

Funcionamiento y empleo de los gráficos ferroviarios

Apellidos, nombre	Salvador Zuriaga, Pablo ¹ (pabsalzu@cam.upv.es)
Departamento	¹ Departamento de Ingeniería de los Transportes y del Terreno
Centro	Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universitat Politècnica de València

Resumen de las ideas clave

Los gráficos ferroviarios constituyen una herramienta esencial para la programación y el análisis de la explotación, ya que permiten representar sobre un mismo soporte la relación entre el espacio recorrido y el tiempo de circulación de los trenes. A través de ellos es posible diseñar horarios, estudiar cruces y adelantamientos, estimar la capacidad de una línea y dimensionar tanto la oferta como el material móvil necesario. Su utilidad docente es especialmente relevante en aquellas titulaciones en las que se abordan problemas de explotación ferroviaria, puesto que conectan en una sola representación la infraestructura, el material rodante, la demanda, los sistemas de bloqueo y la lógica de la programación de servicios. El presente artículo expone los fundamentos de la programación mediante gráficos, las variables que intervienen en la construcción de las marchas, los criterios básicos de grafiado y las aplicaciones de las mallas de trenes en la planificación del servicio ferroviario.

Objetivos

Al finalizar el estudio de este artículo, el estudiante será capaz de:

- Distinguir los conceptos básicos que intervienen en la programación ferroviaria y en la representación mediante gráficos de circulación.
- Clasificar los trenes según el servicio prestado, el sentido de circulación y el carácter de su itinerario.
- Interpretar las distintas velocidades operativas de un tren y su influencia sobre la explotación.
- Descomponer el tiempo total de una marcha en tiempo teórico, tiempos de parada y márgenes de explotación.
- Explicar el significado operativo de un gráfico ferroviario y su utilidad para analizar cruces, adelantamientos y ocupación de la infraestructura.
- Aplicar los criterios de prioridad, homogeneidad y cadencia al diseño de un gráfico de circulaciones.
- Relacionar el desarrollo del gráfico con la demanda, la geometría de la vía, la capacidad, el material móvil y los sistemas de ayuda a la explotación.
- Valorar la utilidad del gráfico ferroviario como herramienta para tomar decisiones sobre oferta, frecuencia y dotación de material móvil.

Estos objetivos se formulan como resultados de aprendizaje observables y evaluables, de manera coherente con el enfoque docente de la plantilla, y orientan el estudio hacia la comprensión aplicada de la explotación ferroviaria.

Introducción

La explotación ferroviaria presenta un rasgo diferenciador de gran interés desde el punto de vista docente: su marcado carácter determinista. Cada tren circula de acuerdo con un horario y un itinerario previamente definidos, y ocupa durante un cierto tiempo una infraestructura cuya capacidad es limitada. Como consecuencia, la organización del servicio no puede improvisarse, sino que debe apoyarse en procedimientos de programación rigurosos que permitan anticipar el comportamiento de las circulaciones, coordinar recursos y evitar incompatibilidades.

En este contexto aparecen los gráficos ferroviarios, también denominados mallas de trenes cuando se utilizan de forma sistemática para estructurar el servicio. El gráfico permite representar en unos ejes de espacio y tiempo la trayectoria de cada tren, visualizar la coincidencia o conflicto entre circulaciones y comprobar si la oferta prevista resulta compatible con la infraestructura disponible. Se trata, por tanto, de una herramienta de representación, pero también de análisis y decisión.

El contenido de este artículo resulta especialmente útil en titulaciones como el Grado en Ingeniería Civil, el Grado en Gestión del Transporte y la Logística, el Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y el Máster en Ingeniería Avanzada de la Producción, Logística y Cadena de Suministro, así como en otras asignaturas en las que sea necesario comprender la explotación ferroviaria. El nivel de exposición se ha planteado para alumnado de grado y máster, combinando definiciones fundamentales con criterios de diseño y lectura aplicados a la operación real.

