



FUNDACIÓN DE LOS
FERROCARRILES
ESPAÑOLES

colección **TESIS**
DOCTORALES
INGENIERÍA / ARQUITECTURA

CONTRIBUCIÓN AL DISEÑO EFICIENTE DE LA CONFIGURACIÓN EN PLANTA DE LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD

María del Pilar Martín Cañizares

Dirigida por Andrés López Pita

Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio
Programa de Doctorado en Ingeniería e Infraestructuras de Transporte



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Barcelona, 2015

INGENIERÍA / ARQUITECTURA

**COLECCIÓN
TESIS DOCTORALES**

INGENIERÍA / ARQUITECTURA

**CONTRIBUCIÓN AL DISEÑO EFICIENTE DE LA
CONFIGURACIÓN EN PLANTA DE LÍNEAS DE ALTA
VELOCIDAD**

María del Pilar Martín Cañizares

Dirigida por Andrés López Pita

**DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE Y DEL
TERRITORIO**

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA E INFRAESTRUCTURAS
DE TRANSPORTE**



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Barcelona, 2015

COLECCIÓN TESIS DOCTORALES

INGENIERÍA / ARQUITECTURA

La Fundación de los Ferrocarriles Españoles pone a disposición del público la **Colección de Tesis Doctorales** sobre el ferrocarril, con el objetivo fundamental de contribuir a la difusión de la investigación universitaria sobre esta materia y facilitar el acceso libre y gratuito a las investigaciones de los autores, aportando así una información muy valiosa y especializada y contribuyendo, al mismo tiempo, a la preservación de estos trabajos. Con ello, además, se da visibilidad a esta producción intelectual. La Fundación aspira a que su repositorio sea lo más amplio posible y que estén representados en él todos los ámbitos de investigación del ferrocarril.

La **Colección de Tesis Doctorales** se clasifica en tres ramas, en función de su temática:

- Ingeniería y Arquitectura
- Humanidades
- Economía y Regulación

CONTRIBUCIÓN AL DISEÑO EFICIENTE DE LA CONFIGURACIÓN EN PLANTA DE LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD

El objeto de esta tesis es realizar un análisis sistemático y conjunto de las dos dimensiones que deben considerarse al diseñar la planta de vías de una nueva línea de alta velocidad (temporal y espacial). Se abordan en detalle aspectos técnicos y económicos para finalmente presentar la Metodología de Diseño Bidimensional de líneas de alta velocidad como herramienta para el diseño eficiente de las mismas. Se define como diseño eficiente aquel que garantiza la disponibilidad, la robustez y el nivel de servicio adecuado a un coste asumible, no sólo en condiciones normales de explotación sino también en estados degradados.

María del Pilar Martín Cañizares es doctora en Ingeniería e Infraestructuras del Transporte por la UPC, ingeniera en Informática por Comillas-ICAI, máster en Sistemas Ferroviarios por Comillas-ICAI y experta en Ingeniería Ferroviaria por la UNED. Jefa de Proyectos de Investigación de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, actualmente desarrolla sus funciones en el Gabinete del director general de Renfe Viajeros. Autora de numerosas comunicaciones en congresos, monografías y artículos técnicos, y profesora ocasional en cursos de postgrado, fue miembro del equipo de investigación que en 2008 obtuvo el VIII Premio Talgo a la Innovación Tecnológica.

ISBN: 978-84-946555-3-1

Depósito legal: M-10772-2017

Fundación de los Ferrocarriles Españoles – 2017

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	13
1.1	Antecedentes.....	15
1.2	Objetivo y justificación de la investigación	18
1.3	Esquema de la tesis	19
2	DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DE LAS LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD EN EL MUNDO	21
2.1	Redes de alta velocidad de Japón, Francia y España	23
2.1.1	Red de alta velocidad en Japón	24
2.1.2	Red de alta velocidad en Francia	26
2.1.3	Red de alta velocidad en España.....	28
2.2	Configuración de vías de líneas de alta velocidad en servicio	31
2.2.1	Líneas de alta velocidad de Japón	31
2.2.2	Líneas de alta velocidad de Francia.....	41
2.2.3	Líneas de alta velocidad de España.....	57
2.3	Análisis de distancias entre dependencias del conjunto de la redes	71
2.4	Síntesis.....	75
3	ANÁLISIS ESPECÍFICO DE LA ESTRUCTURA Y TOPOLOGÍA DE LAS LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD.....	77
3.1	Introducción	79
3.2	Estructura de las redes en relación con los servicios potenciales	79
3.2.1	Patrones de conexión.....	80
3.2.2	Proceso para determinar la estructura de una red	80
3.3	Topologías de conexión de las redes.....	87
3.3.1	Estudio de las topologías de conexión mediante la determinación de la propiedad small-world	88
3.3.2	Eficiencia y desarrollo de las redes de alta velocidad de Japón, Francia y España	89
3.4	Síntesis.....	90
4	EVALUACIÓN Y COSTES DE PROYECTOS DE ALTA VELOCIDAD.....	91
4.1	Evaluación financiera y evaluación socioeconómica.....	93
4.1.1	Indicadores	94
4.1.2	Incertidumbre y riesgo	95
4.2	Costes de construcción de una línea de alta velocidad	101
4.2.1	Infraestructura	102
4.2.2	Vía	107
4.2.3	Dependencias.....	108
4.2.4	Sistema de electrificación.....	109
4.2.5	Sistemas de seguridad y comunicaciones	112
4.2.6	Seguridad y salud.....	113
4.2.7	Expropiaciones.....	113
4.2.8	Resumen de costes de construcción de una línea de alta velocidad.....	114

4.3	Costes de mantenimiento y operación de una línea de alta velocidad.....	116
4.3.1	Mantenimiento de infraestructura y vía (sin aparatos).....	117
4.3.2	Mantenimiento de aparatos de vía	119
4.3.3	Mantenimiento del sistema de electrificación	120
4.3.4	Mantenimiento de los sistemas de seguridad y comunicaciones	121
4.3.5	Operación de la infraestructura y seguridad.....	122
4.3.6	Mantenimiento y operación de estaciones	122
4.3.7	Costes generales y de estructura	122
4.3.8	Resumen de costes de mantenimiento de una línea de alta velocidad... ..	122
4.4	Costes e ingresos de un operador de viajeros en alta velocidad	123
4.4.1	Conceptos previos	124
4.4.2	Función de costes del operador de alta velocidad	124
4.4.3	Resumen de costes de un operador de viajeros en alta velocidad	133
4.4.4	Ingresos y tarifas o precios.....	134
4.5	Costes externos.....	134
4.5.1	Impactos sobre la funcionalidad y eficiencia del sistema de transporte ..	135
4.5.2	Impacto ambiental	136
4.6	Precios sombra.....	138
4.7	Síntesis.....	139
5	PROPUESTA METODOLÓGICA DE DISEÑO BIDIMENSIONAL DE LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD.....	141
5.1	Conceptos previos	143
5.2	Dimensión temporal: diseño escalable	144
5.2.1	Evolución de vía única a vía doble	144
5.2.2	Análisis de capacidad de diferentes configuraciones de vías	156
5.2.3	Pautas de diseño en la dimensión temporal.....	165
5.3	Dimensión espacial.....	166
5.3.1	Opciones de diseño en la dimensión espacial.....	167
5.3.2	Análisis de capacidad y tiempos de viaje	168
5.3.3	Pautas de diseño en la dimensión espacial.....	181
5.4	Consideración conjunta de las dimensiones temporal y espacial	181
5.4.1	Análisis del número y distribución de los servicios	182
5.4.2	Agrupación de orígenes-destinos en trenes	188
5.4.3	Generación de variantes de infraestructura y horarios.....	189
5.4.4	Evaluación socioeconómica de las variantes de infraestructura	190
5.5	Síntesis.....	190
6	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO BIDIMENSIONAL A UN CASO EJEMPLO.....	191
6.1	Presentación del caso ejemplo.....	193
6.1.1	Características del trazado actual	193
6.1.2	Servicios actuales.....	196

6.1.3	Demanda de viajeros actual	197
6.2	Desarrollo del caso ejemplo	200
6.2.1	Hipótesis	200
6.2.2	Definición de la situación de referencia (sin proyecto)	201
6.2.3	Situación con proyecto. Estimación de la demanda	202
6.2.4	Situación con proyecto. Definición de la oferta ferroviaria	204
6.2.5	Situación con proyecto. Definición de variantes de infraestructura	205
6.2.6	Evaluación socioeconómica	209
6.3	Síntesis	210
7	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	211
7.1	Conclusiones	213
7.2	Futuras líneas de investigación	216
8	BIBLIOGRAFÍA	217

RESUMEN

La construcción de una línea de alta velocidad requiere una cuantiosa inversión y su diseño condiciona fuertemente la operación, dándose la circunstancia agravante de que realizar modificaciones posteriores no previstas inicialmente no siempre es factible a un coste razonable. Por ello resulta necesario acercarse a una configuración óptima de la infraestructura.

Los principios de diseño de líneas de alta velocidad han permanecido inmutables y similares para todas las líneas desde hace 50 años, urge por tanto realizar una revisión y actualización de los mismos adaptándolos a los requerimientos futuros y particulares de cada línea.

En general las líneas se planifican desde un principio para atender elevados volúmenes de tráfico incurriendo en el riesgo de que la demanda prevista no se alcance hasta muy avanzado el ciclo de vida de la infraestructura o, en el peor de los casos, por razones estructurales no llegue a alcanzarse. Dicho sobredimensionamiento, aunque sea temporal, supone un sobrecoste y asignación ineficiente de los recursos económicos.

En esta tesis se identifican dos dimensiones que deben considerarse al diseñar una nueva línea de alta velocidad:

- *Dimensional temporal*: los requerimientos de capacidad no son constantes a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura, por lo general la tendencia es creciente, pero existen múltiples incertidumbres. Por ello la dimensión temporal comprende el estudio de la escalabilidad del diseño, de manera que la capacidad ofertada sea acorde a la demanda y evolucione con ésta, evitándose así sobrecostes.
- *Dimensión espacial*: no todas las líneas e incluso no todas las secciones de una línea tienen la misma funcionalidad en una red ferroviaria. Los patrones de tráfico, volúmenes de demanda y los requisitos de velocidad, difieren de unas secciones a otras y por tanto también el equipamiento debe ser diferente y adaptado a las condiciones particulares. Por otra parte, en ocasiones las nuevas líneas de alta velocidad se plantean para enlazar poblaciones que hasta la fecha disponían de línea convencional, con el objetivo de reducir los tiempos de viaje y en estos casos es necesario decidir qué hacer con la línea preexistente. Ambas cuestiones se engloban en la dimensión espacial.

El objetivo de esta tesis es realizar un análisis sistemático y conjunto de las dos dimensiones abordando en detalle aspectos técnicos y económicos para finalmente presentar la *Metodología de diseño bidimensional de líneas de alta velocidad* como herramienta para el diseño eficiente de las mismas. Se define como diseño eficiente aquel que garantiza la disponibilidad, la robustez y el nivel de servicio adecuado a un coste asumible, no sólo en condiciones normales de explotación sino también en estados degradados. El análisis se circunscribe al diseño de la configuración en planta de nuevas líneas de alta velocidad.

Se parte de un análisis de las redes de alta velocidad de Japón, Francia y España que permite conocer las realidades de diseño existentes y determinar la estructura y topología de las redes y como éstas condicionan la operación y los flujos de tráfico que por ellas pueden circular. El estudio realizado se apoya en la teoría de grafos y la ciencia de redes y permite constatar la homogeneidad de los diseños pese a las particularidades de cada tramo en cuanto a volúmenes de tráfico y ubicación en la red.

A continuación, se realiza un análisis de las implicaciones económicas de los diferentes diseños que se pueden adoptar en una línea de alta velocidad. Se analizan los costes de construcción, mantenimiento y operación de infraestructura, los costes e ingresos de un operador de viajeros y los costes externos, introduciéndose como novedad la identificación de todos los inductores de costes e ingresos y aportándose valores

unitarios orientativos suficientemente desagregados como para poder realizar una evaluación socioeconómica a falta de datos reales.

Se abordan posteriormente los aspectos técnicos, analizando en profundidad la problemática de las dimensiones temporal y espacial, presentando, evaluando y comparando las diferentes opciones de diseño existentes. Los análisis realizados se basan en la realización de numerosas simulaciones en las que combinan diversas configuraciones de vías, tipologías de tráfico y niveles de capacidad demandados. Estos trabajos permiten extraer algunas conclusiones generales, siempre teniendo presente que cada línea y sus condicionantes son particulares.

Una vez estudiados los aspectos económicos y los técnicos en ambas dimensiones se ponen todos en relación, presentando la *Metodología de diseño bidimensional de líneas de alta velocidad* que es objeto de esta tesis.

La metodología propuesta se emplea para plantear y evaluar el diseño de la línea de alta velocidad Ourense-Lugo constatando su validez y aplicabilidad.

ABSTRACT

Building a high-speed line requires significant investment and its design strongly influences the operation, with the aggravating circumstance that subsequent modifications not initially planned are not always feasible at a reasonable cost. It is therefore necessary to define optimal infrastructure configurations.

Design principles of high-speed lines have remained unchanged for 50 years and are similar to all lines. For this reason it is crucial to review, update and adapt them to the future and specific requirements of each line.

This thesis identifies two dimensions which should be considered when designing a new high speed line:

- *Time dimension*: capacity requirements are not constant throughout the life cycle of the infrastructure. Usually there is an upward trend but subject to many uncertainties. Thus, the time dimension involves the study of scalable design, which allows adapting supply to demand mitigating the risk of any cost overrun.
- *Spatial dimension*: not all lines and even not all sections of a line have the same functionality in a railway network. Traffic patterns, demand volumes and speed requirements, differ from one section to another, so that the equipment must also be different and adapted to the particular conditions. Moreover, sometimes a new high-speed line is planned to link populations that hitherto had conventional line to reduce travel times. In such cases, a decision will have to be taken on what to do with the existing line.

The aim of this thesis is to undertake a systematic analysis considering both dimensions and addressing in detail technical and economic aspects to finally present the *Two-dimensional design methodology for high speed lines* as a tool to achieve efficient design. The analysis is confined to the track layout of new high speed lines.

On the basis of a detailed analysis of the high-speed networks in Japan, France and Spain, common design patterns are identified. Furthermore, using graph theory and network science, it is quantified how the structure and topology of the networks influence operation and capacity.

An analysis of the economic implications of adopting different designs (single track, double track, scalable design...) is performed. Infrastructure investment, maintenance and operation costs, as well as costs and revenues of a railway operator and external costs are discussed. All cost and revenue drivers are identified. Guideline values are provided, detailed enough to undertake a socio-economic assessment in the absence of actual data.

Subsequently, technical aspects are addressed, analysing in depth time and spatial dimensions, presenting, evaluating and comparing the design solutions available. The analysis is based on simulation, combining different infrastructure variants, train types and headways. It allows drawing some general conclusions, always bearing in mind that each line has its particularities and constraints.

Following study of economic and technical aspects in both dimensions they are interconnected, presenting the *Two-dimensional design methodology for high speed lines*.

The proposed methodology is applied to the Ourense-Lugo high speed line to verify its usability.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi director de tesis Andrés López Pita su dedicación y comprensión, así como todos los buenos consejos y orientaciones.

De manera muy especial quiero dar las gracias a mi maestro Alberto García Álvarez por haber confiado y apostado siempre por mí, por transmitirme de manera generosa sus amplios conocimientos y pasión por el ferrocarril, así como por fomentar en mí el pensamiento crítico y el interés por aprender y el trabajo bien hecho. Su contribución en esta tesis ha sido decisiva por las numerosas buenas ideas aportadas, reflexiones compartidas y revisiones.

Gracias a mis compañeros de trabajo más directos Nacho González y Juanma Hidalgo con los que en diferentes etapas he podido intercambiar ideas y que en los momentos de dificultades me han escuchado y no han dudado en echarme una mano. A todas las personas de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Renfe y Adif que han compartido conmigo sus conocimientos: Rodolfo Ramos, Luis E. Mesa, Ana Cabanes, David Martín Caro, Javier Fernández, César López, Lorenzo Jaro y David Villalmanzo. También a Naoto Yanase (UIC) y Florent Brisou (Rail21).

Jag är mycket tacksam för hjälpen jag fått från Järnvägsgruppen på KTH. Särskilt vill jag tacka Professor Bo-Lennart Nelldal, Oskar Fröidh, Olov Lindfeldt, Anders Lindfeldt och Hans Sipilä för alla inspirerande konversationer samt Jennifer Warg för att hon berättade hemligheter för mig om simulering av tågtrafik. Jag kände mig hemma hos er.

A todos los amigos que han permanecido a mi lado durante este tiempo, que se han interesado por mis avances y me han animado a seguir adelante.

Y por supuesto, millones y millones de gracias a mis padres por todo. ¡Va por vosotros!

M^a del Pilar Martín Cañizares

Junio de 2015

1. INTRODUCCIÓN



Trenes de alta velocidad en la estación de Madrid Puerta de Atocha

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Desde que la alta velocidad se inauguró en Japón en 1964 diversos países, tanto de Europa como de Asia, han adoptado este nuevo modelo ferroviario y actualmente continúan expandiendo sus redes. Incluso muchos de los países que no disponen de alta velocidad se plantean su puesta en servicio como única opción para revitalizar el transporte colectivo de viajeros y hacer frente a la expansión del vehículo privado y del avión en recorridos medios.

Ventajas de la alta velocidad.- La rápida expansión en el mundo del ferrocarril de alta velocidad obedece a las ventajas que aporta, tanto económico-operativas, como sociales.

Desde el punto de vista económico-operativo al incrementarse la velocidad de circulación y consecuentemente reducirse los tiempos de viaje, aumenta su atractivo con respecto al ferrocarril convencional, al mismo tiempo que mantiene, e incluso mejora, las ventajas de éste.

Como consecuencia de este mayor atractivo se transportan más viajeros, que además pueden estar dispuestos a pagar más por su billete. Por otra parte, el aumento de la velocidad se traduce en una disminución de los costes operativos (García Álvarez, 2012).

En cuanto a las ventajas de orden social, cabe destacar que el tren de alta velocidad, al tener unos tiempos de viaje menores, supone un ahorro de tiempo para los viajeros. A su vez, el aumento de la velocidad permite al ferrocarril captar viajeros de la aviación y el vehículo privado, ambos modos con un consumo de energía y emisiones muy superiores a las del tren. La captación de viajeros del coche se traduce también en una reducción de la accidentalidad del sistema de transporte.

