



Máster Universitario en
Sistemas Ferroviarios

Estudio de explotación de una línea ferroviaria de tráfico mixto (viajeros y mercancías)

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CURSO: 2019-2020

Master Universitario en Sistemas Ferroviarios
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA ICAI

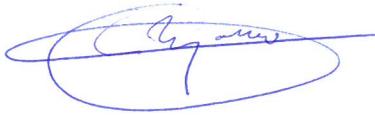
Autor: Carlos Bejarano Aparicio

Director/es: Marco José Mayoral van Son

FICHA TÉCNICA

TÍTULO: Estudio de explotación de una línea ferroviaria de tráfico mixto (viajeros y mercancías)

AUTOR: Carlos Bejarano Aparicio
Firma:



DIRECTOR: Marco José Mayoral van Son
Firma:



PROGRAMA CURSADO: Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios.
Curso académico: 2019-2020.

RESUMEN DE LAS PRINCIPALES IDEAS

En este trabajo fin de máster se desarrollan los principales conceptos en el proceso de análisis y diseño de la explotación de una línea ferroviaria, desde el proceso de dimensionamiento de los servicios ferroviarios de viajeros y mercancías a partir de la demanda prevista y los condicionantes de infraestructura, hasta el cálculo de la capacidad y saturación de la línea a partir de la malla de explotación previamente determinada.

En primer lugar, en el proceso de dimensionamiento de los servicios ferroviarios, se ha realizado un análisis comparativo entre distintas unidades autopropulsadas de viajeros y distintas locomotoras de transporte de mercancías, para seleccionar el material rodante óptimo en la explotación según la capacidad de transporte del mismo y su velocidad comercial, con el objetivo de compatibilizar el tráfico mixto en la línea.

En segundo lugar, esta selección del material rodante ha sido el punto de partida para determinar el número de circulaciones de cada tipo y posteriormente calcular mediante software específico de simulación de marchas tipo el tiempo total de recorrido, añadiendo los márgenes de explotación correspondientes.

A partir del tiempo de recorrido calculado para las circulaciones, se ha elaborado una malla de explotación, fijando una serie de criterios como: la optimización de la flota necesaria, la priorización del tráfico de viajeros, la adecuación de los horarios a los periodos punta de la demanda o la reserva para las tareas de mantenimiento y conservación.

Y por último, sobre el resultado de la programación de servicios, expuesto en la malla de explotación, se ha desarrollado un análisis de capacidad y saturación de la infraestructura, en el que se han calculado los tiempos mínimos de sucesión, con el objetivo de comprobar la validez de la programación realizada.

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. PLANIFICACIÓN DE TAREAS	3
4. DATOS DE PARTIDA	4
5. METODOLOGÍA	6
6. DIMENSIONAMIENTO Y PREVISIÓN DE SERVICIOS FERROVIARIOS	7
6.1. Dimensionamiento y previsión de servicios ferroviarios de viajeros.....	7
6.1.1. Material rodante considerado	7
6.1.2. Número de circulaciones.....	9
6.2. Dimensionamiento y previsión de servicios ferroviarios de mercancías	12
6.2.1. Composición del tren tipo	13
6.2.1.1. Cálculo de cargas máximas	13
6.2.1.2. Selección de la locomotora de mercancías	18
6.2.1.3. Selección del material remolcado.....	27
6.2.2. Cálculo del número de circulaciones.....	28
7. PROGRAMACIÓN DE LA EXPLOTACIÓN. GRAFIADO DE LA MALLA Y COMPROBACIÓN DE CAPACIDAD DE LA LÍNEA	30
7.1. Cálculo de marchas tipo y tiempos de recorrido	30
7.1.1. Marchas tipo de servicios ferroviarios de viajeros	30
7.1.2. Marchas tipo de servicios ferroviarios de mercancías.....	32
7.1.3. Márgenes UIC de explotación y tiempos totales de recorrido	33
7.2. Grafiado de la malla de explotación.....	35
7.3. Comprobación de capacidad de la línea y grado de saturación.....	36
7.3.1. Tiempo mínimo de sucesión entre circulaciones de viajeros	38
7.3.2. Tiempo mínimo de sucesión de circulación de mercancías seguida por circulación de viajeros.....	40
7.3.3. Tiempo mínimo de sucesión de circulación viajeros seguida por circulación de mercancías.....	44
7.3.4. Tiempo adicional.....	45
7.3.5. Tiempo de análisis considerado	45
7.3.6. Cálculo del grado de saturación y capacidad	45
8. CONCLUSIONES Y APORTACIONES.....	47
9. BIBLIOGRAFÍA.....	49
ANEXO 1: FICHAS TÉCNICAS DE MATERIAL RODANTE.....	50
ANEXO 2: HORARIOS DE LOS SERVICIOS DE MERCANCÍAS Y VIAJEROS	60
ANEXO 3: DISTRIBUCIÓN DE CANTONES EN LA LÍNEA	62
ANEXO 4: TIEMPOS MÍNIMOS DE SUCESIÓN EN LA LÍNEA	63

1. INTRODUCCIÓN

La planificación de infraestructuras ferroviarias como sistemas de transporte, generalmente son la consecuencia de acciones orientadas al impulso de modos de transporte más sostenibles y eficientes, dado que buscan como objetivo la transferencia de demanda desde otros modos menos eficientes o con mayores externalidades negativas, como los modos asociados a la carretera.

Entre los estudios iniciales que se realizan antes de llevar a cabo actuaciones detalladas en una línea ferroviaria, se encuentran los estudios de explotación. En este marco, los estudios de programación y explotación ayudan en un primer lugar a realizar una planificación estratégica de la operación y de las necesidades de la infraestructura o del material rodante.

Este tipo de estudios se alimentan de otros análisis previos iniciales, como por ejemplo los estudios de demanda, no obstante, el estudio de la explotación y programación de la línea permite orientar la definición del material rodante a emplear y su influencia en el número de circulaciones necesarias en la línea, el tiempo que emplearán estas en hacer los distintos recorridos o el consumo de capacidad de infraestructura que realizarán.

Este consumo de capacidad, es uno de los factores importantes que condicionan la definición posterior de otros parámetros de la línea, ya que un consumo alto de la misma, se traduce en una saturación de la infraestructura y posibilita la existencia de retrasos o incidencias en las circulaciones, minimizando el margen de crecimiento de tráfico potencial por un crecimiento de la demanda.

Los resultados que aporta un estudio de explotación, sirven de base para el desarrollo detallado de otros subsistemas, como puede ser la señalización o la electrificación y energía, especialidades estrechamente relacionadas con el tipo de explotación que se efectúe en una línea.

En este trabajo fin de máster, se aborda el desarrollo de un estudio de explotación de una línea ferroviaria, partiendo de unos datos básicos de infraestructura y demanda, para definir y justificar posteriormente el material rodante más adecuado en la explotación y obtener las circulaciones necesarias para cubrir la demanda prevista.

La preselección del material rodante para realizar el análisis comparativo que termine definiendo el material rodante de la operación y el número de circulaciones, se ha basado en los datos técnicos de trenes autopropulsados de Renfe [1] en el caso de viajeros y en el caso de mercancías, en datos técnicos de varias locomotoras existentes en el mercado [8, 9] y en los datos recogidos de material remolcado en el catálogo de vagones de Renfe [10].

El proceso de selección del material que operará se ha realizado siguiendo, entre otros, criterios de aprovechamiento [2] posible máximo, en el caso de los servicios de viajeros y de carga máxima [4], en el caso de los servicios de mercancías.

A partir de las circulaciones tipo definidas, en este trabajo se lleva a cabo una simulación de marchas de cada tipo de circulación, mediante software específico, para terminar confeccionando una malla que refleje el horario y el tiempo de recorrido de todas las circulaciones, considerando los márgenes de explotación correspondientes [11].

Finalmente, en este estudio se realiza un análisis de la capacidad y del grado de saturación [12], calculando los tiempos mínimos de sucesión entre las distintas circulaciones contempladas en la programación de la malla de explotación.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo fin de máster es elaborar un diseño de la programación y explotación de una línea ferroviaria, estableciendo como condicionantes a tener en cuenta y necesidades a satisfacer, la demanda de viajeros y mercancías prevista en el momento de puesta en servicio y las características principales de la infraestructura.

El desarrollo de este trabajo, se fundamenta en una selección de parámetros o aspectos que son determinantes para la explotación, como el material rodante a emplear, siendo el objetivo del trabajo determinar estos aspectos de forma óptima, buscando el equilibrio en el compromiso entre una mayor eficiencia del sistema de transporte y una mayor eficiencia de la explotación ferroviaria que posibilite la compatibilización del tráfico mixto de viajeros y de mercancías.

Este trabajo fin de máster busca además mostrar en su desarrollo, la influencia que puede tener en el proceso de diseño de la explotación ferroviaria, los distintos elementos que la componen. La selección del material rodante a emplear según la demanda prevista y las características del propio material, tiene como objetivo ofrecer un análisis comparativo en el que se observe el grado de influencia que pueden llegar a obtener estas decisiones en la explotación ferroviaria.

Tras precisar el material rodante que se utilizará en las circulaciones, la confección de la malla de explotación se realiza con el objetivo de lograr un diseño eficiente que minimice la necesidad de flota a disponer y conseguir un patrón óptimo entre circulaciones de viajeros y mercancías estableciendo unos criterios mínimos de cumplimiento.

Por último, la programación de la explotación reflejada en la malla de explotación, es analizada con el objetivo de validar el diseño realizado desde el punto de vista de la capacidad y asegurar un nivel de servicio adecuado para la operación.

Por otra parte, otro de los objetivos de este trabajo es aportar una visión de un estudio de explotación ferroviaria, como parte de un proceso de planificación de una infraestructura ferroviaria que sirve como sistema de transporte eficiente. El modo ferroviario compite con otros modos de transporte, como la carretera, que son mayoritariamente utilizados a pesar del mayor coste social y ambiental que generalmente poseen.

Adicionalmente, como objetivo personal de este trabajo, profundizando en esta materia se busca alcanzar un conocimiento específico y una experiencia en este tipo de estudios, que cuentan con una amplia presencia en el ámbito de los estudios de planificación de transportes ferroviarios.

3. PLANIFICACIÓN DE TAREAS

Para el desarrollo de este trabajo fin de máster se han identificado y estructurado a lo largo del tiempo las siguientes tareas:

Tabla 1 Cronograma de tareas

Tarea	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Recopilación de información y datos de partida (trazado, demanda, material rodante)				
Selección del material rodante				
Establecimiento de circulaciones ferroviarias para cubrir la demanda prevista				
Cálculo de tiempos de recorrido mediante la simulación de marchas tipo				
Elaboración de la malla de explotación				
Comprobación de la capacidad de la línea y el grado de saturación				
Elaboración del informe de metodología y resultados				

Fuente: elaboración propia

La ejecución de estas tareas ha sido escalonada aunque han podido realizarse algunas de ellas de forma simultánea. Como detalle de los trabajos llevados a cabo en cada tarea, se presenta a continuación una breve descripción de las subtareas realizadas:

- **Recopilación de información y datos de partida (trazado, demanda, material rodante):** Estos datos comprenden los listados de trazado en planta y en alzado, la demanda de mercancías y viajeros prevista y las características técnicas de distintas unidades de material rodante, tanto de viajeros, como de mercancías.
- **Selección del material rodante:** Estudio del oscilograma de carga y aprovechamiento de las unidades de viajeros y estudio de cargas máximas de locomotoras.
- **Establecimiento de circulaciones ferroviarias para cubrir la demanda prevista:** según el material rodante seleccionado, cálculo del número de circulaciones necesarias para cubrir la demanda prevista según un aprovechamiento medio de las unidades de viajeros y según el dimensionamiento del tipo de tren de mercancías.
- **Cálculo de tiempos de recorrido mediante la simulación de marchas tipo:** utilización de software específico en cálculo de marchas tipo para el cálculo de tiempos de recorrido, añadiendo los márgenes de explotación. Carga de datos en el software y análisis de los datos de salida.
- **Elaboración de la malla de explotación:** encaje de los servicios según el tiempo de recorrido calculado, respetando los intervalos mínimos de sucesión, los tiempos de rotación del material y la banda reservada para el mantenimiento de la línea.
- **Comprobación de la capacidad de la línea y el grado de saturación:** análisis de un ejercicio práctico de malla comprimida según los tiempos mínimos de sucesión y el patrón de circulaciones determinado.
- **Elaboración del informe de metodología y resultados:** redacción del documento y exposición de resultados.

4. DATOS DE PARTIDA

Como datos iniciales de partida para la realización de este estudio de programación de la explotación ferroviaria de la línea, se tiene información acerca de una antigua línea ferroviaria en desuso, que pretende ser rehabilitada y adaptada para el tráfico ferroviario tanto de viajeros como de mercancías. Como datos de partida para llevar a cabo el estudio de explotación, se encuentra la previsión de demanda de viajeros ferroviarios, la previsión de demanda de mercancías a transportar por ferrocarril e información sobre la infraestructura y el trazado de la línea.

La infraestructura objeto de estudio cuenta con una **vía doble electrificada en ancho ibérico** de una longitud de 195 km, uniendo dos ciudades y discurriendo a través de otros cinco núcleos de población de relevancia. Todas estas poblaciones cuentan con estación de viajeros. El listado de estaciones y su ubicación en la línea se observa en la siguiente tabla:

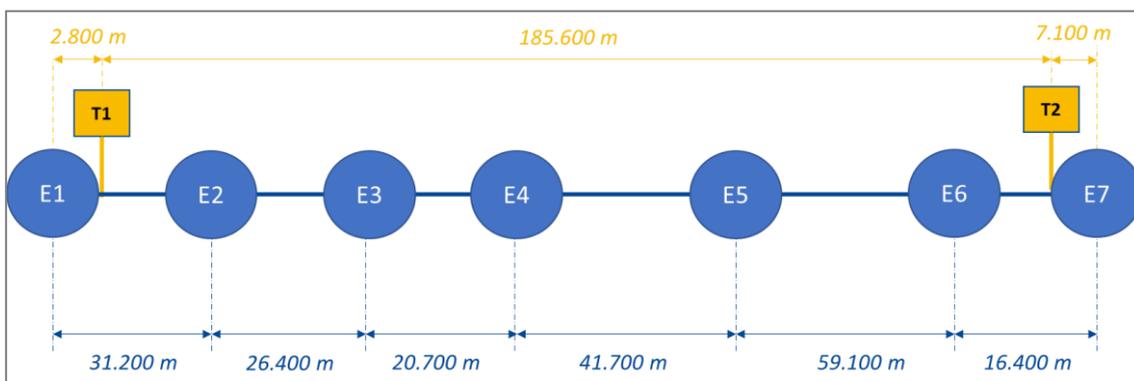
Tabla 2 Estaciones de viajeros en la línea

Tramo	P.K.
Estación 1 (E1)	0+000
Estación 2 (E2)	31+200
Estación 3 (E3)	57+600
Estación 4 (E4)	78+300
Estación 5 (E5)	120+000
Estación 6 (E6)	179+100
Estación 7 (E7)	195+500

Fuente: información de partida

En la línea existen además dos terminales ferroviarias de mercancías, ubicadas en los P.K. 2+800 (T1) y 188+400 (T2).

Figura 1 Croquis de la línea



Fuente: información de partida

El trazado tiene una **rampa característica** de 11,5 mm/m y un radio mínimo de curva de 250 m. La **velocidad máxima** por la que podrían circular los trenes por esta vía se encuentra entre 130 y 160 km/h (en función del tramo de la línea). La **longitud de andenes** en las estaciones es de 250 m, lo que condiciona la longitud máxima de las unidades de material rodante de viajeros, mientras que la **longitud máxima de apartadero** es de 350 m, parámetro condicionante de la longitud máxima del tren de mercancías.

Respecto a la **previsión de demanda de viajeros**, se parte de la matriz origen-destino de viajes para un día laborable, que es el día tipo de la semana con mayor demanda prevista en el año previsto de puesta en servicio de la operación. Estos datos se detallan a continuación:

Tabla 3 Previsión de demanda de viajeros en un día laborable según estación de subida y estación de bajada.

Estación subida /Estación bajada	Estación 1	Estación 2	Estación 3	Estación 4	Estación 5	Estación 6	Estación 7	Total
Estación 1	-	704	420	385	163	203	368	2.242
Estación 2	650	-	71	228	155	86	155	1.346
Estación 3	368	69	-	179	128	130	118	993
Estación 4	345	211	179	-	151	117	473	1.475
Estación 5	186	182	120	151	-	186	560	1.385
Estación 6	186	102	126	132	186	-	639	1.371
Estación 7	333	182	130	482	596	639	-	2.360
Total	2.068	1.449	1.047	1.557	1.378	1.362	2.312	11.172

Fuente: información de partida

Adicionalmente, como dato de partida se dispone de información acerca de las horas punta de viajeros, las cuales se encontrarían concentradas en tres periodos horarios a lo largo del día:

- Periodo punta de mañana: de 6:30 h a 9:30 h.
- Periodo punta de mediodía: de 14:00 h a 15:30 h.
- Periodo punta de tarde: de 17:00 a 18:30 h.

Con relación a los datos de **previsión de demanda de mercancías**, los datos de partida que se disponen hacen referencia a las toneladas semanales en un día medio laborable que se transportarían en ferrocarril entre origen y destino y al tipo de mercancía. En este caso, la previsión existente es que se transporte mercancía en contenedores, con el siguiente volumen:

- Origen Terminal 1- Destino Terminal 2: 1.200 t en un día medio laborable.
- Origen Terminal 2-Destino Terminal 1: 1.200 t en un día medio laborable.

Por último, como dato de partida asociado al sistema de detección de trenes y señalización de la línea, se dispone de la **distribución de cantones** en la línea, la cual condiciona la explotación de esta y su capacidad. El detalle de los cantones con su longitud y ubicación se puede observar en los anexos.

5. METODOLOGÍA

El proceso seguido para el diseño de la programación de la explotación ferroviaria de la línea, parte de los datos iniciales descritos en el capítulo anterior. A partir de estos datos, se ha realizado un análisis entre distintas posibilidades de material rodante, con el objetivo de seleccionar el más adecuado desde el punto de vista de la eficiencia del propio sistema de transporte y de la explotación.

Para ello se ha analizado el oscilograma de carga y el aprovechamiento que se obtenía en los servicios de viajeros en los distintos tramos de la línea y se ha estudiado la capacidad de carga de distintas locomotoras y su influencia con la velocidad según la norma técnica de Renfe, en el caso de los servicios de mercancías. Este análisis del material rodante ha permitido determinar el número de circulaciones en la línea para cubrir la demanda de viajeros y mercancías prevista.

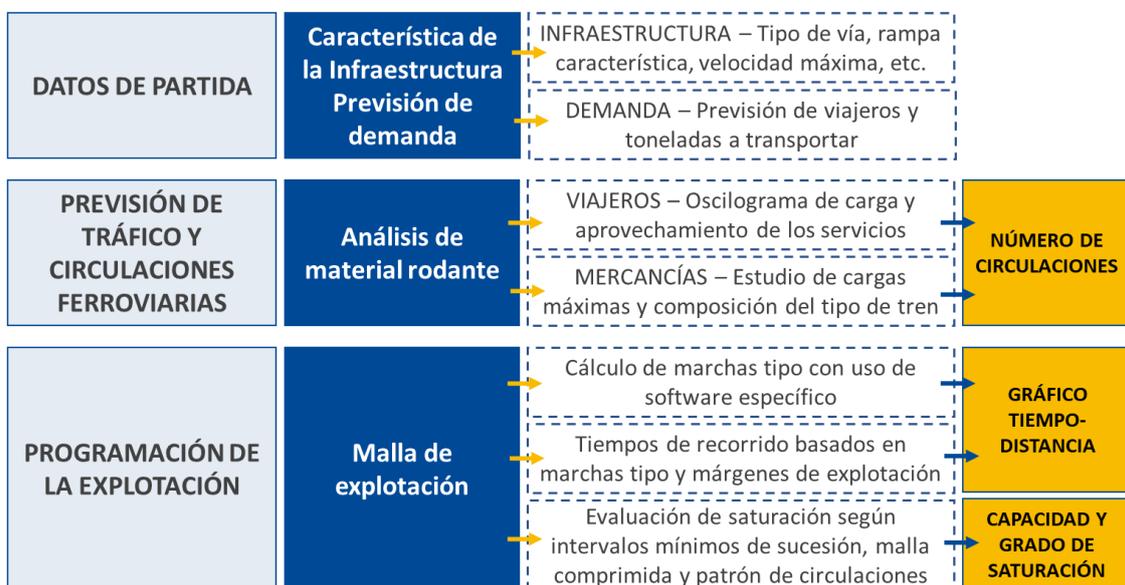
En segundo lugar, una vez seleccionado el material rodante que operará en la línea, se han calculado el tiempo de las distintas marchas de cada servicio, realizando simulaciones con software específico y añadiendo los márgenes correspondientes, para obtener finalmente el tiempo de recorrido que emplearía cada unidad.