Para seguir adecuadamente el contenido es conveniente que el estudiante disponga de nociones previas sobre circulación ferroviaria, elementos básicos de infraestructura y características del material móvil. A partir de esa base, el texto se organiza de manera progresiva: primero se definen las circulaciones y sus parámetros esenciales; después se estudia cómo se programan las marchas; finalmente se analiza el concepto de gráfico y los criterios empleados para su diseño e interpretación. La secuencia propuesta persigue que el estudiante no solo identifique los conceptos, sino que sea capaz de utilizarlos para interpretar o elaborar un gráfico sencillo.

Desarrollo

1. Planteamiento general de la programación ferroviaria

La programación ferroviaria parte de una idea básica: toda circulación utiliza una infraestructura concreta durante un intervalo de tiempo determinado. Cuando varias circulaciones pretenden hacer uso de una misma línea, la explotación debe establecer un orden, unas prioridades y unas reservas temporales que permitan compatibilizarlas. De ahí que la

programación sea una función central de la explotación y no un mero complemento administrativo del horario.

Desde esta perspectiva, el tren se contempla ante todo como una circulación que ocupa la vía. Lo relevante no es solo el vehículo en sí, sino la forma en que utiliza la capacidad disponible. Esta visión facilita el paso desde la descripción del servicio a su tratamiento operativo, pues obliga a considerar la velocidad, las paradas, los márgenes, los cruces, los adelantamientos y los tiempos de permanencia en terminales.

Los gráficos y las mallas de trenes materializan esa programación. Su valor reside en que convierten un problema complejo, con múltiples trenes y restricciones, en una representación inteligible para el planificador y para el estudiante. En consecuencia, el gráfico ferroviario puede entenderse como el lenguaje técnico en el que se expresa la explotación de una línea.

2. El tren como circulación y su clasificación operativa

En explotación ferroviaria puede considerarse tren cualquier circulación que ocupe la vía. Esta definición engloba tanto servicios comerciales como movimientos materiales, maniobras de posicionamiento o circulaciones técnicas, y por ello resulta adecuada para la programación mediante gráficos. Clasificar correctamente las circulaciones es importante porque cada una de ellas exige recursos, introduce restricciones y suele disfrutar de un nivel de prioridad distinto.

Atendiendo al servicio prestado, los trenes de viajeros comprenden servicios de cercanías y metro, trenes regionales y servicios de largo recorrido. En el ámbito de mercancías aparecen, entre otros, trenes ómnibus, semidirectos, directos, colectores-distribuidores, trenes completos y trenes puros o lanzadera. Cada modalidad presenta pautas propias de velocidad, número de paradas, flexibilidad operativa, regularidad y necesidad de prioridad sobre el resto de circulaciones.

También es habitual clasificar los trenes por su sentido de circulación y por el carácter de su itinerario. En la tradición operativa española se distingue entre trenes pares y trenes impares, asociados convencionalmente a sentidos opuestos de marcha; del mismo modo, pueden diferenciarse servicios regulares, servicios materiales o de posicionamiento y servicios facultativos o discrecionales. Esta categorización tiene consecuencias directas sobre el grafiado, pues determina precedencias, ventanas de circulación y reglas de explotación.

Criterio	Categorías principales	Implicación operativa
Servicio prestado	Viajeros y mercancías	Condiciona prioridad, velocidad y número de paradas

Sentido de circulación	Pares / impares	Ordena la lectura del gráfico y el comportamiento en línea
Carácter del itinerario	Regular, material, facultativo	Determina estabilidad del horario y reserva de capacidad

Tabla 1. Clasificación operativa básica de las circulaciones ferroviarias.

3. Velocidades ferroviarias y significado operacional

PREGUNTA

¿Cuántos tipos de velocidad crees que hay en la explotación ferroviaria?



La velocidad es uno de los parámetros más influyentes en cualquier gráfico ferroviario, ya que afecta a la pendiente de la trayectoria representada y a las posibilidades de convivencia entre circulaciones. Sin embargo, en explotación no basta con conocer la velocidad máxima teórica del material móvil; es necesario utilizar magnitudes que reflejen mejor el comportamiento real del servicio.

