

ESTUDIO DE LA CAPACIDAD EN ESTACIONES FERROVIARIAS: METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO TEÓRICO

Juan Manuel Aguado López

Técnico. Ineco. España.

Clara Zamorano Martin

Profesora Titular de Ferrocarriles. UPM. España.

Javier Achutegui Hernandez

Jefe de Adjudicación de Capacidad. ADIF. España.

RESUMEN

Desde su aparición, el ferrocarril se ha caracterizado por ser el medio más eficiente para transportar tanto viajeros como mercancías a medias – largas distancias. Una de sus principales características, ser un transporte guiado que debe discurrir por una plataforma propia y específica, hace que sean las estaciones, los nodos de transporte, los puntos donde se presentan fenómenos de congestión que van afectando con el tiempo al conjunto de la red. Actualmente los principales nodos de la red ferroviaria española, particularmente las estaciones de mayor afluencia de tráfico, muestran síntomas de saturación. Debido a esta situación, resulta de especial interés disponer de una herramienta que permita cuantificar la capacidad de estos nodos, entendida como el número de circulaciones que pueden ser atendidas en un periodo de tiempo, bajo unas condiciones de calidad y estabilidad, para dimensionar las insuficiencias de capacidad y proponer las soluciones más adecuadas para cada caso. Este estudio presenta un modelo de cálculo que permite determinar la capacidad de los nodos ferroviarios congestionados, particularmente de las estaciones ferroviarias con gran afluencia de tráfico.

Habitualmente, los estudios enfocados al cálculo de la capacidad de las estaciones han estado centrados en el análisis de las incompatibilidades entre circulaciones y la formación y propagación de retrasos. Sin embargo, en contraposición a estas aproximaciones, el modelo desarrollado se basa en las características de la infraestructura, de los servicios prestados y la experiencia de explotación, obteniendo con ello una aproximación flexible y aplicable a las diferentes configuraciones que presentan las distintas estaciones.

En una situación de congestión en las estaciones se hace necesario realizar actuaciones que permitan devolver a la normalidad la explotación de éstas. En este sentido, el modelo presentado provee de una herramienta de decisión que permite estudiar y optimizar la capacidad para las composiciones de tráfico existentes en las estaciones.. Esto se debe a que el modelo puede ser reconfigurado para cada caso en función de las características de las distintas actuaciones previstas.

1. INTRODUCCIÓN

El ferrocarril es un modo de transporte caracterizado por el seguimiento de un itinerario fijo, guiado y controlado, por lo cual es capaz de aportar una elevada capacidad de transporte, alcanzando elevadas velocidades de explotación sin que ello suponga un elevado consumo energético. Esta amplia capacidad de transporte hace que dicho modo sea propicio para un amplio espectro de aplicaciones, cubriendo desde el transporte a medias y largas distancias de mercancías y pasajeros hasta el transporte de pasajeros en las crecientemente congestionadas urbes. El ferrocarril juega, por tanto, un papel clave en el conjunto del sistema de transporte, por lo que es fundamental prever la saturación de los principales nodos de la red ferroviaria y hacer un análisis de la capacidad que estos son capaces de aportar.

Para comprender la situación actual del sistema ferroviario es necesario analizar su irregular evolución a lo largo del tiempo ya que, desde la puesta en servicio de la línea entre Liverpool y Manchester en 1830 y su consecuente rápida expansión a nivel mundial, la popularización del motor a combustión con el nacimiento del automóvil y la concatenación de guerras durante la primera mitad del siglo XX relegarían al ferrocarril a un segundo plano con gran parte de la infraestructura europea devastada. El inicio de la recuperación de la popularidad del ferrocarril vendría asociado al éxito inmediato de la alta velocidad en Japón. Este hecho derivaría en el inicio de distintos proyectos de alta velocidad a lo largo del mundo, y que en España se traduciría en la línea de Madrid - Sevilla en 1992.

El desarrollo de la alta velocidad ferroviaria española supuso un desafío tanto técnico como tecnológico. Para afrontarlo se hizo necesario mejorar las características de los elementos que condicionan la operación de los ferrocarriles: diseñar nuevos materiales móviles adaptados a las elevadas velocidades, establecer nuevas infraestructuras capaces de proveer de condiciones de circulación seguras y confortables (condicionadas por los mayores esfuerzos impuestos por el aumento de la velocidad), y desarrollar sistemas de protección que permitiesen asegurar la recepción e interpretación de las señales por parte de los maquinistas.

En España supuso la integración de una red ferroviaria de distinto ancho a la previamente establecida, por lo que su establecimiento ha requerido de infraestructuras específicas que han sido el resultado de la adaptación de las existentes o la nueva construcción en casos necesarios. Debido a la diferencia entre anchos de vía la red de alta velocidad tiene una permeabilidad muy limitada con la ya existente, que sólo se da en puntos específicos equipados con cambiadores de ancho de vía o vías de triple hilo adaptadas para la circulación de tráfico de ambos anchos. Dichos equipamientos se encuentran ubicados en el entorno de las principales estaciones de la red, donde conviven tráfico de ambos anchos de vía y se hace necesaria esta permeabilidad para favorecer la accesibilidad a la red de alta velocidad de tráfico que conectan núcleos de población en los que dicha red aún no ha sido desarrollada.

Con la adición de los cambiadores de ancho se produce la reafirmación de la importancia de las estaciones como nodos de la red ferroviaria. Sin embargo, el papel de las estaciones no se limita a este entorno, ya que componen el enlace necesario entre la realidad urbana y la red ferroviaria. Su impacto en el sistema de transporte de las ciudades en las que se enmarcan suele ser considerable: salvo en casos de nueva construcción, las estaciones se ubican en los sectores centrales de las ciudades, requiriendo una amplia reserva de terreno para su establecimiento y ampliación. Estas ubicaciones son privilegiadas, debido a que permiten atraer grandes volúmenes de pasajeros, lo cual hace necesaria una coordinación con el transporte público local que se suele traducir en el establecimiento de grandes nodos intermodales, indispensables para la movilidad diaria en las urbes.

La expansión de la intermodalidad con el modo ferroviario es una de las principales consecuencias de las políticas de transporte impulsadas desde la Unión Europea, encaminadas al impulso de dicho modo en un afán de promover la eficiencia de las redes de transporte de los Estados miembros. Entre estas políticas cabe destacar dos en el plano ferroviario: el establecimiento de una red ferroviaria interoperable y la liberalización de los servicios comerciales de viajeros y mercancías.

En España estas medidas se han adoptado mediante la creación de la red de Alta Velocidad con estándares interoperables y la segregación de Renfe (organismo público que ejercía las veces de operador y administrador de infraestructuras de forma simultánea), en Adif (como empresa administradora de infraestructura ferroviaria) y Renfe Operadora permitiendo con ello el concurso de diferentes operadores por los servicios comerciales.