Delimitación del concepto de alta velocidad.- No existe una definición universal de alta velocidad ferroviaria. Sin embargo, dado que el material rodante, sistemas de señalización e infraestructuras convencionales permiten velocidades máximas de 200-220 km/h, se puede decir que la alta velocidad empieza en el entorno a los 250 km/h. El límite superior de la alta velocidad está establecido en la actualidad (2015) en 350 km/h. Circular a velocidades superiores requiere afrontar retos tecnológicos como la interacción pantógrafo-catenaria, los efectos aerodinámicos en túnel, el vuelo de balasto, y en general la idoneidad de la vía sobre balasto y la determinación de los parámetros de diseño que garanticen la seguridad.

La Especificación Técnica de Interoperabilidad (ETI) del subsistema “infraestructura” (R (UE) nº 1299/2014 de la Comisión, de 18 de noviembre de 2014) define tres categorías de líneas de alta velocidad:

- *Categoría I:* líneas construidas especialmente para alta velocidad, equipadas para velocidades generalmente iguales o superiores a 250 km/h
- *Categoría II:* líneas mejoradas especialmente para alta velocidad, equipadas para velocidades del orden de 200 km/h.
- *Categoría III:* líneas mejoradas especialmente para alta velocidad o especialmente construidas para alta velocidad que tienen características especiales debido a condicionamientos topográficos, urbanísticos o de relieve, en las que las velocidades tienen que adaptarse a cada caso.

Respecto al material rodante, la Especificación Técnica de Interoperabilidad del subsistema de material rodante “locomotoras y material rodante de alta velocidad” (R (UE) nº 1302/2014 de la Comisión, de 18 de noviembre de 2014,) define dos clases:

- Clase 1: material rodante de velocidad máxima igual o superior a 250 km/h.
- Clase 2: material rodante de velocidad máxima de al menos 190 km/h pero inferior a 250 km/h.

Estas ETIs no son de aplicación para velocidades superiores a 350 km/h.

Tráfico mixto.- Respecto al tráfico mixto es necesario aclarar el concepto, pues si bien tradicionalmente se ha entendido por tal la circulación simultánea de trenes de viajeros y mercancías por una misma línea, (López Pita, 2000) ofrece un nuevo enfoque al señalar que la definición debe recaer más bien sobre la tipología del material rodante que circula por la vía. El autor distingue cuatro tipos de líneas:

- *Líneas T1*, donde sólo se utilizan ramas especializadas para el transporte de viajeros a alta velocidad. Por ejemplo, LGV Nord Europe y LGV Interconnexion.
- *Líneas T2*, donde sólo circulan trenes de viajeros, pero tanto ramas como composiciones formadas por material rodante convencional (locomotora más coches). Por ejemplo, la línea Madrid-Sevilla.
- *Líneas T3*, donde circulan al mismo tiempo ramas especializadas para el transporte de viajeros y material rodante convencional para el transporte de viajeros y mercancías. Por ejemplo, la línea Hannover-Würzburg, Mannheim-Stuttgart y Roma-Florenca.
- *Líneas T4*, donde sólo se utilizan ramas especializadas para el transporte de viajeros y trenes convencionales para el transporte de mercancías. Es el caso de algunos tramos de la LGV Atlantique y Barcelona-Figueres-Perpignan.

En la red española de alta velocidad coexisten trenes autopropulsados de viajeros que realizan servicios de larga distancia y media distancia a alta velocidad, autopropulsados y composiciones Talgo remolcadas por locomotora que realizan servicios de ancho variable, trenes de mercancías (Barcelona-Figueres) e incluso está prevista la circulación de trenes de cercanías en algunos tramos.

La alta velocidad como sistema.- La alta velocidad se identifica en ocasiones con un determinado tren o línea. Sin embargo, debe ser concebida y construida como un *sistema* formado por elementos de altas prestaciones y calidad estrechamente relacionados (vía, electrificación, señalización y comunicaciones, material rodante, estaciones, mantenimiento, comercialización, gestión...). La experiencia demuestra que olvidarse de alguno de estos subsistemas supone perder ventajas del resto y que el óptimo del sistema en su conjunto no es igual a la suma de los óptimos de los subsistemas que lo componen.

De estos elementos el que se puede considerar menos flexible y adaptable a cambios es la infraestructura, ya que cualquier modificación significativa una vez puesta en funcionamiento tiene un coste de implantación alto y los efectos son muy limitados. Hay que tener en cuenta que desde que se inicia el diseño de una línea hasta que se pone en servicio transcurren, como media 6 u 8 años e incluso en algunos casos más, y que además el ciclo de vida es largo, entre 50 y 100 años. Por todo ello el diseño de la infraestructura debe ser sometido a un estudio profundo y se debe acometer con visión de futuro, adelantándose a los avances que se puedan producir por ejemplo en el material rodante, con el incremento de las velocidades, las longitudes de los trenes o los gálibos, así como la incorporación de nuevas formas de explotación y productos.

Criterios de diseño tradicionales.- Por regla general las líneas de alta velocidad construidas en el mundo, y en España en particular, tienen unas características muy similares. Resulta evidente que en una línea en la que se circula a velocidades superiores a los 250 km/h es necesario disponer sistemas de señalización no basados únicamente en señalización lateral y de supervisión puntual, del mismo modo, las elevadas potencias demandadas requieren sistemas de electrificación en corriente alterna, y los materiales que conforman la infraestructura deben ser aptos para soportar los esfuerzos dinámicos generados por el paso del material.

Sin embargo, llama la atención que, independientemente de la demanda que un tramo de alta velocidad deba atender, de su localización en la red ferroviaria y del tipo de tráfico que por él circulará, se dispongan los mismos equipamientos. Compárese por ejemplo el tramo de la red de alta velocidad japonesa Tokyo-Nagoya, por el que circulan 141 trenes por sentido y día, y el tramo de la red de alta velocidad española Bif. La Sagra-Toledo, por el que circulan 13,6 trenes por sentido y día, ambos dotados de vía doble banalizada con señalización en cabina y ATP de supervisión continua.

En muchos casos no se llega a plantear el número de vías necesario, dando lugar a un excedente de capacidad que lleva consigo unos costes elevados frente a los ingresos obtenidos. Por el contrario, puede ocurrir que con el paso de los años las infraestructuras se saturen y como la posible ampliación no había sido prevista inicialmente, resulta especialmente compleja y costosa o sencillamente imposible.

La explotación de trenes de alta velocidad sobre una línea nueva requiere una minuciosa planificación y concepción de las instalaciones. No es lo mismo diseñar y explotar una línea en la que todos los trenes van a circular a la misma velocidad, a intervalos cortos y sin estaciones intermedias, que una en la que se prevean trenes directos y otros con paradas; una línea exclusiva de tráfico de viajeros, que una en la que también circulen trenes de mercancías; o una línea separada de la red convencional, que una con conexiones con ésta.

Del mismo modo, las hipótesis consideradas para el dimensionamiento de las subestaciones de tracción o la definición de los cantones de señalización no siempre se particularizan para cada tramo de línea, siendo comunes en España dimensionamientos para trenes en doble composición cada tres minutos por sentido. Cabe plantearse en este caso si los esquemas de vías de las estaciones permitirían expedir trenes con dicha frecuencia.

Si las líneas se planifican desde un principio para elevados volúmenes de tráfico se incurre en el riesgo de que la demanda no se llegue a alcanzar hasta muy avanzado el ciclo de vida de la infraestructura; o en algunos casos, por razones estructurales, nunca se alcance. El sobredimensionamiento de las líneas de alta velocidad (aunque fuese temporal) supone un sobre coste y por ende una asignación ineficiente de los recursos económicos.

Metodología de diseño bidimensional de líneas de alta velocidad.- Frente a estos diseños de líneas que podríamos denominar *estáticos* se propone y, es objeto de esta tesis, una nueva metodología.

La Metodología de diseño bidimensional de líneas de alta velocidad considera de manera conjunta las dos dimensiones que afectan al diseño de una línea de alta velocidad con el objeto de lograr un diseño eficiente de la misma: la dimensión temporal y la espacial.

Dimensión temporal: el diseño eficiente de una infraestructura debe orientarse a atender la demanda a un coste asumible. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la demanda varía a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura y que además durante el mismo está sometida a múltiples incertidumbres. Por ello, el diseño de las líneas debe ser flexible, siendo posible incrementar la capacidad ofertada adaptando el esquema de vías y el equipamiento. Este criterio se empleó en el diseño de la línea de velocidad alta Bothnia (Botniabanan) en Suecia (Lindblom, 2010). En este sentido, en 2010 el Ministerio de Fomento español publicó la Orden Ministerial FOM//3317/2010 “Instrucción sobre las medidas específicas para la mejora de la eficiencia en la ejecución de las obras públicas de infraestructuras ferroviarias, carreteras y aeropuertos del Ministerio de Fomento” (O. FOM/3317/2010, de 17 de diciembre). Dicho documento indica que es necesario realizar un análisis específico considerando los diferentes escenarios de operación y contemplando la hipótesis de construir sólo una vía en la primera fase y la

segunda vía en fases sucesivas. Este análisis se debe realizar para el diseño de la configuración de vías, los sistemas de energía, señalización y gestión del tráfico. Aunque la filosofía es enunciada por el Ministerio de Fomento español, los técnicos carecen en la actualidad de procedimientos para determinar qué solución es la más adecuada en cada caso y cómo ejecutar un diseño escalable sin incurrir en elevados sobrecostes.

Dimensión espacial: no todas las líneas e incluso no todas las secciones de una línea tienen la misma funcionalidad en una red ferroviaria. Los patrones de tráfico, volúmenes de demanda o los requisitos de velocidad máxima, difieren de una sección a otra y por tanto también el equipamiento debe ser diferente y adaptado a las circunstancias particulares de cada sección. Esta reflexión es presentada por (García Álvarez, 2011b; Martín Cañizares, 2011; Martín Cañizares y García Álvarez, 2012). Posteriormente, (Castillo Ron et al., 2013) teoriza sobre la posibilidad de construir la línea de alta velocidad Palencia-Santander alternando tramos de vía doble y única al tratarse de una línea periférica con una demanda de tráfico baja.

En la dimensión espacial se engloba también la cuestión de qué hacer con las líneas convencionales al inaugurarse líneas de alta velocidad. Su cierre puede suponer la desaparición de la oferta ferroviaria para algunas poblaciones en las que la demanda no justifica la construcción de una estación de alta velocidad y si se opta por transferir el tráfico existente a la nueva línea la densidad de tráfico y la heterogeneidad del mismo pueden afectar negativamente a la explotación. Por el contrario, seguir operando la línea convencional supone incurrir en costes de mantenimiento y operación. En ocasiones las líneas convencionales se mantienen en servicio para atender principalmente tráficos de mercancías.

Los estudios existentes sobre estos aspectos pueden clasificarse en dos grupos:

- Los que evalúan en detalle la rentabilidad económica o socioeconómica de las líneas dejando a un lado los aspectos técnicos (de Rus y Nash, 2007; de Rus, 2012).
- Los que abordan en profundidad aspectos técnicos como el diseño de una línea de alta velocidad en vía única (Petersen y Taylor, 1987), la localización y diseño de apartaderos (Yokota, 1979) o la relación entre número de vías y capacidad (Katsuta, Koseki y Sone, 2000) generalmente sin considerar la casuística particular de cada tramo de línea, su localización y evolución en el tiempo y los niveles de robustez requeridos y sin poner en relación estos aspectos con los económicos. A su vez, muchos de los trabajos existentes no están específicamente orientados a alta velocidad y aunque ésta utilice principios y elementos de los ferrocarriles clásicos, requiere un análisis específico.

1.2 OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo de esta tesis es realizar un análisis sistemático y conjunto de las dos dimensiones que afectan al diseño de líneas de alta velocidad (temporal y espacial) desde el punto de vista técnico y económico, presentado la *Metodología de diseño bidimensional de las líneas de alta velocidad* como herramienta para el diseño eficiente de las mismas.

Se considera diseño eficiente aquel que garantiza la disponibilidad, la robustez y el nivel de servicio adecuado a un coste asumible, no sólo en condiciones normales de explotación sino también en estados degradados.

El diseño de la infraestructura es un campo amplio que engloba diversos aspectos, por ejemplo la elección del trazado, los materiales que la constituyen o la determinación de parámetros como los radios de curva, peraltes, pendientes..., para lograr el tiempo de viaje objetivo teniendo presente el confort del viajero. Sin embargo, de aquí en adelante, cuando en este documento se mencione el diseño de infraestructura se referirá exclusivamente al diseño de la configuración de vías de la línea, que es una parte (la que aquí resulta relevante) del diseño de la infraestructura. El análisis se circunscribe a líneas de alta velocidad de nueva construcción y dedicadas al tráfico de viajeros. La influencia de la explotación de mercancías en el diseño, coste y mantenimiento de líneas de alta velocidad es analizada por (López Pita, 2014).

Esta reconsideración del diseño de las futuras líneas de alta velocidad resulta de especial interés en la actualidad por cuatro razones:

- Los principios de diseño de líneas de alta velocidad han permanecido inmutables desde hace 50 años y se requiere una revisión y actualización de los mismos con vistas a adaptarlos a los futuros requerimientos.
- La crisis económica ha supuesto una reducción de los fondos públicos por lo que es necesario optimizar su asignación, dedicándolos a aquellas actuaciones con un mayor retorno económico y social.
- En Europa, y en España en particular, se ha acometido ya la construcción de muchos de los tramos principales de líneas de alta velocidad, debiéndose diseñar y construir en un futuro, por razones de vertebración territorial, los tramos cuyo potencial de captación de demanda es más reducido y su situación en la red es periférica.
- Los países emergentes comenzarán a plantear sus líneas de alta velocidad en un entorno económico y tecnológico diferente al existente en Europa.

1.3 ESQUEMA DE LA TESIS

La tesis se estructura en los siguientes capítulos:

- En el Capítulo 2 se presentan las redes de alta velocidad de Japón, Francia y España, los servicios que en ellas se operan y las configuraciones respectivas de vías.
- En el Capítulo 3 se analizan las redes de alta velocidad de Japón, Francia y España mediante la aplicación de teoría de grafos y ciencia de redes con el objetivo de identificar las reglas que determinan su estructura y topología actual.
- En el Capítulo 4 se presenta el procedimiento empleado para la evaluación socioeconómica de líneas de alta velocidad, incluyéndose los modelos de cálculo de los costes de los diferentes agentes, incidiendo en los inductores de costes y aportando valores unitarios orientativos que pueden ser empleados a falta de valores reales.
- En el Capítulo 5 se analizan las dimensiones temporal y espacial desde el punto de vista técnico y se propone la *Metodología de diseño bidimensional de líneas de alta velocidad*, como herramienta de apoyo en la fase de diseño de una nueva línea de alta velocidad.
- En el Capítulo 6 se aplica la metodología a un caso ejemplo.
- En el Capítulo 7 se recogen los resultados más relevantes y se sugieren futuras líneas de investigación.

2. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DE LAS LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD EN EL MUNDO



Estación de Zaragoza Delicias (LAV Madrid-Barcelona-F. francesa)

2 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DE LAS LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD EN EL MUNDO

Antes de abordar un estudio teórico de las líneas de alta velocidad es relevante conocer la situación actual y analizar la concepción de los diferentes países que implementan sistemas de alta velocidad, ligadas a las características propias de la explotación, así como de la estructura territorial de cada país.

Muchos de los aspectos técnicos y operativos de la alta velocidad han sido analizados en detalle y están bien documentados. Sin embargo, no existe un conocimiento sistemático sobre el diseño eficiente de la configuración en planta de las líneas. Pese a ello, la operación de alta velocidad es exitosa, teniendo unos elevados índices de fiabilidad, disponibilidad y puntualidad.

Este capítulo está dedicado al estudio de las redes de alta velocidad de Japón, Francia y España puesto que sus peculiaridades, que se detallan a continuación, hacen estas redes particularmente interesantes. El objetivo es tratar de encontrar algunas de las reglas que subyacen en los diseños actuales.

En la 2.1. se presenta una descripción general de las redes de alta velocidad analizadas. La sección 2.2. muestra las configuraciones de vías de cada una de líneas de alta velocidad en operación. En la sección 2.3. se analizan y comparan las distancias entre dependencias del conjunto de las redes.

2.1 REDES DE ALTA VELOCIDAD DE JAPÓN, FRANCIA Y ESPAÑA

Desde que Japón inauguró su primera línea de alta velocidad (Shinkansen) en 1964, entre Tokyo-Osaka, varios países han adoptado y consolidado este modelo ferroviario. Actualmente en Europa se operan líneas de alta velocidad en doce países. Además, en los próximos años se espera que haya una importante expansión de la red de alta velocidad mundial puesto que muchas líneas están en fase de diseño o construcción.

Entre las redes de alta velocidad existente este estudio se centra en las de Japón, Francia y España por las razones que se indican a continuación.

Japón fue el país pionero en alta velocidad y las redes que se construyeron posteriormente tienen en mayor o menor medida inspiración japonesa. El sistema de alta velocidad japonés destaca a nivel mundial por el elevado número de viajeros que transporta cada día, lo que requiere operar numerosos servicios por hora y líneas dedicadas exclusivamente el tráfico de viajeros.

Francia fue el primer país europeo que inauguró una línea de alta velocidad y sus parámetros y soluciones fueron aplicados por otros países posteriormente. Una característica reseñable de la red de alta velocidad francesa son las múltiples conexiones con la convencional, con la que comparte ancho de vía.

El análisis de la red española de alta velocidad (AVE) es interesante por su estructura, la heterogeneidad de los servicios que en ella se operan y las conexiones con la red convencional, que tiene diferente ancho de vía y sistema de electrificación.

El objetivo de esta sección no es aportar una revisión exhaustiva de la evolución y las características de la redes de alta velocidad, puesto que existe abundante literatura al respecto, por ejemplo sobre la red de alta velocidad española se puede consultar (García Álvarez et al., 2009), (Soulié y Tricoire, 2002) está dedicado a la red de alta velocidad francesa y (The high-speed rail in Japan committee, 2009) al Shinkansen. Esta sección compendia aquellos aspectos que han condicionado la configuración y

características de las redes de alta velocidad de estos países y que pueden dividirse en dos categorías:

- *Operación ferroviaria*: densidad de tráfico, heterogeneidad de los servicios, niveles de disponibilidad requeridos en condiciones degradadas y características del material rodante.
- *Geografía y demografía del país*: distribución de la población, localización de los principales centros industriales y orografía.

