

Estimación de la puntualidad en redes ferroviarias: estado del arte

Alejandro Escudero Santana¹, Jesús Muñozuri Sanz¹, M^a del Carmen Delgado Román¹

¹ Dpto. de Ingeniería de Organización. Escuela Superior Ingenieros. Universidad de Sevilla. Avd. Descubrimientos s/n 41092. Sevilla. munuzuri@esi.us.es, aescudero@esi.us.es, mdelgado@esi.us.es

Palabras clave: Redes ferroviarias, fiabilidad, puntualidad.

1. Introducción

La fiabilidad del tiempo de tránsito o puntualidad es una de las más importantes variables de decisión en la elección del modo de transporte (Bhat y Sardesai, 2006; Allen et al., 1985). Los clientes dan mayor importancia a la incertidumbre del tiempo de tránsito que al propio tiempo en sí. Es necesaria entonces una alta calidad del servicio ferroviario para que este pueda desarrollar sus competencias.

El presente trabajo presenta una revisión de diferentes estudios relativos a la fiabilidad y la puntualidad en líneas ferroviarias. En el siguiente capítulo se explicarán los mecanismos de generación de los retrasos, se listarán algunos de los factores que influyen en la fiabilidad y se hará distinción entre retrasos primarios y secundarios. En la última parte del artículo se ha realizado una revisión sobre las diferentes tendencias en el análisis de la puntualidad en redes y líneas ferroviarias.

2. El mecanismo de generación de retrasos en el transporte ferroviario

Los mecanismos a través de los que se pueden explicar los retrasos en los sistemas ferroviarios son extremadamente complejos (figura 1). Un sistema de transporte ferroviario consta de muchos subsistemas que interactúan entre sí: la red viaria, incluyendo al sistema de señalización; el sistema de suministro de energía eléctrica; todo el material rodante, tanto locomotoras como vagones; y el personal. Todos estos subsistemas trabajan normalmente en serie. Si uno de ellos no funciona, o está operando por debajo de su nivel habitual de rendimiento, se reduce el nivel de servicio del sistema como un todo.

El modelo conceptual de la figura 1 refleja que el estado de las infraestructuras está dividido en: estado tecnológico y un estado funcional. El estado tecnológico de las vías hace referencia a sus características de diseño y construcción. Para un tramo de vía eso incluye máxima velocidad permitida, pendiente característica, máxima longitud de los trenes y máxima carga por ejes, así como el sistema de señalización y la subdivisión de una vía en varios cantones de bloqueo. El estado funcional describe posibles defectos o perturbaciones que el estado tecnológico pudiera presentar. Esto indica por ejemplo que la máxima velocidad permitida en un determinado cantón de bloqueo tuviera que ser reducida por culpa de daños o defectos en la vía. Tales defectos hacen que la capacidad de diseño de la infraestructura sea reducida. La capacidad es un concepto definido aproximadamente (UIC, 2003). Normalmente expresa el máximo número de trenes por unidad de tiempo que podrían operar en una determinada vía. Los retrasos debidos a la reducción de la capacidad de diseño se le llamará retrasos primarios. Pero este número máximo de trenes no sólo depende del estado tecnológico y funcional de la vía. Esto además depende de cómo se mezclan los trenes según los horarios y las velocidades de los mismos. Por ejemplo, no es lo mismo en una vía simple que pase un tren en cada

dirección alternativamente, a que pasen los trenes en una dirección de tres en tres. Al porcentaje de tiempo que una línea es bloqueada por algún tren se le suele llamar capacidad consumida. La capacidad consumida difiere dependiendo del horizonte temporal para la que se calcule: hora punta o un día entero. A los retrasos debido a la iteración entre los trenes, se le conoce como retrasos secundarios.