En tercer lugar, se ha realizado el encaje de estos servicios en un gráfico tiempo-distancia configurando así una malla de explotación con todas las circulaciones que se producirían en la línea en un día laborable.

Y, por último, se ha comprobado la capacidad y el grado de saturación de la línea, realizando un ejercicio práctico según una malla comprimida basada en los intervalos mínimos de sucesión entre trenes y el patrón de circulaciones establecido en la programación de servicios.

En la siguiente figura, se observa un esquema del proceso seguido en el desarrollo de este trabajo fin de máster:

Figura 2 Metodología



Fuente: elaboración propia

6. DIMENSIONAMIENTO Y PREVISIÓN DE SERVICIOS FERROVIARIOS

Para el dimensionamiento de los servicios de viajeros y mercancías que operarán en la línea, es necesario determinar en primer lugar el material rodante que se empleará en la operación y que condicionará el número de circulaciones necesarias para cubrir la demanda prevista. En este capítulo, se describe de forma separada, tanto para viajeros, como para mercancías, el proceso seguido para determinar el número de circulaciones previstas en la línea y su carga media, en viajeros y toneladas.

6.1. Dimensionamiento y previsión de servicios ferroviarios de viajeros

Para determinar el número de circulaciones de servicios de viajeros que circularán por la línea, en primer lugar, es necesario conocer la previsión del número de viajeros que utilizarán la línea y el material rodante empleado en la explotación de la línea. En este caso, la demanda de viajeros de la línea es un dato de partida y el material rodante se seleccionará entre un conjunto de trenes autopropulsados, atendiendo a sus principales características: velocidad máxima, unidades de la cada composición, plazas, etc.

La selección del material rodante condicionará, por una parte en función las plazas, el número de circulaciones necesarias para cubrir la demanda prevista y, por otra parte en función de su velocidad máxima, condicionará la explotación de la línea según el tiempo de recorrido que se pueda obtener.

La velocidad máxima no es el único parámetro del que dependerá el tiempo de recorrido de los servicios ferroviarios, ya que este depende de otros aspectos como el peso o la potencia en función de la velocidad, pero se ha utilizado en una primera aproximación para realizar la selección del material rodante, porque esta velocidad es un factor principal en la composición del tiempo de recorrido final.

6.1.1. Material rodante considerado

El material rodante considerado para el análisis de este apartado consta de tres series distintas de trenes autopropulsados de tracción eléctrica utilizados habitualmente por Renfe [1] en la explotación ferroviaria en líneas de características similares a la línea objeto de este estudio. Estas series de autopropulsados son:

- S-448. Caf, Alstom.
- S-449. Caf.
- S-470. Caf, Westinghouse, Bombardier, Macosa, Mitsubishi.

Las principales características de estos trenes, se exponen a continuación:

- S-448

Figura 3 Tren S-448

Parámetro	Valor
Fabricante	Caf, Alstom
Peso	151 t
Potencia	1.160 kW
Nº de coches de cada composición	3 coches
Plazas totales de cada composición	236 plazas
Velocidad máxima	160 km/h
Longitud	78.530 mm

Fuente: Renfe

- S-449

Figura 4 Tren S-449

Parámetro	Valor
Fabricante	Caf
Peso	172 t
Potencia	2.400 kW
Nº de coches de cada composición	5 coches
Plazas totales de cada composición	260 plazas
Velocidad máxima	160 km/h
Longitud	98.970 mm

Fuente: Renfe

- S-470

Figura 5 Tren S-470

Parámetro	Valor
Fabricante	Varios
Peso	156 t
Potencia	1.160 kW
Nº de coches de cada composición	3 coches
Plazas totales de cada composición	224 plazas
Velocidad máxima	140 km/h
Longitud	79.590 mm

Fuente: Renfe

Como se observa en las figuras anteriores, el tren S-448 y S-449 son los que pueden circular a una velocidad máxima más elevada, 160 km/h, disponiendo además de la mayor capacidad de transporte de viajeros, con 236 y 260 plazas, respectivamente. Todos ellos admiten composiciones múltiples, aunque en composición simple, estos trenes tienen entre 3 y 5 coches cada unidad.

6.1.2. Número de circulaciones

A partir de los datos de demanda de partida y de los datos técnicos de cada tren, se ha elaborado un análisis en el que se han calculado los viajeros por km y las plazas por km ofertadas en cada tramo, para poder así dimensionar el número de servicios de acuerdo con un grado de aprovechamiento óptimo que podría producirse en los servicios.

El grado de aprovechamiento [2] es la relación entre los viajeros transportados y las plazas ofertadas en cada tramo y es una forma de medir la eficiencia de la capacidad de transporte que se oferta en relación a los viajeros transportados.

$$\text{Aprovechamiento (\%)} = \frac{\text{viajeros} * \text{km}}{\text{plazas} * \text{km}}$$

Por lo tanto, el grado de aprovechamiento medio debe encontrarse en la medida de lo posible en valores altos para maximizar la relación entre la demanda y la capacidad y la eficiencia del propio servicio de transporte. No obstante, el grado de aprovechamiento medio no alcanza valores cercanos al 100%, ya que esto supondría que habría demanda que, en ocasiones puntuales, no podría ser atendida, produciendo un déficit en la oferta de transporte.

Como ejemplo, en la red ferroviaria de España, el grado de aprovechamiento de los servicios de Larga Distancia convencional (servicios comerciales) se situó alrededor del 65% [3].

Partiendo de este dato, las características del material rodante y las previsiones de demanda, se han elaborado los oscilogramas de carga de los servicios estableciendo un número de circulaciones que permita obtener grados de aprovechamiento medio no superiores al 65%. De esta forma, para cada material rodante considerado anteriormente se obtiene el número de circulaciones necesarias para optimizar el grado de aprovechamiento en el entorno del 65%, lo que permitirá detectar si existen variaciones en el número de servicios a disponer, atendiendo a este criterio.

En primer lugar, se ha calculado a partir de la matriz de viajes, la demanda en los distintos tramos de la línea entre cada estación y según sentidos de circulación, obteniendo los datos de la siguiente tabla:

Tabla 4 Viajeros por tramos

Tramo	Viajeros/día Sentido A	Viajeros/día Sentido B
Estación 1-Estación 2	2.242	2.068
Estación 2-Estación 3	2.234	2.163
Estación 3-Estación 4	2.298	2.281
Estación 4-Estación 5	2.246	2.310
Estación 5-Estación 6	2.396	2.453
Estación 6-Estación 7	2.312	2.360
Total	13.728	13.635

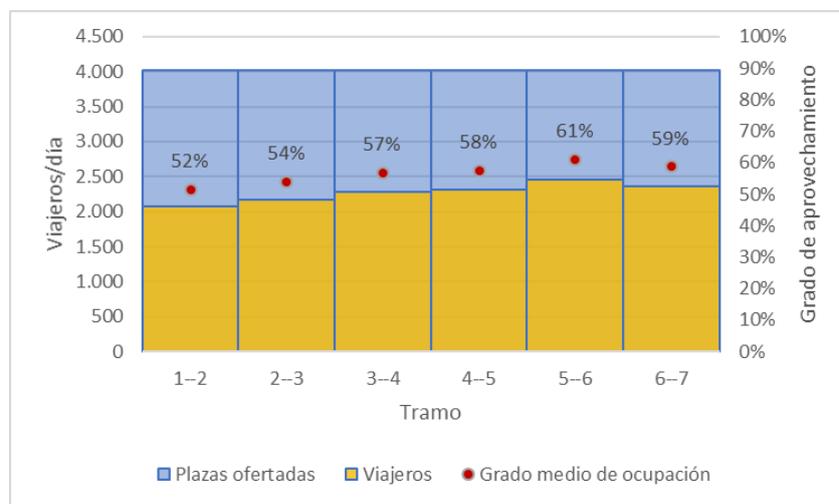
Fuente: elaboración propia

En general, la demanda de viajes tiene un alto grado de simetría, aunque se observa en la tabla anterior que el tramo entre la estación 5 y la estación 6 en el sentido B de circulación, adquiere la mayor carga de viajeros de la línea, siendo el tramo por el que mayor número de viajes discurren.

A continuación, para cada serie de material rodante, se han calculado las plazas ofertadas y por último el grado de aprovechamiento medio de cada tramo. Dado que en el sentido B se encuentra el tramo con mayor carga de viajes, este análisis se ha centrado en este sentido de circulación.

En las siguientes figuras, se detallan los grados de aprovechamiento obtenidos en cada tramo para cada serie de material rodante y según el número de circulaciones, estableciendo como umbral máximo de aprovechamiento medio diario del 65%. En este análisis se ha considerado que todas las circulaciones realizarán el recorrido completo de la línea entre las estaciones 1 y 7 en composición simple y realizando parada en todas ellas.

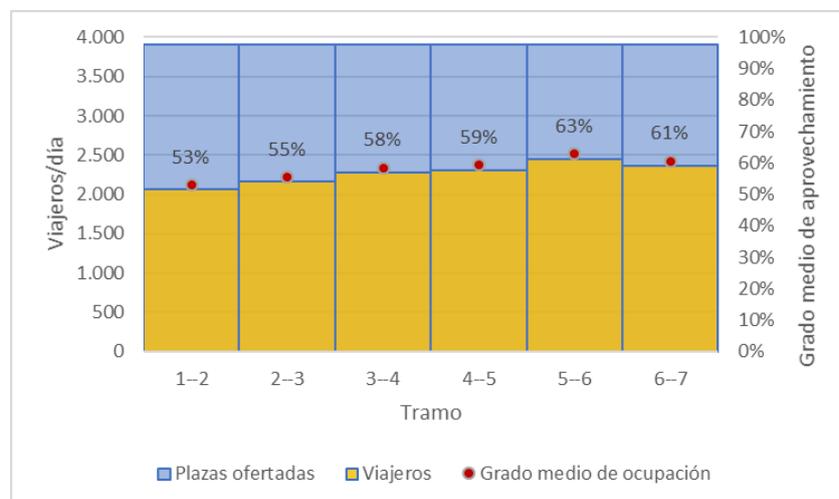
Figura 6 Oscilograma de carga tren S-448. Viajeros/día medio. Sentido B. (17 circulaciones)



Fuente: elaboración propia

En la figura anterior, puede observarse que para no sobrepasar el aprovechamiento medio del 65% en los trenes S-448, sería necesario disponer de 4.000 plazas por sentido en un día medio, lo que equivale a 17 circulaciones de una unidad simple del S-448.

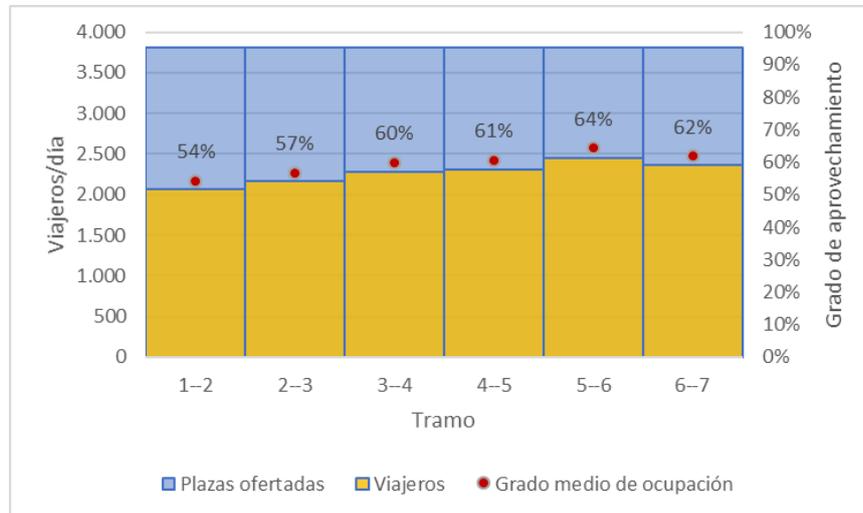
Figura 7 Oscilograma de carga tren S-449. Viajeros/día medio. Sentido B. (15 circulaciones)



Fuente: elaboración propia

Para los trenes de la serie S-449 se observa que podría alcanzarse un grado de aprovechamiento medio de hasta el 63% ofertando un número similar de plazas, que equivaldría a 15 circulaciones por día y sentido de una unidad simple de los trenes S-449.

Figura 8 Oscilograma de carga tren S-470. Viajeros/día medio. Sentido B. (17 circulaciones)



Fuente: elaboración propia

Por último, para los trenes de la serie S-470, para alcanzar el aprovechamiento óptimo deberían disponerse igualmente de casi 4.000 plazas por cada sentido en un día medio, lo que supone en esta serie de material 17 circulaciones de una unidad simple.

Adicionalmente, se ha realizado el ejercicio de comprobación para calcular el grado de aprovechamiento que se obtendría en el tramo más cargado para los trenes de la serie S-448 y S-470 para el mismo número de circulaciones que los trenes S-449, es decir 15 circulaciones, obteniendo que el grado de aprovechamiento se incrementaría hasta el 69% en los trenes S-448 y hasta el 73% en los trenes S-470.

A continuación, se muestra una tabla comparativa del análisis realizado entre las tres series de material autopulsado considerado:

Tabla 5 Viajeros por tramos

Indicador	Tren		
	S-448	S-449	S-470
Circulaciones	17	15	17
Grado de aprovechamiento medio en el tramo más cargado	61%	63%	64%
Plazas ofertadas por tramo	4.012	3.900	3.808

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, estableciendo como criterios para el dimensionamiento de los servicios de viajeros, que estos alcancen un grado óptimo de aprovechamiento y que el tráfico ferroviario de viajeros se optimice en la línea para permitir tráfico de servicios de mercancías, se observa que los trenes de la serie S-449 cumplirían con el objetivo disponiendo de 2 circulaciones menos que el resto de las series. Un menor número de circulaciones en la línea repercute además en una

menor necesidad de disponibilidad de parque de material rodante y puede reducir costes de operación.

Por otro lado, los trenes de la serie 449 pueden circular a la velocidad máxima de 160 km/h, permitiendo optimizar el tiempo de recorrido, ventaja del lado de la explotación ferroviaria ya que hace aumentar la capacidad de transporte y del lado del sistema de transporte de viajeros, que mejoran su tiempo de viaje frente a otros modos de transporte, aumentando la utilidad para los usuarios.

Según esto, los trenes de la serie S-449 han sido seleccionados como el material rodante más adecuado a emplear en la explotación ferroviaria de viajeros de la línea y será empleado posteriormente para calcular los tiempos de marcha mediante simulación y en total serán necesarios 15 servicios ferroviarios de viajeros por sentido en un día medio para cubrir la demanda de viajeros prevista en la línea, realizando paradas en las 7 estaciones de la línea.

Tabla 6 Previsión de tráfico ferroviario de viajeros

Tramo	Parada de viajeros	Circulaciones por sentido	Plazas ofertadas por sentido	Aprovechamiento medio
Estación 1-Estación 2	✓	15	3.900	55%
Estación 2-Estación 3	✓			56%
Estación 3-Estación 4	✓			59%
Estación 4-Estación 5	✓			58%
Estación 5-Estación 6	✓			62%
Estación 6-Estación 7	✓			60%

Fuente: elaboración propia

6.2. Dimensionamiento y previsión de servicios ferroviarios de mercancías

La constitución de los trenes tipo de los servicios ferroviarios de mercancías se realiza para calcular el número de circulaciones que serán necesarias para satisfacer la demanda de mercancías, dato de partida de este trabajo fin de máster. El número de circulaciones ferroviarias de mercancías es un dato a determinar en este estudio para poder hacer posteriormente el grafiado de la malla de explotación.

Este dimensionamiento de circulaciones, depende por lo tanto del número de toneladas que son necesarias transportar, del material rodante empleado (constitución del tren tipo: locomotora y material remolcado) y de los condicionantes impuestos por el trazado. El proceso seguido para el dimensionamiento se basa en estos tres factores enumerados y se expone a continuación:

- Selección de la locomotora empleada en las circulaciones.
- Cálculo de la carga máxima o Toneladas Brutas Remolcadas por la locomotora según:
 - Características propias del material rodante: peso, número de ejes, velocidad máxima, potencia, etc.
 - Condicionantes del trazado: Velocidad máxima, rampa característica, etc.
- Cálculo de las Toneladas Netas Remolcadas y longitud de la composición del tren.
- Cálculo del número de circulaciones para cubrir la demanda prevista.

La locomotora que compondrá los servicios ferroviarios de mercancías de la línea se ha seleccionado entre un listado de ellas, procediendo para cada una con el cálculo de las cargas máximas admisibles para terminar definiendo finalmente una locomotora que optimice el transporte con la relación más adecuada entre velocidad y carga transportada.

Las locomotoras contempladas en este análisis son:

- Locomotora 253. Bombardier Transportation.
- Locomotora 269.0/1. Caf-Macosa-Ateinsa-Mitsubishi.
- Locomotora 269.2/1. Caf-Macosa-Ateinsa-Mitsubishi.
- Locomotora Bitrac. Caf.

Todas las locomotoras incluidas en este análisis son de tracción eléctrica, dado que está contemplado que la línea ferroviaria esté dotada de alimentación eléctrica mediante catenaria. Entre estas locomotoras, la Bitrac posee la característica de ser dual, permitiendo operar mediante tracción eléctrica o tracción diésel. Esto puede plantearse inicialmente como una ventaja, ya que en las operaciones de carga y descarga de la mercancía en las vías de maniobras no existe infraestructura de catenaria para poder realizar esta labor de carga y descarga de contenedores.

6.2.1. Composición del tren tipo

6.2.1.1. Cálculo de cargas máximas

Para el cálculo de la carga máxima capaz de transportar cada locomotora, se ha empleado como metodología, la propuesta por la Norma Técnica de Renfe [4]. Esta norma describe un procedimiento de cálculo para obtener la carga máxima basado en:

- Potencia de la locomotora.
- Esfuerzo máximo por adherencia.
- Resistencia al avance del tren.
- Esfuerzo máximo admisible por los enganches.

A partir de esta información, puede obtenerse la carga máxima en cada una de las siguientes situaciones límite:

- Límite en el arranque por esfuerzo máximo de la locomotora.
- Límite en el arranque por esfuerzo máximo de la locomotora condicionado por la adherencia.
- Límite por el esfuerzo máximo de la locomotora en la marcha en régimen continuo o unihorario.
- Límite por el esfuerzo máximo de la locomotora en la marcha condicionado por la adherencia.

La carga máxima que podrá transportar la locomotora, será la mínima que resulte de las situaciones límite descritas anteriormente.

En general, la carga máxima se encuentra limitada bien por el esfuerzo máximo capaz de llevar a cabo la locomotora por la potencia de sus motores, o bien por el esfuerzo que es capaz de desarrollar esta sin superar la adherencia, es decir, sin que las ruedas deslicen por pérdida de adherencia.

En primer lugar, el esfuerzo máximo que puede ejercer una locomotora está determinado por las características de sus motores y su potencia, lo que establece por un lado el esfuerzo máximo tractor capaz de desarrollar según la velocidad (curva de esfuerzo-velocidad) y por otro lado el esfuerzo máximo continuo o unihorario que se da a velocidades más bajas. Este último es el

esfuerzo máximo que puede realizar la locomotora, aunque solo por un periodo de tiempo limitado.

Y, en segundo lugar, el esfuerzo máximo que puede ejercer una locomotora está fijado por la máxima adherencia disponible entre rueda y carril, circunstancia que depende de las condiciones de la propia vía (humedad, temperatura, etc), del peso de la locomotora, el número de ejes motores o la velocidad de la marcha. Como característica de la adherencia, cabe destacar que es una función decreciente a medida que se incrementa la velocidad de circulación.

Entre las fórmulas que pueden obtenerse de este parámetro, pueden encontrarse los siguientes [5, 6].