2.1.1 *Red de alta velocidad en Japón*

La primera línea de alta velocidad en el mundo fue inaugurada en Japón en 1964 entre Tokyo y Osaka para solventar el problema de saturación de la línea convencional que ya había sido cuadruplicada en gran parte de su recorrido.

Aunque inicialmente la línea fue diseñada para admitir tráficos especiales de mercancías, lo que determinó su gálibo, finalmente el intenso tráfico diario y la necesidad de ejecutar trabajos de mantenimiento por la noche condujeron a limitar su uso a trenes de viajeros. De hecho, en la actualidad solo circulan trenes de viajeros de alta velocidad.

Una de las principales características de la red Shinkansen es su independencia de la red convencional. Ambas redes tienen diferente ancho de vía: 1.435 mm la de alta velocidad y 1.067 mm la convencional. Las líneas de Yamagata y Akita (Mini-Shinkansen), que provienen de la conversión de líneas convencionales existentes tienen el mismo ancho de vía que la red Shinkansen pero menor gálibo.

Existe una barrera interna en la red Shinkansen que hace imposible la conexión directa entre todas las líneas, la frecuencia del sistema de electrificación. Las líneas de Tokaido y Tohoku-Joetsu tienen frecuencias de electrificación diferentes y los trenes son monofrecuencia por lo que los viajeros tienen que transbordar en la estación de Tokyo Central.

La población de Japón supera los 127 millones de habitantes, siendo la superficie del país de 377.000 kilómetros cuadrados. El centro de Japón está dominado por montañas escarpadas y la mayor parte de las grandes ciudades y áreas industriales se han desarrollado a lo largo de la planicie costera. La ratio de terreno habitable frente al área total del país es sólo del 20% dando lugar a una elevada densidad de población en las zonas habitadas. La población japonesa se concentra en las ciudades, principalmente en las áreas metropolitanas de Tokyo, Osaka y Nagoya (Okada, 1994). Estas características geográficas y distribución de la población han dado lugar al desarrollo de una red lineal a lo largo de la costa este.

Desde el punto de vista de la operación ferroviaria, la alta velocidad japonesa se caracteriza por su elevada densidad de tráfico, tanto en número de trenes como de viajeros transportados, y por operar diferentes tipos de servicios (directos y con paradas) lo que hace muy comunes los adelantamientos (García Álvarez, 2010a).

Las distancias entre estaciones son cortas debido a la alta densidad de población y la localización de las ciudades a lo largo de las líneas. Cabe reseñar la existencia apeaderos.

La Figura 2.1. muestra el estado de la red de alta velocidad japonesa en 2014.



Figura 2.1. Red de alta velocidad de Japón (2014)

Respecto a la evolución de la red Shinkansen, desde la exitosa inauguración del Tokaido en 1964 se han llevado a cabo las siguientes actuaciones:

- El Sanyo Shinkansen fue inaugurado entre Shin-Osaka y Okayama en 1972 y entre Okayama y Hakata en 1975.
- El Joetsu Shinkansen fue inaugurado en 1982 entre Omiya and Niigata.
- El Tohoku Shinkansen fue inaugurado entre Omiya y Morioka en 1982, entre Ueno y Morioka en 1985 y en 1991 entre Tokyo y Ueno. La extensión del Tohoku Shinkansen entre Morioka y Hachinohe fue inaugurada en 2002 y entre Hachinohe y Shin-Aomori en 2010.
- El Hokuriku Shinkansen fue inaugurado en 1997 entre Takasaki y Nagano. En la actualidad se encuentra en construcción el tramo que enlaza Kanazawa, Tsuruga y Osaka.

- El Kyushu Shinkansen fue inaugurado entre Shin Yatsushiro y Kagoshima-Chuo en 2004 y entre Shin Yatsushiro y Hakata en 2011.

2.1.1.1 Servicios

En la red de alta velocidad japonesa coexisten servicios con diferentes velocidades máximas, que van desde los 240 km/h a los 300 km/h, y distintos patrones de paradas, siendo notable la heterogeneidad del tráfico tal y como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Denominación de los servicios Shinkansen en función de su velocidad

Línea	Tipo de servicio		
	Rápido	Normal	Lento
Tokaido	Nozomi	Hikari	Kodama
Sanyo	Nozomi	Hikari	Kodama
Tohoku	Hayate	Yamabiko	Nasuno
Joetsu	Toki		Tanigawa
Hokuriku	Asama		
Kyushu	Tsubame		
Akita	Komachi		
Yamagata	Tsubasa		

Fuente: (Pigem Cameselle, 2008)

2.1.2 Red de alta velocidad en Francia

La primera línea de alta velocidad en Francia se inauguró en 1981 para enlazar París con Lyon y solventar el problema de capacidad que existía en la línea convencional París-Lyon-Marseille. Al mismo tiempo se pretendía recuperar los viajeros que el ferrocarril había perdido en favor de la aviación y el vehículo privado por lo que era necesario minimizar el tiempo de viaje entre las ciudades. Ello dio lugar a una línea con escasas estaciones intermedias en las que además se operaban pocos servicios, dando prioridad a la conexión entre las principales ciudades en las que las estaciones se ubican en el centro.

Sin embargo, el deseo de contribuir a la integración del territorio nacional hizo que en las siguientes líneas se construyeran algunas estaciones intermedias para dar servicio a pequeñas ciudades (López Pita, 2010). Estas estaciones están normalmente lejos del centro de las ciudades, en el campo y sin conexiones con la red convencional, por ejemplo Haute-Picardie o Lorraine. Así al mismo tiempo que dan servicio a otras áreas el tiempo de viaje no se incrementa para los viajeros que viajan de origen a destino. Otras estaciones están diseñadas como intercambiadores modales, es el caso de Aeropuerto Charles de Gaulle, Lyon-Saint-Exupéry o Marne la Vallée Chessy.

Las características técnicas de las líneas francesas de alta velocidad las hacen adecuadas exclusivamente para trenes de alta velocidad ya que existen pocas estaciones y vías de maniobras. La única excepción es la sección en las inmediaciones de Tour del TGV Atlantique que también fue diseñada para admitir mercancías.

El enfoque adoptado para extender la red de alta velocidad es establecer conexiones que generen altos volúmenes de tráfico, es decir, entre las principales ciudades. Estos volúmenes de tráfico son difíciles de alcanzar si no se considera París, de ahí la topología radial de la red con centro en París (Rodríguez Bugarín, Novales Ordax y Orro Arcay, 2005).

Una de las peculiaridades de las líneas francesas de alta velocidad es la existencia de puestos de banalización que disponen de vías para el estacionamiento de vehículos de mantenimiento.

La Figura 2.2 muestra la red de alta velocidad francesa en operación junto con las líneas convencionales empleadas por los trenes de alta velocidad.

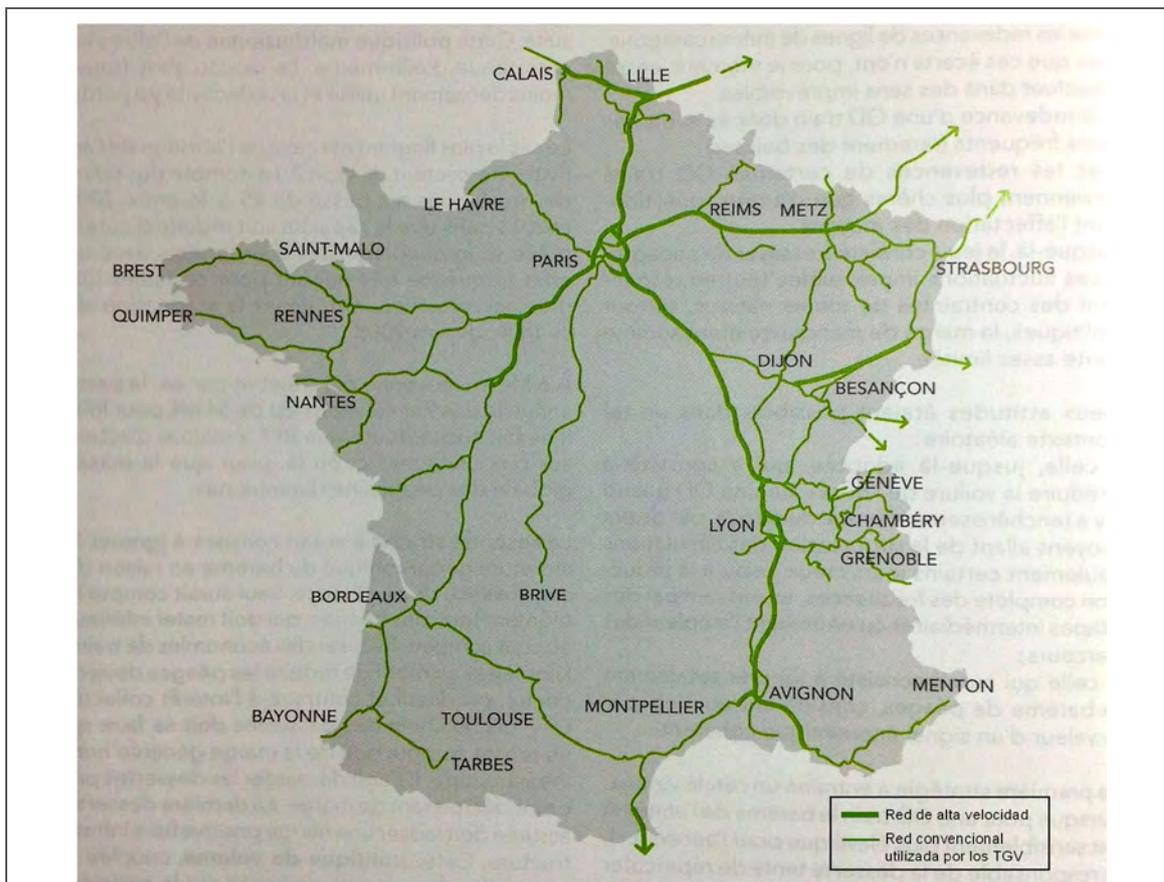


Figura 2.2. Red francesa de alta velocidad
Fuente: (Leboeuf, 2014)

Tanto la red de alta velocidad como la convencional tienen el mismo ancho de vía (1.435 mm) lo que permite múltiples conexiones entre ellas. Los trenes de alta velocidad franceses continúan sus recorridos por líneas convencionales y otros países europeos simplemente cambiando su sistema de señalización y tensión. Por ello es fundamental que los trenes puedan operar al menos en dos tensiones. El material que actualmente circula en las líneas francesas de alta velocidad es:

- TGV Sud-Est. Bi-tensión: 25 kV 50 Hz / 1500 V cc (Francia). Tri-tensión: 25 kV 50 hZ / 1500 V cc (Francia) y 15 kV 16 2/3 Hz (Suiza).
- TGV Postal. Bi-tensión: 25 kV 50 Hz / 1500 V cc (Francia).
- TGV Atlantique. Bi-tensión: 25 kV 50 Hz / 1500 V cc (Francia).
- TGV Réseau. Tri-tensión: 25 kV 50 Hz (Francia), 3000 V cc (Bélgica) and 1500 V cc (Francia).
- TGV TMST (Eurostat). Tri-tensión: 25 kV 50 Hz (Francia), 3000 V cc (Bélgica) and 750 V cc (Inglaterra).
- TGV PBKA (París, Bruselas, Koln, Amsterdam): 25 kV 50 Hz (Francia), 1500 V (Holanda), 3000 V cc (Bélgica) and 15 kV 16 2/3 Hz (Alemania).
- TGV Duplex. Bi-tensión: 25 kV 50 hZ / 1500 V cc (Francia y España).
- TGV POS. Tri-tensión: 25 kV 50 hZ / 1500 V cc (Francia) and 15 kV 16 2/3 Hz (Alemania).

- Euro TGV. Tri-tensión: 25 kV 50 hZ / 1500 V cc (Francia) and 15 kV 16 2/3 Hz (Suiza).

Respecto a las líneas que constituyen la red de alta velocidad:

- La primera fue la ya mencionada París-Lyon denominada LGV Sud-Est, inaugurada en 1981 entre St Florentin – Lyon Sathonay y prolongada en 1983 entre Combs la Ville (París) y St Florentin.
- A la LGV Sud-Est le siguió la LGV-Atlantique, que enlaza París con Le Mans y Tours mediante un tronco común que se ramifica en Courtalain para alcanzar ambos destinos. In 1989 se inauguró la sección Bagneux (París) – Connerré Junction (Le Mans) y en 1990 la sección Courtalain Junction-Monts Junction (Tours).
- En 1993 se inauguró la LGV-Nord Europe entre París y Lille donde se ramifica para continuar al oeste hacia Calais donde conecta con el túnel del Canal de la Mancha y al este hacia Bruselas.
- Entre 1994 y 1996 se inauguró la LGV-Interconnexion para conectar la LGV Nord, LGV Sud-Est y LGV Atlantique.
- En 1992 se inauguró la LGV-Rhône-Alpes entre Montanay Junction y Lyon-Saint-Exupéry y en 1994 la extensión Lyon-Saint-Exupéry – St Marcel les Valence.
- En 2001 se inauguró la LGV Méditerranée que enlaza Valence con Marseille y Nîmes, con una bifurcación en Anglès.
- En 2007 se inauguró la primera sección de la LGV Est Européenne que enlazará París con Strasbourg y continuará hacia Alemania.
- En 2010 se inauguró el tramo Figueres-Perpignan.
- En 2011 se inauguró la primera sección de la línea LGV Rhin-Rhône entre Villers-les-Pots y Mulhouse.

2.1.2.1 Servicios

Los servicios que circulan en la red francesa de alta velocidad tienen un nombre comercial de acuerdo con las rutas que realizan, pero no con sus características operacionales (número de paradas o velocidad máxima). Los nombres comerciales establecidos por son:

- *TGV*: servicios de alta velocidad franceses.
- *TGV Lyria*: circula entre Francia y Suiza.
- *Thalys*: enlaza París, Bruselas, Köln y Amsterdam.
- *Eurostar*: enlaza París, Londres, Bruselas y Frankfurt.
- *Artesia Jour*: circula entre Francia e Italia.
- *AVE-TGV*: circula entre Francia y España.

Todos los trenes que emplean la red de alta velocidad son autopulsados eléctricos.

2.1.3 Red de alta velocidad en España

España es junto con China el país que ha experimentado un crecimiento más rápido de su red de alta velocidad. En 2014 la longitud de la red de alta velocidad era de 2.322 kilómetros en ancho internacional y 84 kilómetros en ancho ibérico.

La red está dedicada exclusivamente al tráfico de viajeros a excepción del tramo Barcelona-Figueres. La línea Madrid-Sevilla fue diseñada para admitir tráfico de mercancías, aunque este hecho nunca se ha producido. Existe una considerable heterogeneidad entre los diferentes servicios: diferentes velocidades máximas (300

km/h, 250 km/h y 200 km/h) y configuraciones (trenes autopropulsados de alta velocidad, autopropulsados de ancho variable y trenes convencionales). España fue también pionera en el establecimiento de servicios regionales de alta velocidad (Lanzadera y posteriormente Avant).

Una de las características de la red de alta velocidad española es su ancho de vía (1.435 mm) que es diferente del de la red convencional (1.668 mm). Sin embargo, ambas redes están conectadas en algunos puntos mediante cambiadores de ancho.

Respecto a la localización de estaciones, debe subrayarse que algunas se sitúan en pequeñas ciudades como Puertollano, Calatayud, Puente Genil o Antequera. Además, al igual que ocurre en Francia, algunas estaciones están muy alejadas de los núcleos de población, es el caso de Segovia-Guiomar, Camp de Tarragona, Cuenca Fernando Zobel o Guadalajara-Yebes.

En España se diferencian dos generaciones de líneas, la primera comprende la línea Madrid-Sevilla y la segunda comenzó con la línea Madrid-Barcelona con la que se definieron los parámetros que se aplicaron a las siguientes líneas. Las principales diferencias entre ambas generaciones son el diseño general de la línea, las pendientes máximas, el gálibo y el sistema de señalización.

La Figura 2.3. muestra la red de alta velocidad española junto con la red convencional.



Figura 2.3. Red de alta velocidad española (enero de 2015)

Autor: Luis E. Mesa

A simple vista se observa que la red de alta velocidad española en operación y en construcción, al igual que sucede con la red convencional, tiene una marcada estructura troncal y radial, con centro en Madrid. Las distancias entre la capital española y las principales ciudades (Barcelona, Sevilla, Valencia y Málaga) están en el rango de 400 a 600 kilómetros, en el cual para poder competir con el avión los tiempos de viaje deben

estar entre 2 y 3 horas, es por ello por lo que la velocidad máxima de circulación es de 300 km/h y existen servicios AVE directos.

Respecto a la cronología de la red de alta velocidad española:

- La línea Madrid-Sevilla fue inaugurada en 1992.
- La línea Madrid-Barcelona-Frontera francesa fue inaugurada en fases entre 2003 y 2013. En 2003 se inauguró la sección entre Madrid y Lleida, en 2006 el tramo entre Lleida y Camp de Tarragona y los baipases de Zaragoza y Lleida, en 2008 la sección entre Camp de Tarragona y Barcelona Sants, en 2010 los tramos entre Figueres y túnel de Le Pertús y Nudo de Mollet a Girona y en 2013 entre Barcelona Sants y Figueres.
- La conexión Zaragoza-Huesca es de vía única y se inauguró en 2003 y consta de dos secciones: entre Zaragoza y Tardienta en ancho internacional y entre Tardienta y Huesca equipada con tercer carril.
- En 2005 se inauguró la sección La Sagra-Toledo como un ramal de la línea Madrid-Sevilla.
- La línea Córdoba-Málaga fue inaugurada en fases, en 2006 la sección entre Almodóvar del Río (Córdoba) y Antequera y en 2007 la sección entre Antequera y Málaga.
- En 2007 se inauguró la línea Madrid-Segovia-Valladolid, sección que dará acceso en el futuro a los corredores norte y noroeste.
- La línea Madrid-Levante se inauguró en fases. En 2010 se pusieron en servicios los tramos Madrid-Valencia y Motilla del P.-Albacete y en 2013 el tramo Albacete-Alicante.
- En 2011 se inauguró la primera línea de alta velocidad en ancho convencional (provisionalmente) que enlaza Ourense, Santiago de Compostela y A Coruña.
- Además, hay conexiones de alta velocidad entre las líneas Madrid-Sevilla y Madrid-Barcelona y entre las líneas Madrid-Sevilla y Madrid-Levante. En la actualidad existen numerosos tramos en construcción.