La velocidad nominal expresa la máxima velocidad que puede desarrollar el tren de acuerdo con sus prestaciones. La velocidad efectiva relaciona el espacio recorrido con el tiempo de circulación en movimiento y, por tanto, refleja el comportamiento dinámico del tren durante la marcha. Por último, la velocidad comercial incorpora además el efecto de las paradas, por lo que ofrece una imagen más fiel de la prestación finalmente ofrecida al viajero o de la productividad real del servicio logístico.

Desde el punto de vista de la explotación, esta distinción es esencial. Dos trenes con una velocidad nominal parecida pueden ofrecer velocidades comerciales muy distintas si presentan un régimen de paradas diferente o si su inserción en el gráfico les obliga a sufrir esperas. Además, la velocidad real queda limitada por la velocidad máxima de la línea, por el trazado en planta y en alzado, por las condiciones de adherencia, por las rampas, por las curvas y por la interacción con el resto de las circulaciones.

4. Programación de las marchas

Programar una marcha significa reservar el tiempo total necesario para que una circulación recorra un determinado trayecto en condiciones de explotación realistas. Para ello no basta con

estimar un tiempo ideal de recorrido: es preciso incorporar las paradas y los márgenes que garantizan la robustez del horario. Esta descomposición permite transformar una estimación cinemática en una programación operativa utilizable.

El tiempo teórico es el que el tren invertiría en recorrer la distancia considerada bajo unas condiciones de marcha definidas por el trazado, la infraestructura y las prestaciones del material móvil. En su cálculo intervienen factores como el trazado en planta, el trazado en alzado, la presencia de curvas y rampas, el carácter de vía única o doble y la existencia de cantones críticos que limitan la explotación.

A ese tiempo teórico deben añadirse los tiempos de parada. Las paradas comerciales se asocian a la subida y bajada de viajeros o a operaciones necesarias para prestar el servicio. Las paradas técnicas, por el contrario, responden a cruces, adelantamientos o necesidades de la circulación, e incluyen además tiempos de reacción, de formación de itinerarios y de autorización de marcha. Aunque estas magnitudes sean reducidas, su acumulación influye decisivamente en la construcción del horario.

$$T_{\text{total}} = T_{\text{teórico}} + T_{\text{paradas}} + T_{\text{márgenes}}$$

Ecuación 1. Expresión general del tiempo total de programación de una marcha.

Junto a los tiempos de parada, la programación incorpora márgenes de explotación. Entre ellos pueden distinguirse los márgenes cinemáticos, los márgenes adicionales especiales por trabajos en vía o limitaciones temporales y los márgenes de regularidad, destinados a absorber pequeñas perturbaciones como pérdidas de adherencia, distracciones o variaciones menores en la marcha. La presencia de márgenes no debe interpretarse como una ineficiencia, sino como una condición necesaria para dotar al horario de estabilidad y resiliencia.

La calidad de una programación ferroviaria no depende únicamente de que el tren pueda recorrer el trayecto en un tiempo mínimo, sino de que el conjunto del servicio sea viable, regular y compatible con el resto de las circulaciones. Por ello, la programación de marchas constituye un paso previo imprescindible antes de proceder al grafiado completo de la línea.

5. Capacidad de línea y cantón crítico

La capacidad ferroviaria puede definirse, de forma general, como el número de circulaciones que una infraestructura es capaz de admitir durante un periodo dado manteniendo unas condiciones aceptables de seguridad y regularidad. Esta capacidad no depende solo del número de vías, sino también del sistema de bloqueo, de la distancia entre puntos de cruce o adelantamiento, de la ocupación de los cantones y del tipo de servicio que se desea programar.