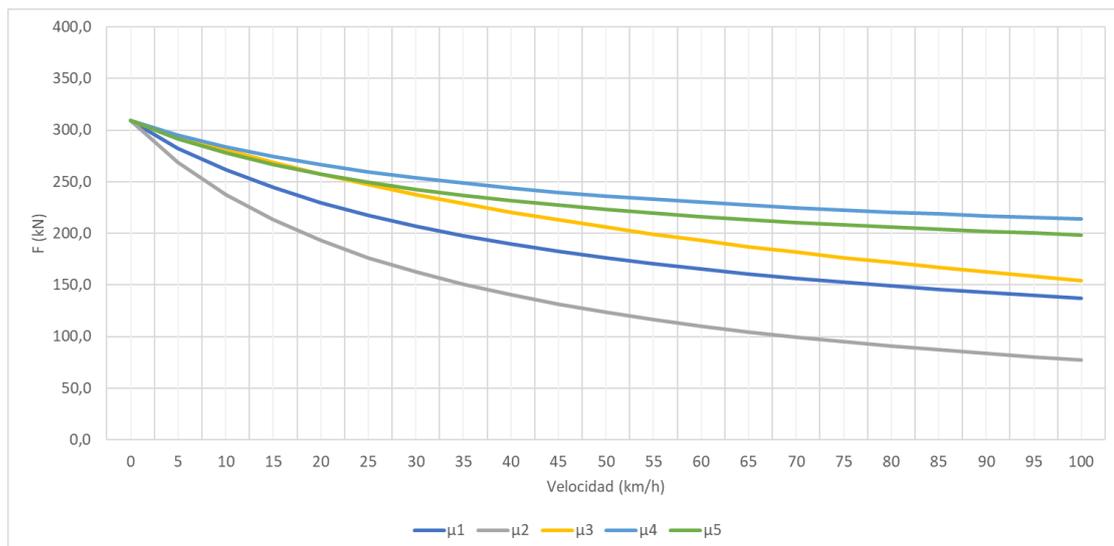
- Fórmula 1: $\mu_V = \mu_0(0,2115 + \frac{33}{V+42})$
- Fórmula 2: $\mu_V = \mu_0 \frac{1}{0,03V+1}$
- Fórmula 3: $\mu_V = \mu_0 \frac{1}{0,01V+1}$
- Fórmula 4: $\mu_V = \mu_0 \frac{8+0,1V}{8+0,2V}$
- Fórmula 5: $\mu_V = \mu_0 \frac{8+0,1V}{8+0,18V}$

Siendo:

- μ_V : coeficiente de adherencia según la velocidad. (Adimensional)
- μ_0 : coeficiente estático de adherencia en el arranque (velocidad igual a 0). Adimensional. Coeficiente específico del material rodante.
- V : velocidad de la marcha. (km/h).

Un ejemplo práctico de las distintas formulaciones de distribución de la fuerza adherente en función de la velocidad, puede observarse a continuación, para un caso concreto de una locomotora de 4 ejes y 90 t, con un coeficiente estático de adherencia de 0,35:

Figura 9 Ejemplos de distribución de fuerza adherente



Fuente: elaboración propia

Para este estudio de cargas máximas de locomotoras, se ha utilizado la fórmula de Nouvion correspondiente a ejes desacoplados (Fórmula 4), y que representa condiciones de baja humedad [7] como las esperadas en la zona geográfica donde se encuentra ubicado el ámbito de estudio.

Una vez definida la adherencia disponible, el esfuerzo tractor máximo que puede realizar en llantas la locomotora sin que esta patine en el momento del arranque viene definido por la siguiente expresión:

$$F_{\mu_0} = \mu_0 L_a$$

Siendo:

- F_{μ_0} : esfuerzo máximo adherente en el arranque. (toneladas)
- L_a : peso adherente de la locomotora o peso en los ejes motores en caso de no tener tracción en todos los ejes. (toneladas)

Durante la marcha, la adherencia disponible se ve reducida a medida que aumenta la velocidad, por lo que el esfuerzo adherente máximo durante la marcha es función de la velocidad, según la siguiente expresión:

$$F_{\mu} = \mu_v L_a$$

Siendo F_{μ_0} el esfuerzo máximo adherente durante la marcha a velocidad V , en toneladas.

Tras haber definido la influencia de la adherencia en los esfuerzos máximos que puede ejercer la locomotora, la carga máxima remolcable depende finalmente del esfuerzo neto resultante entre el esfuerzo máximo disponible y la resistencia al avance de la composición definida por locomotora y vagones en la situación de arranque y en la situación durante la marcha. Estas situaciones son críticas en las rampas que existan en el trazado, concretamente en la rampa característica de la línea.

En primer lugar, el concepto de resistencia en el arranque, se encuentra definido para garantizar que la locomotora, con toda su carga remolcada, pueda iniciar la marcha en la situación crítica de tener que realizar una parada en la rampa característica de la línea. Esta resistencia viene definida mediante la siguiente expresión:

$$E_a = (r_a + i)(L + Q)$$

Siendo:

- E_a : fuerza resistente en el arranque. (daN)
- i : rampa característica del trazado. (mm/m)
- L : peso de la locomotora. (toneladas)
- Q : peso de la carga remolcada. (toneladas)
- r_a : resistencia específica al arranque del tren. (daN/tonelada)

El valor de la resistencia específica dentro de esta fórmula, se encuentra tabulado en función de la rampa característica del trazado:

Tabla 7 Resistencia específica al arranque en función de la rampa

r_a (daN/tonelada)	i (mm/m)
7	<15
8	15-20
9	21-25
10	26-29
11	30-33
12	34-37
13	38-41
14	42-45
15	>45

Fuente: Norma NT-GGC-6

Y en segundo lugar, el concepto de resistencia al avance durante la marcha, representa la fuerza que se opone al movimiento del tren debido principalmente a las resistencias mecánicas, las resistencias aerodinámicas y la fuerza gravitatoria por el efecto de las rampas. Esta resistencia es una función creciente con la velocidad y se expresa de la siguiente forma:

$$E = (E_L + rQ) + i(L + Q) + \left[\frac{ak}{g} 10^3 (L + Q) \right]$$

Siendo:

- E : resistencia al avance durante la marcha. (daN)
- E_L : resistencia genérica al avance. (daN)

$$E_L = 0,65L + 13n + 0,01LV + 0.03V^2$$

- n : número total de ejes de la locomotora
- V : velocidad. (km/h)
- r : resistencia específica de la parte remolcada. (daN/tonelada)

$$r = 2 + \frac{V^2}{1600}$$

- a : aceleración residual. (daN/tonelada. Igual a 1)
- k : coeficiente de masas giratorias (igual a 1,06)
- g : aceleración gravitatoria (igual a 9,81 m/s²)

Finamente, la carga máxima que puede transportar la locomotora será el valor mínimo resultante entre la carga arrancable y la carga remolcable, que a su vez, se subdividen en cargas máximas limitadas por potencia o por adherencia. Además, se debe realizar la comprobación de que la carga máxima no exceda del límite de esfuerzo admisible por los enganches, pero según menciona la propia norma, esta comprobación no se considera en la práctica en el cálculo de

cargas máximas ya que queda validada con la eliminación de la doble tracción de determinadas series de material rodante.

La carga máxima arrancable limitada por el esfuerzo tractor de la locomotora, se define por la siguiente fórmula:

$$Q_A = \left[\frac{(10^3 F_M)}{r_a + i} \right] - L$$

Siendo Q_A la carga en toneladas capaz de remolcar la locomotora.

La carga máxima arrancable limitada por la adherencia, se define por la siguiente fórmula:

$$Q_B = \left[\frac{(10^3 F_{\mu_0})}{r_a + i} \right] - L$$

Siendo Q_B la carga en toneladas capaz de remolcar la locomotora sin que las ruedas patinen por perder la adherencia.

Por lo tanto, la carga máxima arrancable se define por el valor mínimo entre estas dos fórmulas descritas.

Respecto a la carga máxima remolcable, la limitación está establecida por el esfuerzo tractor que puede desarrollar la locomotora durante la marcha en su régimen continuo o unihorario, régimen que se desarrolla a las velocidades más bajas que puede mantener la locomotora manteniendo el máximo esfuerzo tractor. Esta carga se describe con la siguiente fórmula:

$$Q_C = \left[\frac{(10^3 F_C - [E_L + L(i + 1)])}{r + i + 1} \right]$$

Siendo F_C el esfuerzo tractor máximo en toneladas en régimen continuo o unihorario y Q_C la carga en toneladas capaz de remolcar la locomotora.

Por último, la carga máxima remolcable limitada por la adherencia, se define mediante la siguiente fórmula:

$$Q_D = \left[\frac{10^3 F - [E_L + L(i + 1)]}{r + i + 1} \right]$$

Siendo F el esfuerzo tractor máximo en toneladas en régimen continuo o unihorario y Q_D la carga en toneladas capaz de remolcar la locomotora.

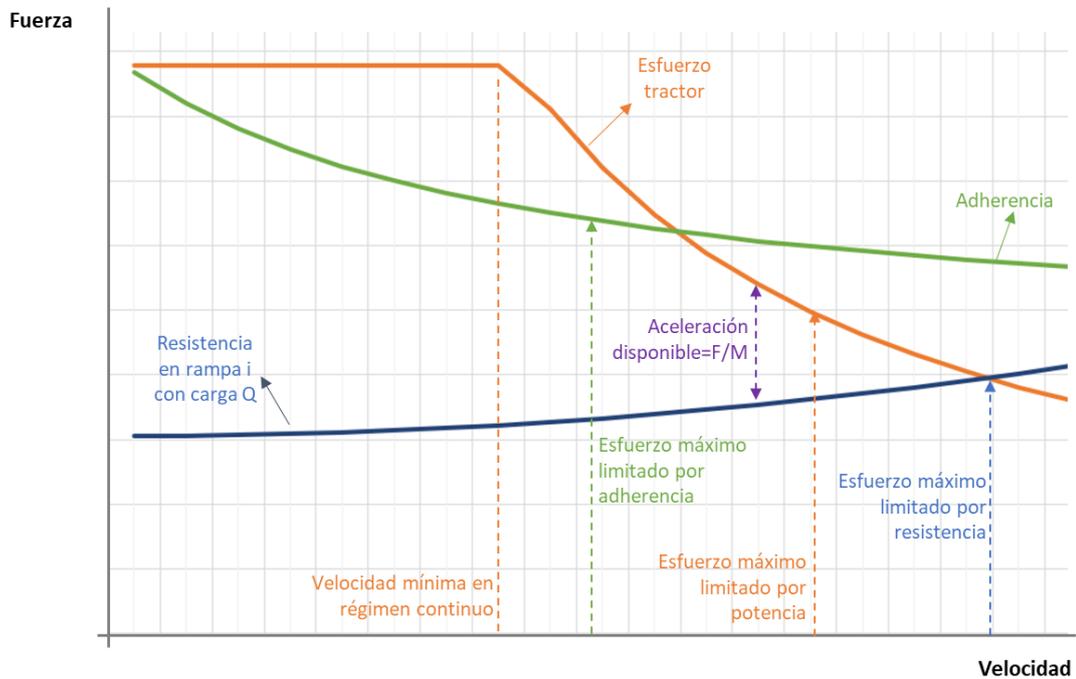
La carga máxima, al ser dependientes de la velocidad, puede determinarse para situaciones concretas. En concreto la carga máxima es una función decreciente con el aumento de la velocidad y de la rampa característica, siendo estas las dos principales variables que determinarán el dimensionamiento de los trenes, además de las propias características de la locomotora.

En general, para maximizar la carga máxima que puede transportar la locomotora en la línea, debe obtenerse esta carga para la rampa característica del trazado y a la velocidad mínima posible, determinada por la adherencia o el régimen continuo de la locomotora.

Sin embargo, estas condiciones permiten maximizar la carga a transportar pero pueden penalizar notablemente el tiempo de recorrido, circunstancia que puede ser relevante en la explotación de una línea de tráfico mixto.

En el siguiente gráfico, se describen los principales parámetros contemplados en esta norma técnica para el cálculo de la carga máxima.

Figura 10 Ejemplo relación esfuerzo-velocidad



Fuente: Elaboración propia

6.2.1.2. Selección de la locomotora de mercancías

Con el objetivo de obtener la locomotora óptima para la explotación, que pueda transportar la máxima carga posible de la forma más eficiente, se ha realizado un estudio comparativo calculando la carga máxima para las 4 locomotoras incluidas en el análisis y mencionadas anteriormente. Esta carga máxima se ha determinado para la rampa característica de la línea y para la situación de régimen crítico en el que la locomotora puede desarrollar el máximo esfuerzo a la mínima velocidad posible.

No obstante, dado que la explotación de la línea prevista en este estudio es de tráfico mixto, la velocidad comercial de las circulaciones tiene una especial relevancia y se ha considerado que la velocidad mínima de las circulaciones no debe ser inferior a los 80 km/h, para obtener así un tiempo de recorrido compatible con la circulación de servicios de viajeros.

Por este motivo, se ha calculado también la carga máxima que podría llevar cada locomotora teniendo en cuenta esta limitación de velocidad mínima.

Las características consideradas para cada locomotora en el cálculo de la carga, se describen a continuación [8, 9].

- Locomotora 253

Figura 11 Locomotora 253



Fuente: Renfe

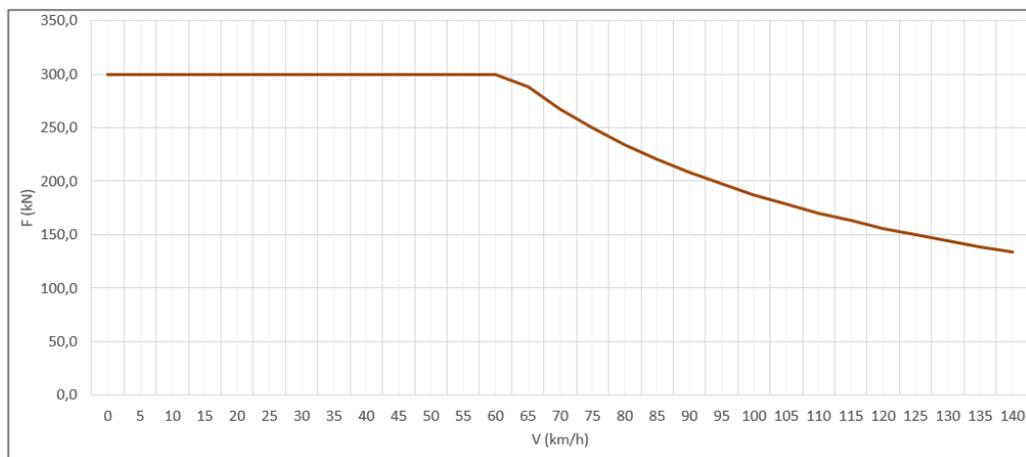
Las características técnicas de esta locomotora, se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 8 Características técnicas de la locomotora 253

Parámetro	Valor
Fabricante	Bombardier Transportation.
Peso	87 t
Potencia	5.400 kW
Número de ejes	4 ejes
Tipo de bogies	Bo'-Bo'
Velocidad máxima	140 km/h
Esfuerzo máximo en el arranque	300 kN
Longitud	18.900 mm

Fuente: Renfe

Figura 12 Curva esfuerzo-velocidad. Locomotora 253



Fuente: Renfe

- Locomotora 269.0/1

Figura 13 Locomotora 269.0/1



Fuente: Renfe

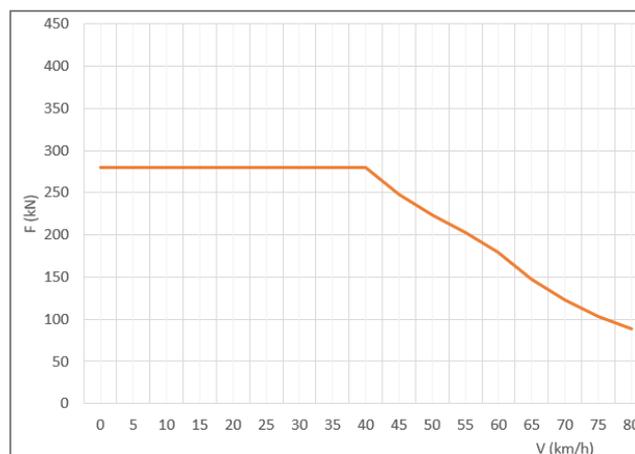
Las características técnicas de esta locomotora, se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 9 Características técnicas de la locomotora 269.0/1

Parámetro	Valor
Fabricante	Caf-Macosa-Ateinsa-Mitsubishi.
Peso	88 t
Potencia	3.100 kW
Número de ejes	4 ejes
Tipo de bogies	Bo'-Bo'
Velocidad máxima	80 km/h
Esfuerzo máximo en el arranque	280 kN
Longitud	17.270 mm

Fuente: Renfe

Figura 14 Curva esfuerzo-velocidad. Locomotora 269.0/1



Fuente: Renfe

- Locomotora 269.2

Figura 15 Locomotora 269.2



Fuente: Renfe

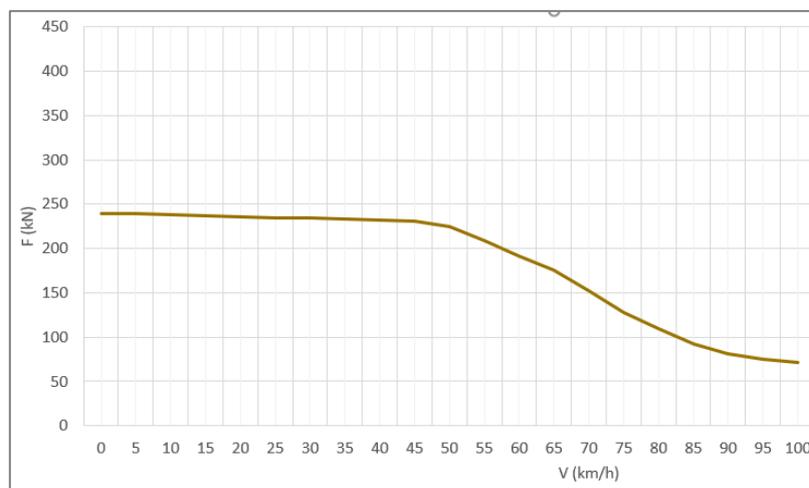
Las características técnicas de esta locomotora, se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 10 Características técnicas de la locomotora 269.2

Parámetro	Valor
Fabricante	Caf-Macosa-Ateinsa-Mitsubishi.
Peso	88 t
Potencia	3.100 kW
Número de ejes	4 ejes
Tipo de bogies	Bo'-Bo'
Velocidad máxima	100 km/h
Esfuerzo máximo en el arranque	240 kN
Longitud	17.270 mm

Fuente: Renfe

Figura 16 Curva esfuerzo-velocidad. Locomotora 269.0/1



Fuente: Renfe

- Locomotora Bitrac

Figura 17 Locomotora Bitrac



Fuente: Caf

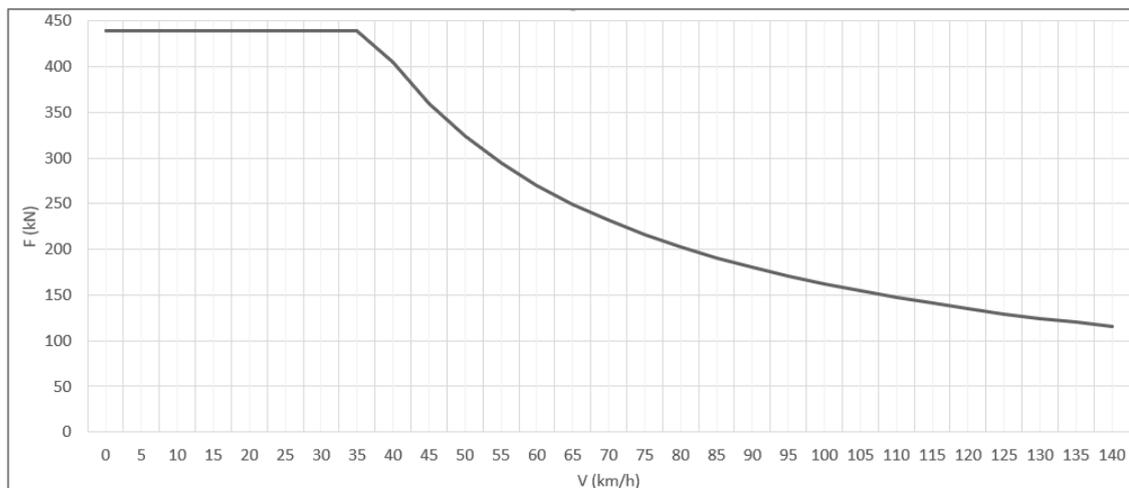
Las características técnicas de esta locomotora, se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 11 Características técnicas de la locomotora Bitrac

Parámetro	Valor
Fabricante	Caf
Peso	130 t
Potencia	4.500 kW
Número de ejes	6 ejes
Tipo de bogies	Co'-Co'
Velocidad máxima	120 km/h
Esfuerzo máximo en el arranque	440 kN
Longitud	22.410 mm

Fuente: Caf

Figura 18 Curva esfuerzo-velocidad. Locomotora Bitrac



Fuente: Caf

Para el dimensionamiento de los trenes de mercancías, se considerará la locomotora capaz de transportar la máxima carga posible a la velocidad mínima a 80 km/h para poder compatibilizar el tráfico de la línea con los servicios de viajeros y no incrementar excesivamente los tiempos de recorrido. No obstante, se ha incorporado en este análisis, la carga máxima que podría transportar cada locomotora en las siguientes situaciones, con el objetivo de observar la influencia de la velocidad en la carga máxima.