2.1.3.1 Servicios

Los servicios que se operan en la red de alta velocidad se agrupan comercialmente en cuatro categorías:

- *AVE*: servicios de alta velocidad y larga distancia operados con trenes autopropulsados eléctricos. Su velocidad máxima es de 300 km/h (310 km/h en la sección Madrid-Lleida de la línea Madrid-Barcelona), algunos de estos trenes son directos y otros realizan paradas intermedias.
- *Avant*: servicios alta velocidad y media distancia operados por trenes autopropulsados eléctricos cuya velocidad máxima es de 250 km/h.
- *Alvia*: servicios de larga distancia operados por trenes autopropulsados eléctricos de ancho variable que realizan una parte de su recorrido por línea de alta velocidad y otra por convencional. Su velocidad máxima es de 250 km/h en líneas de alta velocidad y 200 km/h en líneas convencionales. Además, existen trenes de la serie 730 fabricados por Talgo que pueden circular también por líneas sin electrificar a una velocidad máxima de 180 km/h.
- *Altaria*: servicios de larga distancia prestados por composiciones de ancho variable remolcadas por locomotoras eléctricas o diésel. Su velocidad máxima en las líneas de alta velocidad, en las que siempre circulan en tracción eléctrica, es de 200 km/h.

2.2 CONFIGURACIÓN DE VÍAS DE LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD EN SERVICIO

En todas las líneas ferroviarias existen elementos comunes, son las denominadas dependencias de circulación: estaciones, apeaderos, apartaderos y puestos de banalización. Sin embargo, su localización y configuración de vías no son siempre iguales. Por ello en este apartado se recoge una descripción de cada una de las líneas y los esquemas de las plantas de vías y se analizan las distancias entre dependencias.

2.2.1 Líneas de alta velocidad de Japón

Tōkaidō Shinkansen (Tokyo – Shin-Osaka)

En la Tabla 2.2. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.2. Características básicas de la línea Tōkaidō Shinkansen (Japón)

Año de inauguración	1964
Velocidad máxima (km/h)	270
Tipo de tráfico	Viajeros
Porcentaje de vía doble	100%
Conexiones con la red convencional	0
Longitud total (km)	515,4

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.4. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

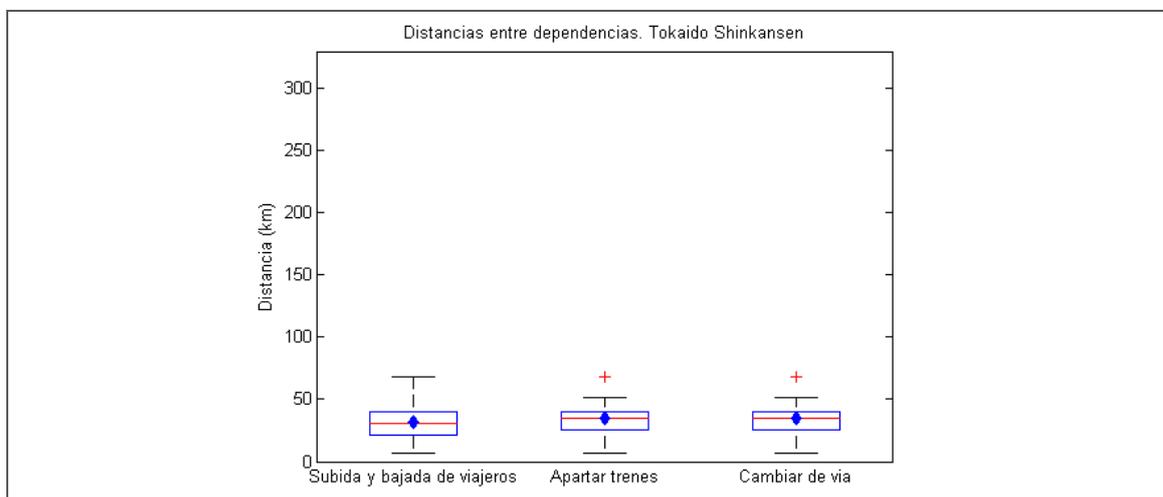


Figura 2.4. Distancia (km) entre dependencias de la línea Tōkaidō Shinkansen (Japón)

Fuente: Elaboración propia

La distancia media entre dependencias que permiten la subida y bajada de viajeros es de 32,21 kilómetros. La distancia media entre dependencias que permiten apartar trenes es de 34,36 kilómetros. La línea cuenta con 16 estaciones y un apeadero. En las estaciones de Shinagawa, Nagoya y Mishima las vías de apartado se ubican entre las generales y existen vías adicionales para el estacionamiento de trenes. La estación de Shinagawa se considera una subterminal de la estación de Tokyo y fue inaugurada en 2003 para estacionar trenes y evitar así su desplazamiento a la base de material de Tokyo.

En la Figura 2.5. se muestran los esquemas de vías de la línea.

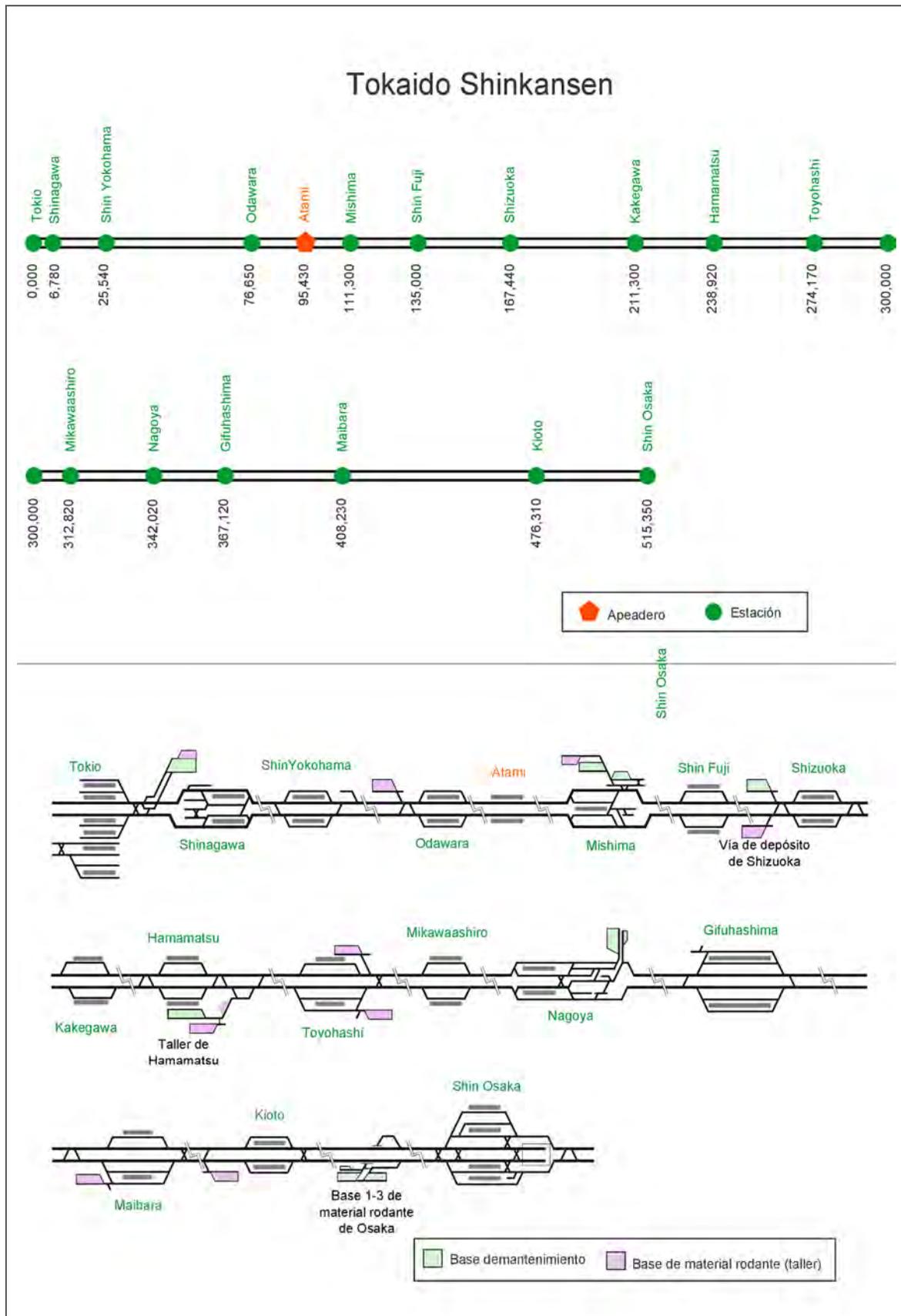


Figura 2.5. Esquema de dependencias de la línea Tōkaidō Shinkansen (Japón)
Fuente: Elaboración propia

Sanyō Shinkansen (Shin-Osaka – Estación Hakata)

En la Tabla 2.3. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.3. Características básicas de la línea Sanyō Shinkansen (Japón)

Año de inauguración	1972
Velocidad máxima (km/h)	300
Tipo de tráfico	Viajeros
Porcentaje de vía doble	100%
Conexiones con la red convencional	0
Longitud total (km)	1077,6

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.6. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

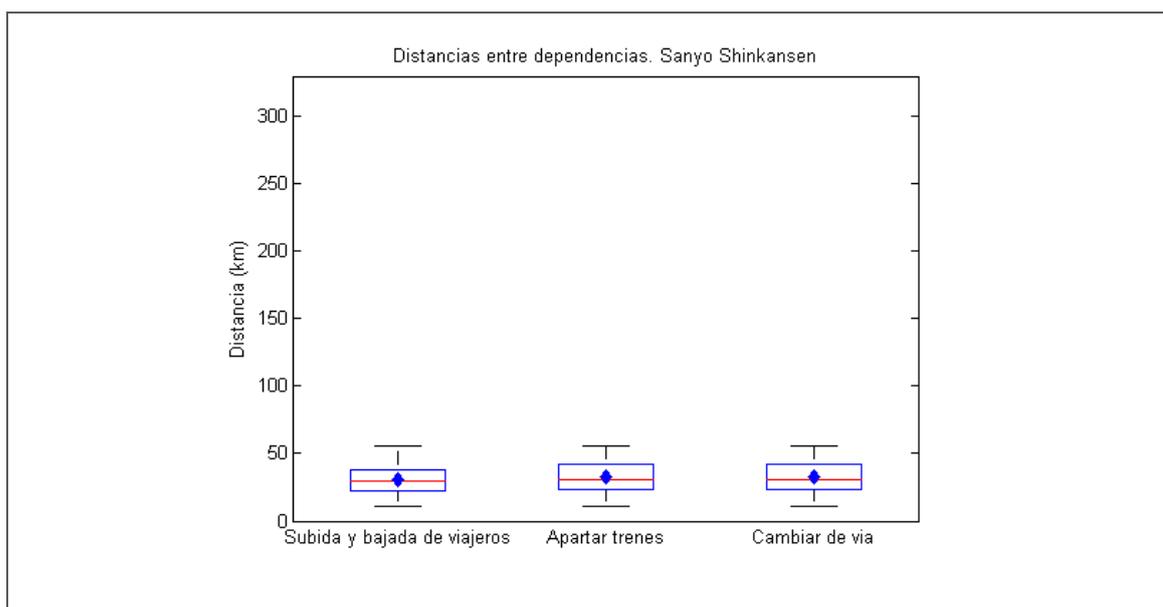


Figura 2.6. Distancia (km) entre dependencias de la línea Sanyō Shinkansen (Japón)

Fuente: Elaboración propia

La línea dispone de 18 estaciones y un apeadero. La distancia media entre dependencias que permiten la subida y bajada de viajeros de 30,76 kilómetros. La distancia media entre dependencias que permiten apartar trenes es de 32,57 kilómetros. El principio de diseño de las estaciones del Sanyō Shinkansen fue dotarlas de dos vías de apartado con andén con la excepción de Shin Kobe en la que existían algunas limitaciones geográficas.

Con el fin de facilitar la operación en caso de incidencia las estaciones de Himeji, Shin Shimonoseki y Shin Iwakuni disponen de una vía adicional de apartado.

En la Figura 2.7. se muestran los esquemas de vías de la línea.

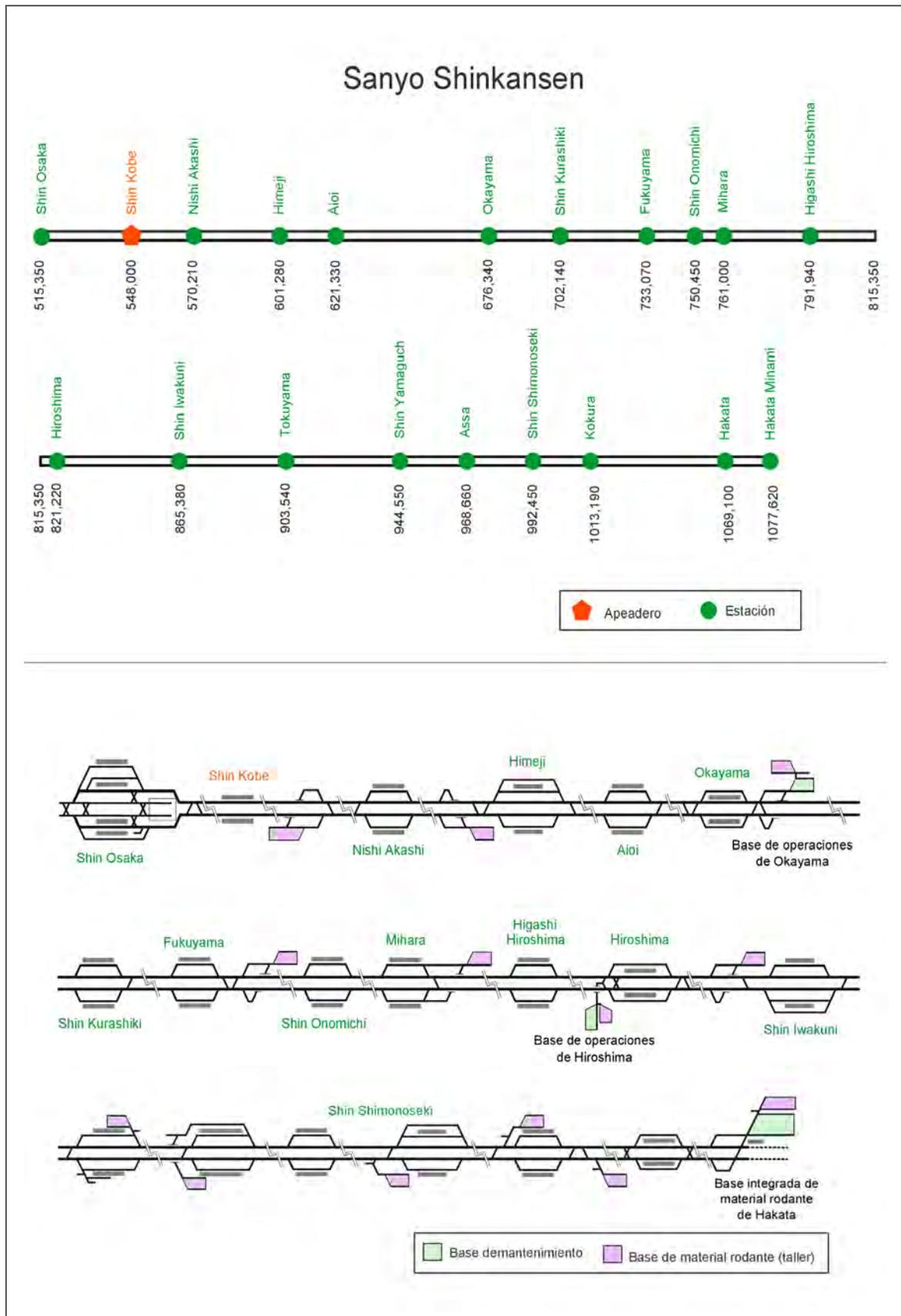


Figura 2.7. Esquema de dependencias de la línea Sanyō Shinkansen (Japón)
Fuente: Elaboración propia

Tōhoku Shinkansen (Tokyo – Shin-Aomori)

En la Tabla 2.4. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.4. Características básicas de la línea Tōhoku Shinkansen (Japón)

Año de inauguración	1982
Velocidad máxima (km/h)	275
Tipo de tráfico	Viajeros
Porcentaje de vía doble	100%
Conexiones con la red convencional	0
Longitud total (km)	593,1

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.8. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

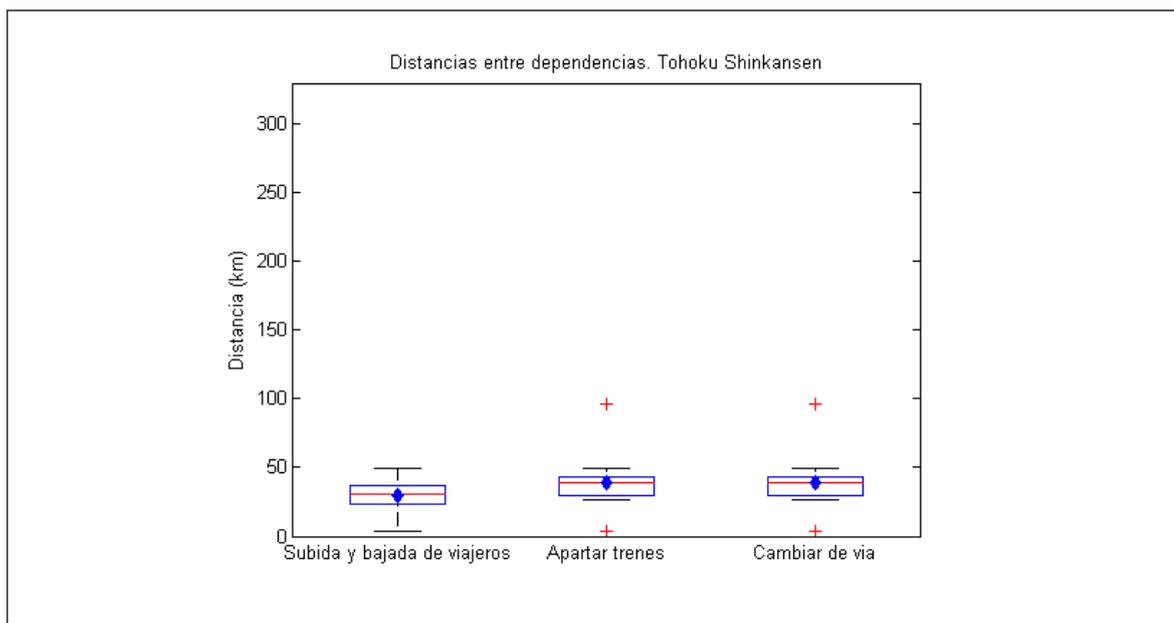


Figura 2.8. Distancia (km) entre dependencias de la línea Tōhoku Shinkansen (Japón)

Fuente: Elaboración propia

La línea dispone de 16 estaciones y cinco apeaderos. La distancia media entre dependencias que permiten la subida y bajada de viajeros de 29,65 kilómetros. La distancia media entre dependencias que permiten apartar trenes es de 39,54 kilómetros.