Debido a la apertura del mercado de servicios comerciales de viajeros se hace necesario armonizar los tráficos a ofertar a los distintos operadores, por lo que la capacidad ferroviaria se debe cuantificar y adjudicar en función de los trayectos a realizar. Tradicionalmente esta capacidad ofertada se limitaba a la reserva del trayecto en las líneas ocupadas, sin embargo, una posible congestión de los principales nodos ferroviarios hace necesario coordinar dichas reservas con el estudio y la adjudicación de la capacidad disponible en aquellas estaciones consideradas como susceptibles de encontrarse saturadas.

Por tanto, el estudio de la capacidad de las estaciones ferroviarias se alza como una consecuencia del aumento de la demanda inducida por la liberalización de los servicios comerciales que introduce nuevos operadores en infraestructuras con una elevada exigencia de puntualidad. Este aumento de la demanda junto con el grado de saturación ya existente puede inducir fallos o errores que desemboquen en retrasos, los cuales a su vez son capaces de transmitirse de tren a tren. Este efecto produce la amplificación de los retrasos, provocando la saturación del nodo y, dependiendo de la importancia del nodo dentro de la red ferroviaria, la totalidad de líneas puede llegarse a ver afectada.

El presente documento es el resultado de una colaboración en forma de prácticas de empresa con Adif, en el contexto de la redacción de un trabajo de fin de máster en ingeniería de caminos, canales y puertos, por lo que los datos empleados para la calibración del modelo son resultado de la operación real y los resultados obtenidos han sido cotejados con la experiencia de explotación.

2. ESTADO DEL ARTE

El funcionamiento de las redes de ferrocarril requiere de una planificación exhaustiva y eficaz, necesaria para asegurar que los servicios prestados tengan unos altos estándares de calidad, medida en puntualidad y seguridad. En escenarios de elevada demanda la necesidad de planificación se intensifica, surgiendo la necesidad de estudiar la capacidad de los elementos de la red más afectados, estableciendo un techo operacional a la oferta planteada a los operadores de la red.

2.1 Concepto de capacidad

Pese a ser una variable clave en la administración de las redes ferroviarias, la capacidad no es un concepto fijo, variando entre los distintos actores del sistema ferroviario (planificadores de infraestructura, planificadores del servicio y operadores). Es por esta situación que, a fin de unificar el concepto, la UIC propone una definición basada en la contabilización del número de circulaciones que pasan por un tramo de red en un periodo establecido, bajo unas condiciones de circulación establecidas (International Union of Railways 2004). De esta forma se reconoce que la capacidad de la red ferroviaria es un ente de cuatro dimensiones, oscilando entre el número de trenes, la velocidad de circulación, la heterogeneidad de servicios y la estabilidad de la red.

Sin embargo, la definición realizada en dicho informe resulta ser insuficiente para la comprensión de la capacidad aportada por la infraestructura, resultando en la necesidad de categorizar la capacidad en función de las condiciones respecto de las que se calcula. En este sentido Abril, Barber, Ingolotti, Salido, Tormos y Lova (2008) definen las siguientes categorías de capacidad:

- Capacidad teórica: representa el máximo número de trenes que podrían utilizar la infraestructura en unas condiciones matemáticamente perfectas, realizando suposiciones como que el tráfico es homogéneo. Por lo general suele constituir el límite superior de la capacidad, pues ignora las ineficiencias que surgen durante la operación real.
- Capacidad práctica: representa el número máximo de trenes que pueden utilizar la infraestructura en unas condiciones aproximadas a las de operación. Para ello se realizan unas suposiciones más realistas a las que emplea la capacidad teórica. En ciertas líneas adquiere una magnitud del 60 – 75 % de la teórica.

- Capacidad usada: representa el número de trenes que circulan realmente por la infraestructura. Es inferior o igual a la práctica.
- Capacidad disponible: diferencia entre la capacidad práctica y la usada.

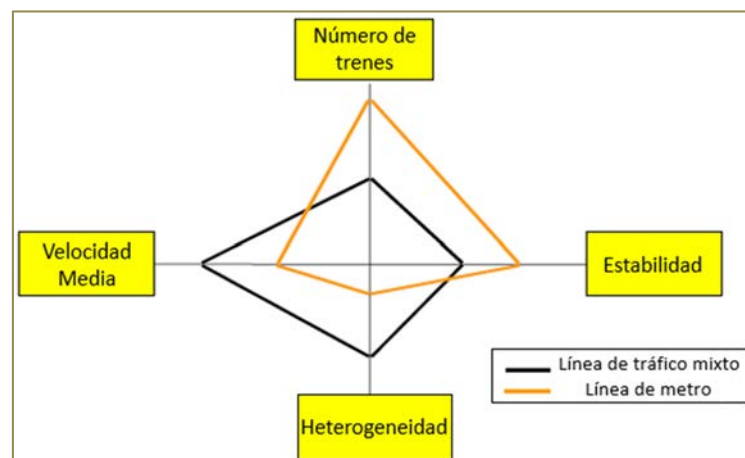


Fig. 1 - Factores que afectan a la capacidad (International Union of Railways 2004)

Estas definiciones se establecen para el estudio de la capacidad de las líneas, que ha sido el objeto tradicional de los estudios de la capacidad ferroviaria, por lo que Liu, Han y Li, (2012) definen la capacidad pasante. Dicha capacidad queda establecida como el número de trenes que se reciben y parten de una estación en un periodo de 24 horas, limitados por las condiciones de operación y de la infraestructura. De esta forma la capacidad aportada por una estación queda limitada por las restricciones impuestas, no sólo por la capacidad inherente a la infraestructura que compone la estación, sino también por la operación a la que se encuentra supeditada y la cual se ha de coordinar con el resto de la red.

2.2 Modelos de capacidad

La determinación de la capacidad y la planificación de su ampliación, son puntos clave en la gestión de las redes ferroviarias, adquiriendo mayor relevancia conforme aumenta la complejidad y la demanda en el sistema ferroviario (Burdett, 2015). El estudio de la capacidad de la red ferroviaria se ha orientado tradicionalmente al estudio de la capacidad de aquellos corredores ferroviarios en los que se detecta una dificultad a la hora de programar circulaciones. Junto con estas líneas de la red, las estaciones han sido tradicionalmente consideradas como generadoras de cuellos de botella (Yuan y Hansen, 2007; Carey y Carville, 2003), pero el estudio de su capacidad ha sido abordado en menor medida. La determinación de la capacidad se aborda mediante la modelización de esta, siendo el modelo más comúnmente empleado en el entorno europeo el establecido por la International Union of Railways (International Union of Railways, 2004; International Union of Railways, 2013). Cabe destacar que, tal como establecen Malavasi, Molková, Ricci y Rotoli (2014), los modelos empleados en la determinación de la capacidad se pueden clasificar a grandes rasgos en dos categorías:

- Analíticos: emplean fórmulas matemáticas generalistas para obtener información y resultados aproximados que puedan ser usados como referencia.
- Simulaciones: permiten obtener una aproximación más precisa de la realidad, replicando las condiciones de la vía. Sin embargo, pese a dar una información más precisa, requieren de definiciones detalladas de los equipos de vía.