- Velocidad igual a la velocidad mínima posible en el límite de régimen continuo. Esta velocidad maximiza la carga que puede transportar la locomotora. Estas velocidades en función de las locomotras son:
 - Locomotora 253: 62 km/h
 - Locomotora 269./1: 40 km/h
 - Locomotora 269.2: 48 km/h
 - Locomotora Bitrac: 37 km/h

- Velocidad igual a la velocidad máxima de la locomotora. Esta velocidad permitiría obtener el menor tiempo de recorrido de los servicios de mercancías al minimizar la carga transportada, sin embargo, el transporte de mercancías disminuye su eficiencia al transportar una menor carga en cada circulación. Estas velocidades en función de las locomotras son:
 - Locomotora 253: 140 km/h
 - Locomotora 269./1: 80 km/h
 - Locomotora 269.2: 100 km/h
 - Locomotora Bitrac: 140 km/h

Este caso se ha estudiado con el objetivo de ofrecer una visión de la influencia global que tiene la velocidad en la carga máxima de la locomotora, si bien se trata de un caso que en la práctica no suele ser considerado al disminuir considerablemente el rendimiento de la mercancía transportada.

- Velocidad igual a 80 km/h. Esta velocidad permitirá optimizar la explotación de tráfico mixto de la línea de servicios ferroviarios de viajeros y de mercancías, reduciendo los tiempos de recorrido respecto a la situación anterior.

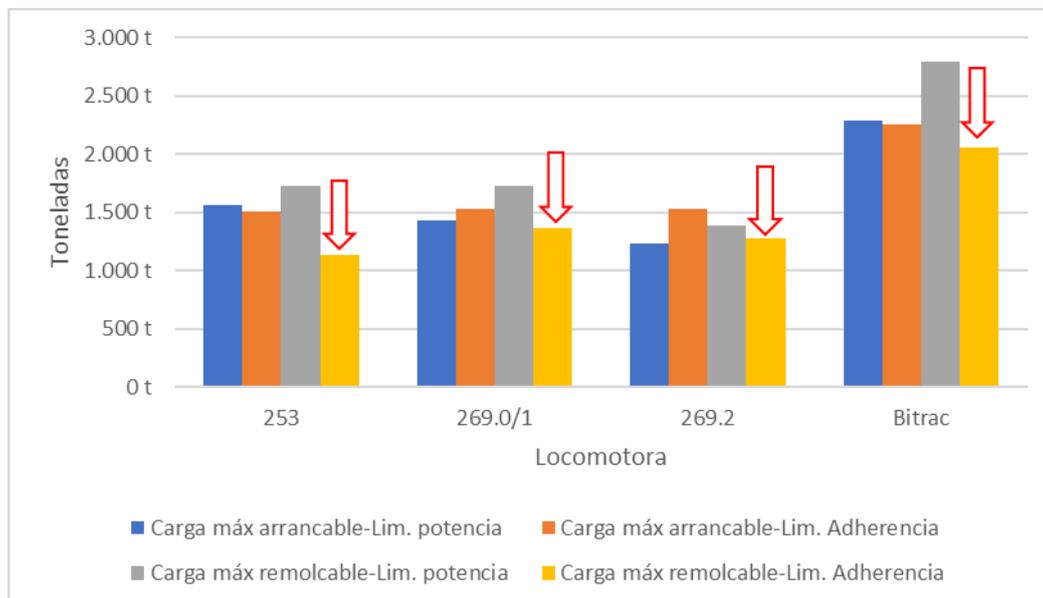
A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los cálculos para cada una de las locomotoras objeto de análisis en la rampa característica de la línea y en las situaciones mencionadas anteriormente:

Tabla 12 Cargas máximas. Velocidad límite de régimen contiuo y rampa característica de 11,5 mm/m

Tipo de carga	Locomotora			
	253	269.0/1	269.2	Bitrac
Carga máxima arrancable	1.512 t	1.427 t	1.234 t	2.259 t
Limitación por potencia	1.566 t	1.427 t	1.234 t	2.289 t
Limitación por adherencia	1.512 t	1.529 t	1.529 t	2.259 t
Carga máxima remolcable	1.134 t	1.364 t	1.273 t	2.055 t
Limitación por potencia	1.728 t	1.725 t	1.388 t	2.792 t
Limitación por adherencia	1.134 t	1.364 t	1.273 t	2.055 t
Carga máxima	1.134 t	1.364 t	1.234 t	2.055 t

Fuente: elaboración propia

Figura 19 Cargas máximas en función de la locomotora. Velocidad límite de régimen continuo



Fuente: elaboración propia

Dimensionando la carga a la velocidad mínima que pueden circular las locomotoras en la rampa característica, se observa que la locomotora Bitrac puede arrancar con hasta 2.259 toneladas, siendo la locomotora 269.2 la que necesita una menor carga para poder arrancar en estas condiciones (1.234 t).

Respecto a la carga máxima remolcable, se observa de nuevo que la locomotora Bitrac es capaz de remolcar en estas circunstancias hasta 2.055 t, mientras que la locomotora 253 es en este caso la que menor carga puede remolcar, con 1.134 t.

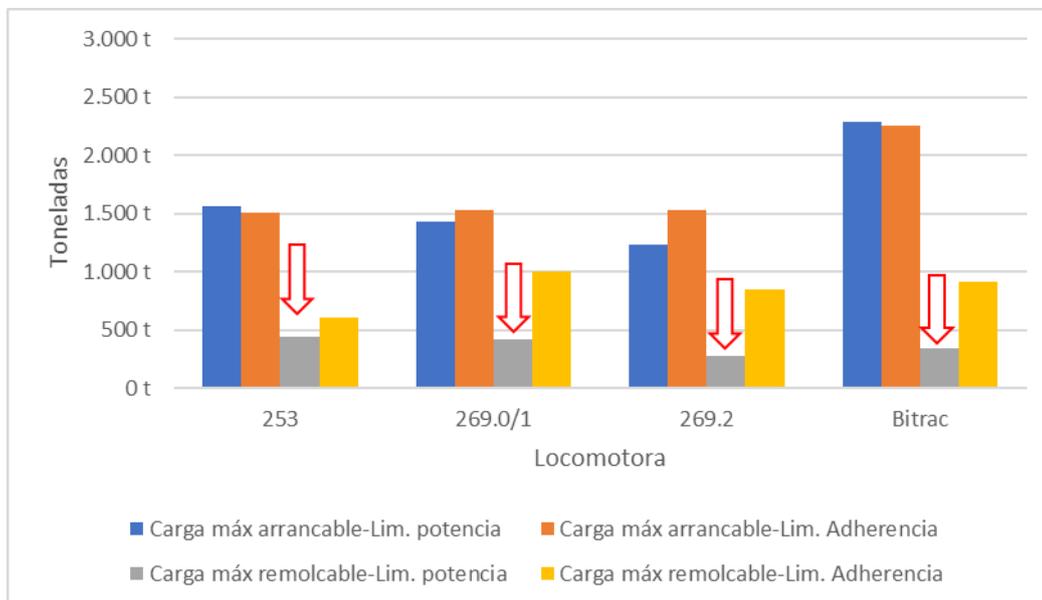
Finalmente, en esta situación la locomotora que mayor carga admite es la Bitrac, ya que puede transportar hasta 2.055 t, mientras que la locomotora 253 es la que menor carga podría transportar.

Tabla 13 Cargas máximas. Velocidad máxima y rampa característica de 11,5 mm/m

Tipo de carga	Locomotora			
	253	269.0/1	269.2	Bitrac
Carga máxima arrancable	1.512 t	1.427 t	1.234 t	2.259 t
Limitación por potencia	1.566 t	1.427 t	1.234 t	2.289 t
Limitación por adherencia	1.512 t	1.529 t	1.529 t	2.259 t
Carga máxima remolcable	439 t	416 t	277 t	345 t
Limitación por potencia	439 t	416 t	277 t	345 t
Limitación por adherencia	605 t	999 t	850 t	914 t
Carga máxima	439 t	416 t	277 t	345 t

Fuente: elaboración propia

Figura 20 Cargas máximas en función de la locomotora. Velocidad máxima



Fuente: elaboración propia

A la máxima velocidad que pueden circular estas locomotoras, se observa que la mayor carga remolcable puede ser movida por la locomotora 253, con 439 t, una carga muy próxima a la que podría remolcar y transportar igualmente la locomotora 269.0/1.

En este caso, la locomotora Bitrac no es tan competitiva respecto al resto de locomotoras, teniendo en cuenta la carga máxima posible a transportar, que es de 345 t.

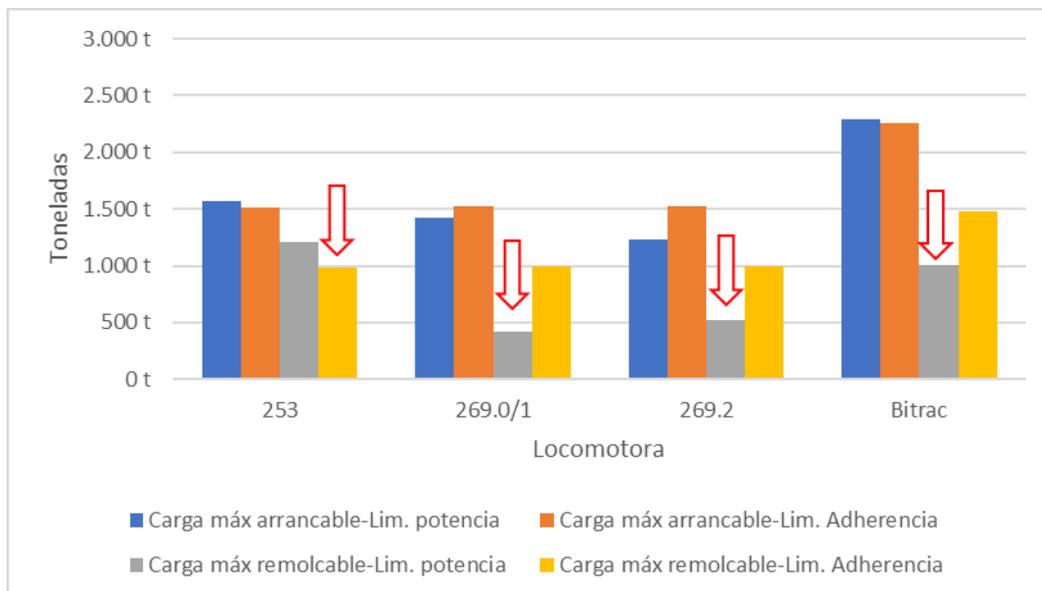
La locomotora de la serie 269.2 es la que menor carga de todas podría transportar en esta situación, con 277 t.

Tabla 14 Cargas máximas. Velocidad mínima de 80 km/h y rampa característica de 11,5 mm/m

Tipo de carga	Locomotora			
	253	269.0/1	269.2	Bitrac
Carga máxima arrancable	1.512 t	1.427 t	1.234 t	2.259 t
Limitación por potencia	1.566 t	1.427 t	1.234 t	2.289 t
Limitación por adherencia	1.512 t	1.529 t	1.529 t	2.259 t
Carga máxima remolcable	987 t	416 t	521 t	1.003 t
Limitación por potencia	1.211 t	416 t	521 t	1.003 t
Limitación por adherencia	987 t	999 t	999 t	1.480 t
Carga máxima	987 t	416 t	521 t	1.003 t

Fuente: elaboración propia

Figura 21 Cargas máximas en función de la locomotora. Velocidad mínima de 80 km/h



Fuente: elaboración propia

Para la velocidad de 80 km/h, las cargas máximas arrancables se mantienen igual que en la situaciones anteriores, dado que estas son independientes de la velocidad y en los distintos escenarios de cálculo la rampa es la misma.

Sin embargo, con relación a las cargas máximas remolcables, la locomotora 253 aumenta en esta situación la diferencia de carga que puede remolcar respecto a las locomotoras de la serie 269, que obtienen una capacidad de carga de 500 t aproximadamente.

La locomotora Bitrac en este caso la que mayor carga puede transportar, con 1.003 t, siendo esta carga casi el doble de la que podrían transportar las locomotoras de la serie 269.

Finalmente, la elección de la locomotora se realiza considerando la mayor carga máxima que se puede transportar en la rampa característica para no circular a una velocidad inferior a 80 km/h.

Esto permitirá, por un lado, incrementar la eficiencia del transporte de las mercancías al seleccionar la locomotora que mayor carga puede transportar y, por otro lado, optimizar el tiempo de recorrido para que este sea compatible en la programación de la explotación con los servicios ferroviarios de viajeros, al limitar la velocidad mínima a 80 km/h.

Por este motivo, la locomotora que se empleará en este estudio para la programación de la explotación es la locomotora Bitrac. Por lo tanto, la carga total que podrá transportar esta locomotora será de 1.003 Toneladas Brutas Remolcadas (TBR).

6.2.1.3. Selección del material remolcado

Para conocer en este caso la carga neta de mercancía que podrá transportar la locomotora, es necesario dimensionar la composición del tren a partir de la carga máxima (TBR previamente calculadas), la tara de los vagones y la tara de los contenedores que transportan en su interior la mercancía, obteniendo así la longitud de la composición de tren, la cual deberá finalmente comprobarse para que no exceda de la máxima longitud de los apartaderos de la línea y, en caso de ser necesario, estos trenes pueden utilizar las instalaciones de apartado.

En resumen, la capacidad del tren tipo que se constituya, vendrá limitada por uno de los dos siguientes aspectos:

- Carga máxima remolcable por la locomotora: toneladas brutas que puede transportar la locomotora. Dato previamente calculado.
- Longitud máxima del tren: según la longitud máxima de las instalaciones de apartado.

Para la selección del material remolcado, se ha partido de la información disponible de material remolcado de Renfe [10], en el cual existen hasta cuatro tipos distintos de vagones que admiten el transporte de contenedores. Cada uno de ellos cuenta con unas características técnicas concretas en relación a la tara, la carga máxima, la velocidad máxima a la que se pueden desplazar por la vía o la longitud entre topes del vagón. Estas características se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 15 Características técnicas de vagones

Vagón	Tara	Carga máxima	Velocidad máxima	Longitud entre topes
MC/MCE-Lgs (12/16 clavijas)	12 t	27 t	100 km/h	13,86 m
MMC-Sgs	21 t	58 t	100 km/h	19,90 m
MMP-Sdgkkms	18 t	44 t	120 km/h	16,44 m

Fuente: Renfe

Con el objetivo de aprovechar al máximo las características de la locomotora Bitrac, que puede alcanzar velocidades superiores a 100 km/h, se ha seleccionado el vagón MMP-Sdgkkms como el tipo de vagón a utilizar en la composición del tren de mercancías.

Figura 22 Vagón Sgdkkms



Fuente: Renfe

Respecto a los contenedores, que contendrán la mercancía y serán transportados por este tipo de vagones, sus características tipo serán las siguientes:

- Longitud: 6,096 m. (20 pies)
- Tara: 2,3 t.
- Carga máxima: 25 t.

6.2.2. Cálculo del número de circulaciones

Para calcular el número de circulaciones que serán necesarias en un día y en cada sentido de circulación para satisfacer la demanda de mercancías de 2.400 t, se calcula en primer lugar la carga neta o mercancía que puede transportar cada composición.

Al seleccionar la locomotora Bitrac para la explotación ferroviaria de mercancías en la línea, se ha calculado que la carga máxima que transportará, incluyendo tara y mercancía, será de 1.003 Toneladas Brutas Remolcadas (TBR). A partir de este dato, de las características técnicas del material remolcado seleccionado y de las características de los contenedores, se obtendrá el número de vagones necesarios en cada composición y se comprobará que la longitud máxima de tren no excede del límite.

En primer lugar, cada plataforma puede transportar dos contenedores tipo, lo que supone una tara total de 20,3 t. Para los contenedores, estos no podrán ir cargados por encima del 78% de su capacidad aproximadamente, para no sobrepasar la carga máxima admisible del vagón, que es de 44 t, lo que implica que cada uno de ellos transportará 19,5 t de mercancías. Por lo tanto, cada plataforma podrá transportar 39 t de mercancías, siendo la tara de la plataforma y los dos contenedores de 22,6 t.

Tabla 16 Carga bruta y carga neta de cada vagón

Elementos	Tara	Carga	Total
Vagón portacontenedores	18 t	43,6 t	61,6 t
2 Contenedores	4,6 t	39,0 t	43,6 t

Fuente: Renfe y elaboración propia

Por lo tanto, cada vagón implica una carga a la locomotora de 61,6 TBR, para transportar 39 t de mercancía, esto supone que cada vagón conlleva aproximadamente una tara del 58% de la mercancía transportada.

En segundo lugar, relacionando la máxima carga capaz de transportar la locomotora, 1.003 TBR, con las TBR de cada vagón, se obtiene que cada locomotora puede mover hasta 16 vagones con estas características definidas.

Con estos datos, se obtiene que la composición de tren formada por una locomotora Bitrac y 16 vagones portacontenedores conforma una longitud total de 285,5 m, la cual se encuentra por debajo del límite definido por la longitud de apartaderos de la línea (350 m).

Tabla 17 Características de cada tren de mercancías

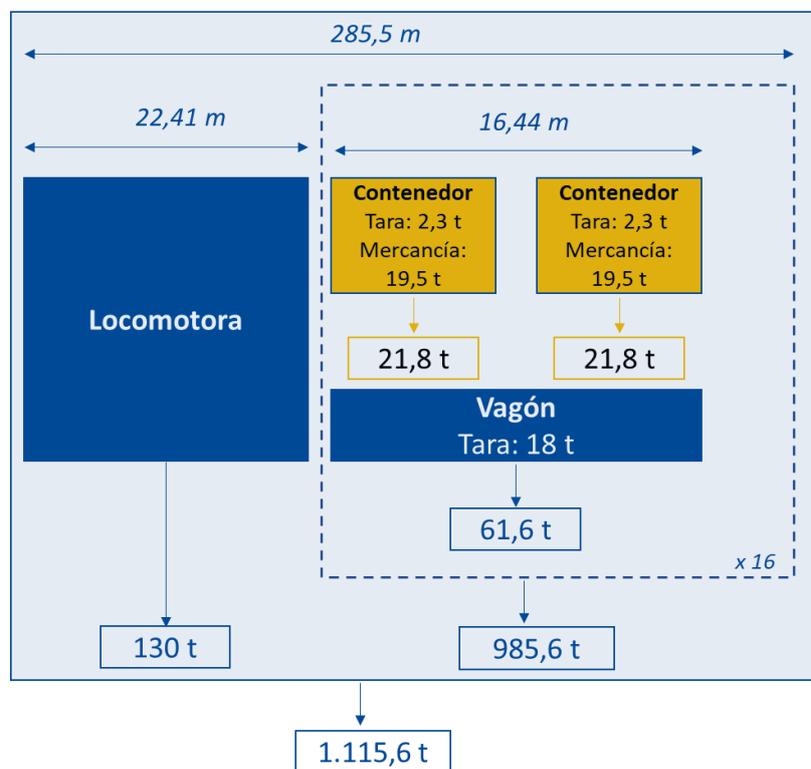
Parámetro	Valor
Carga máxima locomotora	1.003 TBR
Carga por vagón	61,6 TBR
Número de vagones	16 vagones
Carga final resultante para la locomotora	985,6 TBR
Carga neta por tren (mercancía)	624 t
Longitud total de la composición del tren	285,5 m
<i>Longitud de cada vagón</i>	<i>16,4 m</i>
<i>Longitud total de la parte remolcada</i>	<i>263,0 m</i>
<i>Longitud de la locomotora</i>	<i>22,4 m</i>

Fuente: elaboración propia

Por último, teniendo en cuenta que la mercancía transportada por cada una de estas composiciones puede ser de hasta 624 t, será necesario un total de cuatro servicios diarios, dos por cada sentido de circulación, para transportar la demanda de mercancías estimada en 2.400 t diarias en ambos sentidos.

