* , No.7, pp. 267-276.
- Ojeda-Zapata, J. (2001). Games: Microsoft train simulator.
- Paloucci, M., & Pesenti, R. (1999). An Object-Oriented Approach to Discrete-Event Simulation Applied to Underground Railway Systems. *Simulation* , No. 72, pp. 372-383.
- Stephan, A. (2008). OpenPowerNet - simulation of railway power supply systems. *Computers in Railways XI* , No. 103, pp. 449-459.