En líneas de vía única, la presencia de estaciones de cruce y apartaderos condiciona de forma determinante el número de trenes que pueden circular. En vía doble desaparecen las restricciones asociadas al cruce en sentidos opuestos, pero siguen existiendo limitaciones

derivadas del bloqueo, de la velocidad diferencial entre trenes y de la ocupación de los tramos más sensibles. El cantón crítico representa precisamente el tramo o intervalo que más condiciona la capacidad efectiva de la línea y que es aquél que presenta un mayor tiempo de ocupación. Dicho tiempo de ocupación puede ser diferente para cada sentido de circulación, por ejemplo, si el tramo se encuentra en una fuerte rampa.

Desde un punto de vista didáctico, el gráfico ferroviario permite visualizar con claridad esa limitación. Allí donde se concentran esperas, reservas temporales amplias o incompatibilidades repetidas es donde la capacidad comienza a saturarse. Por ello, el análisis gráfico es una vía especialmente útil para comprender por qué determinadas líneas admiten pocas circulaciones adicionales incluso cuando, a primera vista, parecen disponer de margen suficiente.

6. Concepto de gráfico ferroviario

El gráfico ferroviario representa en un sistema de ejes el tiempo y el espacio de la explotación. En el eje vertical suelen situarse las estaciones o puntos kilométricos de la línea y en el eje horizontal el tiempo. Cada tren aparece como una línea de trayectoria cuya inclinación está asociada a su velocidad de recorrido: una mayor pendiente denota menores tiempos para una misma distancia, mientras que una trayectoria menos inclinada suele corresponder a trenes más lentos o con más detenciones.

Esta forma de representación tiene un gran valor porque permite leer de manera inmediata la lógica del servicio. Los puntos en los que dos trayectorias se aproximan o se cruzan indican necesidades de coordinación, cruces o conflictos potenciales. Del mismo modo, los cambios de pendiente, las horizontalidades asociadas a paradas y la separación entre trayectorias facilitan la interpretación de tiempos de recorrido, permanencias en estación y holguras operativas.

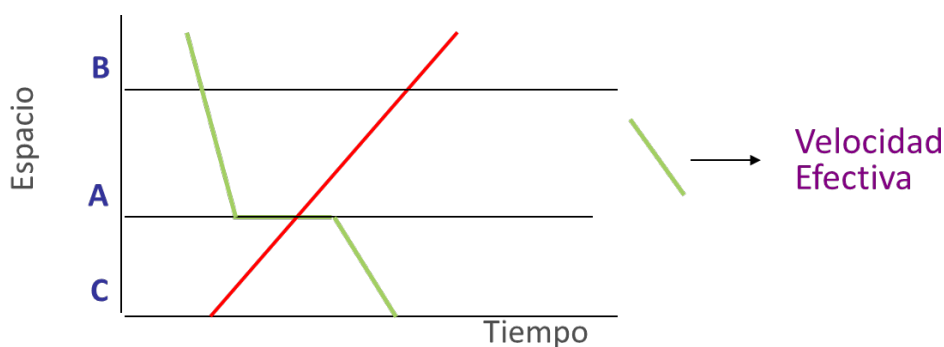


Gráfico 1. Ejemplo de gráfico ferroviario

En líneas de vía única, el gráfico pone de manifiesto con especial claridad dónde deben producirse los cruces entre circulaciones en sentidos opuestos. Cuando coexisten trenes con diferentes velocidades, también permite estudiar adelantamientos y valorar si la mezcla de servicios homogéneos o heterogéneos contribuye a aprovechar mejor la capacidad de la línea.

Además, el gráfico facilita conocer el número de trenes que circulan en un momento dado y, por tanto, la ocupación instantánea de la infraestructura.

7. Criterios básicos de grafiado

El grafiado de servicios ferroviarios no es arbitrario. La construcción de un gráfico útil y explotable se apoya en criterios que permiten ordenar las circulaciones y disminuir conflictos. Entre ellos destacan la prioridad, la homogeneidad y la cadencia. Estos criterios deben entenderse como principios de diseño que orientan las decisiones del planificador cuando la capacidad es limitada.