Esto implica finalmente que cada tren transportaría de media una carga neta de mercancía de 600 t, que supone una carga para la locomotora ligeramente inferior a la máxima carga calculada, 1.003 TBR. No obstante, para el cálculo posterior del tiempo de la marcha tipo se emplea la carga máxima de 1.003 TBR, con el objetivo de dimensionar la programación para el caso más restrictivo posible, manteniendo así unos márgenes de explotación que den fiabilidad a la operación.

Figura 23 Composición del tren de mercancías



Fuente: elaboración propia

7. PROGRAMACIÓN DE LA EXPLOTACIÓN, GRAFIADO DE LA MALLA Y COMPROBACIÓN DE CAPACIDAD DE LA LÍNEA

Tras definir el material rodante que será empleado en la explotación ferroviaria de la línea y el número de circulaciones previstas para cubrir la demanda, tanto de viajeros como de mercancías, en este capítulo se calculará el tiempo que necesariamente empleará cada circulación en realizar cada recorrido, para posteriormente poder configurar un diagrama tiempo-desplazamiento o malla de explotación, que sirva como programación del tráfico ferroviario de la línea. El diseño de esta malla se realizará a partir del tiempo obtenido en las simulaciones realizadas y añadiendo los márgenes de regularidad establecidos por la UIC [11].

La definición de esta malla, será posteriormente comprobada para evaluar su grado de saturación, para lo cual será necesario calcular la capacidad de la línea, cálculo que será realizado mediante un ejercicio práctico de configuración de una malla comprimida basada en los intervalos mínimos de sucesión entre las distintas circulaciones.

7.1. Cálculo de marchas tipo y tiempos de recorrido

Para el cálculo de marchas tipo que determinen el tiempo mínimo de recorrido de las circulaciones, se ha empleado un software específico de simulación de marchas tipo (CRONOS, software que está siendo desarrollado por Ineco), que permite el cálculo de estas marchas según los siguientes inputs:

- Características de la infraestructura: parámetros básicos de la planta (longitud, radios de curvatura, velocidades máximas), alzado (longitud, rampas, pendientes) y puntos singulares (ubicación de estaciones y vías de apartado o limitaciones de velocidad puntuales).
- Característica del material rodante: curvas de potencia-velocidad, coeficientes específicos de resistencia al avance, adherencia, peso de la composición, etc.

A continuación, se detallan las simulaciones realizadas.

7.1.1. Marchas tipo de servicios ferroviarios de viajeros

La simulación de marcha tipo para el tráfico ferroviario de viajeros se ha realizado con el tren autopropulsado S-449, material rodante que ha sido seleccionado en el capítulo anterior 6.1 *Dimensionamiento y previsión de servicios ferroviarios de viajeros*. Las características técnicas de este material empleadas en la simulación han sido:

Tabla 18 Principales características técnicas S-449 empleadas en la simulación

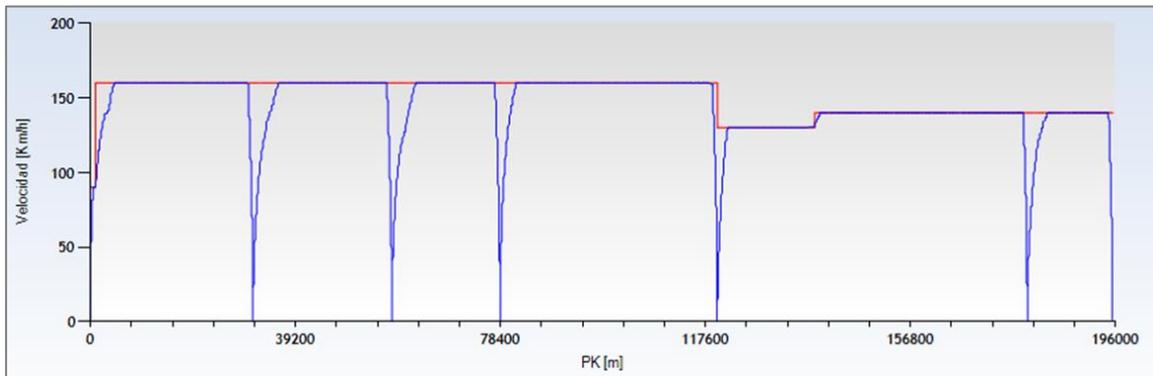
Parámetro	Valor
Peso	187 t
Potencia	2.400 kW
Número de ejes	12 ejes
Esfuerzo tractor máximo	170 kN
Aceleración máxima	0,85 m/s ²
Deceleración máxima	1 m/s ²
Velocidad máxima	160 km/h
Coefficiente específico de resistencia al avance (a)	1,4842 daN/t
Coefficiente específico de resistencia al avance (b)	0,0100 daN/[t(km/h)]
Coefficiente específico de resistencia al avance (c)	0,0002 daN/[t(km/h) ²]

Fuente: Renfe

En la tabla anterior, el parámetro del peso considerado es la suma de la tara del material rodante y el peso de los viajeros del tren en unas condiciones de ocupación del tren superior al 85%.

En la siguiente figura, se detalla el gráfico distancia velocidad obtenido en la simulación en el sentido A, es decir, siendo la Estación 1 el origen de la expedición:

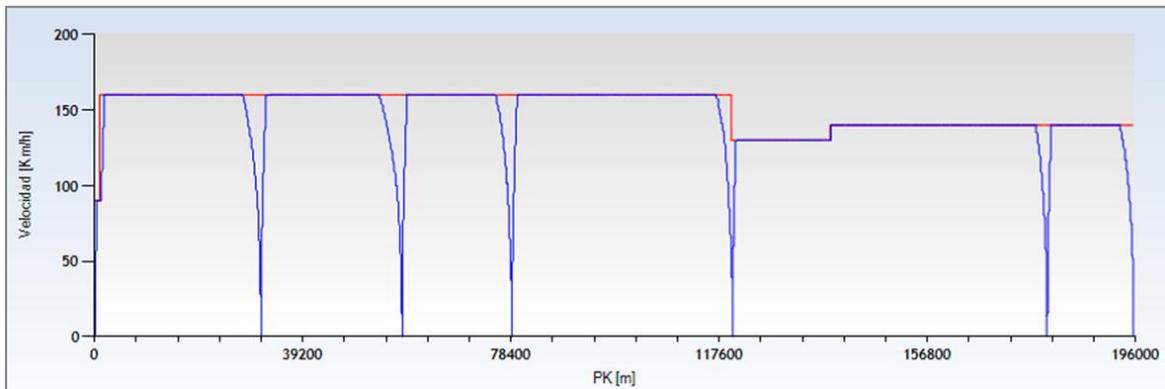
Figura 24 Gráfico distancia-velocidad. Servicios de viajeros. Sentido A



Fuente: elaboración propia

El gráfico distancia velocidad correspondiente a la simulación de la marcha en el sentido B, donde la Estación 1 es el destino de la circulación, se observa a continuación:

Figura 25 Gráfico distancia-velocidad. Servicios de viajeros. Sentido B



Fuente: elaboración propia

En la representación de este gráfico en el sentido B, la estación de origen se encuentra en el extremos derecho de la figura, siendo la estación de destino la ubicada en el P.K. 0.

En estas simulaciones, se han considerado unos tiempos de parada en cada estación generalmente de 1 minuto, salvo en algunas estaciones en las que la operación pudiera ser más lenta, donde se ha dispuesto de 2 minutos. Este es el caso de las Estación 4 y la Estación 6.

Finalmente, los tiempos obtenidos en la simulación, han sido de 1 hora y 32 minutos, en ambos sentidos de circulación. A este tiempo bruto obtenido en la simulación, posteriormente se añadirá el margen de explotación para obtener finalmente el tiempo total de recorrido con el que se confeccionará la malla. El detalle de los márgenes aplicados se describe posteriormente dentro de este capítulo.

7.1.2. Marchas tipo de servicios ferroviarios de mercancías

Los servicios ferroviarios de mercancías se han simulado a partir del tren tipo dimensionado en el apartado 6.2 *Dimensionamiento y previsión de servicios ferroviarios de mercancías*. En este apartado se dimensionó el tren de mercancías que operará en la línea, que está compuesto por una locomotora Bitrac y 16 vagones portacontenedores, arrastrando la locomotora un total de 1.003 TBR.

Las características técnicas de este material empleadas en la simulación han sido:

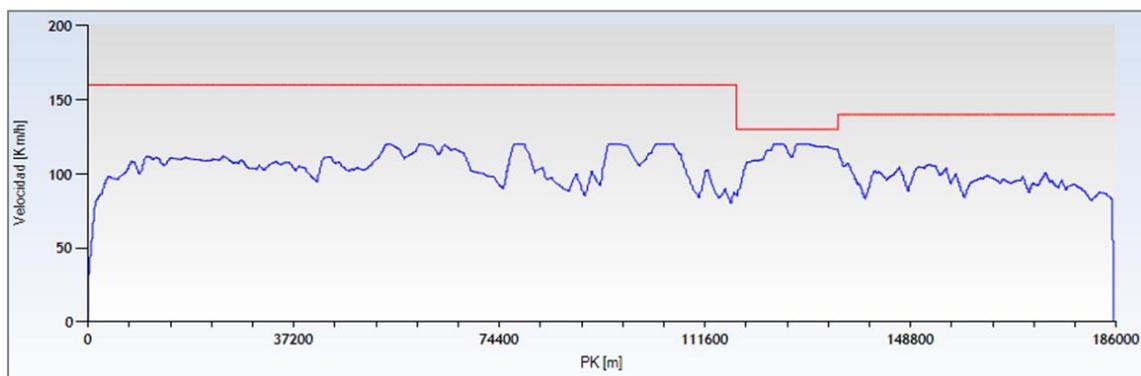
Tabla 19 Principales características técnicas locomotora y material remolcado empleadas en la simulación

Parámetro	Valor locomotora	Valor material remolcado
Peso	130 t	Tara: 18 t. Tara + Carga 61,6 t
Potencia	4.500 kW	--
Número de ejes	6 ejes	4 ejes x 16 vagones
Esfuerzo tractor máximo	439 kN	--
Aceleración máxima	1 m/s ²	--
Deceleración máxima	0,6 m/s ²	--
Velocidad máxima en régimen continuo	37 km/h	--
Velocidad máxima	120 km/h	120 km/h
Resistencia al avance	*	0,0006 daN/t

*Según formulación descrita en 6.2 *Dimensionamiento y previsión de servicios ferroviarios de mercancías*
Fuente: Renfe, Caf y elaboración propia

Los datos obtenidos en la simulación a partir de estos parámetros, se representan a continuación mediante el gráfico distancia-velocidad, para el sentido A de circulación:

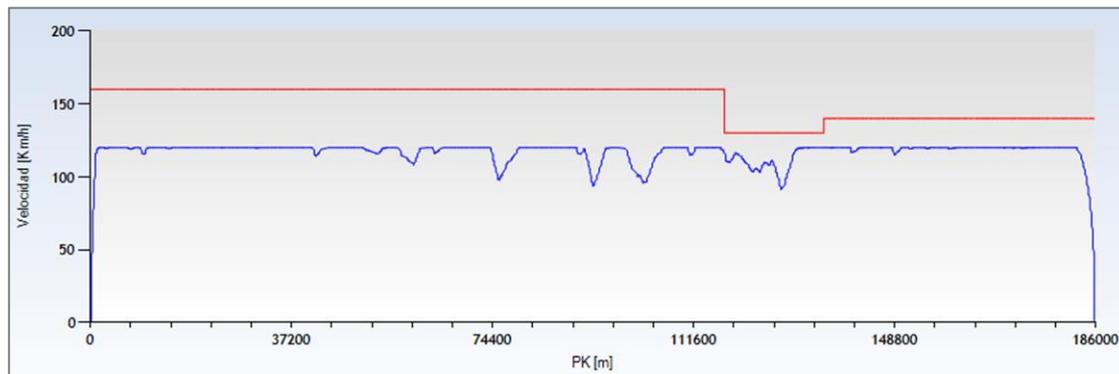
Figura 26 Gráfico distancia-velocidad. Servicios de mercancías. Sentido A



Fuente: elaboración propia

El gráfico distancia velocidad correspondiente a la simulación de la marcha en el sentido B, se observa a continuación:

Figura 27 Gráfico distancia-velocidad. Servicios de mercancías. Sentido B



Fuente: elaboración propia

En la representación de este gráfico en el sentido B, la terminal de origen se encuentra en el extremo derecho de la figura, siendo la terminal de destino la ubicada en el P.K. 0.

Como se observa en las simulaciones realizadas en las figuras anteriores, en el sentido A las rampas del trazado provoca que la velocidad de la marcha sea irregular y heterogénea, alcanzando su valor mínimo de 80 km/h en el P.K. 119, en el sentido A, donde se encuentra la rampa característica de la línea. Este valor fue prefijado para el dimensionamiento del tren de mercancías en el capítulo anterior de este documento, para que el tiempo de recorrido no pudiera suponer un condicionante en la explotación de tráfico mixto de la línea.

Los tiempos obtenidos en la simulación, han sido de 1 hora y 55 minutos, en el sentido A y 1 hora y 43 minutos en el sentido B de circulación. A este tiempo bruto obtenido en la simulación, posteriormente se añadirá el margen de explotación para obtener finalmente el tiempo total de recorrido con el que se confeccionará la malla. El detalle de los márgenes aplicados se describe a continuación en el siguiente epígrafe.

7.1.3. Márgenes UIC de explotación y tiempos totales de recorrido

Con el objetivo diseñar una programación de horarios que incluya posibles retrasos eventuales debido a labores de mantenimientos, incidentes técnicos en el material rodante, en la infraestructura o en las instalaciones o por incidencias de gestión, en el diseño de tiempos de recorrido de la malla de explotación, se añaden sobre los tiempos de simulación un margen de tiempo con unos valores establecidos según la ficha UIC 451-1 [11]. Estos valores dependen del tipo de material rodante (trenes autopropulsados, trenes de viajeros compuestos por locomotora y coches o trenes de mercancías), la velocidad máxima del tren y la distancia de recorrido.

En este caso, donde la velocidad máxima de los trenes de viajeros es de 160 km/h y la de trenes de mercancías es de 120 km/h, el margen de tiempo establecido se compone de:

- Trenes de viajeros:
 - Un minuto y medio por cada 100 km de recorrido, sobre el tiempo de la simulación.
 - Un 3% de incremento de tiempo adicional.
- Trenes de mercancías. Una de las siguientes tres opciones:
 - Un minuto y medio por cada 100 km de recorrido más un 3% de incremento de tiempo adicional.
 - 3 minutos por cada 100 km.
 - Un 4% de incremento de tiempo adicional.

Finalmente, tras aplicar estos márgenes, el tiempo de recorrido de los servicios ferroviarios de viajeros se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 20 Tiempo de recorrido. Servicios ferroviarios de viajeros.

Tramo	Tiempo simulac. Sentido A	Margen Sentido A	Tiempo Sentido A (hh:mm)	Tiempo simulac. Sentido B	Margen Sentido B	Tiempo Sentido B (hh:mm)
Estación 1- Estación 2	0:13	0:01	0:14	0:13	< 0:01	0:13
Estación 2- Estación 3	0:12	0:01	0:13	0:12	< 0:01	0:12
Estación 3- Estación 4	0:10	< 0:01	0:10	0:10	< 0:01	0:10
Estación 4- Estación 5	0:19	0:01	0:20	0:18	0:02	0:20
Estación 5- Estación 6	0:27	0:02	0:29	0:27	0:02	0:29
Estación 6- Estación 7	0:09	0:01	0:10	0:10	0:01	0:11
Total	1:32	0:06	1:38	1:32	0:06	1:38

Fuente: elaboración propia

En el caso de los servicios ferroviarios de mercancías, los tiempos de recorrido obtenidos tras añadir los márgenes a los tiempos de simulación, son los siguientes:

Tabla 21 Tiempo de recorrido. Servicios ferroviarios de mercancías.

Tramo	Tiempo simulac. Sentido A	Margen Sentido A	Tiempo Sentido A (hh:mm)	Tiempo simulac. Sentido B	Margen Sentido B	Tiempo Sentido B (hh:mm)
Term. 1- Estación 2	0:17	0:01	0:18	0:15	0:01	0:16
Estación 2- Estación 3	0:15	<0:01	0:15	0:13	0:01	0:14
Estación 3- Estación 4	0:11	< 0:01	0:11	0:10	0:01	0:11
Estación 4- Estación 5	0:24	0:01	0:25	0:21	0:01	0:22
Estación 5- Estación 6	0:34	0:02	0:36	0:30	0:01	0:31
Estación 6- Term. 2	0:07	<0:01	0:07	0:02	< 0:01	0:02
Total	1:50	0:04	1:54	1:34	0:04	1:38

Fuente: elaboración propia

7.2. Grafiado de la malla de explotación

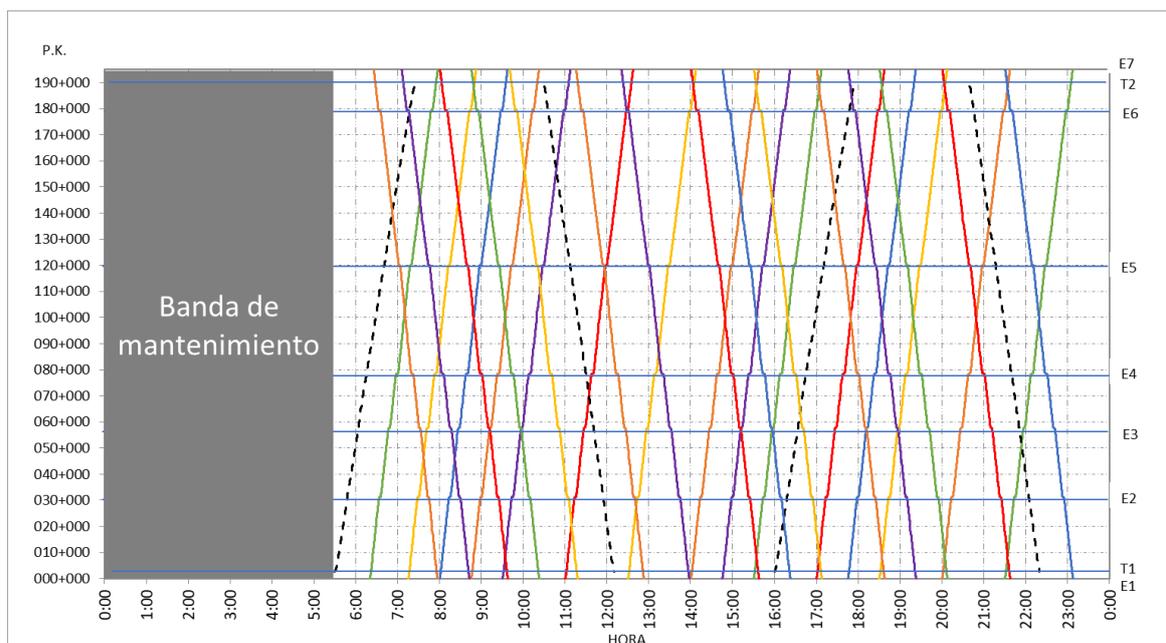
Con las simulaciones realizadas y el margen de explotación añadido, se ha obtenido el tiempo de recorrido de los servicios ferroviarios de viajeros y mercancías en la línea, siendo el siguiente paso, la elaboración de los horarios y la elaboración de la malla de explotación.

Para la elaboración de la malla o gráfico tiempo-distancia, se han tenido en cuenta los siguientes aspectos para definir los horarios de los servicios:

- Los servicios ferroviarios de viajeros tienen prioridad sobre los servicios ferroviarios de mercancías.
- Se ha considerado una banda de mantenimiento de 6 horas para operaciones de mantenimiento en la infraestructura de la línea, en la que no circularán servicios de viajeros o mercancías.
- Los horarios de los servicios ferroviarios de viajeros se han distribuido en intervalos según periodos punta y periodos valle, de la siguiente forma:
 - Periodos punta: en los periodos punta comprendidos entre las 6:30 h y las 9:30 h, entre las 14:00 h y las 15:30 h y entre las 17:00 y las 18:30 h, se han establecido intervalos de salida de los trenes en ambas cabeceras de entre 40 y 60 minutos.
 - Periodos valle: en el resto del día, se han considerado intervalos de salida de trenes entre cabeceras de una hora y media.
- A partir de lo anterior, se ha elaborado la malla de explotación con el criterio de minimizar el número de unidades de material rodante necesarias para la operación, considerando un tiempo mínimo de rotación en las cabeceras de 45 minutos para las unidades de viajeros.