En la estación de Omiya la línea se bifurca dando acceso al Hokuriku Shinkansen y Joetsu Shinkansen.

Las estaciones intermedias tienen una configuración de dos vías de apartado con andén excepto las estaciones de Oyama, Nasushiobara, Koriyama, Fukushima, Shiraishizao, Kitagami que disponen de vías adicionales.

En la Figura 2.9. se muestran los esquemas de vías de la línea.

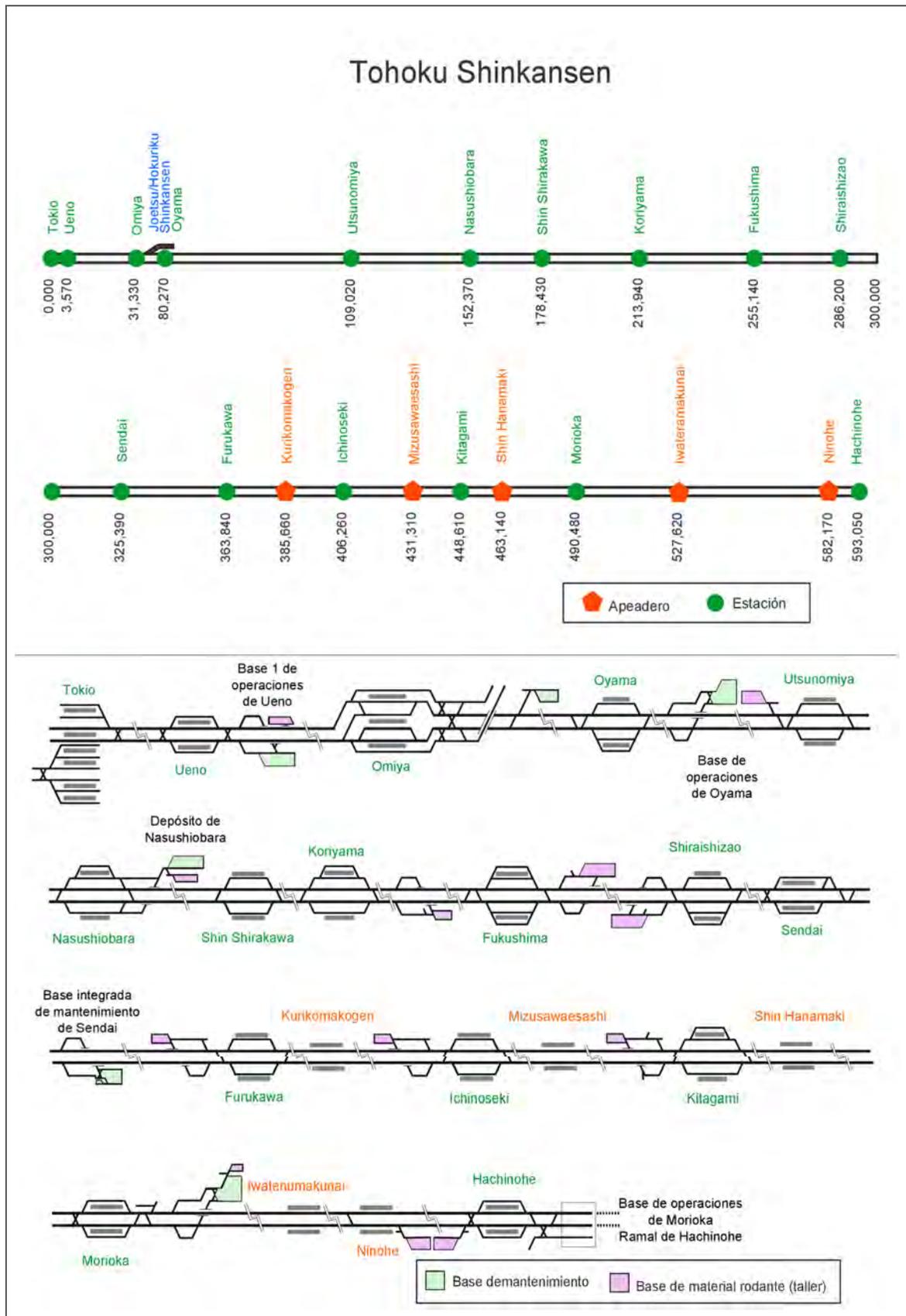


Figura 2.9. Esquema de dependencias de la línea Tōhoku Shinkansen (Japón)
Fuente: Elaboración propia

Jōetsu Shinkansen (Ōmiya – Niigata)

En la Tabla 2.5. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.5. Características básicas de la línea Jōetsu Shinkansen (Japón)

Año de inauguración	1982
Velocidad máxima (km/h)	275
Tipo de tráfico	Viajeros
Porcentaje de vía doble	100%
Conexiones con la red convencional	0
Longitud total (km)	269,5

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.10. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

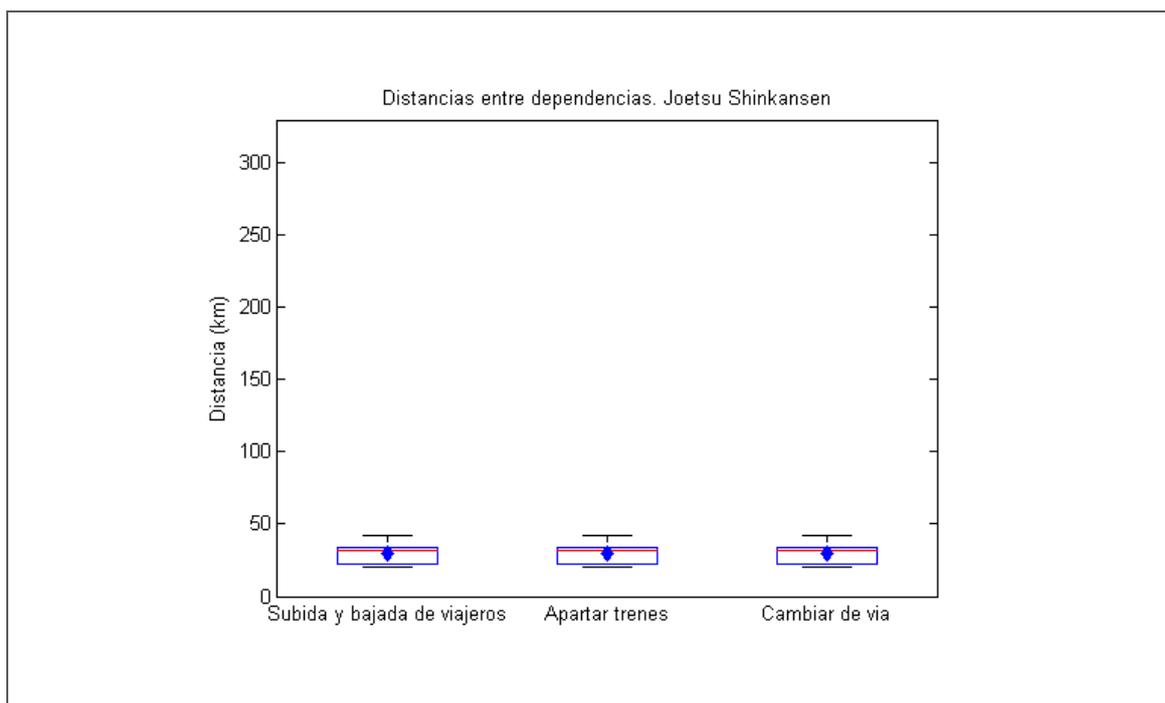


Figura 2.10. Distancia (km) entre dependencias de la línea Jōetsu Shinkansen (Japón)
Fuente: Elaboración propia

La línea dispone de 10 estaciones siendo la distancia media entre ellas de 29,95 kilómetros. En la estación de Takasaki la línea se bifurca dando acceso al Hokuriku Shinkansen.

Las estaciones intermedias tienen una configuración de dos vías de apartado con andén excepto las estaciones de Kumagaya, Takasaki, Echigoyuzawa y Tsubamesanjo que disponen de vías adicionales.

En la Figura 2.11. se muestran los esquemas de vías de la línea.

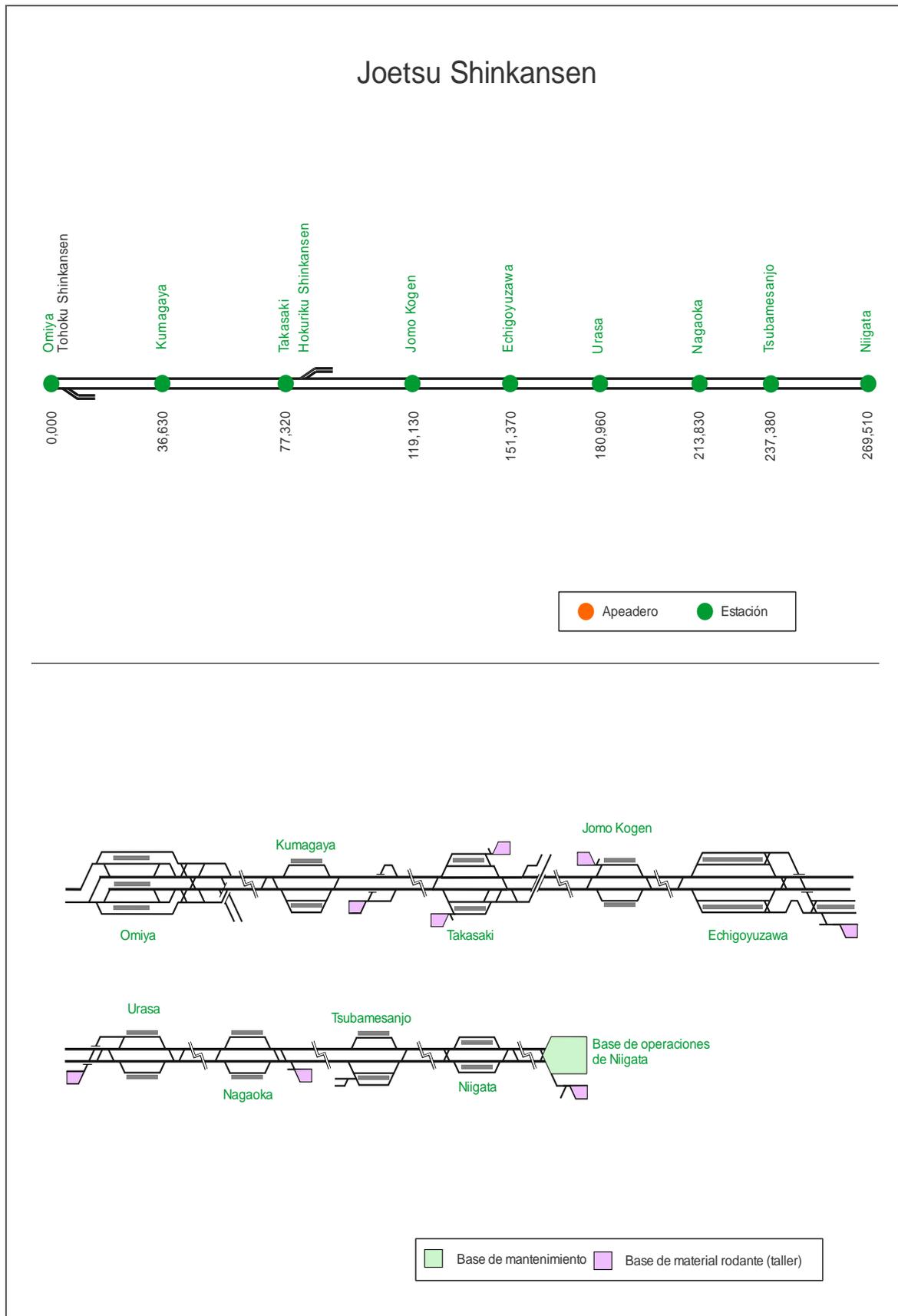


Figura 2.11. Esquema de dependencias de la línea Jōetsu Shinkansen (Japón)
Fuente: Elaboración propia

Hokuriku Shinkansen o Nagano Shinkansen (Takasaki – Nagano)

En la Tabla 2.6. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.6. Características básicas de la línea Hokuriku Shinkansen

<i>Año de inauguración</i>	1997
<i>Velocidad máxima (km/h)</i>	260
<i>Tipo de tráfico</i>	Viajeros
<i>Porcentaje de vía doble</i>	100%
<i>Conexiones con la red convencional</i>	0
<i>Longitud total (km)</i>	117,4

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.12. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

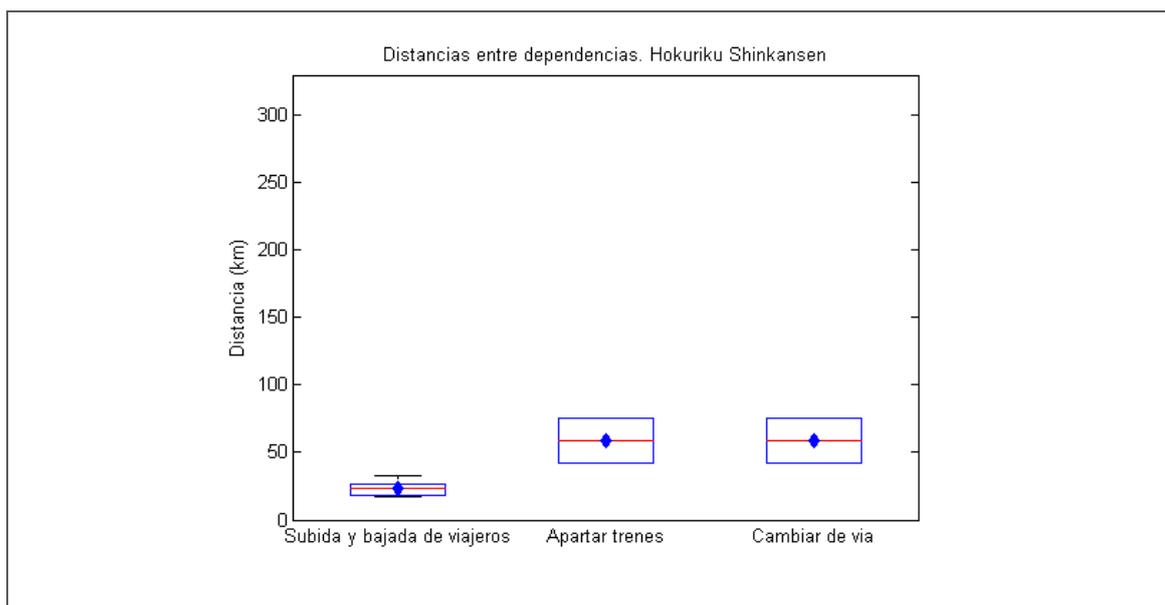


Figura 2.12. Distancia (km) entre dependencias de la línea Hokuriku Shinkansen (Japón)

Fuente: Elaboración propia

La línea dispone de tres estaciones y tres apeaderos. La distancia media entre dependencias que permiten la subida y bajada de viajeros de 23,48 kilómetros. La distancia media entre dependencias que permiten apartar trenes es de 58,70 kilómetros. En Takasaki la línea se bifurca dando acceso al Joetsu Shinkansen. Las estaciones disponen de dos vías de apartado con andén.

En la Figura 2.13. se muestran los esquemas de vías de la línea.