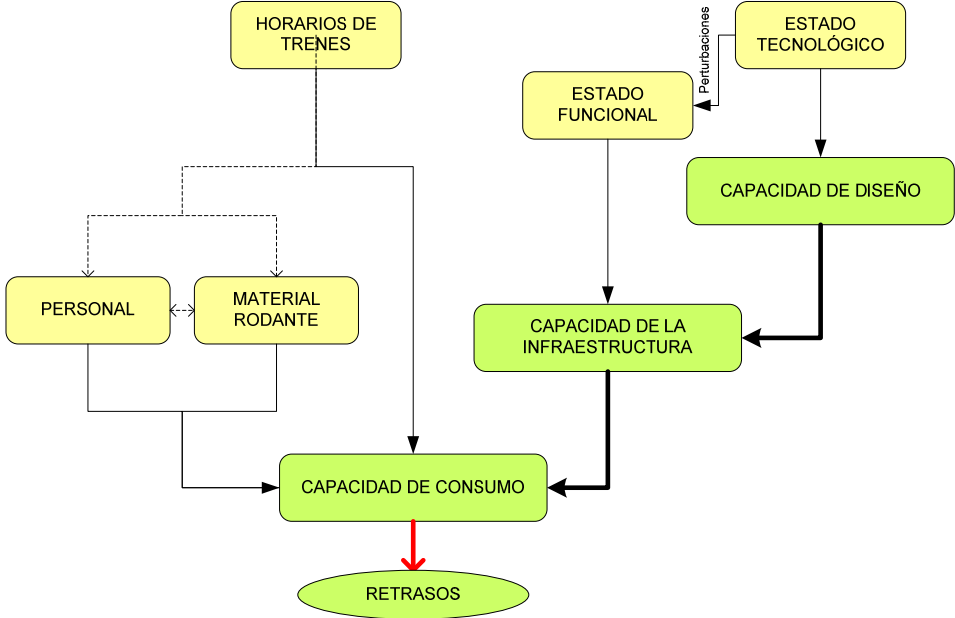


Figura 1. Modelo conceptual de relación entre el estado de las infraestructuras y los retrasos

Existe una serie de factores que influyen directa o indirectamente en la puntualidad de una línea ferroviaria. Todos estos factores se engloban entre sí en una serie de parámetros básicos que interactúan entre sí con la capacidad de infraestructura como parámetro de balance (Figura 2). Estos parámetros básicos de referencia de calidad son la velocidad, la heterogeneidad, el número de trenes que circulan y la puntualidad. Estos parámetros dependen de un gran número de factores, algunos de los cuales son mostrados en la tabla 1.

Fuente: UIC, 2003

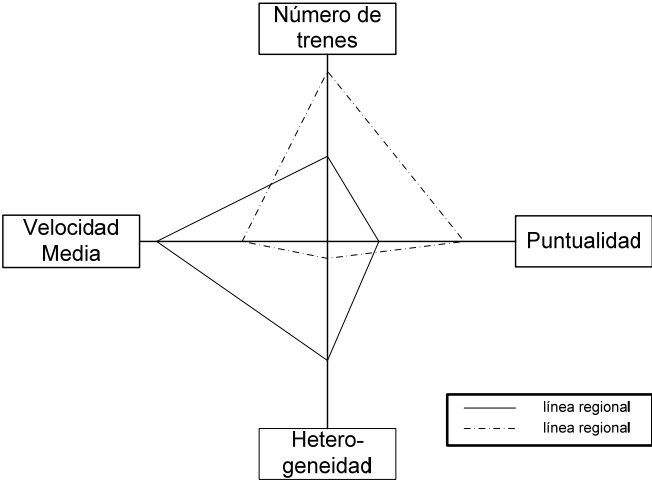


Figura 2. Balance de capacidad

Tabla 1. Factores que influyen en los parámetros básicos

Parámetro	Factores
Capacidad de la infraestructura	<ul style="list-style-type: none">- Número de vías- Tipo de Bloqueo- Enclavamiento de estaciones y apeaderos- Comunicaciones- Electrificación- Estado de conservación de la vía, instalaciones y material rodante- Protección de los pasos a nivel- CTC. Telemando centralizado
Velocidad	<ul style="list-style-type: none">- Trazado en planta y perfil de la línea- Características y conservación de la vía, instalaciones y material rodante.
Heterogeneidad	<ul style="list-style-type: none">- Gráficos de circulación y programación horaria
Número de Trenes	<ul style="list-style-type: none">- Gráficos de circulación y programación horaria
Regularidad	<ul style="list-style-type: none">- Equipamientos de vía, ingeniería civil, instalaciones y material rodante.- Organización de los procesos de explotación

3. Revisión de la literatura sobre puntualidad en sistemas ferroviarios

Debido a que los retrasos primarios son independientes de la utilización que se haga de la línea (demostrado empíricamente por Gibson et al, 2002), la literatura existente se centra principalmente en la reducción de los retrasos secundarios a través del aumento de la capacidad de la línea (enfoque estratégico) o de la correcta definición de horarios (enfoque táctico-operacional). La reducción de los retrasos primarios dependerá en gran medida del binomio mantenimiento-formación; el mantenimiento que sea llevado a cabo por el mantenedor de la red, y de la formación de los operarios.