Los métodos basados en simulaciones se pueden diferenciar en función del ámbito de aplicación: los modelos microscópicos permiten simular la operación de la estación (Han, Yue, y Zhou, 2014), pudiendo llegar a incluir el impacto de los retrasos y su propagación a lo largo del horario de servicio, cuyo impacto en la determinación de la capacidad ha sido estudiado por Zieger, Weik, y Niessen (2018). Por otra parte, los modelos macroscópicos y mesoscópicos permiten emular y validar las condiciones de funcionamiento de una red; permitiendo los mesoscópicos modelizar puntos clave, como pueden ser los cuellos de botella, con características propias de los microscópicos (Shi, Zhao, Yang, Guo, Zhang, y Feng, 2020) a mayor coste computacional.

La principal ventaja que poseen los modelos analíticos reside en su capacidad de aportar resultados significativos sin tener que recurrir a la simulación, incurriendo, por tanto, en menores costes (Hansen y Pachel, 2008). Los modelos analíticos han evolucionado con el paso del tiempo, pasando de considerar únicamente las incompatibilidades entre movimientos en un nodo, a integrar la teoría de colas y modelos probabilísticos, aumentando su potencia conforme los medios computacionales se han desarrollado (Malavasi et al 2014). En este sentido los modelos analíticos, al permitir realizar una aproximación teórica y puramente matemática, son más adecuados para aplicarse en fases de planificación de infraestructuras. Estos estudios se fundamentan en la optimización de distintas variables de la operación de la estación, como pueden ser las secuencias de tráfico que pasan por la estación (Jovanović, Pavlović, Belošević y Milinković 2020). Así mismo, estos modelos se pueden complementar con métodos de simulación que permitan su validación (Altazin, Dauzère-Pérès, Ramond, y Tréfond, 2020) o su inclusión en una red de mayor entidad. Debido a su naturaleza matemática, el análisis de la sensibilidad de las variables de las que parten estos modelos aporta una herramienta para la toma de decisiones en la expansión de la capacidad (Bevrani, Burdett, y Yarlaga, 2017).

Como se ha expuesto, la capacidad ferroviaria es un concepto esquivo que varía en función del entorno en el que se considere y de la metodología empleada para su determinación, pero no sólo puede verse afectada por estas variables: El contexto de administración y operación de la infraestructura también resulta determinante. Tal como exponen Pouryousef y White, (2013), las condiciones de contorno del sistema ferroviario varían de una forma muy significativa en los entornos estudiados (Europa y Estados Unidos), resultando en concepciones y metodologías diferenciadas para la determinación de la capacidad. Estas características, reflejadas en la Fig. 2, han propiciado que en estos dos entornos característicos exista una diferenciación clara entre los métodos de determinación de

capacidad: En Europa, los estudios de capacidad realizados dependen ampliamente de simulaciones tanto de tráfico como de horarios gracias a la disponibilidad de software como RailSys y OpenTrack, pudiendo combinarse estas simulaciones con métodos analíticos; mientras que en Estados Unidos, debido a su operación no dependiente de horarios, las modelizaciones realizadas dependen de la simulación de los tráfico y, en mayor medida, de métodos analíticos (Pouryousef, Lautala y White, 2015).

	The U.S. Rail Network	Europe Rail Network
Rolling Stock Operations Signaling Infrastructure	Private Ownership of Rail Infrastructure Bidirectional double-tracks / Single track Longer sidings/yards Higher axle loads Many existing grade crossings	Public Ownership of Rail Infrastructure Directional double-tracks Shorter distance between sidings/yards Larger radius horizontal curves
	Few corridors still under manual block operation	Majority of corridors under signaling systems Cab signaling & automated train stop aspects
	Preponderance freight traffic Improvised operations pattern	Preponderance passenger traffic Structured operations (freight, passenger) Higher punctuality for passenger and freight trains (short delays)
	Longer and heavier freight trains Diversity of freight trains	Faster and more modern passenger trains (HSR) Diversity of passenger trains

Fig. 2 – Principales diferencias entre los sistemas ferroviarios europeos y de Estados Unidos (Pouryousef y White, 2013).

3. METODOLOGÍA PROPUESTA

Ante la reconocida situación de saturación de los nodos más importantes de la red ferroviaria española se hace necesario estudiar la situación actual y los posibles escenarios derivados de ésta. El estudio de la capacidad asociada a una estación ferroviaria conlleva el estudio de su contexto, su operación y sus características físicas, por lo que resulta necesario desarrollar una metodología que permita establecer dicha capacidad de forma uniforme para los casos presentados, a la vez que conserve una flexibilidad suficiente para reconocer y adaptar sus particularidades.

3.1 Definición de capacidad

Como base la metodología empleada para la determinación de la capacidad de las estaciones ferroviarias se ha establecido el concepto de capacidad definido en las Fichas UIC 406: el número total de trenes que pasan por un tramo de vía en un periodo de tiempo determinado, con una calidad de servicio adecuada y considerando tanto el trayecto empleado como las condiciones establecidas por el administrador de infraestructuras (International Union of Railways 2004).

La definición establecida se hace extensiva tanto para los tramos de vía individuales como para los nodos que formen parte de una red ferroviaria, sin embargo, para su aplicación a las estaciones ferroviarias se va a considerar una puntualización a dicha definición, contabilizando el número de circulaciones comerciales capaces de ser operadas en un periodo de tiempo en las vías de estacionamiento. Esta modificación se sustenta en el hecho de que el complejo de una estación puede poseer vías pasantes por las cuales circulen trenes que no se vean condicionados por el funcionamiento de la misma, no realizando parada y siendo de paso prioritario, por lo que es poco común que sean cizallados (cruces al mismo nivel) por tráficos procedentes de la estación.

La adopción de esta definición conlleva una serie de consideraciones, ya que como se reconoce en la ficha UIC 406 (International Union of Railways 2004), la capacidad ferroviaria es un ente de cuatro dimensiones, interviniendo no sólo el número de trenes, sino la velocidad, la estabilidad y la heterogeneidad. Debido a que tres de estas dimensiones quedan fuera de la cuantificación de la capacidad, se hace necesario integrarlas en el modelo, con el objetivo de que éste sea lo más fidedigno con la realidad presentada en la operación normal.