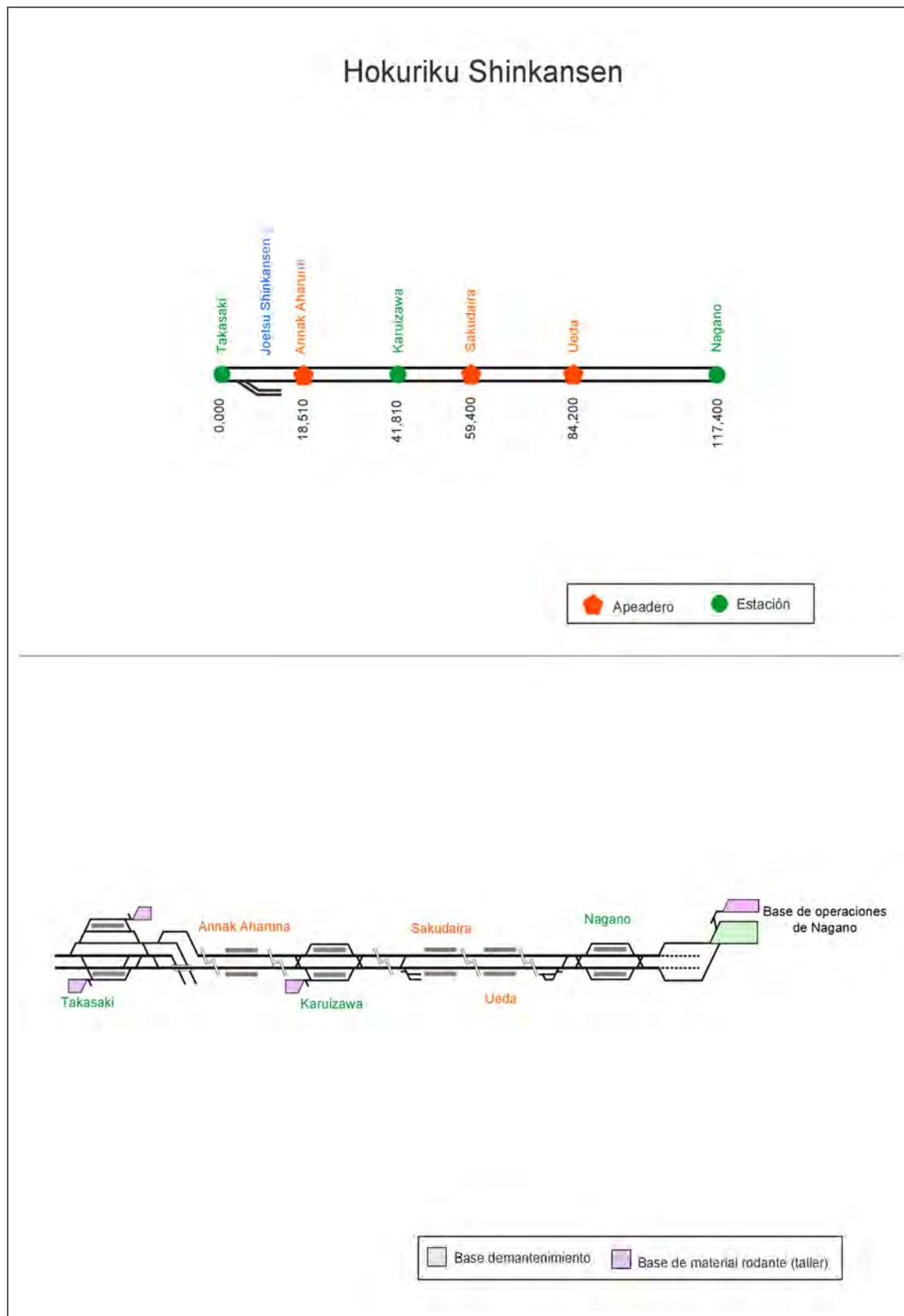


Figura 2.13. Esquema de dependencias de la línea Hokuriku Shinkansen (Japón)
Fuente: Elaboración propia

2.2.2 Líneas de alta velocidad de Francia

2.2.2.1 Línea de alta velocidad París Sud-Est (LN1)

En la Tabla 2.7. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.7. Características básicas de la línea París Sud-Est (Francia)

Año de inauguración	1981
Velocidad máxima (km/h)	300
Tipo de tráfico	Viajeros
Porcentaje de vía doble	100%
Conexiones con la red convencional	6
Longitud total (km)	391,1

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.14. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

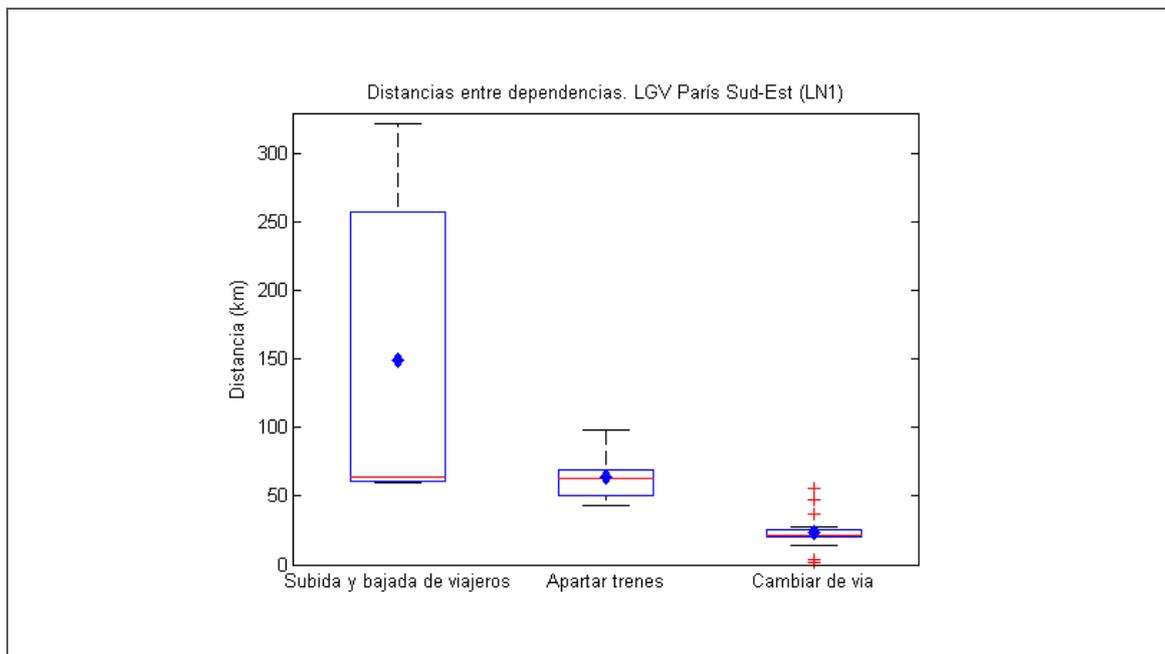


Figura 2.14. Distancia (km) entre dependencias de la línea París Sud-Est (Francia)

Fuente: Elaboración propia

La línea enlaza París Gare de Lyon con Lyon Part Die, aunque estaciones de alta velocidad propiamente dichas en la línea hay dos. La distancia media entre estaciones de 148,9 kilómetros, aunque las estaciones de París y Le Creusot distan 322,516 kilómetros.

Dispone de cuatro apartaderos con una única vía con andén, siendo la distancia media entre dependencias que permiten apartar trenes de 63,82 kilómetros. Cuenta con 12 puestos de banalización, de los cuales tres disponen de vías auxiliares.

Existen cuatro conexiones con la red convencional y dos con otras líneas de alta velocidad: LGV Interconnexion en el Triángulo de Coubert y LGV Rhône-Alpes en la Bifurcación de Montanay.

En la Figura 2.15. se muestran los esquemas de vías de la línea.

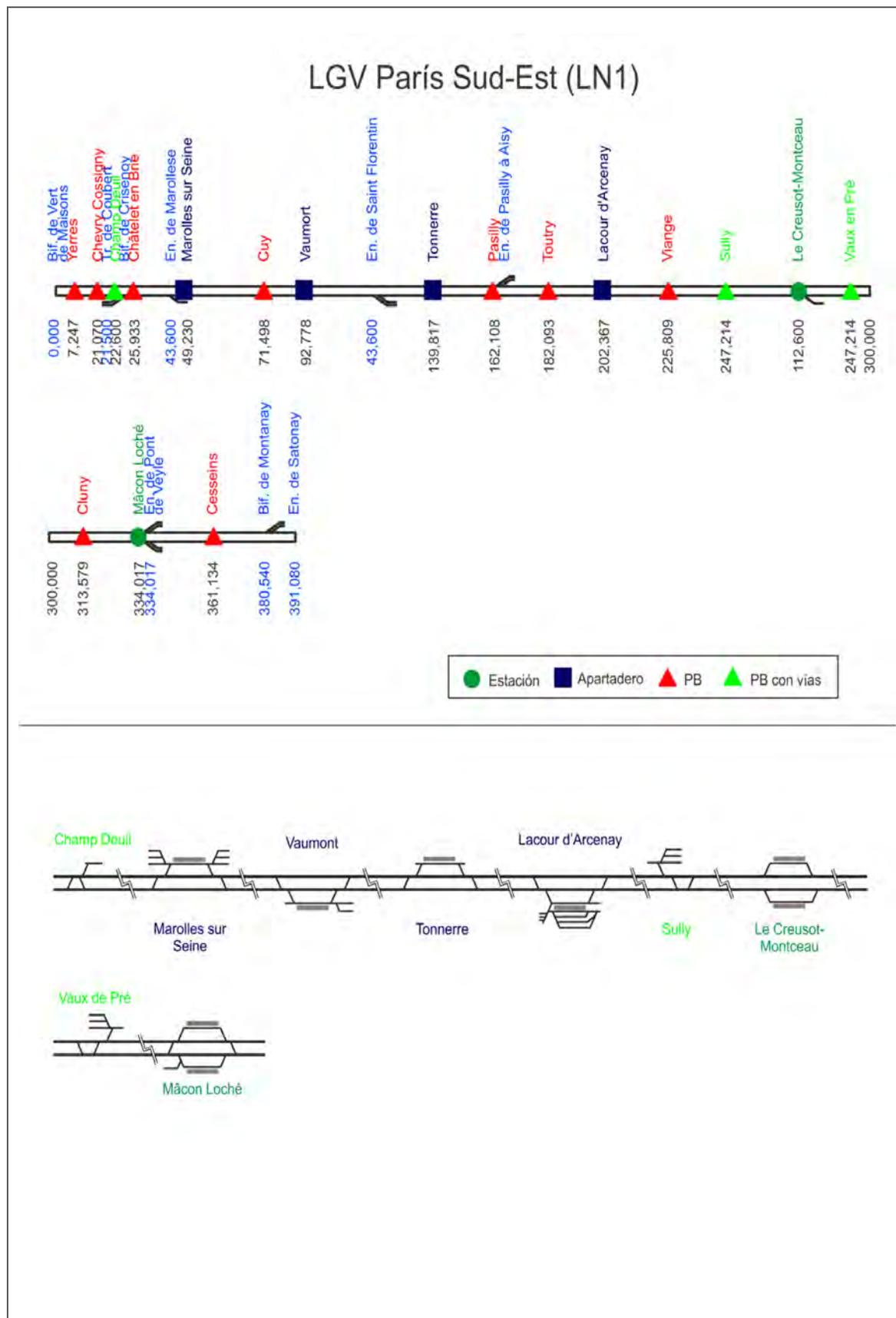


Figura 2.15. Esquema de dependencias de la línea París Sud-Est (Francia)
Fuente: Elaboración propia

2.2.2.2 Línea de alta velocidad Atlantique (LN2)

En la Tabla 2.8. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.8. Características básicas de la línea Atlantique (Francia)

<i>Año de inauguración</i>	1989
<i>Velocidad máxima (km/h)</i>	300
<i>Tipo de tráfico</i>	Viajeros
<i>Porcentaje de vía doble</i>	100%
<i>Conexiones con la red convencional</i>	5
<i>Longitud total (km)</i>	279

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.16. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

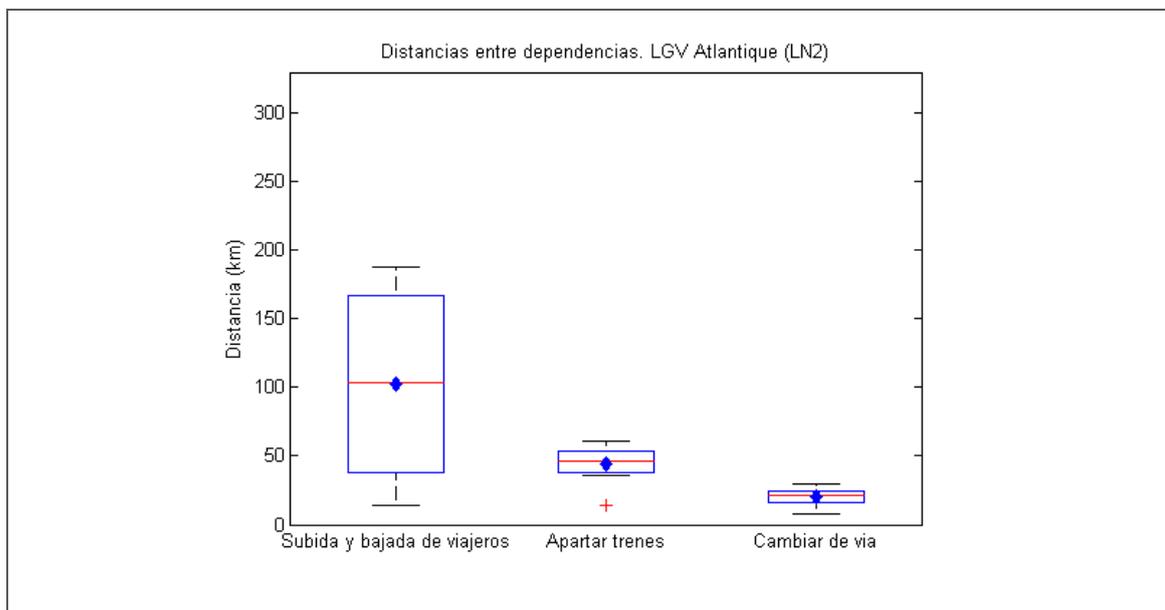


Figura 2.16. Distancia (km) entre dependencias de la línea Atlantique (Francia)

Fuente: Elaboración propia

La línea enlaza París Gare Montparnasse con Le Mans y Tours mediante un tronco común que se separa en dos ramas en Bifurcación de Courtalain, Dichas estaciones no son de alta velocidad, las estaciones intermedias de alta velocidad por las que discurre son dos. La distancia media entre estaciones, considerándolas todas es de 102,25 kilómetros.

La línea cuenta con tres apartaderos dotados de una única vía con andén y ocho puestos de banalización. La distancia media ente dependencias que permiten apartar trenes es de 44,13 kilómetros y entre dependencias para cambiar de vía de 20,60 kilómetros.

Dispone de tres enlaces intermedios con la red convencional y otros dos en Connerré y Monts en los extremos. La rama de Le Mans conectará con la futura LGV Bretagne-Pays de la Loire.

En la Figura 2.17. se muestran los esquemas de vías de la línea.



Figura 2.17. Esquema de dependencias de la línea Atlántica (Francia)
Fuente: Elaboración propia

2.2.2.3 Línea de alta velocidad Nord Europe (LN3)

En la Tabla 2.9. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.9. Características básicas de la línea Nord Europe (Francia)

Año de inauguración	1993
Velocidad máxima (km/h)	300
Tipo de tráfico	Viajeros
Porcentaje de vía doble	100%
Conexiones con la red convencional	5
Longitud total (km)	323,7

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.18. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

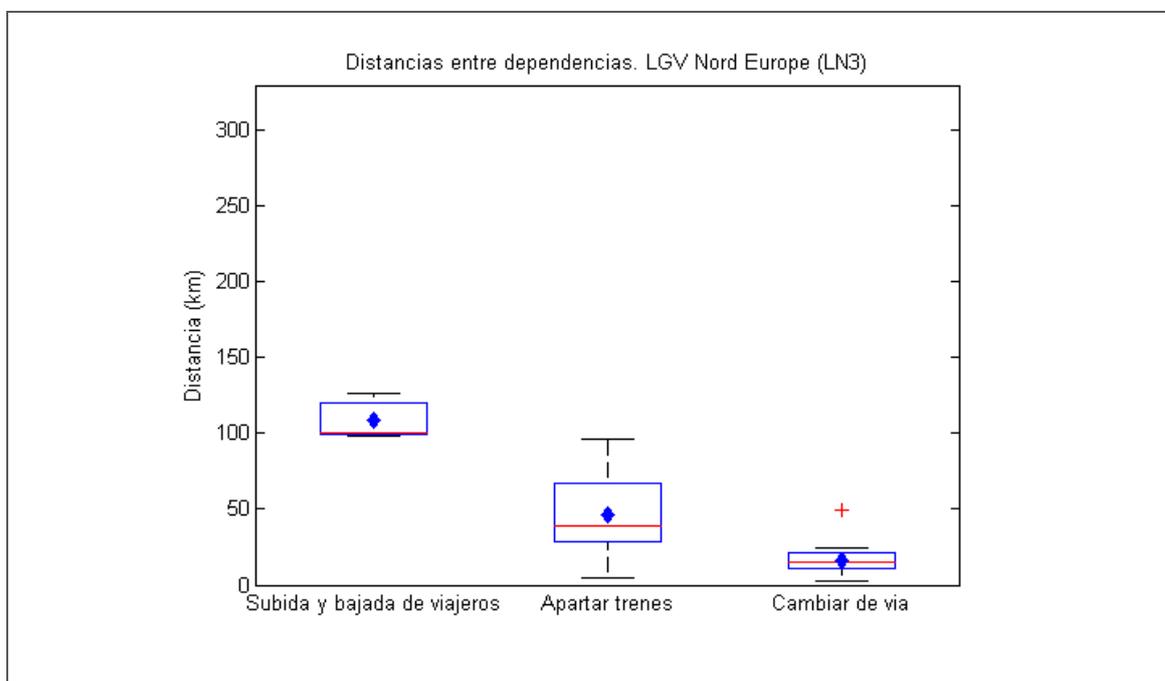


Figura 2.18. Distancia (km) entre dependencias de la línea Nord Europe (Francia)

Fuente: Elaboración propia

Consta de un tronco común entre París Gare du Nord y el Triángulo de Fretin donde se ramifica para conectar con el Eurotunnel y Bruselas.

París Gare du Nord no se encuentra en la línea de alta velocidad, si lo están las estaciones TGV Haute Picardie, Lille Europe y Calais Frethun. La distancia media entre estaciones es de 108,61 kilómetros.

El conjunto de la línea dispone de cinco apartaderos con una única vía con andén. La distancia media entre dependencias que permiten apartar trenes es de 46,55 kilómetros. Existen 13 puestos de banalización de los cuales dos cuentan con vías auxiliares. La distancia media entre dependencias que permiten cambiar de vía es de 16,30 kilómetros.

La línea conecta con la LGV Interconnexion en el Triángulo de Vémars. Además, existen cinco conexiones con la red convencional.

En la Figura 2.19. se muestran los esquemas de vías de la línea.