En las últimas décadas, un gran número de investigadores ha centrado sus esfuerzos en el estudio de técnicas para mejorar la puntualidad en los servicios ferroviarios. Dicha literatura se enfoca de dos maneras: estratégico y táctico-operacional.

El enfoque estratégico, se busca diseñar la infraestructura necesaria para llevar a cabo unos servicios, pero no conocidos con exactitud. De estos servicios se pronosticará la demanda prevista de los mismos y los retrasos máximos asumibles. Por lo tanto, el objetivo será maximizar la capacidad de diseño de la red asumiendo el mínimo coste posible. Como se ha comentado anteriormente, los retrasos en los trenes dependen del número de trenes que circulen por las vías y de la planificación de horarios (tabletime) de los mismos. Esto en principio es desconocido en un enfoque estratégico, por lo que es habitual asumir algunos horarios “típicos” basados en principios estadísticos (Huisman y Broucherie, 2001) o simular un número razonable de horarios y tomar la media.

El enfoque táctico-operacional está más orientado a la construcción o modificación de horarios para unos servicios ya definidos con el objetivo de minimizar los retrasos en los horarios, ya que tanto la infraestructura como los servicios son conocidos.

La bibliografía revisada ha sido clasificada en tres metodologías diferentes: métodos analíticos, modelos de simulación y análisis estadístico basado en datos empíricos. Cada uno de estos métodos tiene sus pros y sus contras, y la idoneidad de su utilización dependerá del problema que se quiera resolver.

3.1. Métodos analíticos de análisis de retrasos

Se trata de modelos muy simples, diseñados para modelar el comportamiento del ferrocarril a través de formulas matemáticas y expresiones algebraicas, que permiten determinar una solución preliminar. Suelen ser rápidos de aplicar, por lo que estos métodos son usualmente usados en una etapa de planificación y diseño, cuando una gran cantidad de variables son consideradas en la definición de los horarios (horas de llegada y salida de los trenes, tiempos de parada,...). Debido a esta gran cantidad de variables se requiere de un gran número de simplificaciones para el uso de los modelos analíticos, siendo este hecho un claro inconveniente. Sin embargo, este inconveniente es realmente menor en una etapa de planificación donde muchos parámetros de diseño, condiciones de operación y demandas futuras son inciertos. De igual manera estos métodos son usados como referencia de comparación.

Muchos de los modelos analíticos están basados en el cálculo de la capacidad de la línea (UIC, 2003). Conocidas la capacidad máxima de la línea y la capacidad consumida de la misma se podrían derivar los retrasos esperados. Burdett y Kozan (2006) desarrollan un modelo de cálculo de la capacidad para líneas complejas. Cicák y Shi (2003) hace un estudio de la influencia que tiene en la capacidad de la línea las oscilaciones en el volumen de tráfico.

Otros estudios se aprovechan de las características del algebra max-plus para la evaluación de la robustez de las programaciones horarias. Algunas características clave, como el tiempo mínimo de ciclo, son fácilmente calculables con el algebra max-plus. PETER es una herramienta evaluadora de programaciones horarias basada en esta técnica (Goverde y Odijk, 2002). Las actuales investigaciones basadas en el algebra max-plus y enmarcadas en la fiabilidad de los servicios ferroviarios están orientadas a la inclusión de perturbaciones aleatorias en los modelos. De Korts et al. (2003) usa un modelo max-plus para valorar la capacidad de una infraestructura ferroviaria, desarrollan una metodología para calcular el máximo número posible de movimientos de trenes que pueden llevarse a cabo, sobre una infraestructura particular en un periodo de tiempo dado, con una probabilidad mayor o igual a p . El umbral p puede ser considerado un requerimiento de la fiabilidad del servicio.