La prioridad expresa que no todos los servicios tienen el mismo rango operativo. Determinadas circulaciones, como los trenes internacionales o algunos servicios metropolitanos de elevada frecuencia, suelen gozar de mejores condiciones de inserción que otros servicios de viajeros o de mercancías. Establecer prioridades es imprescindible para decidir precedencias, resolver incompatibilidades y reservar capacidad a aquellos trenes cuya regularidad resulta más crítica para el sistema.

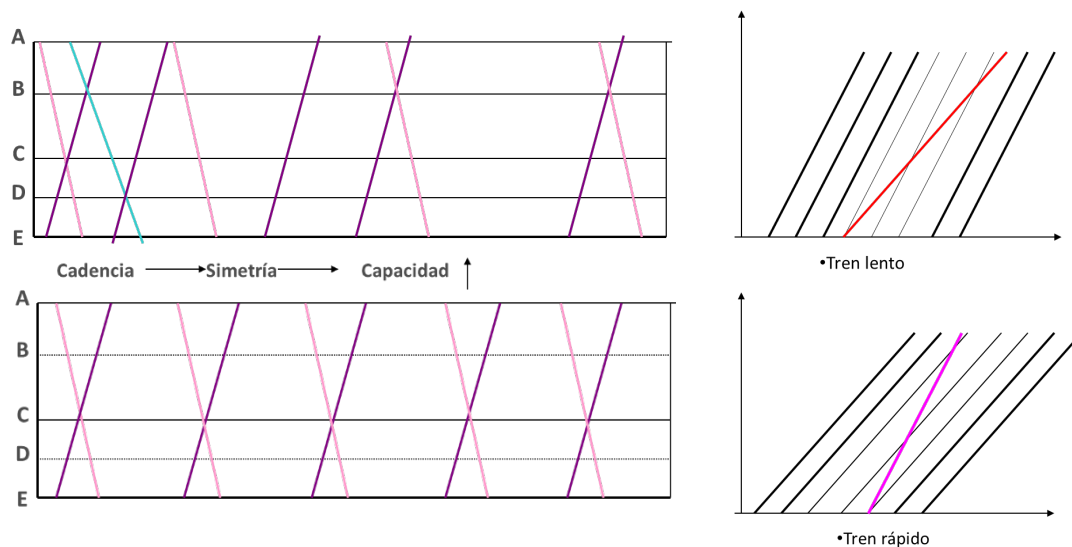


Gráfico 2. Efectos de la cadencia y homogeneidad en la capacidad

La homogeneidad persigue aproximar las velocidades y patrones de parada de los trenes que comparten una misma infraestructura. Cuando las circulaciones son homogéneas, el gráfico se simplifica, disminuye la necesidad de adelantamientos y mejora el aprovechamiento de la capacidad. Por el contrario, cuando conviven trenes muy rápidos con trenes lentos o con numerosos trenes de mercancías, aparecen más huecos improductivos y aumenta la complejidad de la explotación.

Por su parte, la cadencia se refiere a la repetición periódica de los servicios y a la simetría del horario. Un servicio cadenciado mejora la legibilidad de la oferta para el usuario y simplifica la organización de la explotación, ya que permite reproducir patrones de circulación estables a lo largo del día. En redes urbanas, metropolitanas o regionales, la cadencia suele constituir uno de los pilares de la malla de servicio.

8. Mallas de trenes y desarrollo del gráfico

La malla de trenes puede entenderse como una organización sistemática y repetitiva de las circulaciones sobre el gráfico. En lugar de programar cada servicio de manera aislada, se construye un esquema en el que frecuencias, terminales, tiempos de viaje y tiempos de bucle se coordinan para producir una oferta coherente. Esta lógica resulta especialmente útil cuando se desea implantar servicios periódicos con elevada regularidad.

El desarrollo del gráfico debe comenzar por el estudio de la demanda. Es necesario conocer la distribución de la población, los principales flujos de movilidad, la existencia de centros de demanda localizada, la elasticidad de la demanda y la posible demanda inducida por una mejora del servicio. También conviene tener en cuenta la oferta de otros operadores o de otros modos de transporte y la integración general del sistema en el marco de la planificación territorial y del transporte.