3.2 Caracterización del tráfico

El tráfico ferroviario que solicita una estación es una pieza clave de la concepción de la metodología al ser el objeto del estudio para la determinación de la capacidad. La modelización del mismo ha de reflejar la heterogeneidad operativa que puede introducir en la estación de estudio, pudiendo variar tanto cuestiones ligadas al propio material móvil, como la longitud, la electrificación o el ancho de vía para el que se encuentran dispuestos (o la capacidad de cambiarlo); como características ligadas a la explotación: el número de circulaciones comerciales que son prestados por una composición a su paso por una estación, si pueden acoplarse/desacoplarse con otros materiales, o si la parada que realizan se produce por cuestiones comerciales o técnicas.

La definición de capacidad adoptada permite homologar los criterios de capacidad contabilizada en líneas a estaciones, pues si bien la definición clásica indica el número de trenes que pasan por una sección de vía, estos trenes a su paso por dicha sección, se encuentran prestando un servicio comercial con un origen y un destino definidos, por lo que se pueden identificar como circulaciones comerciales. La modificación se sustenta en que, si bien una estación puede ser origen o destino de circulaciones, ello no conlleva que sean el origen o el destino final del tren (entendido como el material móvil que presta servicios comerciales), ya que éstos pueden realizar operaciones de rotación, prestando con ello servicios comerciales distintos respecto del prestado al ingresar a una estación. En este sentido, en el presente documento, se referirá un material móvil de distinta forma en función de sus acciones.

- **Movimiento:** se refiere a la acción de desplazamiento de un material móvil, pudiendo relacionar vías de estacionamiento con vías de apartado, el acceso de la estación u otras vías de estacionamiento. Forman parte de una circulación.
- **Circulación:** se refiere a la marcha de un tren entre un origen y un destino determinados, prestando un único servicio. Aquellas circulaciones que presten un servicio comercial serán las que permitan definir la capacidad de la estación.
- **Tren:** se refiere al material móvil, puede prestar múltiples servicios comerciales dependiendo de la ventana temporal observada.

Debido a que la capacidad pasa de ser cuantificada como el número de trenes que pasan por un tramo de la infraestructura en un periodo de tiempo establecido, a la cantidad de circulaciones comerciales que pueden ser prestados en la estación (o la cantidad de trenes que pueden ser operados) en un periodo de tiempo establecido, se hace necesario analizar el tiempo de ocupación de las vías de la estación que es requerido por el tráfico. Debido a que el conjunto del tráfico es heterogéneo respecto a las necesidades de parada de cada circulación planteada, la modelización del mismo requerirá la caracterización de las circulaciones en función de la ocupación de las vías del conjunto de la estación y de la proporción en que se dan.

Así mismo debe de acotarse el periodo temporal en el cual se van a producir los tráfico que van a ser contabilizados. Este período temporal se corresponde con el horario de circulación de los trenes, que contempla dos horas adicionales al horario de servicio contemplado en la Declaración de la Red, de 6:00 a 22:00, de forma que se permita finalizar las circulaciones planteadas al final del mismo y que finalicen su recorrido antes de las 24:00.

Cabe destacar que la consideración de la definición de capacidad adoptada excluye una tipología de movimientos: aquellos que son necesarios para la correcta operación de los tráfico en las estaciones, pero que no forman parte de una circulación comercial. Estos movimientos relacionan la estación con vías de apartado o instalaciones designadas para el estacionamiento y/o mantenimiento de los materiales móviles, donde se realizan de forma parcial o total las operaciones requeridas para la puesta en servicio del material móvil. Estos movimientos se contemplan de forma indirecta, asociándolos a la circulación comercial anterior o posterior que realiza el material móvil.

3.3 Caracterización de la infraestructura

Las estaciones ferroviarias, al igual que en el caso del tráfico, distan de ser homogéneas para cada caso de estudio. En este sentido, las diferencias principales vendrán inducidas por la disposición de las vías, las cuales se pueden diferenciar en tres categorías similares a las establecidas en la ficha UIC 406 (International Union of Railways 2004):

- Vías de acceso: permiten, mediante aparatos de vía, distribuir los trenes entre las distintas vías que conforman el nodo. Un nodo puede tener una o dos zonas de cambio, pudiendo distinguirse con ello dos disposiciones de nodo, el fondo de saco y el pasante.
- Vías de estacionamiento: en las que los trenes pueden realizar las operaciones que requieran, pudiendo variar desde la marcha normal al estacionamiento por razones de limpieza, catering o embarque/desembarque de viajeros.
- Vías de apartado: vías en las cuales un tren puede estacionar pero que no se encuentran conectadas a la terminal de viajeros de la estación. Dependiendo de las características del equipamiento que posean, se podrá dar determinados servicios a los trenes que en ellas se encuentren estacionados. Estas vías no se encuentran diferenciadas como tal en la ficha UIC, pero de encontrarse en el complejo de la estación, permiten acortar el estacionamiento de determinados tráficos en las vías de estacionamiento.

La ocupación de las vías contabilizada para cada circulación será la total, siendo necesario realizar una simulación de marcha desde la señal de entrada de la estación. La caracterización del tiempo de ocupación para cada circulación considerada será el resultado de añadir el tiempo resultante de la marcha a la ocupación de las vías realizada en función de los servicios requeridos en cada caso.

Las características del conjunto de las vías de la estación pueden no ser homogéneas, pudiendo variar su longitud de estacionamiento, la longitud de andén, la electrificación, el ancho con el que se encuentran dispuestas o pudiendo prestar servicio a una composición de circulaciones distinta al resto de vías. Por estas razones será necesario segregar las vías en conjuntos de características similares. La capacidad del conjunto de la estación será el resultado de agregar la capacidad aportada por las distintas agrupaciones de vías que hayan sido consideradas.

En la operación de las propias estaciones se pueden encontrar aparatos de vía que permiten dinamizar la gestión de los tráficos, permitiendo dar servicio a un mayor número de circulaciones de forma simultánea. Los aparatos de vía que se pueden encontrar en las estaciones y que se emplean para este fin son los bretelles, que conectan dos vías paralelas mediante cuatro desvíos simples; y los escapes, que se componen por dos desvíos sencillos y conectan dos vías paralelas en forma de cruz de San Andrés, conformando un escape doble que enlaza dos vías paralelas en ambos sentidos. Se compone por dos diagonales de carriles diferentes superpuestos, contando con una zona singular en la parte central donde tiene lugar la intersección de las dos vías desviadas.