A continuación, se describe el gráfico tiempo-distancia de los servicios ferroviarios en la línea de vía doble, donde se han identificado con distintos colores los surcos que utilizaría cada unidad de viajeros y con una línea discontinua los surcos programados para servicios de mercancías.

Figura 28 Gráfico distancia-tiempo. Malla de explotación.



Fuente: elaboración propia

Como resultado, puede observarse que la programación ferroviaria de la línea podría realizarse con 6 unidades de material rodante de viajeros, sin considerar las posibles reservas de material necesarias, mientras que los servicios de mercancías podrían efectuarse con una sola locomotora.

El detalle de los horarios de todos los servicios contemplados en la figura anterior, puede observarse en los anexos.

7.3. Comprobación de capacidad de la línea y grado de saturación

Para evaluar el grado de saturación de la línea, se analiza en este apartado la capacidad de la línea según el patrón de tráfico establecido en la malla de explotación, a partir de la metodología de la malla comprimida descrita en la ficha UIC 406 [12].

Según esta metodología, el grado de saturación o capacidad consumida, es la relación entre el **tiempo de ocupación de la sección considerada**, incluyendo **tiempos adicionales** que garanticen la fiabilidad de la operación, y el periodo de **tiempo total de análisis**.

$$\text{Grado de saturación (\%)} = \frac{\text{Tiempo de ocupación} + \text{Tiempo adicional}}{\text{Tiempo de análisis definido}}$$

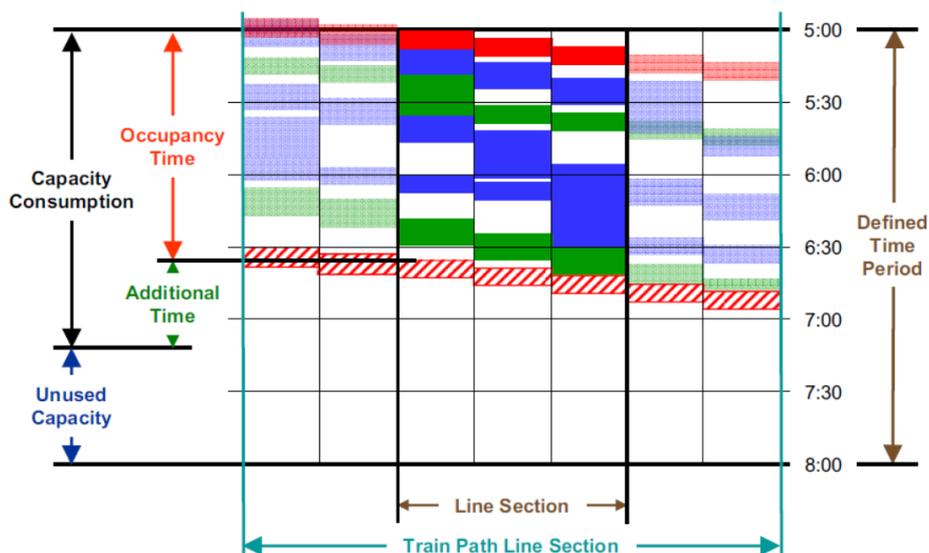
El **tiempo de ocupación** está determinado por los tiempos mínimos de sucesión (TMS) de las circulaciones de la malla, al realizar el ejercicio de compresión de las circulaciones. El TMS es el intervalo de separación mínimo que pueden tener dos trenes en una sección sin que el tren que se sitúa por detrás vea perturbada su marcha por el tren al que persigue.

Este tiempo de ocupación, por lo tanto, depende del patrón de tráfico de las circulaciones, las características de la señalización, los límites de la infraestructura, la dinámica del tren o el sistema de bloqueo, entre otros.

Después de obtener el resultado de comprimir las circulaciones en la malla respetando el TMS, se añade un **tiempo adicional** con el objetivo de garantizar y optimizar la flexibilidad y la robustez de la explotación para alcanzar un nivel de calidad de servicio aceptable.

Por último, el **tiempo de análisis definido** es el tiempo total de capacidad disponible en la malla sin comprimir.

Figura 29 Tiempo de consumo de capacidad

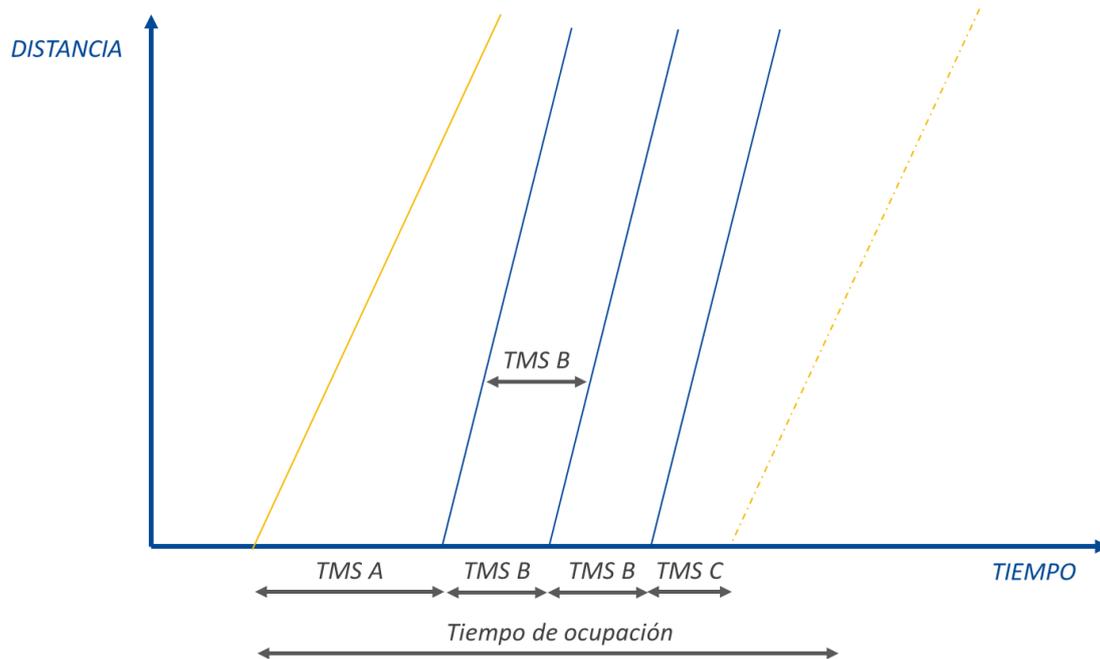


Fuente: UIC 406

En este caso, este análisis se va a centrar en la situación pésima de operación, que se localiza entre las dos terminales de mercancías, donde confluye el tráfico de mercancías y de viajeros y en el sentido A de circulación, sentido en el que se producen mayores tiempo de recorrido de los trenes de mercancías dado que la marcha de estos trenes es más lenta y por lo tanto existe un mayor tiempo de ocupación de infraestructura.

Para determinar el tiempo de ocupación, deben fijarse en primer lugar los tiempos mínimos de sucesión, que condicionarán el tiempo de ocupación de la infraestructura. En la figura siguiente, se muestra un ejemplo concreto, dado un patrón de circulaciones de un tren lento por cada tres trenes rápidos.

Figura 30 Ejemplo de tiempo de ocupación en la malla comprimida según TMS



Fuente: elaboración propia

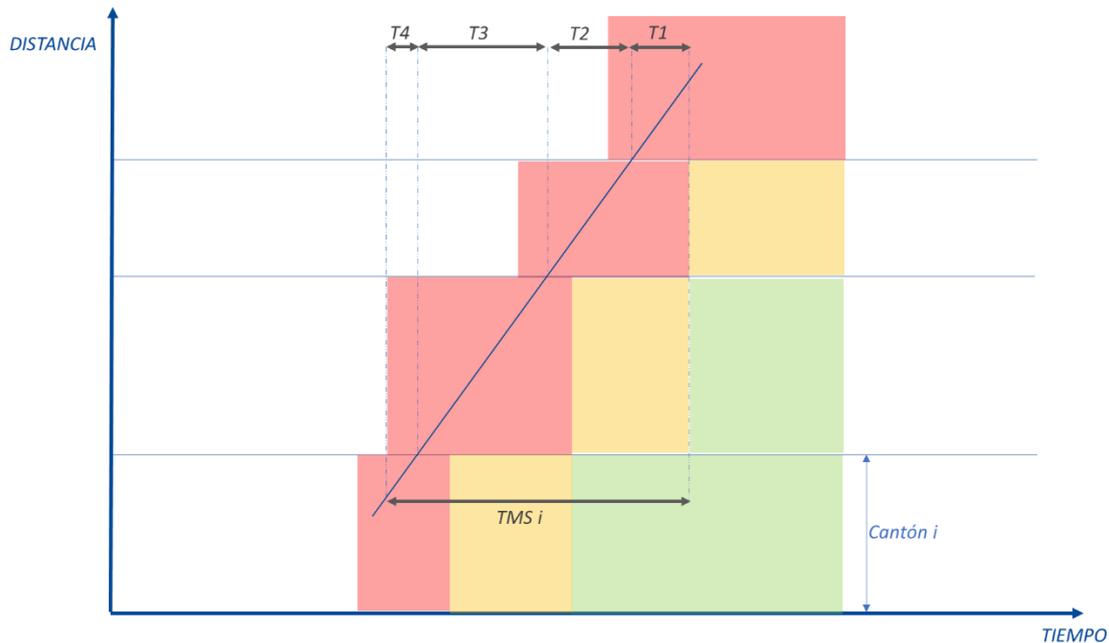
TMS A se corresponde con el tiempo mínimo de sucesión de un tren lento seguido por un tren rápido, TMS B se corresponde con el tiempo mínimo entre dos trenes rápidos y TMS C se corresponde con con el intervalo mínimo de un tren rápido seguido por un tren lento.

El TMS depende de varios factores como el tiempo de recorrido de las circulaciones, la distribución de cantones de la línea o los sistemas de bloqueo y señalización, entre otros aspectos.

En la siguiente figura, se muestra un ejemplo de los factores que se han tenido en cuenta en el TMS y su cálculo, considerando que, para que un tren no se vea perturbado por la marcha del tren al que persigue, debe mantener una distancia equivalente a la suma de:

- T1: Tiempo empleado por el tren en atravesar el límite del cantón que va a ser liberado y actualización de la señalización.
- T2: Tiempo empleado en recorrer el cantón que acaba de ser liberado por el primer tren. Este cantón pasa de tener una señal de aspecto roja a una señal de aspecto amarillo.
- T3: Tiempo empleado en recorrer el cantón anterior al que acaba de ser liberado. Este cantón pasa de tener una señal de aspecto amarillo a una señal de aspecto verde.
- T4: Longitud necesaria para el reconocimiento de la señal que acaba de cambiar a aspecto verde y/o longitud correspondiente a un margen de explotación.

Figura 31 Composición de tiempos para el cálculo de TMS



Fuente: elaboración propia

En la figura anterior, se observan en distintos colores los aspectos que tendrían las señales de entrada a cada cantón y un ejemplo de cuál sería el TMS antes de que el siguiente tren que circulara en la línea saliera del primer cantón. No obstante, el TMS es distinto a lo largo de la línea, debiéndose estudiar cada caso independientemente.

En los siguientes subepígrafes, se detalla el cálculo de los distintos TMS que intervienen en el cálculo de capacidad de la línea según la malla comprimida:

- TMS entre circulaciones de viajeros.
- TMS de circulación de mercancías precedida por circulación de viajeros.
- TMS de circulación de viajeros precedida por circulación de mercancías.

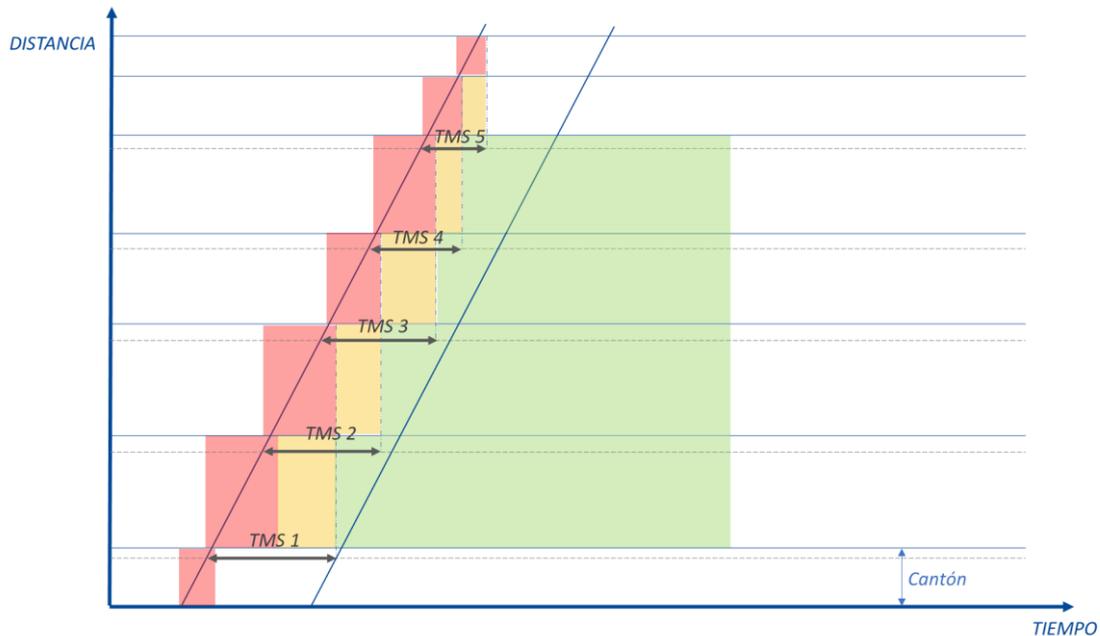
7.3.1. Tiempo mínimo de sucesión entre circulaciones de viajeros

Dado que los servicios ferroviarios de viajeros tienen marchas tipo con tiempos de recorrido idénticos y además, la velocidad de circulación por la línea se mantiene de forma homogénea a lo largo de los distintos tramos, el intervalo mínimo de sucesión vendrá determinado por el máximo TMS de todos los existentes en cada cantón, produciéndose el valor máximo en el entorno del cantón crítico, que es el de mayor longitud y por lo tanto el de mayor tiempo de ocupación.

La distribución de cantones en la línea, es un dato de partida y puede observarse el detalle de los mismos en los anexos. El cantón crítico de la línea tiene una longitud de 14.200 metros y se encuentra ubicado entre las estaciones E5 y E6, concretamente entre los P.K. 140+000 y P.K. 154+200.

En la siguiente figura, se observa en un ejemplo genérico, que entre todos los TMS existentes, el limitante es el TMS 1 y por lo tanto, este es el intervalo mínimo de tiempo que debe existir entre dos trenes para que el primero de ellos que circula, no interfiera en la marcha de la circulación que le precede.

Figura 32 Cálculo de TMS entre trenes de viajeros



Fuente: elaboración propia

El cálculo seguido para obtener el TMS concreto asociado al cantón crítico de la línea de estudio, se ha tenido en cuenta los tiempos anteriormente detallados de ocupación de cantones, considerando para T1 en la actualización del aspecto de las señales 10 segundos y para T4 en una distancia de 500 metros a la velocidad máxima posible del tren en dicho tramo.

En la siguiente tabla, el detalle de cálculo del TMS, habiéndose calculado igualmente el TMS de los cantones adyacentes, lo que permite observar la variación de este valor en los distintos cantones:

Tabla 22 Cálculo de TMS asociado al cantón crítico

Ubicación del primer tren	T1	T2+T3	T4	Total TMS
Liberación del cantón anterior al cantón crítico (C-1)	0:00:14	0:06:54	0:00:12	0:07:20
Liberación del cantón crítico (C)	0:00:14	0:09:33	0:00:12	0:09:59
Liberación del siguiente cantón al cantón crítico (C+1)	0:00:13	0:10:09	0:00:12	0:10:34
Liberación del segundo cantón posterior al cantón crítico (C+2)	0:00:13	0:06:33	0:00:13	0:06:59

Fuente: elaboración propia

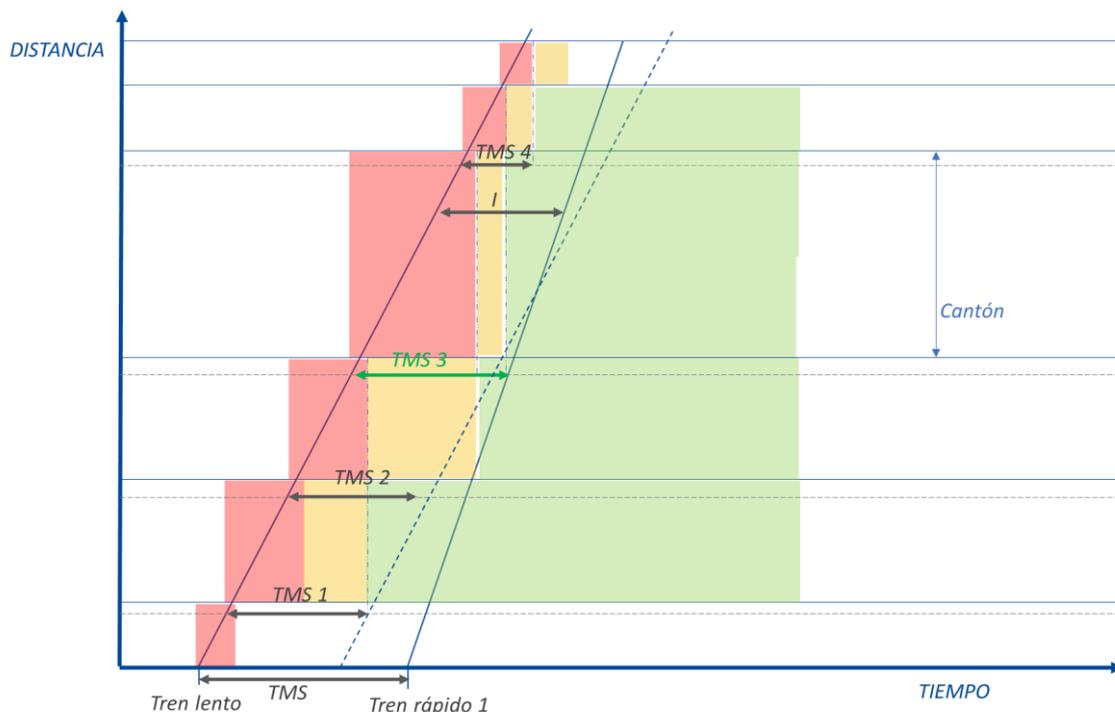
Por lo tanto, el intervalo mínimo de sucesión entre trenes de viajeros con el que se realizará el cálculo de la malla comprimida y el análisis de capacidad, es de 10 minutos y 34 segundos.

7.3.2. Tiempo mínimo de sucesión de circulación de mercancías seguida por circulación de viajeros

En este caso, la marcha de los dos trenes es distinta, siendo la del tren de mercancías más lenta que la del tren de viajeros. Esto provoca que el proceso de cálculo del TMS difiera ligeramente respecto al caso anterior.