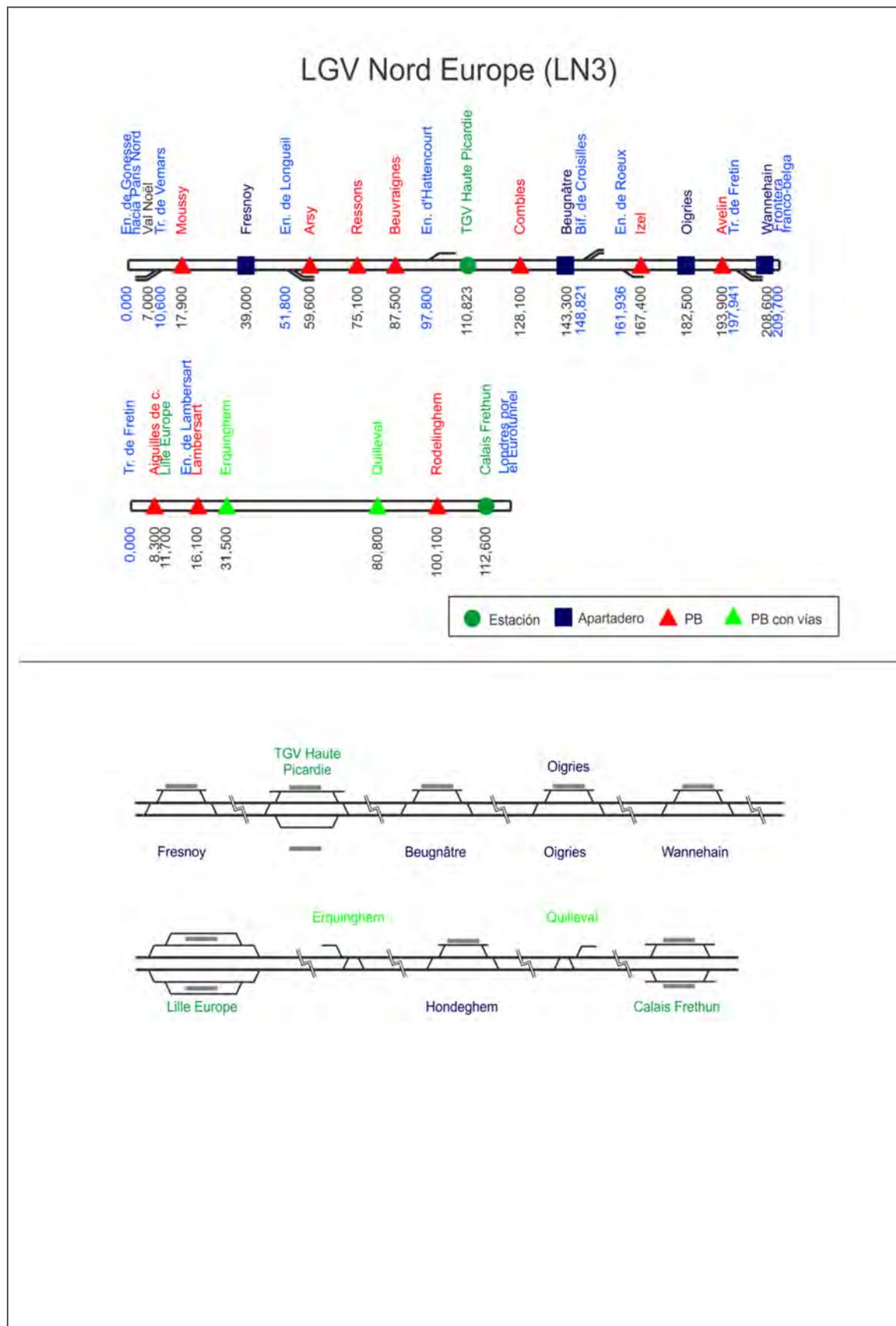


Figura 2.19. Esquema de dependencias de la línea Nord Europe (Francia)
Fuente: Elaboración propia

2.2.2.4 Línea de alta velocidad Interconnexion

En la Tabla 2.10. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.10. Características básicas de la línea Interconnexion (Francia)

Año de inauguración	1995
Velocidad máxima (km/h)	270
Tipo de tráfico	Viajeros
Porcentaje de vía doble	100%
Conexiones con la red convencional	2
Longitud total (km)	56,0

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.20. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

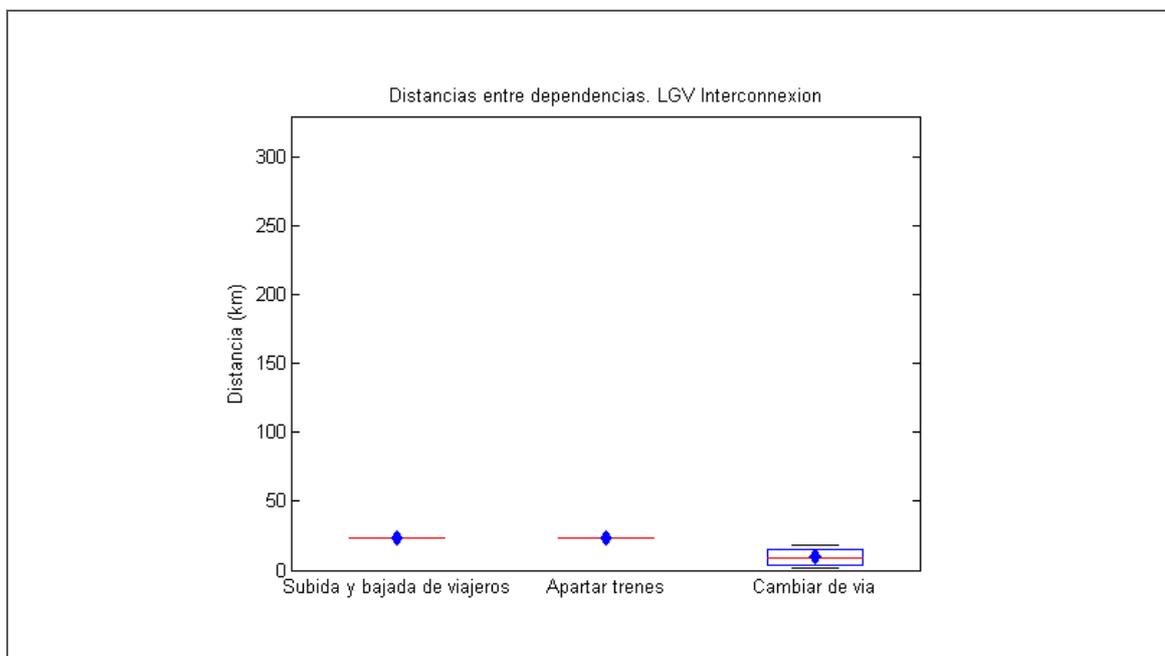


Figura 2.20. Distancia (km) entre dependencias de la línea Interconnexion (Francia)

Fuente: Elaboración propia

La línea dispone de dos estaciones intermedias que distan 23,79 kilómetros. En la estación de Marne la Vallée-Chessy las tres vías de apartado con andén se ubican entre las generales.

No hay apartaderos, pero sí tres puestos de banalización, dos de ellos con una vía auxiliar. La distancia media entre dependencias que permiten cambiar de vía es de 9,40 kilómetros.

La línea permite la conexión con la LGV Nord Europe en el Triángulo de Vemars, con la LGV París Sud-Est en el Triángulo de Coubert y con la LGV Est Européenne en el enlace LN6/LNI. Además, existe una conexión con la red convencional.

En la Figura 2.21. se muestran los esquemas de vías de la línea.

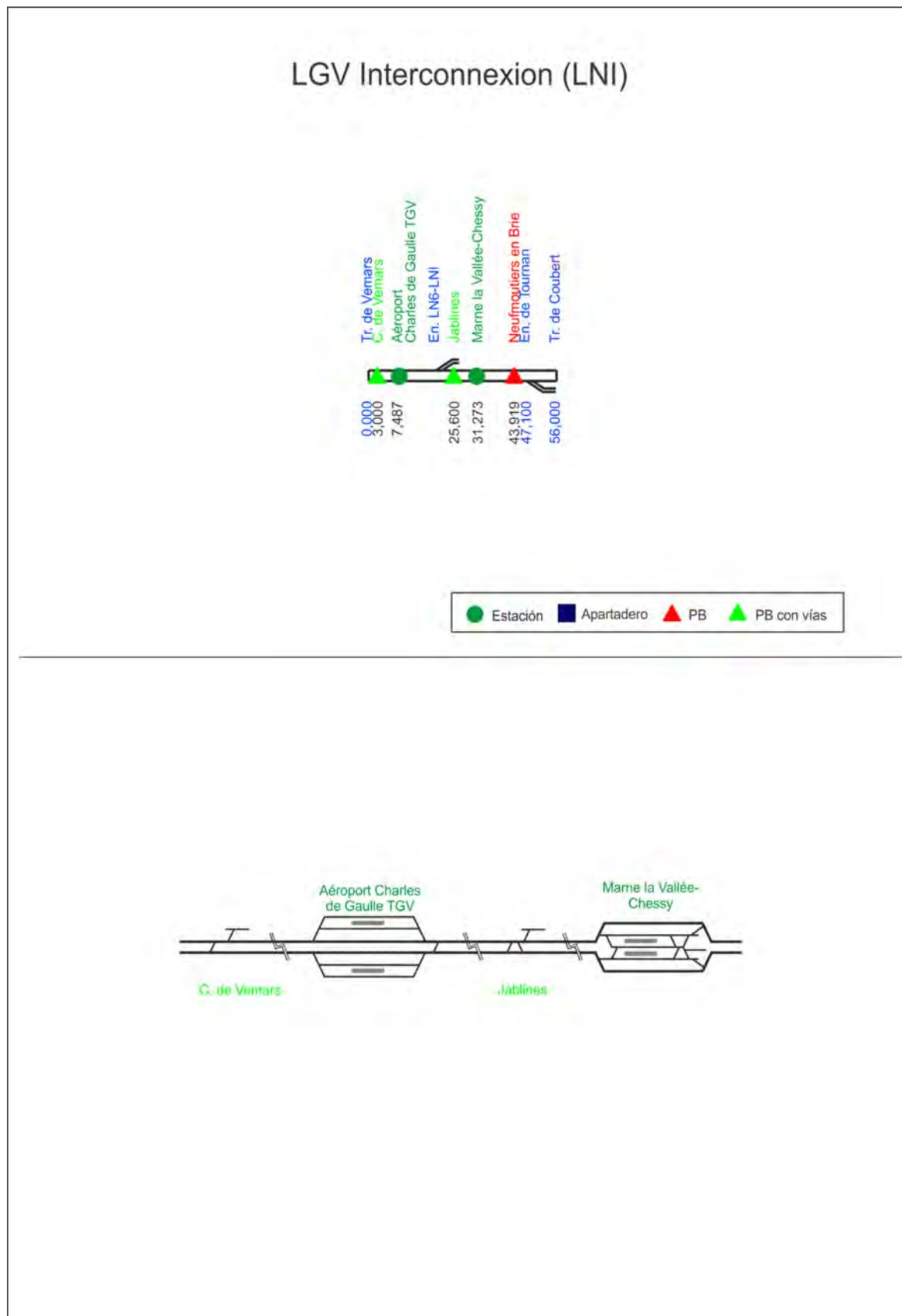


Figura 2.21. Esquema de dependencias de la línea Interconnexion (Francia)
Fuente: Elaboración propia

2.2.2.5 Línea de alta velocidad Rhône-Alpes (LN4)

En la Tabla 2.11. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.11. Características básicas de la línea Rhône-Alpes (Francia)

Año de inauguración	1992
Velocidad máxima (km/h)	300
Tipo de tráfico	Viajeros
Porcentaje de vía doble	100%
Conexiones con la red convencional	2
Longitud total (km)	114,9

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.22. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

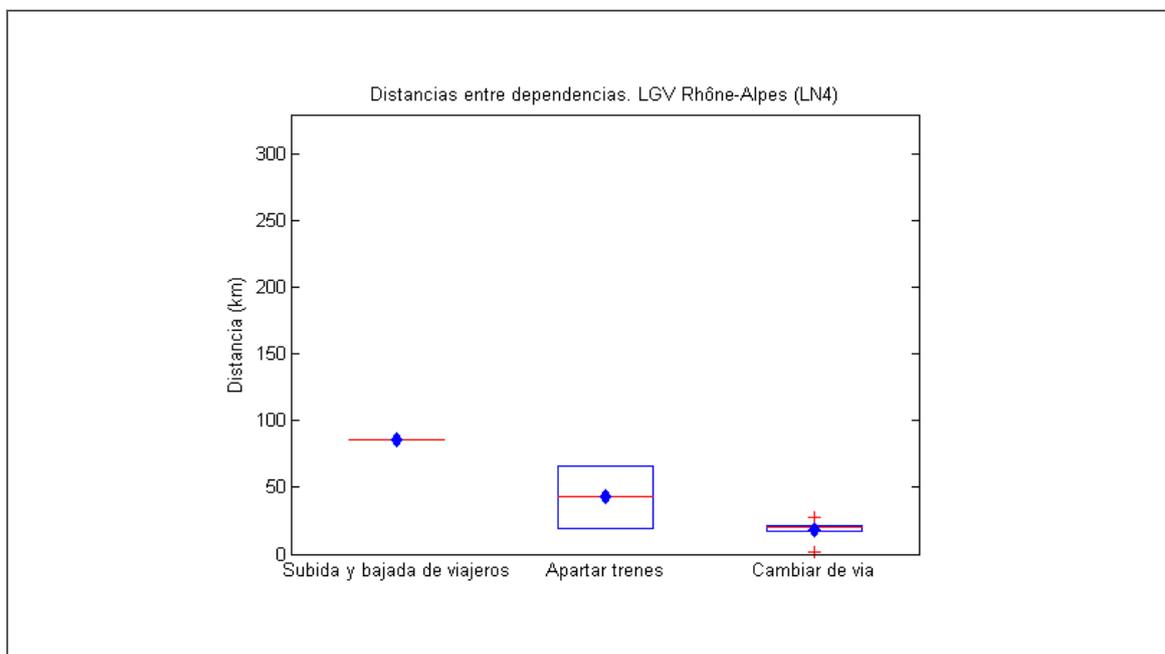


Figura 2.22. Distancia (km) entre dependencias de la línea Rhône-Alpes (Francia)

Fuente: Elaboración propia

La línea dispone de dos estaciones, Lyon-Saint Exupéry y Valence TGV que distan 85,72 kilómetros, aunque en rigor la línea finaliza justo antes de la estación de Valence TGV en Saint Marcel lès Valence.

Cuenta con un único apartadero dotado de una vía con andén, siendo la distancia media entre dependencias que permiten apartar trenes de 42,86 kilómetros. Existen tres puestos de banalización, dos de ellos dotados de una vía auxiliar, siendo la distancia media entre dependencias que permiten cambiar de vía de 17,72 kilómetros.

La línea enlaza al norte con la LGV París Sud-Est y al sur con la LGV Méditerranée. Además, existen dos conexiones con la red convencional.

En la Figura 2.23. se muestran los esquemas de vías de la línea.

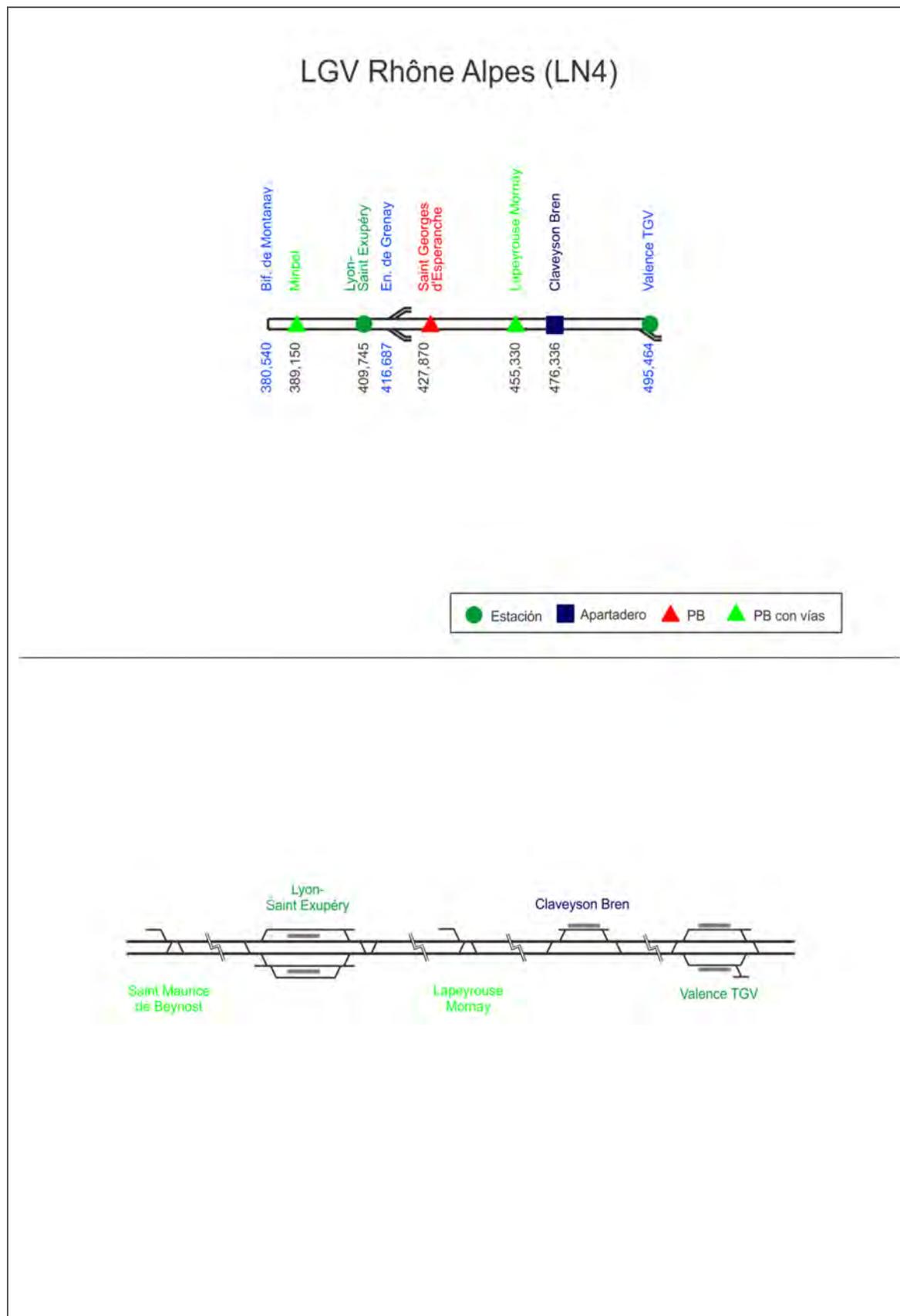


Figura 2.23. Esquema de dependencias de la línea Rhône-Alpes (Francia)
Fuente: Elaboración propia

2.2.2.6 Línea de alta velocidad Méditerranée (LN5)

En la Tabla 2.12. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.12. Características básicas de la línea Méditerranée (Francia)

<i>Año de inauguración</i>	2001
<i>Velocidad máxima (km/h)</i>	350
<i>Tipo de tráfico</i>	Viajeros
<i>Porcentaje de vía doble</i>	100%
<i>Conexiones con la red convencional</i>	5
<i>Longitud total (km)</i>	250

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.24. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

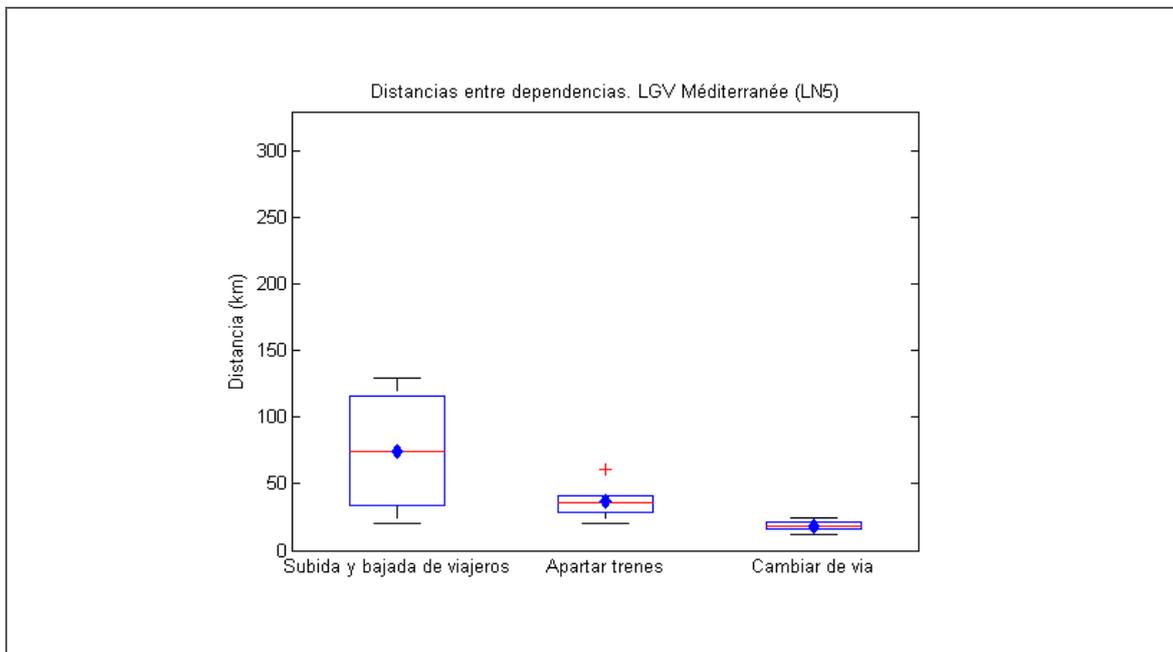


Figura 2.24. Distancia (km) entre dependencias de la línea Méditerranée (Francia)

Fuente: Elaboración propia

La línea tiene su origen al norte de la estación de Valence TGV, concretamente en Saint Marcel lès Valence, donde se conecta con la LGV Rhône-Alpes. Costa de un tronco común entre Valence TGV y el Triángulo des Angles donde se ramifica para conectar con Marseille y Montpellier.