El principal beneficio de los aparatos de vía es que permiten dotar a la infraestructura de una gran flexibilidad de operación, permitiendo cambiar de una vía a la adyacente en los cuatro sentidos de la circulación, todo ello minimizando el espacio ocupado. Su implementación en

las vías de estacionamiento de una estación permite dividir dos vías paralelas en cuatro sectores de operación, en los cuales se puede dar servicio de forma individualizada a distintos servicios. Si las vías se disponen en fondo de saco (sólo poseen un acceso) de los cuatro sectores sólo podrán emplearse tres de forma simultánea (dos orientados a las toperas y uno orientado al acceso), dejando el cuarto libre para permitir la salida de todas las circulaciones una vez éstas hayan terminado de realizar las operaciones requeridas. En caso de que las vías de estacionamiento se encuentren dispuestas de forma pasante (pudiendo acceder a ellas desde cualquier sentido de la circulación), se podrían operar hasta cuatro circulaciones de forma simultánea (una por cada sector de vía disponible), sin embargo se trata de un régimen de funcionamiento inestable que no se puede prolongar demasiado en el tiempo (debido a los tráficos pasantes a la estación deben ser acomodados en otras vías en la mayoría de los casos), por lo que lo normal es establecer su funcionamiento dejando un sector libre. La principal ventaja de los bretelles frente a los escapes es que permiten alternar el sector libre, mientras que en los escapes, este sector es fijo.

3.4 Determinación de la capacidad

De manera análoga a lo establecido por Abril et al. (2008), la capacidad teórica puede definirse como el máximo número de circulaciones a las que se pueden dar servicio en las vías de estacionamiento de la estación en unas condiciones matemáticamente perfectas. Para su cálculo se requiere caracterizar la estación, estableciendo las vías de estacionamiento y los aparatos de vía que permitan ampliar la capacidad de las vías en las que se encuentren; así como el estudio del tráfico y la ocupación que requiere.

Una vez caracterizado el tráfico que soporta la estación, pormenorizado para cada vía, se procede a agrupar dichas vías en función de sus características, tanto físicas como de demanda. En función de dichas características, se establece la capacidad aportada por cada vía tipo, partiendo de la ocupación requerida por cada servicio planteado y en la proporción determinada que caracterice su tráfico distintivo. Cabe destacar que entre las distintas tipologías de tráfico planteadas pueden encontrarse aquellas que realicen dos servicios independientes entre sí, pudiendo llegar a ser predominantes en las estaciones dispuestas en fondo de saco o que sean el origen o el destino final de los servicios comerciales. Para estos casos la capacidad consumida por cada circulación será la mitad de la consumida por la estancia total del tren.

Una vez obtenida la composición del consumo del tiempo del periodo considerado, establecido en una hora, a su vez determinada por la composición del tráfico considerado para cada vía tipo considerada, se puede determinar la capacidad teórica aportada agregando las distintas capacidades establecidas por cada tráfico y cada conjunto de vías considerado.

Debido a que la capacidad calculada no refleja la capacidad que puede ser operada en la estación, es necesario realizar consideraciones adicionales. El cálculo de la capacidad teórica asume que los tráficos prescritos para cada vía podrán sucederse sin interferir entre sí, por

lo cual, la primera consideración debe reflejar el impacto sobre la capacidad que tienen las condiciones de acceso a cada conjunto de vías considerado. Aplicando esta restricción se obtendrían el número máximo de trenes que se podrían operar en la estación, sin embargo, debido a que las estaciones se encuentran sujetas a unas condiciones de funcionamiento garantas de estabilidad, la capacidad que se puede ofertar a las empresas ferroviarias y operadores que en ellas planteen servicios comerciales debe ser estrictamente menor a la resultante del cálculo.

4. MODELO EMPLEADO

La aplicación de la metodología propuesta a un caso práctico se ha realizado mediante el modelo a continuación presentado y resumido en la figura 3. Este modelo, presentado de forma teórica, se ha usado para determinar la capacidad de varios casos de estudio en la red ferroviaria española.

4.1 Cálculo de la capacidad teórica

Como paso previo para determinar la capacidad teórica de la estación se deben definir tanto la infraestructura que la conforma como los tráficos que la solicitan. La caracterización de la infraestructura se puede realizar mediante un esquema de vías, al cual se agregará la información pertinente (datos que permitan la descripción de las vías, tales como el ancho de vía, la longitud de vía, la longitud de andén, la tensión de electrificación...), en función de la cual se agrupan en conjuntos de vía. Para cada conjunto de vía se establece un tiempo de acceso medio, que puede determinarse mediante una simulación de marcha, debiendo realizar un estudio del cizallamiento para aquellos trayectos que puedan verse afectados.