Schwahnhäuser (1994) hace uso de la teoría de colas para anticipar el valor esperado del retraso. Estos modelos de colas están solamente basados en la frecuencia de los trenes y en los tiempos de tránsito, no en las programaciones horarias. Hansen (2000) usa tanto la teoría de colas como el algebra max-plus para estudiar la capacidad y estabilidad de los movimientos de trenes en estaciones. Huisman et al. (2002) proponen un modelo de cola de redes para evaluar el rendimiento de una vía doble.

La heterogeneidad de las velocidades influye perjudicialmente en la capacidad de la línea y en los retrasos de los trenes. Fransoo y Bertrand (2000) proponen un procedimiento para la planificación de infraestructuras de cruces en una vía doble, de tal forma que los trenes lentos puedan ser adelantados por los más rápidos. Además, calculan una ecuación para predecir el incremento del tiempo de transito de los trenes lentos debido a que estos deben reducir su velocidad para permitir que los trenes más rápidos puedan adelantarles en el tramo disponible para tal fin. Huisman y Boucherie (2001) desarrollan un modelo para el análisis de retrasos sobre una sección de vía doble con tráfico heterogéneo y donde el adelantamiento es no es posible o simplemente no está permitido.

Carey y Kwiecinsky (1994, 1995) y Carey (1999) realizan un análisis estocástico del problema. Carey (1999) desarrolla una formulación para calcular funciones de densidad de probabilidad de retrasos secundarios como función de la separación de tiempos entre trenes y la función densidad de probabilidad de los retrasos primarios, siendo por tanto posible calcular el retraso total esperado. Además, hace uso de unas medidas heurísticas para valorar la fiabilidad de un horario dado sin requerimientos de información probabilística de retrasos exógenos.

Higgins et al. (1995) proponen un modelo para cuantificar lo que ellos llaman riesgo de retraso para una línea de vía simple. Higgins et al. (1996) analizan el incremento porcentual del tiempo medio de viaje cuando determinados factores son alejados de su valor. Higgins y Kozan (1998) desarrollan un modelo analítico para cuantificar el retraso esperado de un tren de pasajeros en una red ferroviaria urbana.

Existe además una amplia literatura donde no se evalúa explícitamente el retraso en los trenes, sino que realizan una planificación de los horarios basándose en ciertos aspectos para mejorar la puntualidad de los mismos (p.ej: Higgins et al., 1996; Sahin, 1999; Dorfman y Medanic, 2004; Ghoseiri et al., 2004). Al mismo tiempo, tales modelos pueden ser usados como sistemas de ayuda a la decisión para la reprogramación de horarios de trenes cuando retrasos considerables han ocurrido. Estos modelos son matemáticamente complejos y normalmente versan sobre técnicas heurísticas.

3.2. La simulación como enfoque de análisis de retrasos

La simulación es otro de los métodos empleados para la realización de análisis de retrasos en servicios ferroviarios. Una simulación es una imitación de un proceso del mundo real en un entorno virtual. En los modelos de simulación se parametrizan todas las características posibles del sistema bajo estudio: vías, señalización, material rodante...

Los modelos de simulación se han extendido en el estudio de las diferentes redes ferroviarias existentes en el mundo, usados tanto para la planificación de infraestructuras como de horarios (Middelkoop y Bouwman, 2000). La mayoría de las empresas encargadas de la administración de las infraestructuras ferroviarias dispone de su propio entorno de simulación además, diferentes softwares han sido usado para el desarrollo de simulaciones: paquetes software de simulación para ferrocarriles, por ejemplo RailSys o MOM; paquetes software de simulación general de procesos, por ejemplo Arena; software de programación. No se va a realizar una revisión de todos estos softwares (Abril et al., 2008), sino que se va a ilustrar el uso de los mismos para establecer cómo el retraso puede depender de diferentes factores, de los cuales la utilización de la capacidad es el más interesante (Ragaraj et al, 2003).

Como ejemplo, en la figura siguiente se muestra el diagrama de flujo del entorno de simulación RailSys, usado por Demitz et al (2004) para el perfeccionamiento de horarios. RailSys hace uso de tres tipos de datos de entrada: infraestructura, tipos de trenes y programación horaria. La infraestructura incluye detalles sobre los tramos de red, intercambiadores, señales y bloques, junto con velocidades máximas y gradientes de cada una de las secciones. El tipo de tren incluye datos sobre la aceleración, el potencial de frenada y la prioridad. La programación horaria describe los puntos de origen y destino de los trenes y la hora programada de salida y permanencia en cada estación. En el núcleo del sistema los movimientos de los trenes, incluyendo sus tiempos de tránsito y llegadas a las estaciones, son simulados acorde a las características de los trenes e infraestructuras. Existe la posibilidad de introducir aleatoriedad en los retrasos en las paradas y en el tiempo de salida. Los datos de salida son por ejemplo el instante de tiempo en que los trenes pasan por cada estación.