El objetivo de este proceso es determinar el intervalo mínimo de tiempo entre la salida de un tren de mercancías y uno de viajeros, el cual está vinculado al TMS que se produce en cada cantón. Sin embargo, en este caso, el máximo TMS de la línea no representa directamente el intervalo mínimo entre salidas de estos trenes, ya que la marcha tipo de ambos es distinta, como se observa en la siguiente figura:

Figura 33 Cálculo de TMS entre tren de mercancías y tren de viajeros. Caso I



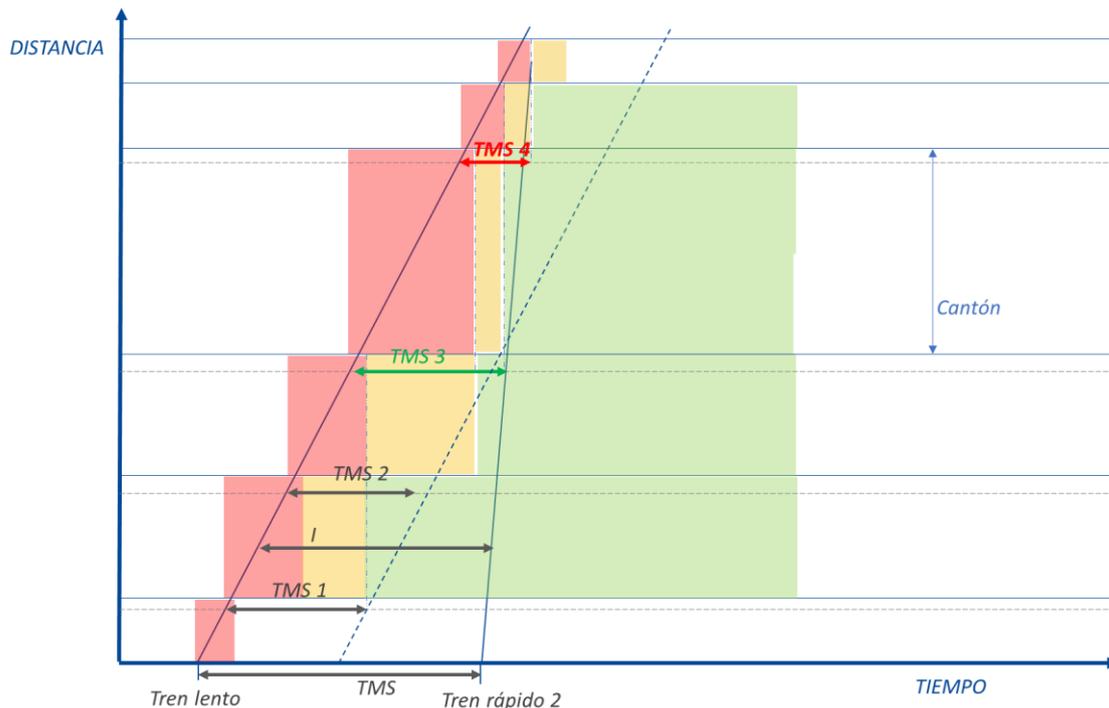
Fuente: elaboración propia

En la figura, el TMS 3 representa el máximo tiempo de sucesión que se produce en los distintos cantones, siendo este tiempo el que servirá para establecer el intervalo horario de salidas entre ambos trenes en la cabecera de la línea, que será el TMS a considerar en el cálculo de capacidad.

No obstante, una vez calculado el máximo TMS en los distintos cantones (TMS 3 en la figura anterior), debe comprobarse que la marcha del tren de viajeros, más rápida que la del tren de mercancías, no provoca que en cantones posteriores al TMS 3 el tren rápido pueda ver perturbada su marcha por el tren lento. Esto puede suceder ya que el intervalo entre ambos trenes (I) se va reduciendo a medida que aumenta la distancia al origen.

En la siguiente figura, se muestra un ejemplo de una situación de este tipo, en la que el máximo TMS de los cantones no es el condicionante para el cálculo del TMS en la cabecera de la línea:

Figura 34 Cálculo de TMS entre tren de mercancías y tren de viajeros. Caso II



Fuente: elaboración propia

En la figura anterior, se observa que el TMS 3 es el máximo tiempo mínimo de sucesión entre los cantones, sin embargo, la marcha del segundo tren, mucho más rápida que la del primero, hace que en el siguiente cantón el tren rápido vea alterada su marcha por el tren lento. Esto se produce porque el intervalo entre trenes se va reduciendo rápidamente a medida que aumenta la distancia recorrida, por la diferencia de marchas entre ambos trenes.

Por lo tanto, el proceso seguido para el cálculo del TMS en cabecera de la línea en este apartado, ha sido:

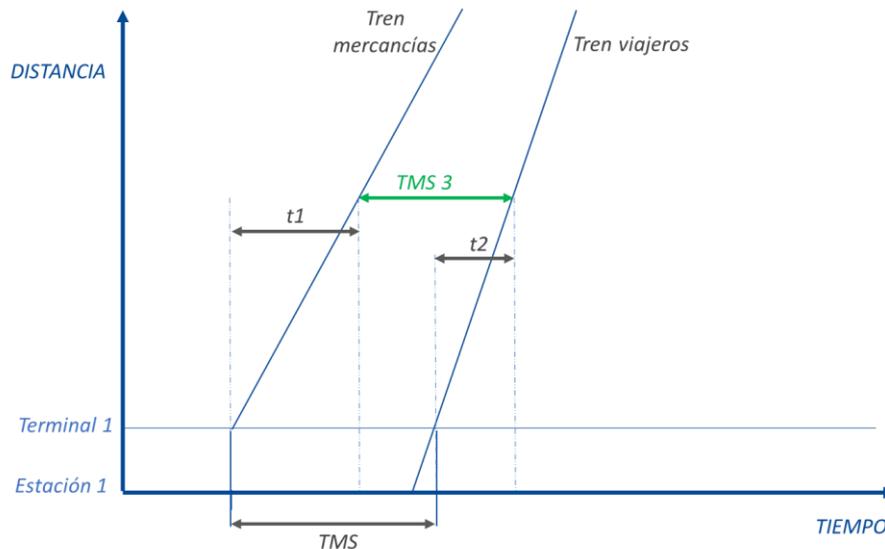
1. Cálculo del TMS máximo entre cantones (TMS 3 en las dos figuras anteriores).
2. Comprobación de que el TMS máximo entre cantones (TMS 3) es el condicionante para determinar el TMS en cabecera de la línea. Para ello, se analiza si la reducción de TMS respecto a TMS 3 en cantones posteriores a este, es superior a la reducción de intervalo. Por lo tanto, el proceso que se realiza en los cantones posteriores a TMS 3, es comprobar la siguiente fórmula:

$$\Delta TMS \geq \Delta I$$

3. Si la reducción de intervalo entre trenes es menor que la reducción entre TMS, se estaría en el primero de los casos, en el que TMS 3 es el que condiciona para el cálculo del TMS en cabecera (Caso I).
4. En caso contrario, el TMS que condiciona el intervalo en cabecera de línea no será TMS 3, que representa el máximo tiempo de sucesión entre cantones y será uno posterior (Caso II).

Por último, una vez identificado el caso de estudio, se determina el intervalo de salida según se observa en la siguiente figura:

Figura 35 Cálculo del TMS máximo entre ambos trenes



Fuente: elaboración propia

La figura anterior se ha adaptado al caso concreto de la línea de estudio, en la que los puntos de salida de trenes de viajeros y mercancías difieren en 2.800 m.

Para este caso, se han calculado todos los parámetros descritos en todos los cantones de la línea y se ha observado que, en el cálculo realizado de TMS en los distintos cantones, el tiempo de sucesión condicionante (identificado como TMS 3 en las figuras anteriores), se encuentra asociado al cantón más largo de la línea, al igual que lo sucedido en el cálculo de sucesión entre trenes de viajeros.

Tabla 23 Cálculo de TMS condicionante

Ubicación del primer tren	T1	T2+T3	T4	Total TMS cond.
Liberación del cantón crítico (C)	0:00:17	0:12:25	0:00:20	0:13:02
Liberación del siguiente cantón al cantón crítico (C+1)	0:00:17	0:14:10	0:00:22	0:14:49
Liberación del segundo cantón posterior al cantón crítico (C+2)	0:00:20	0:09:09	0:00:21	0:09:50
Liberación del tercer cantón posterior al cantón crítico (C+3)	0:00:19	0:09:04	0:00:20	0:09:43
Liberación del cuarto cantón posterior al cantón crítico (C+4)	0:00:18	0:06:49	0:00:21	0:07:27
Liberación del quinto cantón posterior al cantón crítico (C+5)	0:00:19	0:03:16	0:00:21	0:03:56
Llegada del tren de mercancías a la Terminal 2	0:00:19	0:03:09	0:00:22	0:03:50

Fuente: elaboración propia

Como se observa en la tabla, el TMS condicionante está asociado a la liberación del cantón C+1, con un tiempo de casi 15 minutos.

Posteriormente, se ha comprobado que la reducción de intervalo entre trenes provocada por la marcha más rápida del tren de viajeros, sea inferior a la reducción del tiempo mínimo de sucesión en los cantones sucesivos, obteniendo los valores de la siguiente tabla:

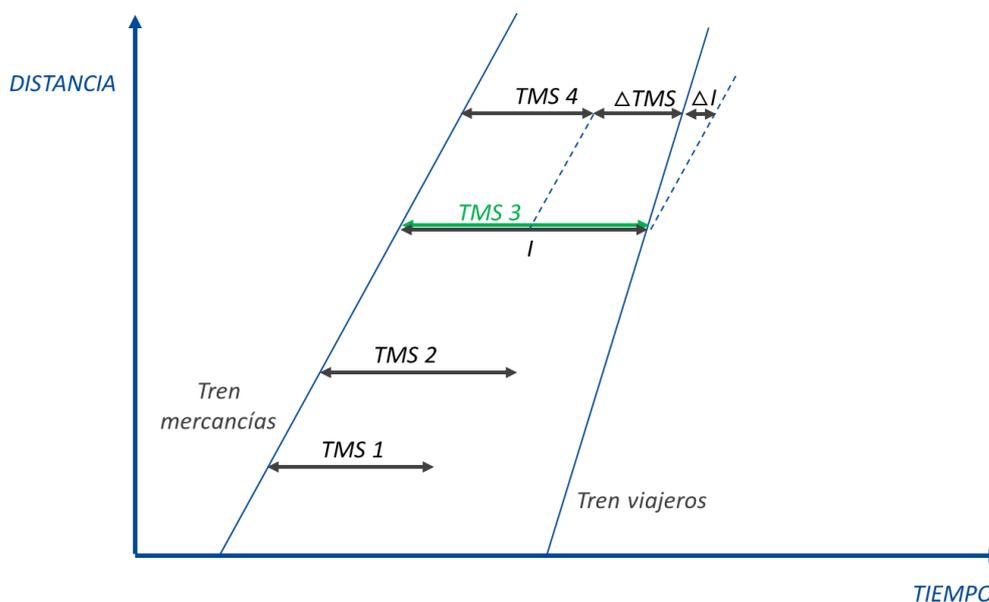
Tabla 24 Comprobación del TMS condicionante

Ubicación del primer tren	Reducción de TMS en cantones sucesivos respecto al TMS condicionante ΔTMS	Reducción de intervalo de seguimiento ΔI
Liberación del segundo cantón posterior al cantón crítico (C+2)	0:05:00	0:01:24
Liberación del tercer cantón posterior al cantón crítico (C+3)	0:05:06	0:02:40
Liberación del cuarto cantón posterior al cantón crítico (C+4)	0:07:22	0:04:04
Liberación del quinto cantón posterior al cantón crítico (C+5)	0:10:54	0:05:28
Llegada del tren de mercancías a la Terminal 2	0:10:59	0:06:52

Fuente: elaboración propia

Con estos datos, queda comprobado, que el caso de estudio es el Caso I, siendo el tiempo de 14 minutos y 49 segundos el que condicionará el TMS máximo entre ambos trenes. Esta situación que se ha comprobado, se puede observar en la figura siguiente:

Figura 36 Cálculo de la diferencia entre horas de salida de ambos trenes



Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, el tiempo máximo entre ambos trenes, será el resultado del cálculo expresado en la *Figura 35 Cálculo del TMS máximo entre ambos trenes*.

Tabla 25 Cálculo de TMS máximo entre trenes

t1	TMS condicionante	t2	TMS máximo entre trenes
1:18:32	0:14:49	1:04:34	0:28:47

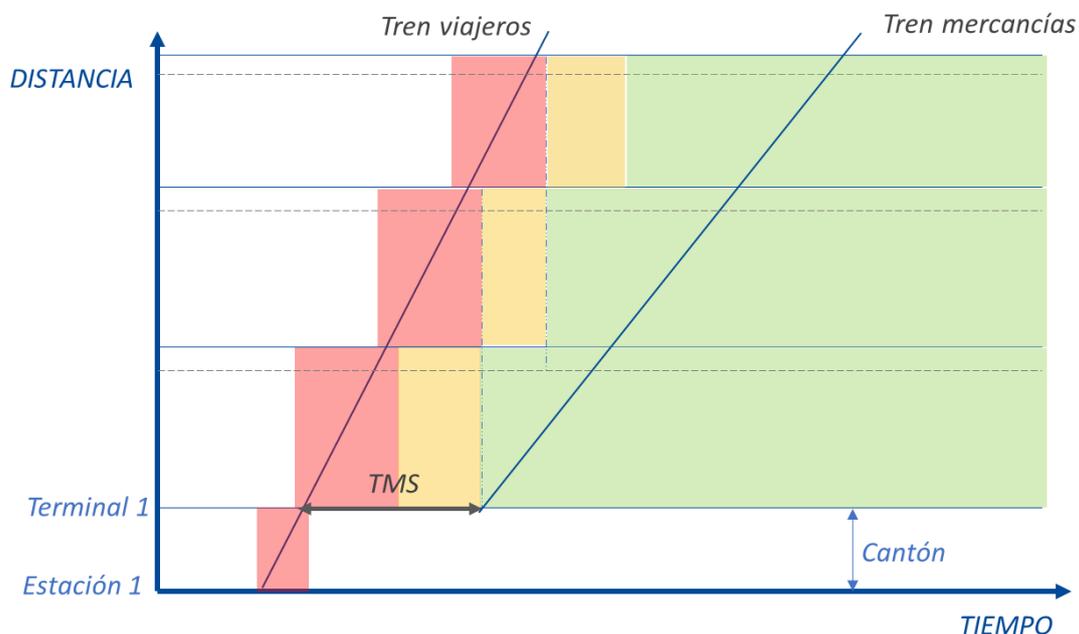
Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, el tiempo a incluir entre en el cálculo de capacidad entre un tren de mercancías y uno de viajeros, es de 28 minutos y 47 segundos.

7.3.3. Tiempo mínimo de sucesión de circulación viajeros seguida por circulación de mercancías

En el caso del tren de viajeros precedido por un tren de mercancías, el caso de cálculo del TMS entre ambos trenes se centra en calcular el TMS en el momento en el que el tren de viajeros libera el cantón concreto que permite al tren de mercancías comenzar su marcha sin perturbaciones. Este caso se ha calculado de esta forma, dado que el tren perseguidor tiene una marcha más lenta en todo el recorrido de la línea.

Figura 37 Cálculo de TMS de viajeros precedido por tren de mercancías



Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, tras liberar el segundo cantón tras la Terminal 1, el tren de mercancías se podrá incorporar a la línea en condiciones de libre circulación.

En la siguiente tabla, se detalla el cálculo realizado del TMS en esta situación, tras liberar el tren de viajeros este cantón.

Tabla 26 Cálculo de TMS máximo entre trenes

T1	T2+T3	T4	Total TMS
0:00:12	0:07:19	0:00:13	0:07:32

Fuente: elaboración propia

Para el cálculo de capacidad y grado de saturación, se empleará en este caso un tiempo mínimo de sucesión para un tren de viajeros precedido por uno de mercancías, de 7 minutos y 32 segundos.

7.3.4. Tiempo adicional

Según la ficha UIC 406, se define un tiempo adicional en el cálculo del tiempo de ocupación para asegurar alcanzar un grado de calidad del servicio en la explotación aceptable, favoreciendo de esta forma unas buenas condiciones de operación a pesar de posibles imprevistos de explotación que puedan surgir en la línea. Según esto, define los siguientes valores de tiempo adicional, según tipo de línea y periodo horario de análisis:

Tabla 27 Tiempo adicional de ocupación

Tipo de línea según tráfico	Hora punta	Diario
Tráfico de Cercanías	18%	43%
Tráfico de alta velocidad	33%	67%
Tráfico mixto	33%	67%

Fuente: UIC 406

En el caso de la línea objeto de estudio, el porcentaje adicional de tiempo a considerar sobre el tiempo de ocupación calculado, será del 67%, al tratarse de una línea de tráfico mixto, viajeros y mercancías y al realizar el cálculo sobre un periodo diario de análisis.

7.3.5. Tiempo de análisis considerado

El tiempo de análisis definido para el cálculo de capacidad, será el día completo, salvo la banda de mantenimiento reservada para tareas de conservación de la infraestructura, para la cual se estima en este análisis de 6 horas.

7.3.6. Cálculo del grado de saturación y capacidad

Para el cálculo de la malla comprimida, en primer lugar se considera el patrón de circulaciones establecido en la malla de explotación, que es de 2 circulaciones de mercancías por cada 15 circulaciones de viajeros.

En segundo lugar, se define el tiempo de ocupación de estas circulaciones según los TMS previamente calculados, que se resumen a continuación:

- TMS entre servicios de viajeros: 0:10:34.
- TMS de servicio de mercancías precedido por servicio de viajeros: 0:28:47
- TMS de servicio de viajeros precedido por servicio de mercancías: 0:07:32.

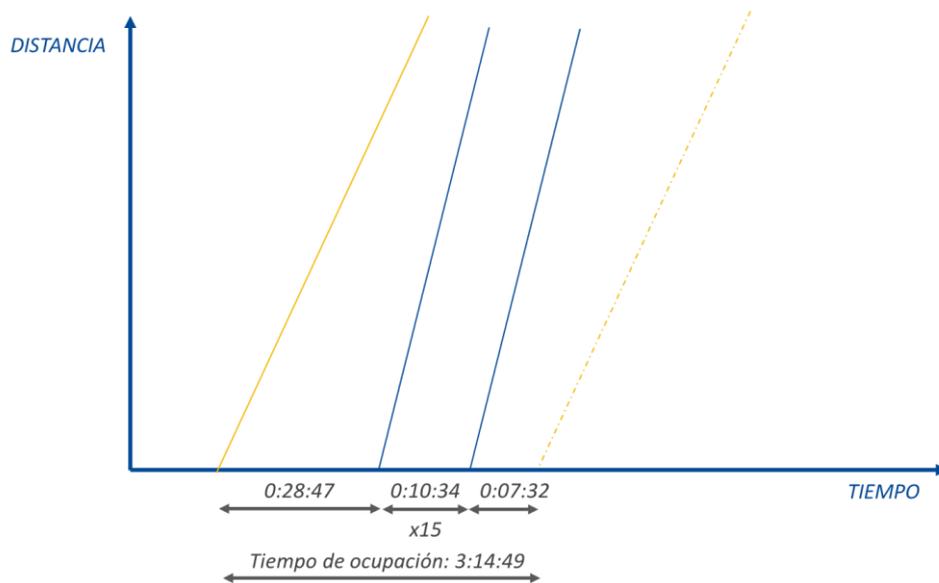
La secuencia comprimida de trenes da como resultado el siguiente tiempo de ocupación:

Tabla 28 Tiempo total de ocupación en la malla comprimida

TMS	Número de circulaciones	Tiempo de ocupación
Entre servicio de viajeros	15	2:38:30
Mercancías precedido por viajeros	1	0:28:47
Viajeros precedido por mercancías	1	0:07:32
Total	17	3:14:49

Fuente: elaboración propia

Figura 38 Tiempos de malla comprimida



Fuente: elaboración propia

Finalmente, el grado de saturación obtenido, se observa en la siguiente tabla:

Tabla 29 Tiempo total de ocupación en la malla comprimida

Parámetro	Valor
Tiempo de ocupación (A)	195 min.
Tiempo adicional (B)	131 min.
Tiempo de análisis (C)	1.080 min.
Grado de ocupación $([A+B]/C)$	30%

Fuente: elaboración propia

El grado de saturación obtenido es del 30% para la vía sentido A, que según la ficha UIC-406 es un valor aceptable ya que son tolerables valores de hasta el 100%, por lo que existe capacidad excedente que podría ser utilizada en caso de incrementarse la demanda y verse incrementado en consecuencia el número de circulaciones, o modificarse el patrón de circulaciones existente.

8. CONCLUSIONES Y APORTACIONES

En la programación de la explotación llevada a cabo en este estudio se determina que los trenes eléctricos de la serie 449 y la locomotora Bitrac, sería el material rodante óptimo desde el punto de vista de la explotación y el sistema de transporte y bajo los condicionantes impuestos por la infraestructura y la previsión de la demanda.

Esta selección del material rodante, se ha realizado tomando como principales criterios la capacidad de transporte y la velocidad comercial en la explotación, con el objetivo de minimizar el número de circulaciones sobre la infraestructura, sin que ello conlleve en el caso de viajeros, una frecuencia de servicios insuficiente. En este proceso de selección, se ha observado la influencia que tendría en la explotación el uso de otro tipo de material rodante, observando que:

- La utilización de otras unidades de material rodante de viajeros, con menor capacidad, supondría, por un lado, un aumento en el número de circulaciones para cubrir la demanda prevista, hecho que podría repercutir en una mayor necesidad de flota a disponer y, por otro lado, un descenso de la velocidad comercial al disminuir la velocidad máxima del tren. Este último aspecto, es además un factor de peso teniendo en cuenta que los viajeros que utilizarían el ferrocarril podrían tener en general una mejora de tiempo en su viaje, respecto a otros modos de transporte, minimizando el coste social y ambiental para el sistema de transporte en su conjunto.
- La utilización de otras locomotoras para el transporte de mercancías, serían capaces de transportar una menor carga a la velocidad mínima considerada para la compatibilización del tráfico mixto en la línea (80 km/h), lo que se traduciría en la necesidad de introducir un mayor número de circulaciones de mercancías.