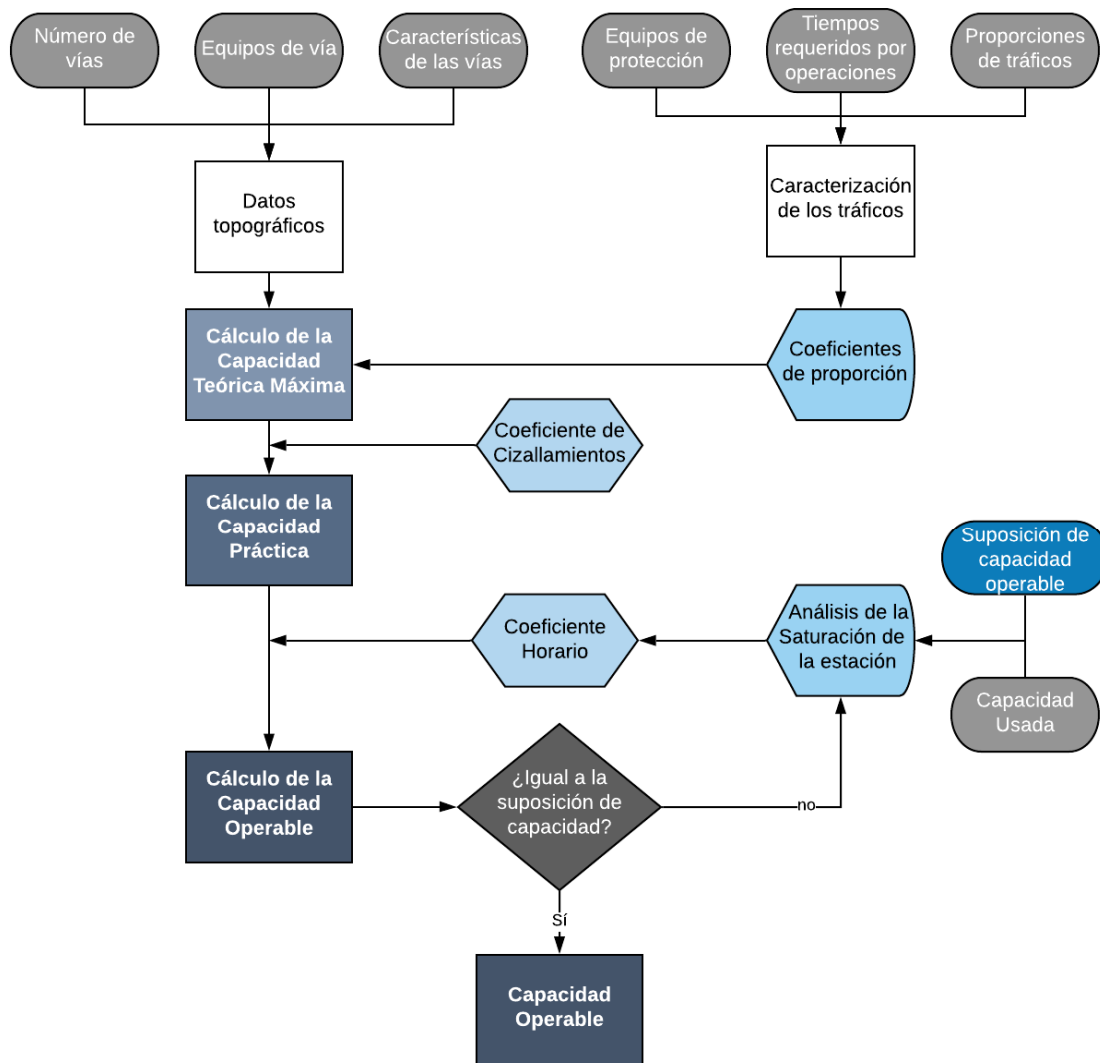


Fig. 3 – Diagrama de flujo del modelo propuesto. (Elaboración Propia)

La caracterización de los tráficos se realiza mediante la observación de las circulaciones que utilizan la estación, en una semana que se considere representativa del funcionamiento normal de ésta. Debido a que el registro de las paradas que realizan las circulaciones refleja aquellas asociadas a las que se realizan por motivos comerciales o técnicos, dicho registro puede resultar insuficiente al no representar el total de las paradas que puede realizar un tren en una estación. La parada no representada es aquella que se realiza al iniciar o finalizar un servicio, pudiendo relacionar dos servicios comerciales o un servicio comercial y un movimiento no comercial a vías de apartado o bases de mantenimiento cercanas. Para el correcto estudio de la ocupación de las vías se debe recurrir a los denominados como Gráficos de Ocupación de Vías (GOV), que permiten visualizar la ocupación de las vías de la estación producida por los trenes. Así mismo, combinando estos documentos con el esquema de vías de la estación se pueden comprender las operaciones de coordinación de tráficos que lleva a cabo el administrador de infraestructuras.

El tiempo de ocupación que requiere cada tren, las circulaciones y los movimientos comerciales serán las variables principales que permitan determinar la composición de tipologías de trenes que utilizan la estación. Una vez determinadas estas tipologías los GOV permiten adicionalmente realizar una segunda fase del agrupamiento de las vías de estacionamiento, estableciendo con ello aquellas que poseen tanto unas características físicas como una composición de circulaciones similares. Este segundo agrupamiento puede realizarse con los propios registros de circulaciones de la estación si a éstas se les ha agregado la vía de estacionamiento real. Con esta información podemos clasificar de forma general los trenes en las siguientes categorías:

- **Rotaciones:** Son trenes que llegan a la estación prestando un servicio comercial, realizan una parada destinada a la puesta en servicio del tren, realizando operaciones de limpieza, catering..., tras las cuales se procede al embarque de viajeros y parten de la estación prestando un servicio comercial independiente del inicial. Debido a ello, un tren produce dos circulaciones comerciales, que a su vez implican dos movimientos, también comerciales.
- **Pasantes:** Son trenes que llegan a la estación prestando un servicio comercial y que, tras una parada por razones técnicas o comerciales, parten de la misma prestando el mismo servicio. Por ello, un tren produce una circulación comercial que se traduce en dos movimientos, también comerciales.
- **Materiales vacíos:** Son trenes que llegan o parten de la estación prestando un servicio comercial, realizando un movimiento complementario (de acceso o salida de las vías de estacionamiento) no comercial, conectando la estación con talleres o vías de apartado. Estos trenes producirán, una circulación comercial y dos movimientos, de los cuales uno de ellos es comercial.
- **Acoplados:** Son trenes que se encuentran compuestos por dos circulaciones que al llegar a la estación se unen o separan, de forma que una de las circulaciones tiene origen o destino la estación mientras que la otra se comporta como un tren pasante. Por ello, un tren producirá dos circulaciones, ambas comerciales y tres movimientos, también comerciales.

Una vez determinados los conjuntos de vía a analizar y las tipologías de trenes que van a caracterizar el tráfico que las ocupa, se calcula su frecuencia de paso y un coeficiente de ajuste de proporción. Este coeficiente tiene como objetivo establecer el porcentaje real observado de cada tráfico para cada conjunto de vía, permitiendo obtener con ello, los tiempos que de media se consumen por cada circulación en una hora y para cada grupo de vía analizado. Estos tiempos permiten caracterizar la ocupación media que realizaría cada tipología de tráfico en una hora y con ello, las circulaciones que dicha tipología aportaría a la capacidad máxima de las vías estudiadas. La capacidad máxima, por tanto, se calcula en dos fases: en primer lugar, se agrega la capacidad aportada por cada tráfico a la vía tipo de cada conjunto de vías, lo cual permite obtener fácilmente la capacidad aportada por cada grupo de vías. Una vez se ha obtenido la capacidad aportada por cada conjunto de vías, estas

capacidades se agregan dando como resultado la capacidad teórica, la máxima a la cual la estación podría dar servicio en unas condiciones ideales.

4.2 Capacidad Práctica y Capacidad Operable

Como se ha establecido el cálculo de la capacidad teórica no resulta representativo de la capacidad que se puede o podría operar en unas condiciones de funcionamiento normales de la estación. Esto se debe a que el cálculo realizado se basa en la suposición de que una vez la vía queda libre otro tren entra para ocuparla, lo cual, pese a poder establecer un margen de tiempo por razones de seguridad, no resulta representativo al no contemplar las posibles incompatibilidades en los trayectos generados por los distintos movimientos requeridos por el conjunto de vías consideradas. Estas incompatibilidades derivan principalmente de la disposición de la playa de vías, que establece las condiciones de acceso a los sectores considerados y particularmente, los tráficos que quedan cizallados entre sí.

A fin de reflejar el impacto que la disposición de las vías de acceso tiene sobre la capacidad se determina el coeficiente de cizallamiento. Dicho coeficiente representa el número de trenes retrasados, cuyo tiempo de ocupación de vía es mayor al estrictamente necesario para realizar las operaciones por cuestiones de indisponibilidad de itinerario. De forma similar a lo establecido por Abril et al. (2008), dicho coeficiente reductor adquiere valores comprendidos entre 0,6 y 0,8 dependiendo de la topología y de las condiciones de explotación de la estación, pudiendo llegar a discriminar el uso de determinadas vías para evitar interferencias entre tráficos. La aplicación de dicho coeficiente a la capacidad máxima teórica permite obtener la capacidad práctica de la estación, representando la capacidad que se podría operar en condiciones máximas, bajo la operación y coordinación de tráficos del día medio.