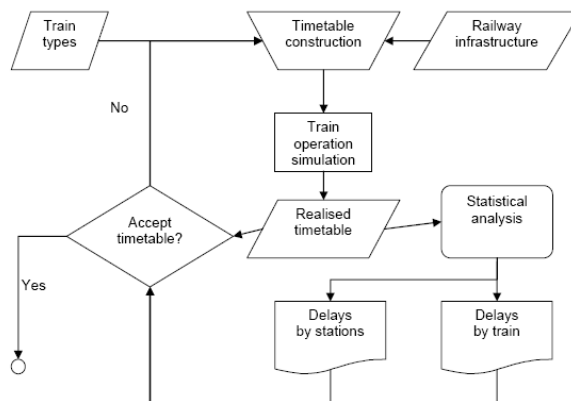


Figura 3: Diagrama de flujo del simulador RailSys

Un estudio de Hallowell y Harper (1998) usa un modelo desarrollado previamente para el cálculo de los retrasos dentro de una herramienta para la optimización de los horarios de trenes. Con este objetivo son desarrolladas simulaciones Monte Carlo de dos líneas ferroviarias en USA. Dado que el retraso depende tanto de la incertidumbre en el tiempo de salida y del volumen de tráfico, desarrollan escenarios para volúmenes de tráfico bajo, medio y alto, y para 50%, 100% y 150% de desviación estándar en los errores de tiempo de salida. Concluyen que la media del retraso es bastante sensible al volumen de tráfico, mientras que la desviación estándar del retraso es bastante sensible a la desviación estándar del error en la salida.

Leilich (1998) utiliza la simulación para encontrar relaciones entre distintos parámetros y el retraso medio por tren. Una gráfica de este estudio se muestra en la Figura 4.

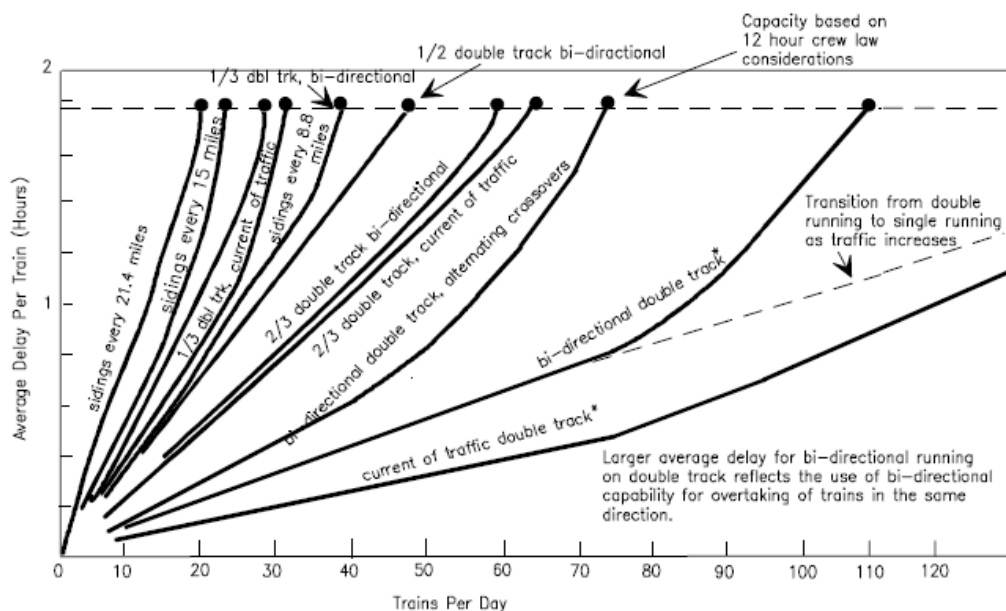


Figura 4: Relaciones entre Volumen de Tráfico y la Media del Retraso para diferentes configuraciones de una línea férrea de 100 millas