A continuación deben incorporarse las condiciones físicas y operativas de la red. La geometría de la vía determina los tiempos de recorrido posibles; la capacidad de circulación depende del número de estaciones de cruce, apartaderos, bifurcaciones, terminales o vías de adelantamiento; y las características del material móvil condicionan la aceleración, la velocidad máxima y, en último término, la velocidad comercial. Del mismo modo, los bloqueos y las ayudas a la explotación, como los enclavamientos o sistemas de protección y conducción, influyen sobre la separación mínima entre trenes y sobre la robustez de la programación.

Una vez integradas estas variables, el gráfico deja de ser una simple representación geométrica para convertirse en la expresión operativa de una oferta de transporte. Su desarrollo exige equilibrar las restricciones de infraestructura con los objetivos de servicio, lo que convierte a la malla ferroviaria en un problema de diseño técnico con una fuerte componente estratégica.

9. Dimensionamiento del material móvil y oferta ferroviaria

Una de las aplicaciones más valiosas del gráfico ferroviario consiste en determinar cuántos trenes deben estar simultáneamente en servicio para ofrecer una frecuencia determinada. Esta cuestión es especialmente importante en redes de cercanías, metros y tranvías, así como en servicios regionales con horarios repetitivos, donde pequeñas variaciones en el tiempo de recorrido o en el tiempo de permanencia terminal pueden modificar de manera apreciable el parque necesario.

De forma simplificada, el número de trenes en vía depende del tiempo de ida y vuelta, del tiempo de bucle o regulación en terminales y de la frecuencia ofertada. Esta relación permite enlazar de modo directo el diseño del horario con las decisiones de inversión y explotación. De hecho, la determinación del parque no puede separarse del gráfico, ya que es la propia estructura del servicio la que fija el ciclo de utilización de cada unidad.

$$\text{Nº trenes en vía} = (\text{Tiempo de ida y vuelta} + \text{Tiempo de bucle}) / \text{Frecuencia}$$

Ecuación 2. Relación simplificada para estimar el material móvil necesario.

A partir de este cálculo puede estimarse el número de plazas ofertadas, estudiar alternativas de frecuencia y valorar el impacto de distintas configuraciones de servicio sobre el coste de explotación. En consecuencia, el gráfico ferroviario no solo sirve para ordenar trayectorias sobre una línea, sino también para soportar decisiones económicas y de planificación de recursos.

Cierre

Los gráficos ferroviarios sintetizan en una única herramienta una gran parte del conocimiento operativo necesario para comprender la explotación de una línea o red. En ellos confluyen la infraestructura, el material móvil, los tiempos de recorrido, las paradas, los márgenes, los sistemas de seguridad y la lógica de la oferta. Por eso constituyen un recurso docente de gran valor para asignaturas vinculadas a la ingeniería civil, al transporte y a la logística.

A lo largo del artículo se ha puesto de manifiesto que programar una marcha implica mucho más que calcular un tiempo de viaje. Supone integrar restricciones físicas, prioridades entre servicios, necesidades de regularidad y objetivos de demanda en una estructura coherente y explotable. El gráfico ferroviario permite visualizar ese equilibrio y, al mismo tiempo, comprobar las consecuencias que tendría cualquier modificación en la frecuencia, en la velocidad o en la organización de los trenes.

Como actividad de consolidación, se recomienda que el estudiante interprete un gráfico real o elabore una pequeña malla para una línea sencilla, identificando tiempos de recorrido, puntos de cruce, posibles adelantamientos, frecuencia ofertada y número de trenes necesarios. Este ejercicio favorece una comprensión aplicada del concepto y muestra con claridad por qué el grafiado es una herramienta esencial en la planificación y gestión de la explotación ferroviaria.

Bibliografía

García Álvarez, A. (2024). Manual de Ferrocarriles (2ª edición). Garceta

López Pita, A. (2008). Explotación de líneas de ferrocarril. MIDAC Llibres.