Tal como se ha establecido, las condiciones de operación de una estación se encuentran sujetas a unas condiciones que han de ser garantes de la estabilidad del servicio, por lo que establecer la capacidad máxima de la estación como la capacidad práctica puede resultar poco representativo de cara al cálculo del estado de saturación de la estación. Debido a ello se introduce el concepto de capacidad operable.

La capacidad operable permite reflejar el funcionamiento de la estación sometida a las condiciones de operación medias. Para ello se estima la ocupación media, que se define como la media de la tasa de ocupación horaria de las vías en un día medio. Se debe a la necesidad de reflejar en el modelo que no todas las horas estarán sujetas a la misma demanda por parte de los operadores. Esta diferencia de demanda permite clasificar las horas de operación en horas valle y horas punta, adaptando como máximo de capacidad horaria la capacidad operable de la estación y la capacidad punta extraordinaria, respectivamente.

La capacidad punta extraordinaria se estima partiendo de los datos de operación de la estación. Mediante un análisis del número de trenes que la estación es capaz de operar en una hora se puede extrapolar o estimar, para un determinado intervalo de confianza la capacidad máxima en la estación. Con el objetivo de que la ley de capacidad sea continua, se establece un modelo de capacidad lineal, permitiendo reflejar cómo varía la saturación de la estación.

El grado de saturación se calculará en función de la clasificación de la hora en hora punta o valle. Para determinar dicha clasificación se comparará el número de trenes que circulan con el número máximo que puede circular por hora, si dicho cociente supera el umbral del 75% (utilizado en el Manual de Capacidad editado por Adif para establecer un tramo como congestionado) la hora se clasificará como punta, en caso contrario, como valle. Aplicando el grado de saturación obtenido a la capacidad práctica se obtiene la capacidad operable, la cual ha de coincidir con la capacidad tomada como base para el cálculo de la saturación. En caso de que no coincida, se debe iterar el proceso hasta llegar a la convergencia de ambos valores. Con el objeto de acelerar este proceso de convergencia, se adopta un factor de iteración igual a la media del valor supuesto inicialmente y el valor obtenido del proceso, llegando a la convergencia en el entorno de la sexta-octava iteración. Tal como se puede apreciar en la figura 4, emplear el valor obtenido puede llegar a suponer la necesidad de llegar a realizar del entorno de 40 iteraciones del proceso.

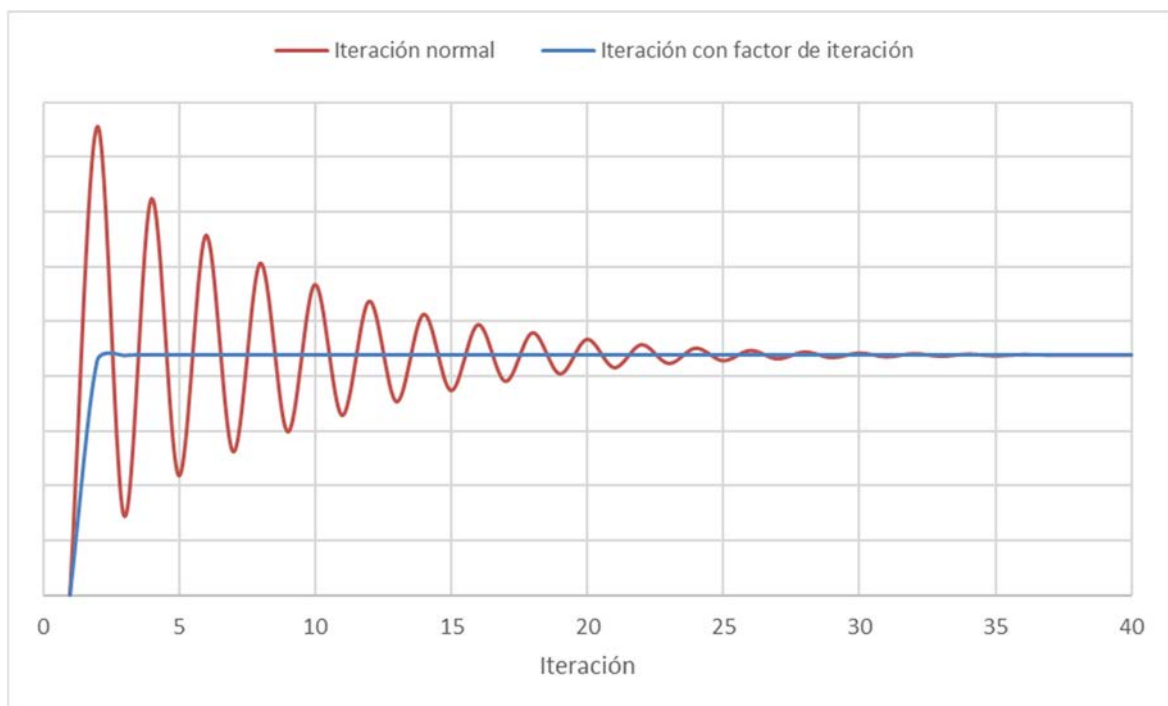


Fig. 4 – Convergencia del valor final de la capacidad operable. (Elaboración Propia)

Tomando como base el grado de saturación horario obtenido se calcula la capacidad operable aplicando la media de dichas saturaciones siempre que sea superior al 60%. En caso contrario la demanda de la estación no es suficiente para adoptar el resultado del estudio de saturación

como válido, ya que la reducción consecuyente de capacidad no resultaría representativa de la capacidad operable de la estación. De esta forma, el modelo empleado permite discernir entre aquellos casos en los cuales la estación no se encuentra saturada, con un coeficiente igual al 60%; aquellos que poseen una saturación moderada, adoptando un 60% - 75%; y aquellas con una saturación considerable, con un coeficiente superior al 75%.

Como se ha establecido, el tiempo de estudio para la determinación de la capacidad va a ser el del horario de circulación, de 6:00 a 24:00, sin embargo, el horario práctico en el cual una vía puede prestar servicio se puede encontrar limitado por distintos elementos. El principal factor que va a limitar el horario de circulación de las vías son los trenes que las ocupan desde su llegada a la estación, en horas cercanas a la finalización del horario de circulación, hasta su partida a la mañana siguiente, cuya hora puede superar la de inicio del horario de circulación. En estos casos, se dice que un tren duerme en la estación, y para contemplar su impacto en la capacidad, se restringe el horario de circulación en función de la estancia que produzca. De esta forma, las horas en las cuales un tren quede estacionado por estos motivos en una vía, no se tendrán en cuenta a la hora de contabilizar la capacidad aportada por la vía en condiciones de circulación. Así mismo, para contemplar su adición de capacidad, estos trenes se suman a la capacidad operable aportada por cada vía o conjunto de vías, ya que en el tiempo en el cual se encuentren estacionados, se producirá una única circulación comercial.