El trabajo realizado por Rietveld et al. (2001) no presenta el típico estudio de simulación; aún así, es bastante interesante porque hace una mirada al tema de la fiabilidad en el transporte público desde la visión del pasajero en lugar de hacerlo desde la perspectiva del servicio en sí. Esto significa un cambio de perspectiva, pasando de un estudio de la fiabilidad de los tiempos de llegada de los trenes a un estudio de la fiabilidad en los tiempos de llegada de los pasajeros

o cargas. Para realizar esto se debe ponderar el retraso de los trenes con el número de pasajeros o cargas afectados. Lo más importante es el cambio de atención desde la fiabilidad de un simple tren a la fiabilidad de una completa cadena de transporte. Por lo cual interconexiones que anteriormente eran olvidadas entran ahora en acción. Además, sugieren diferentes medidas de la fiabilidad y una metodología para calcular la fiabilidad para viajes o envíos que incluye transferencia de vehículos o cambios de modo de transporte.

Carey y Carville (2000) evalúan mediante simulación la propagación del retraso en una gran estación. Carey y Carville (2003) desarrolla heurísticas para encontrar programaciones horarias en las terminales que mejoren los retrasos de los trenes, estos horarios son testados mediante simulación.

3.3. Análisis estadístico del retraso

Un tercer camino para estudiar las relaciones existentes entre el retraso y la capacidad utilizada de la red es mediante el desarrollo de alguna clase de análisis estadístico. En muchos casos, lugares o líneas de trenes con una alta impuntualidad son estudiados para encontrar cuellos de botella. Esta clase de análisis es muchas ocasiones es llevado a cabo por las propias compañías, por lo que los resultados permanecen alejados del mundo científico.

Uno de los estudios más teóricos sobre el tratamiento de datos estadísticos es llevado a cabo por Goverde et al. (2001), que analiza los datos de los trenes alrededor de la estación de Eindhoven durante una semana. Buscan las distribuciones de los tiempos de salida y llegada así como de la prolongación en los tiempos de parada en las estaciones. Yuang y Hansen (2004) analizan en tráfico de trenes en los alrededores de La Haya con el mismo propósito.

Gibson et al. (2002) realizan un estudio pionero basado en datos de la red ferroviaria del Reino Unido. En su artículo desarrollan una metodología para determinar el coste marginal, referido al “coste de congestión”, de un tren adicional. Este coste de congestión muestra el retraso secundario originado por un nivel dado de retraso primario. Un retraso primario en una programación horaria descongestionada sólo podrá ocasionar moderados retrasos secundarios, mientras que en una programación horaria con un alto nivel de congestión los retrasos secundarios ocasionados pueden ser considerables (Figura 5). Así, el coste de congestión se incrementa con el porcentaje de capacidad utilizado. El propósito de Gibson et al. (2002) es relacionar los retrasos secundarios con la capacidad utilizada, para poder reflejar los costes de congestión en los cargos de acceso a la infraestructura. Con dicho objetivo realizan una regresión de los retrasos secundarios y de la capacidad utilizada para diferentes secciones de vías y diferentes periodos de tiempo, y encuentran que una relación exponencial es la más ajustada a los datos.

Un trabajo realizado por Olsson y Haugland (2004) estudia la correlación existente entre la puntualidad en el tiempo de llegada y una serie de factores tales como la puntualidad en la salida, el número de pasajeros, el número de pasajeros por asiento y el consumo de capacidad de la infraestructura. Gorman (2008) identifica los factores que más afectan a la congestión ferroviaria a través de un análisis estadístico. Gorman predice el tiempo de transito total a través del conocimiento del tiempo de transito ideal y esos factores de congestión previamente estudiados. Krueger (1999) realiza un modelo paramétrico para el uso en la planificación de la capacidad ferroviaria. Este modelo paramétrico es una practica herramienta usada para mejorar la utilización de las vías a través de la medida y monitorización de las mismas.