En total, para cubrir la demanda prevista en un día tipo laborable, serían necesarias un total de 34 circulaciones en ambos sentidos, siendo 4 de ellas correspondientes a servicios ferroviarios de mercancías.

Posteriormente, se ha elaborado la malla de explotación calculando los tiempos de recorrido de las circulaciones a partir de simulaciones de marchas tipo y añadiendo los correspondientes márgenes de explotación, obteniendo que las circulaciones de mercancías emplearían casi 2 horas en realizar su recorrido, mientras que las circulaciones de viajeros emplearían alrededor de una hora y media en realizar el mismo trayecto.

Por último, esta programación de la explotación reflejada en la malla, ha sido comprobada mediante un análisis de capacidad, calculando el grado de ocupación de la infraestructura atendiendo al tiempo de ocupación de la misma de cada circulación y reservando un margen de tiempo para tareas de conservación y mantenimiento. Como resultado de este análisis, se ha obtenido que existe capacidad suficiente para la programación considerada, lo que implica que la infraestructura cuenta con margen suficiente para incorporar nuevas circulaciones si así fuera necesario por el crecimiento futuro de la demanda o para modificar el patrón actual de las mismas si fuera necesario introducir cambios que supusieran un incremento en los tiempos de recorrido.

Como principales contribuciones, en primer lugar este estudio aporta, dentro del proceso de planificación de una infraestructura ferroviaria, una serie de resultados que sirven de base para la definición de otros requerimientos asociados a otras especialidades o subsistemas ferroviarios. Además, a partir de los resultados obtenidos en este estudio, podrían llevarse a cabo otras tareas dentro del proceso de la planificación, como es la definición de un plan de inversiones o un análisis de rentabilidad.

Durante el desarrollo de este trabajo fin de máster, otra de las aportaciones que se realiza, es la introducción de una comparativa entre distintas unidades de material rodante existentes en el mercado, para desarrollar un análisis de su uso sobre este caso específico de estudio y su influencia en la explotación.

Adicionalmente, se aporta en la malla de explotación una programación de surcos que permite obtener un predimensionamiento de la flota, observando que en este caso, podría llevarse a cabo la programación establecida con un total de 6 unidades de viajeros y una locomotora, independientemente de las necesidades adicionales de material a disponer debido a reservas temporales o mantenimiento.

Esta malla definida, aporta un patrón inicial de circulaciones que permitirá en fases sucesivas de mayor alcance, estudiar con mayor profundidad la programación de la circulación y la regulación del tráfico ferroviario.

Finalmente, un aporte llevado a cabo en este trabajo en el análisis de capacidad, es el cálculo de los tiempos mínimos de sucesión, obtenidos específicamente para este caso de estudio, lo que permite introducir un mayor grado de detalle en el análisis realizado.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Renfe nuestros trenes. Renfe, 2020. Disponible en www.renfe.com/viajeros/nuestros_trenes.
- [2] A. García, “Explotación comercial y operación de los servicios de transporte de viajeros por ferrocarril”, *Magnitudes, unidades, indicadores y estadísticas del transporte de viajeros*, vol 2. Edición 20. Fundación de los Ferrocarriles Españoles. 2016.
- [3] *Anuario estadístico* [en línea]. Ministerio de Fomento; Dirección General de Programación Económica y Presupuestos, Subdirección General de Estudios Económicos y Estadísticas. 2019. Ministerio de Fomento, Secretaría General Técnica, Centro de Publicaciones.
- [4] Renfe. *Determinación de cargas máximas y rampas características*. NT-GGC-6. 2001.
- [5] A. García, “Documento de explotación técnica y económica de ferrocarriles”, *Dinámica de los trenes en alta velocidad*. Edición 6. Fundación de los Ferrocarriles Españoles. 2010.
- [6] D. Álvarez Mántaras, P. Luque Rodríguez, “Ingeniería e Infraestructura de los Transportes”, *Ferrocarriles*. Servicio de Publicaciones. Universidad de Oviedo. 2003.
- [7] Asociación del Congreso Panamericano de Ferrocarriles. XVI Congreso Panamericano de ferrocarriles. Boletín nº 290. 1984.
- [8] Renfe alquiler. Renfe, 2015. Disponible en www.renfe.com/empresa/MaterialMercancias.
- [9] A. Rodríguez, “Serie 601, las primeras Bitrac, locomotoras híbridas de CAF”, *Vía Libre*. Nº 536. 2009.
- [10] Catálogo de vagones. Renfe, 2015. Disponible en www.renfe.com/empresa/vagones.
- [11] UIC 451-1. *Timetable recovery margins to guarantee timekeeping- Recovery margins*. Edición 4. 2000.
- [12] UIC 406. *Capacity*. Edición 2. 2013.

ANEXO 1: FICHAS TÉCNICAS DE MATERIAL RODANTE

- Material rodante autopropulsado de tracción eléctrica para servicios ferroviarios de viajeros:

Figura 39 Tren autopropulsado S-448



Fuente: Renfe

Tabla 30 Parámetros técnicos del tren autopropulsado S-448

Parámetro	Valor
Fabricante	Caf, Alstom
Peso	151 t
Potencia	1.160 kW
Nº de coches de cada composición	3 coches
Plazas totales de cada composición	236 plazas
Velocidad máxima	160 km/h
Longitud	78.530 mm
Estructura de caja	Acero inox.
Motores de tracción	4
Puertas por costado	2
Anchura de caja	2.900 mm.
Altura del tren	3.682 mm.
Composición máxima	12

Fuente: Renfe

Figura 40 Tren autopropulsado S-449



Fuente: Renfe

Tabla 31 Parámetros técnicos del tren autopropulsado S-449

Parámetro	Valor
Fabricante	Caf
Peso	172 t
Potencia	2.400 kW
Nº de coches de cada composición	5 coches
Plazas totales de cada composición	260 plazas
Velocidad máxima	160 km/h
Longitud	98.970 mm
Estructura de caja	Aluminio
Motores de tracción	6
Puertas por costado	1
Anchura de caja	2.940 mm.
Altura del tren	4.300 mm.
Composición máxima	15

Fuente: Renfe

Figura 41 Tren autopropulsado S-470



Fuente: Renfe

Tabla 32 Parámetros técnicos del tren autopropulsado S-470

Parámetro	Valor
Fabricante	Caf, Bombardier, Alstom, Mitsubishi, Westinghouse
Peso	156 t
Potencia	1.160 kW
Nº de coches de cada composición	3 coches
Plazas totales de cada composición	224 plazas
Velocidad máxima	140 km/h
Longitud	79.590 mm
Estructura de caja	Acero
Motores de tracción	4
Puertas por costado	2
Anchura de caja	2.950 mm.
Altura del tren	4.180 mm.
Composición máxima	9

Fuente: Renfe

- Locomotoras de tracción eléctrica para servicios ferroviarios de mercancías:

Figura 42 Locomotora 253



Fuente: Renfe

Tabla 33 Parámetros técnicos locomotora 253

Parámetro	Valor
Fabricante	Bombardier Transportation.
Peso	87 t
Potencia	5.400 kW
Número de ejes	4 ejes
Velocidad máxima	140 km/h
Esfuerzo máximo en el arranque	300 kN
Longitud	18.900 mm
Ancho de caja	2.997 mm.
Altura máxima	4.270 mm.
Motor de tracción	4 motores trifásicos asíncronos
Freno neumático	Disco
Freno eléctrico	Regenerativo y reostático
Freno estacionamiento	Muelle acumulador Knorr
Registrador	Teloc 2500
Señalización	Asfa digital

Fuente: Renfe

Figura 43 Locomotora 269.0/1



Fuente: Renfe

Tabla 34 Parámetros técnicos locomotora 269.0/1

Parámetro	Valor
Fabricante	Caf-Macosa-Ateinsa-Mitsubishi.
Peso	88 t
Potencia	3.100 kW
Número de ejes	4 ejes
Velocidad máxima	80 km/h
Esfuerzo máximo en el arranque	280 kN
Longitud	17.270 mm
Ancho de caja	3.126 mm.
Altura máxima	4.260 mm.
Motor de tracción	2 mod. MB – 3.200-B2/B3
Freno neumático	Aire comprimido
Freno eléctrico	Reostático
Freno estacionamiento	De husillo a los 2 ejes de un bogie
Registrador	Memotel/Cesis
Señalización	Asfa digital/analógico

Fuente: Renfe

Figura 44 Locomotora 269.2



Fuente: Renfe

Tabla 35 Parámetros técnicos locomotora 269.2

Parámetro	Valor
Fabricante	Caf-Macosa-Ateinsa-Mitsubishi.
Peso	88 t
Potencia	3.100 kW
Número de ejes	4 ejes
Velocidad máxima	100 km/h
Esfuerzo máximo en el arranque	240 kN
Longitud	17.270 mm
Ancho de caja	3.126 mm.
Altura máxima	4.260 mm.
Motor de tracción	2 mod. MB – 3.200-B2/B3
Freno neumático	Aire comprimido
Freno eléctrico	Reostático
Freno estacionamiento	De husillo a los 2 ejes de un bogie
Registrador	Memotel/Cesis
Señalización	Asfa digital/analógico

Fuente: Renfe

Figura 45 Locomotora Bitrac Serie 601



Fuente: Caf

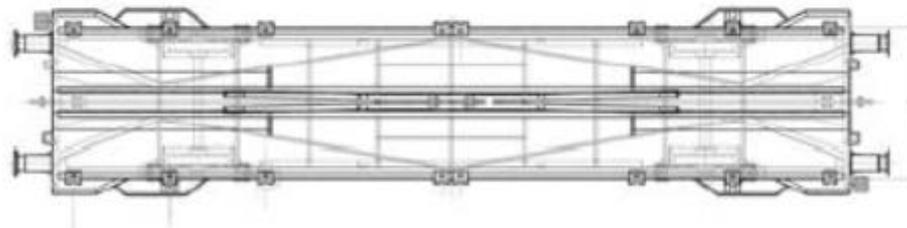
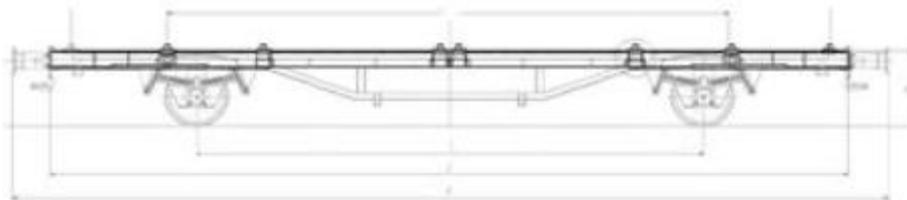
Tabla 36 Parámetros técnicos locomotora Bitrac Serie 601

Parámetro	Valor
Fabricante	Caf
Peso	130 t
Potencia	4.500 kW
Número de ejes	6 ejes
Velocidad máxima	120 km/h
Esfuerzo máximo en el arranque	440 kN
Longitud	22.410 mm
Ancho de caja	2.950 mm.
Altura máxima	4.280 mm.
Señalización	Asfa/ERTMS

Fuente: Caf, Vía Libre

- Vagones para servicios ferroviarios de mercancías:

Figura 46 Vagones MC/MCE-Lgs (12/16 clavijas)



Fuente: Renfe

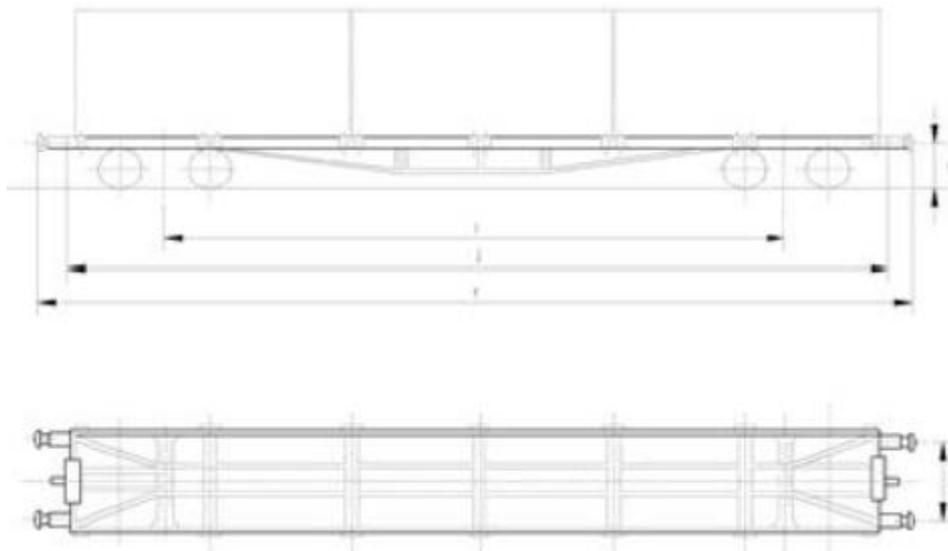
Tabla 37 Parámetros técnicos vagones MC/MCE-Lgs (12/16 clavijas)

Parámetro	Valor
Carga máxima	Entre 27,6 y 28,8 t*
Tara Media	Entre 11,2 y 12,5 t*
Freno	Aire comprimido
Velocidad	100 km/h
Longitud entre topes	13,86 m
Ancho	2,77 m

*En función de la numeración específica del vagón

Fuente: Renfe

Figura 47 Vagones MMC-Sgs



Fuente: Renfe

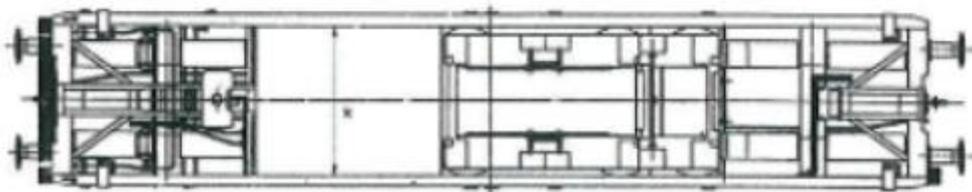
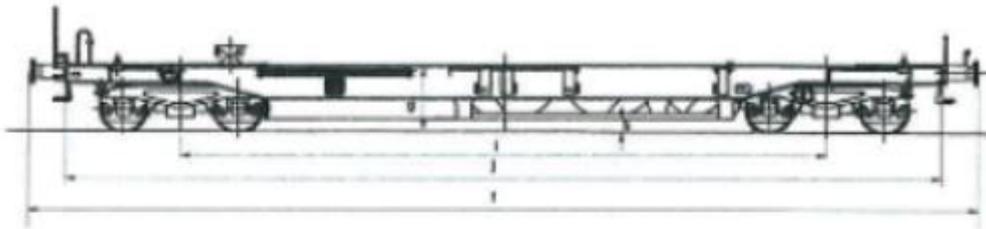
Tabla 38 Parámetros técnicos vagones MMC-Sgs

Parámetro	Valor
Carga máxima	Entre 58 y 59 t*
Tara Media	21 t
Freno	Aire comprimido
Velocidad	100 km/h
Longitud entre topes	19,90 m
Ancho	2,10 m

*En función de la numeración específica del vagón

Fuente: Renfe

Figura 48 Vagones MMP-Sdgkkms



Fuente: Renfe

Tabla 39 Parámetros técnicos vagones MMP-Sdgkkms

Parámetro	Valor
Carga máxima	Entre 37 y 44 t*
Tara Media	18 t
Freno	Aire comprimido
Velocidad	120 km/h
Longitud entre topes	16,44 m
Ancho	2,77 m

*En función del tipo de carga: semirremolques o cajas móviles y contenedores

Fuente: Renfe

ANEXO 2: HORARIOS DE LOS SERVICIOS DE MERCANCÍAS Y VIAJEROS

- Sentido A:

Tabla 40 Horarios de los servicios ferroviarios. Sentido A

Tren	Hora de salida	Hora de llegada
Mercancías	5:30	7:24
Viajeros	6:20	7:58
Viajeros	7:15	8:53
Viajeros	8:00	9:38
Viajeros	8:45	10:23
Viajeros	9:30	11:08
Viajeros	11:00	12:38
Viajeros	12:30	14:08
Viajeros	14:00	15:38
Viajeros	14:45	16:23
Viajeros	15:30	17:08
Mercancías	16:00	17:54
Viajeros	17:00	18:38
Viajeros	17:45	19:23
Viajeros	18:30	20:08
Viajeros	20:00	21:38
Viajeros	21:30	23:08

Fuente: elaboración propia

- Sentido B:

Tabla 41 Horarios de los servicios ferroviarios. Sentido B

Tren	Hora de salida	Hora de llegada
Viajeros	6:25	7:57
Viajeros	7:05	8:43
Viajeros	8:00	9:38
Viajeros	8:45	10:23
Viajeros	9:40	11:18
Mercancías	10:30	12:10
Viajeros	11:15	12:53
Viajeros	12:20	13:58
Viajeros	14:00	15:38
Viajeros	14:45	16:23
Viajeros	15:30	17:08
Viajeros	17:00	18:38
Viajeros	17:45	19:23
Viajeros	18:30	20:08
Viajeros	20:00	21:38
Mercancías	20:40	22:20
Viajeros	21:30	23:08

Fuente: elaboración propia

ANEXO 3: DISTRIBUCIÓN DE CANTONES EN LA LÍNEA

Tabla 42 Distribución de cantones en la línea

Cantón	Longitud (m)	P.K. inicial	Punto sing. inicial	P.K. final	Punto sing. inicial
1	2.800	0	E1	2+800	T1
2	10.100	2+800	T1	12+900	
3	7.500	12+900		20+400	
4	5.900	20+400		26+300	
5	4.900	26+300		31+200	E2
6	5.500	31+200	E2	36+700	
7	6.700	36+700		43+400	
8	9.100	43+400		52+500	
9	5.100	52+500		57+600	E3
10	6.900	57+600	E3	64+500	
11	6.100	64+500		70+600	
12	7.700	70+600		78+300	E4
13	7.600	78+300	E4	85+900	
14	7.900	85+900		93+800	
15	8.100	93+800		101+900	
16	3.200	101+900		105+100	
17	7.400	105+100		112+500	
18	7.500	112+500		120+000	E5
19	6.100	120+000	E5	126+100	
20	7.800	126+100		133+900	
21	6.100	133+900		140+000	
22	14.200	140+000		154+200	
23	8.000	154+200		162+200	
24	6.400	162+200		168+600	
25	7.500	168+600		176+100	
26	3.000	176+100		179+100	E6
27	2.000	179+100	E6	181+100	
28	2.400	181+100		183+500	
29	4.900	183+500		188+400	T2
30	7.100	188+400	T2	195+500	E7

Fuente: datos de partida

ANEXO 4: TIEMPOS MÍNIMOS DE SUCESIÓN EN LA LÍNEA

En este anexo se presentan los tiempos mínimos de sucesión (TMS) calculados en el análisis de capacidad y saturación de la línea en el sentido pésimo considerado en el análisis, sentido A.

Tabla 43 Distribución de TMS en los distintos cantones según patrón de trenes

Cantón	Longitud (m)	TMS entre trenes de viajeros	TMS tren mercancías precedido por viajeros
1	2.800	-	-
2	10.100	0:06:39	-
3	7.500	0:07:32	-
4	5.900	0:05:38	0:04:42
5	4.900	0:05:10	0:01:14
6	5.500	0:07:23	0:00:13
7	6.700	0:07:34	0:00:54
8	9.100	0:06:31	0:02:10
9	5.100	0:06:19	0:01:05
10	6.900	0:07:47	0:02:07
11	6.100	0:08:10	0:00:41
12	7.700	0:06:19	0:01:27
13	7.600	0:09:42	0:00:40
14	7.900	0:09:59	0:00:47
15	8.100	0:06:32	0:00:02
16	3.200	0:04:48	0:03:32
17	7.400	0:05:07	0:00:12
18	7.500	0:07:02	0:03:27
19	6.100	0:08:43	0:00:35
20	7.800	0:09:07	0:01:14
21	6.100	0:07:20	0:00:13
22	14.200	0:09:59	0:04:54
23	8.000	0:10:34	0:01:48
24	6.400	0:06:59	0:05:00
25	7.500	0:06:44	0:00:07
26	3.000	0:05:19	0:02:15
27	2.000	0:05:11	0:03:32
28	2.400	0:05:10	0:00:05
29	4.900	0:03:56	0:02:34
30	7.100	0:06:08	-

Fuente: elaboración propia