5. CONCLUSIONES

En general, los métodos aplicables para el cálculo de la capacidad ferroviaria, así como su gestión, se han centrado predominantemente en líneas. Los estudios de capacidad de las estaciones, de gran importancia sin embargo, han quedado relegados a un segundo plano, lo cual se puede asociar a la dificultad de ejecutar modelos basados en el estudio de las incompatibilidades entre tráficos y la generación y propagación de retrasos en nodos ferroviarios complejos. Los modelos comúnmente basados en la simulación microscópica de la estación añaden a la dificultad de la modelización de una estación el elevado coste computacional que suponen, por lo que la aplicación de modelos analíticos resulta más efectiva a la hora de determinar la capacidad global pese a su dificultad de adaptación a los distintos casos.

La metodología y el modelo de cálculo propuestos se basan en la experiencia de explotación y en la configuración de la infraestructura disponible en las estaciones. Estas dos bases dotan al modelo de una gran flexibilidad a la hora de considerar la heterogeneidad de los tráficos y las características particulares de cada caso al que sea susceptible de ser aplicado, pudiendo aplicarlo en concepto de simulación de forma que se puedan evaluar distintos proyectos orientados a la ampliación de la capacidad.

La principal ventaja de la metodología presentada es la facilidad que muestra para la adaptación entre los distintos casos estudiados, capaz de representar las variaciones de capacidad inducidas por distintas variables, como pueden ser la composición del tráfico o la disposición de la infraestructura. Cabe destacar así mismo, que la variable de cálculo empleada, las circulaciones comerciales, permite determinar unos cupos de capacidad, análogos a los surcos establecidos en líneas, por lo que permite a los administradores de infraestructuras dimensionar la oferta de capacidad segmentada en función de las características que estime.

AGRADECIMIENTOS

Este documento ha sido elaborado a partir de un Trabajo de Fin de Máster para el cual fue necesaria la colaboración del administrador de infraestructuras Adif. El desarrollo de esta metodología no hubiese sido posible sin el apoyo del personal de la Dirección de Gestión de Capacidad a los que se agradece su implicación.

REFERENCIAS

ABRIL, M., BARBER, F., INGOLOTTI, L., SALIDO, M.A., TORMOS, P. & LOVA, A., (2008). An assessment of railway capacity. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 44, no. 5, pp. 774-806. ISSN 13665545. DOI 10.1016/j.tre.2007.04.001.

ALTAZIN, E., DAUZÈRE-PÉRÈS, S., RAMOND, F. & TRÉFOND, S., (2020). A multi-objective optimization-simulation approach for real time rescheduling in dense railway systems. *European Journal of Operational Research*, vol. 286, no. 2, pp. 662-672. ISSN 03772217. DOI 10.1016/j.ejor.2020.03.034.

BEVRANI, B., BURDETT, R.L. & YARLAGADDA, P.K.D.V., (2017). A case study of the Iranian national railway and its absolute capacity expansion using analytical models. *Transport*, vol. 32, no. 4. ISSN 16483480. DOI 10.3846/16484142.2015.1099053.

BURDETT, R.L., (2015). Multi-objective models and techniques for analysing the absolute capacity of railway networks. *European Journal of Operational Research* [en línea], vol. 245, no. 2, pp. 489-505. ISSN 03772217. DOI 10.1016/j.ejor.2015.03.020.

CAREY, M. & CARVILLE, S., (2003). Scheduling and platforming trains at busy complex stations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* [en línea], vol. 37, no. 3, pp. 195-224. [Consulta: 16 febrero 2020]. ISSN 0965-8564. DOI 10.1016/S0965-8564(02)00012-5.

HAN, S., YUE, Y. & ZHOU, L., (2014). Carrying capacity of railway station by microscopic simulation method. 2014 17th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2014. S.l.: s.n., ISBN 9781479960781. DOI 10.1109/ITSC.2014.6958126

HANSEN, I. A. & PACHL, J., (2008). Railway timetable & traffic: analysis, modelling, simulation. *Railway gazette international*, vol. 164, no. 2, pp. 110. ISSN 0373-5346.

INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS (2004). UIC Code 406R Capacity. Paris. ISBN 2-7461-0802-X

INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS (2004). UIC Code 406R Capacity. Paris. ISBN 978-2-7461-2159-1

JOVANOVIĆ, P., PAVLOVIĆ, N., BELOŠEVIĆ, I. & MILINKOVIĆ, S., (2020). Graph coloring-based approach for railway station design analysis and capacity determination. *European Journal of Operational Research*, vol. 287, no. 1. ISSN 03772217. DOI 10.1016/j.ejor.2020.04.057.

LIU, M., HAN, B.M. & LI, D.W., (2012). Calculation and evaluation of carrying capacities at high-speed railway stations. *Tiedao Xuebao/Journal of the China Railway Society*, vol. 34, no. 4. ISSN 10018360. DOI 10.3969/j.issn.1001-8360.2012.04.002.

MALAVASI, G., MOLKOVÁ, T., RICCI, S. & ROTOLI, F., (2014). A synthetic approach to the evaluation of the carrying capacity of complex railway nodes. *Journal of Rail Transport Planning and Management [en línea]*, vol. 4, no. 1-2, pp. 28-42. ISSN 22109706. DOI 10.1016/j.jrtpm.2014.06.001.

POURYOUSEF, H. & WHITE, T., (2013). Review of Capacity Measurement Methodologies; Similarities and Differences in the U.S. and European Railroads. *Proceedings of the 92nd Annual Meeting of The Transportation Research Board*. S.l.: s.n., pp. 1-14.

POURYOUSEF, H., LAUTALA, P. & WHITE, T., (2015). Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe. *Journal of Modern Transportation*, vol. 23, no. 1, pp. 30-42. ISSN 21960577. DOI 10.1007/s40534-015-0069-z.

SHI, C., ZHAO, C., YANG, Y., GUO, Y., ZHANG, X. & FENG, Y., (2020). Macro-meso dynamic analysis of railway transition zone: Hybrid DEM/FDM simulation and experimental validation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 135, pp. 106191. ISSN 02677261. DOI 10.1016/j.soildyn.2020.106191.

YUAN, J. & HANSEN, I.A., (2007). Optimizing capacity utilization of stations by estimating knock-on train delays. *Transportation Research Part B: Methodological [en línea]*, vol. 41, no. 2, pp. 202-217. [Consulta: 16 febrero 2020]. ISSN 0191-2615. DOI 10.1016/J.TRB.2006.02.004.

ZIEGER, S., WEIK, N. & NIESSEN, N., (2018). The influence of buffer time distributions in delay propagation modelling of railway networks. *Journal of Rail Transport Planning and Management*, vol. 8, no. 3-4, pp. 220-232. ISSN 22109706. DOI 10.1016/j.jrtpm.2018.09.001