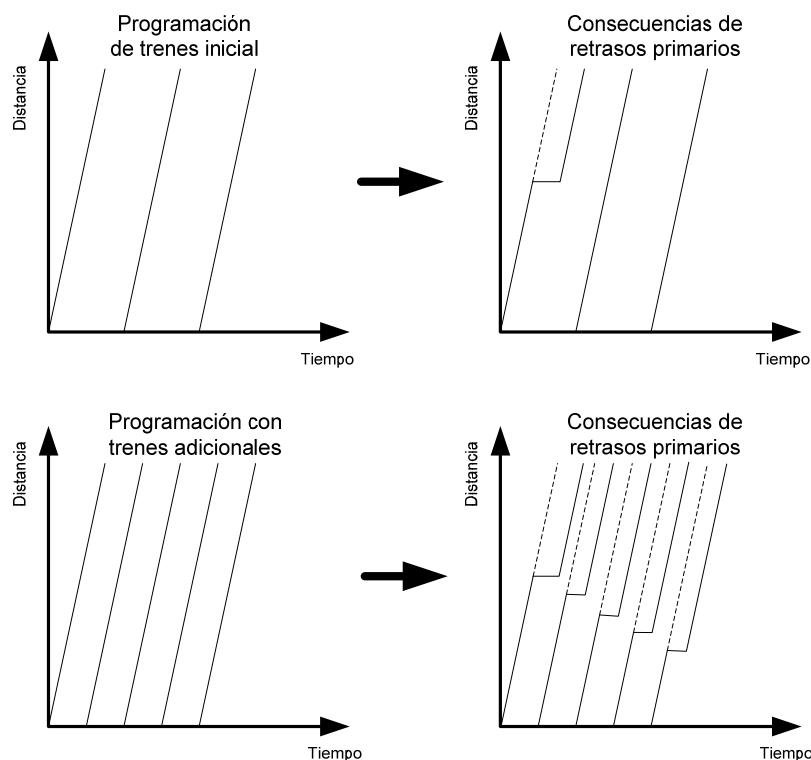


Figura 5. Efecto de la separación existente entre trenes sobre los retrasos secundarios

Referencias

- Abril, M., Barber, F., Ingolotti, L., Salido, M. A., Tormos, P., y Lova, A. 2008. An assessment of railway capacity. *Transportation Research Part E*, vol. 44, no. 5, pp. 774-806.
- Allen, W. B., Mahmoud, M. D., y McNeil, D. 1985. Importance of time in transit and reliability of transit time for shippers, receivers, and carriers. *Transportation Research Part B*, vol. 19, no. 5, pp. 447-456.
- Bhat, C. R. y Sardesai, R. 2006. The impact of stop-making and travel time reliability on commute mode choice. *Transportation Research Part B*, vol. 40, no. 9, pp. 709-730.
- Burdett, R. L. y Kozan, E. 2006, Techniques for absolute capacity determination in railways, *Transportation Research Part B*, vol. 40, no. 8, pp. 616-632.
- Carey, M. y Carville, S. 2000, Testing schedule performance and reliability for train stations, *Journal of Operational Research Society*, vol. 51, no. 6, pp. 666-682.
- Carey, M. y Carville, S. 2003, Scheduling and platforming trains at busy complex stations, *Transportation Research Part A*, vol. 37, no. 3, pp. 195-224.
- Carey, M. y Kwiecinski, A. 1995. Properties of expected costs and performance measures of stochastic models of scheduled transport. *European Journal of Operational Research*, vol. 83, pp. 182-199.
- Carey, M. y Kwiecinski, A. 1994, Swapping the order of scheduled services to minimize expected costs of delays, *Transportation Research Part B*, vol. 28, p. 409.
- Carey, M. 1999, Ex ante heuristic measures of schedule reliability, *Transportation Research Part B*, vol. 33, no. 7, pp. 473-494.

- Cicak, M. y Mandic, D. 1998, A model for calculation of railway lines capacity utilization in relation to the traffic volume oscillations, *Civil engineering and environmental systems*, vol. 15, no. 1, pp. 67-86.
- de Kort, A. F., Heidergott, B., y Ayhan, H. 2003, A probabilistic (max,+) approach for determining railway infrastructure capacity, *European Journal of Operational Research*, vol. 148, no. 3, pp. 644-661.
- Demitz, J., Hubschen, C., y Albrecht, C. 2004, Timetable stability-using simulation to ensure quality in a regular interval timetable. In *Computers in Railways IX*, ed.J.Allan, CA Brebbia, RJ Hill, G.Sciutto, and S.Sone pp. 549-562.
- Dorfman, M. J. y Medanic, J. 2004, Scheduling trains on a railway network using a discrete event model of railway traffic, *Transportation Research Part B*, vol. 38, no. 1, pp. 81-98.
- Fransoo, J. C. y Bertrand, J. W. M. 2000, An aggregate capacity estimation model for the evaluation of railroad passing constructions, *Transportation Research Part A*, vol. 34, no. 1, pp. 35-49.
- Ghoseiri, K., Szidarovszky, F., y Asgharpour, M. J. 2004, A multi-objective train scheduling model and solution, *Transportation Research Part B*, vol. 38, no. 10, pp. 927-952.
- Gibson, S., Cooper, G., y Ball, B. 2002, The Evolution of Capacity Charges on the UK Rail Network, *Journal Of Transport Economics And Policy*, vol. 36, no. 2, pp. 341-354.
- Gorman, M. F. 2008, Statistical estimation of railroad congestion delay, *Transportation Research Part E*.
- Goverde, R. M. P. y Odijk, M. A. 2002, Performance evaluation of network timetables using PETER, in *Computers in Railways VIII* pp. 731-740.
- Goverde, R. M. P., Hooghiemstra, G., y Lopuhaä, H. P. 2001, Statistical Analysis of Train Traffic: The Eindhoven Case DUP Science.
- Hallowell, S. F. y Harker, P. T. 1998, Predicting on-time performance in scheduled railroad operations: methodology and application to train scheduling, *Transportation Research Part A*, vol. 32, no. 4, pp. 279-295.
- Hansen, I. A. 2000, Station capacity and stability of train operations, in *Computers in Railways VII*, J. Allan et al., eds., WIT Press, Southampton (United Kingdom), pp. 853-860.
- Higgins, A. y Kozan, E. 1998, Modeling Train Delays in Urban Networks, *Transportation Science*, vol. 32, no. 4, pp. 346-357.
- Higgins, A., Kozan, E., y Ferreira, L. 1995, Modelling delay risks associated with train schedules, *Transportation Planning and Technology*, vol. 19, no. 2, pp. 89-108.
- Higgins, A., Kozan, E., y Ferreira, L. 1996, Optimal scheduling of trains on a single line track, *Transportation Research Part B*, vol. 30, no. 2, pp. 147-161.
- Huisman, T. y Boucherie, R. J. 2001, Running times on railway sections with heterogeneous train traffic, *Transportation Research Part B*, vol. 35, no. 3, pp. 271-292.
- Huisman, T., Boucherie, R. J., y van Dijk, N. M. 2002, A solvable queueing network model for railway networks and its validation and applications for the Netherlands, *European Journal of Operational Research*, vol. 142, no. 1, pp. 30-51.
- Krueger, H. 1999. Parametric modeling in rail capacity planning. *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*. Eds P. A. Farrington, H. B. Nembhard, D. T. Sturrock, and G. W. Evans.

- Leilich, R. H. Application of simulation models in capacity constrained rail corridors, IEEE Computer Society Press Los Alamitos, CA, USA, pp. 1125-1134.
- Middelkoop, D. y Bouwman, M. Train network simulator for support of network wide planning of infrastructure and timetables in: Computers in Railways VII (Proceedings COMPRAIL 2000, Bologna) WIT Press. 2000. Southampton.
- Olsson, N. O. E. y Haugland, H. 2004, Influencing factors on train punctuality—results from some Norwegian studies, Transport Policy, vol. 11, no. 4, pp. 387-397.
- Rangaraj, N., Johri, M., y Naik, R. Simulator for Railway Line Capacity Planning, operational research and its applications p. 516.
- Rietveld, P., Bruinsma, F. R., y van Vuuren, D. J. 2001, Coping with unreliability in public transport chains: A case study for Netherlands, Transportation Research Part A, vol. 35, no. 6, pp. 539-559.
- Sahin, I. 1999, Railway traffic control and train scheduling based on inter-train conflict management, Transportation Research Part B, vol. 33, no. 7, pp. 511-534.
- Schwanhäusser, W. 1994, The status of German railway operations management in research and practice, Transportation Research Part A, Policy and practice, vol. 28, no. 6, pp. 495-500.
- U. I. C. 405-1 (2003), Capacity, International Union of Railways.
- Yuan, J. y Hansen, I. A. 2004, Analyses of scheduled and real capacity utilization of a major Dutch railway station, J.Allan et al pp. 595-602.