Marseille Saint Charles y Montpellier no se encuentran en la línea de alta velocidad, si lo están las estaciones de Valence TGV, Avignon TGV y Aix en Provence TGV. La distancia media entre estaciones es de 74,56 kilómetros.

El conjunto de la línea dispone de tres apartaderos con una única vía con andén. La distancia media entre dependencias que permiten apartar trenes es de 37,28 kilómetros. Existen seis puestos de banalización de los cuales cinco cuentan con vías auxiliares. La distancia media entre dependencias que permiten cambiar de vía es de 18,64 kilómetros.

La línea dispone de cinco conexiones con la red convencional.

En la Figura 2.25. se muestran los esquemas de vías de la línea.

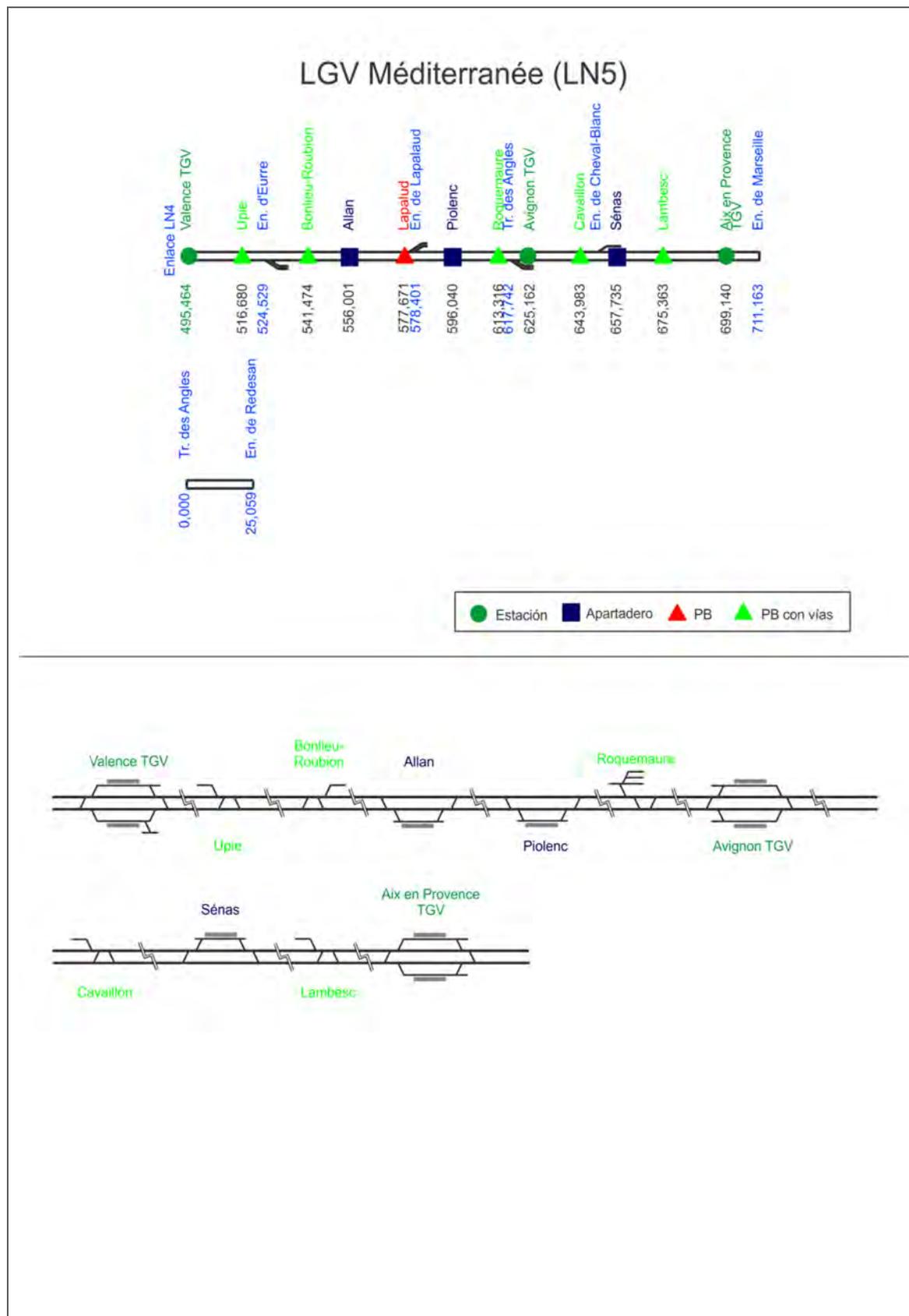


Figura 2.25. Esquema de dependencias de la línea Méditerranée (Francia)
Fuente: Elaboración propia

2.2.2.7 Línea de alta velocidad Est Européenne (LN6)

En la Tabla 2.13. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.13. Características básicas de la línea Est Européenne (Francia)

Año de inauguración	2007
Velocidad máxima (km/h)	320
Tipo de tráfico	Viajeros
Porcentaje de vía doble	100%
Conexiones con la red convencional	6
Longitud total (km)	301,4

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.26. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

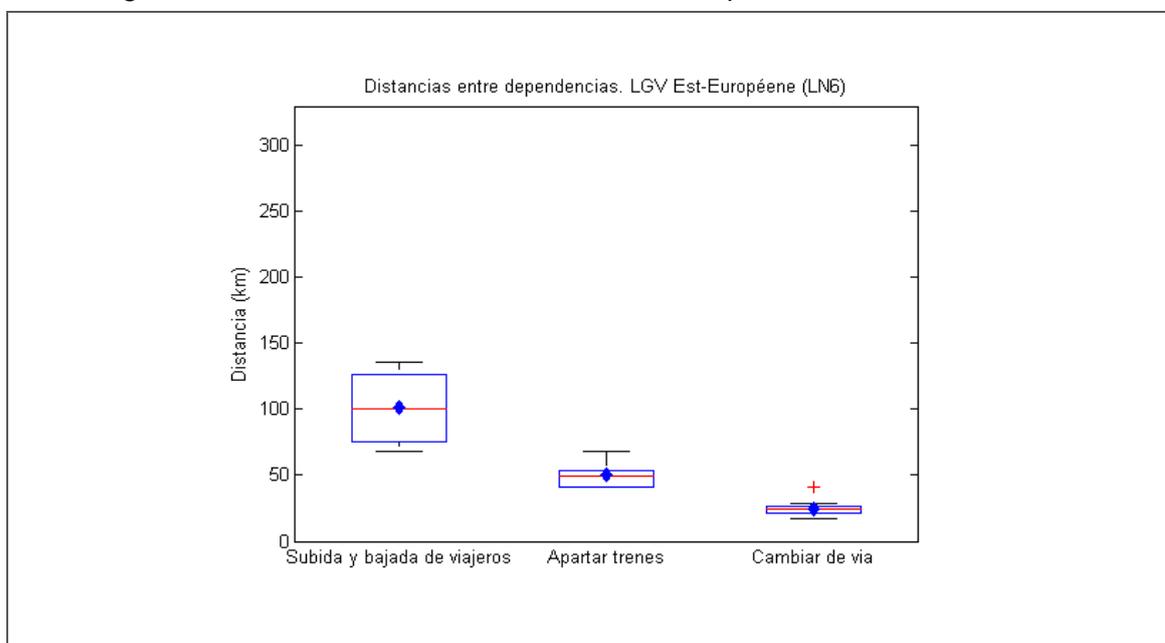


Figura 2.26. Distancia (km) entre dependencias de la línea Est Européenne (Francia)

Fuente: Elaboración propia

La línea Est Européenne será construida en dos fases, en la actualidad está en servicio el tramo entre Vaires y enlace de Beaudrecourt que se encuentra cerca de Metz y Nancy.

Desde Vaires conecta vía la línea convencional con París Gare del' Est. El tramo en servicio dispone de tres estaciones. La distancia media entre estaciones, contando también París Gare del' Est es de 101,15 kilómetros.

Dispone de tres apartaderos, todos ellos dotado de una vía con andén y vías auxiliares. La distancia media entre dependencias que permiten apartar trenes es de 50,58 kilómetros.

Existen seis puestos de banalización, de los cuales tres alternos disponen de vías auxiliares. La distancia media entre dependencias que permiten cambiar de vía es de 24,92 kilómetros.

La línea se conecta con la LGV Interconnexion en el enlace LN6-LNI y además tiene seis conexiones con la red convencional.

En la Figura 2.27. se muestran los esquemas de vías de la línea.

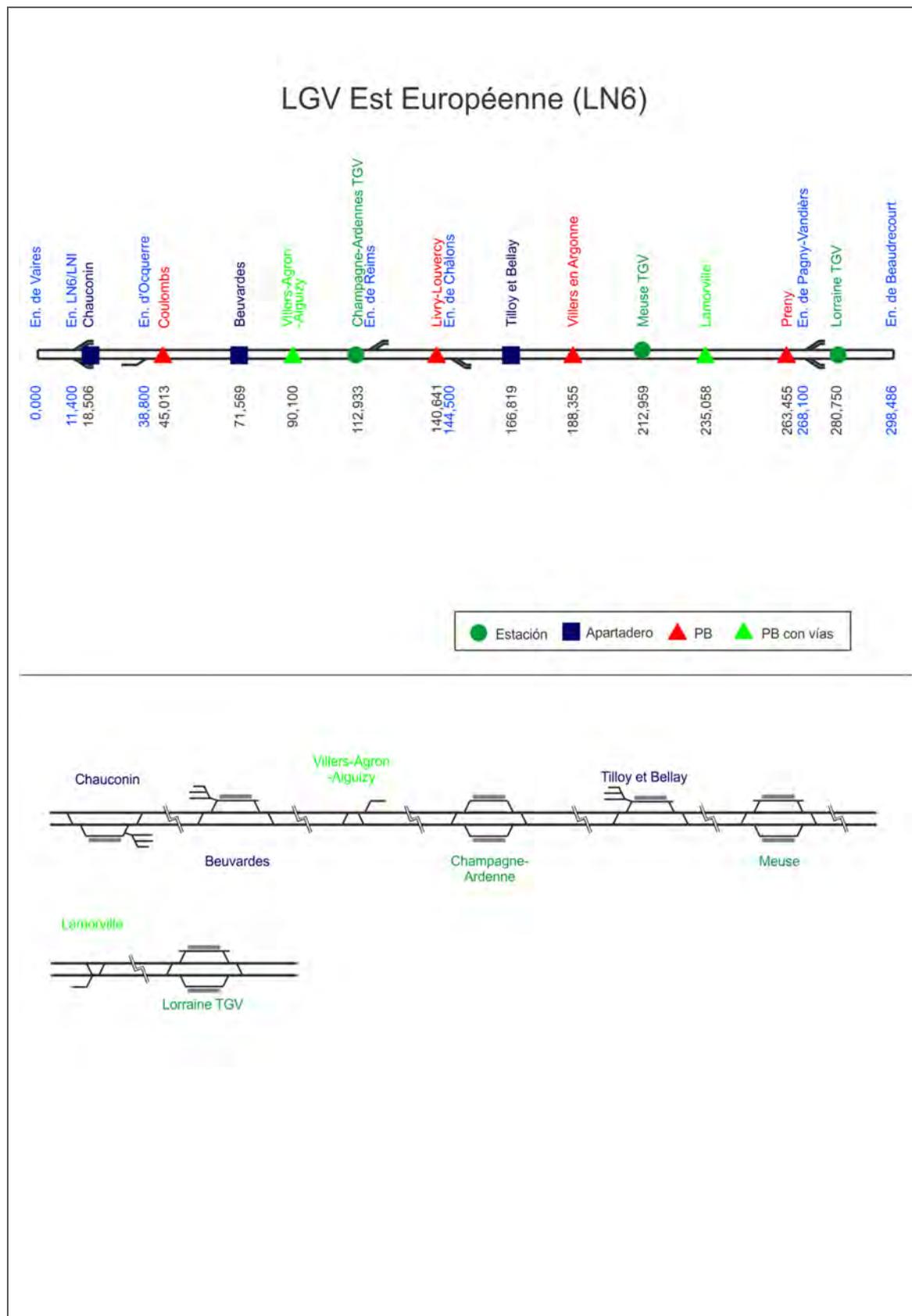


Figura 2.27. Esquema de dependencias de la línea Est Européenne (Francia)
Fuente: Elaboración propia

2.2.2.8 Línea de alta velocidad Rhin-Rhône (LN7)

En la Tabla 2.14. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.14. Características básicas de la línea Rhin-Rhône (Francia)

Año de inauguración	2011
Velocidad máxima (km/h)	320
Tipo de tráfico	Viajeros
Porcentaje de vía doble	100%
Conexiones con la red convencional	3
Longitud total (km)	137,9

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.28. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

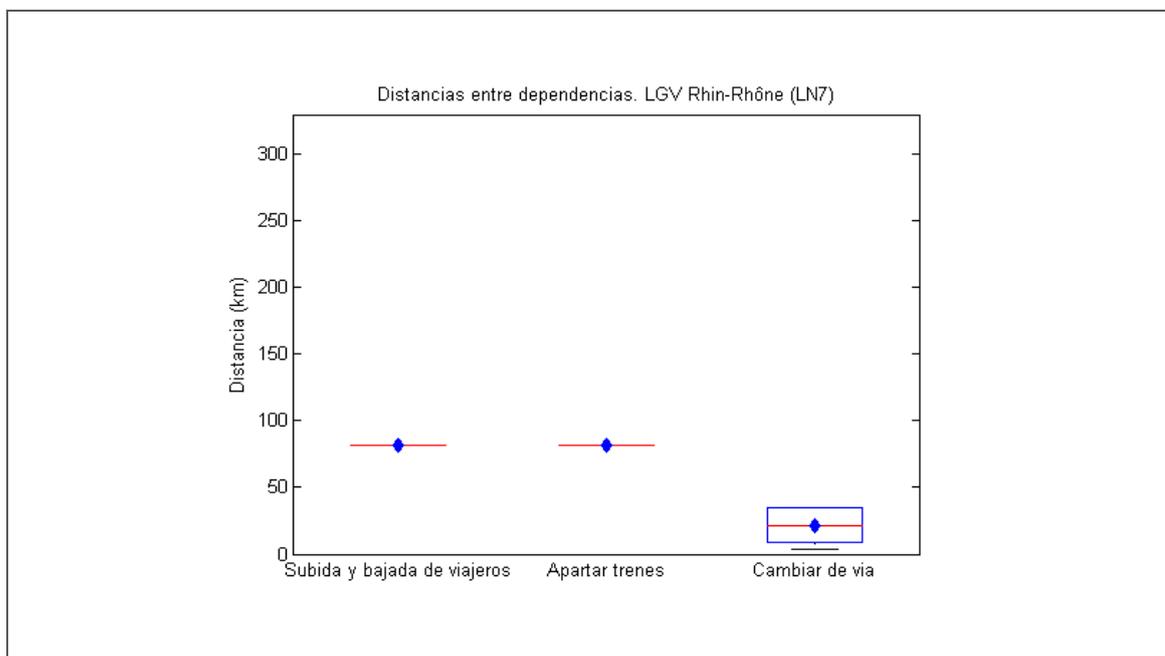


Figura 2.28. Distancia (km) entre dependencias de la línea Rhin-Rhône (Francia)

Fuente: Elaboración propia

La línea Rhin-Rhône será construida en dos fases. En la actualidad está en servicio el tramo entre Villers les Pots y Petit Croix.

Dispone de dos estaciones, siendo la distancia entre ellas de 81,89 kilómetros. La estación de Belfort-Montbéliard cuenta con dos vías de apartado ubicadas entre las vías generales.

La línea no dispone de apartaderos por lo que las únicas dependencias en las que se pueden apartar trenes son las estaciones. Cuenta con cuatro puestos de banalización, de los cuales dos tienen vías auxiliares.

Existen tres conexiones con la red convencional.

En la Figura 2.29. se muestran los esquemas de vías de la línea.

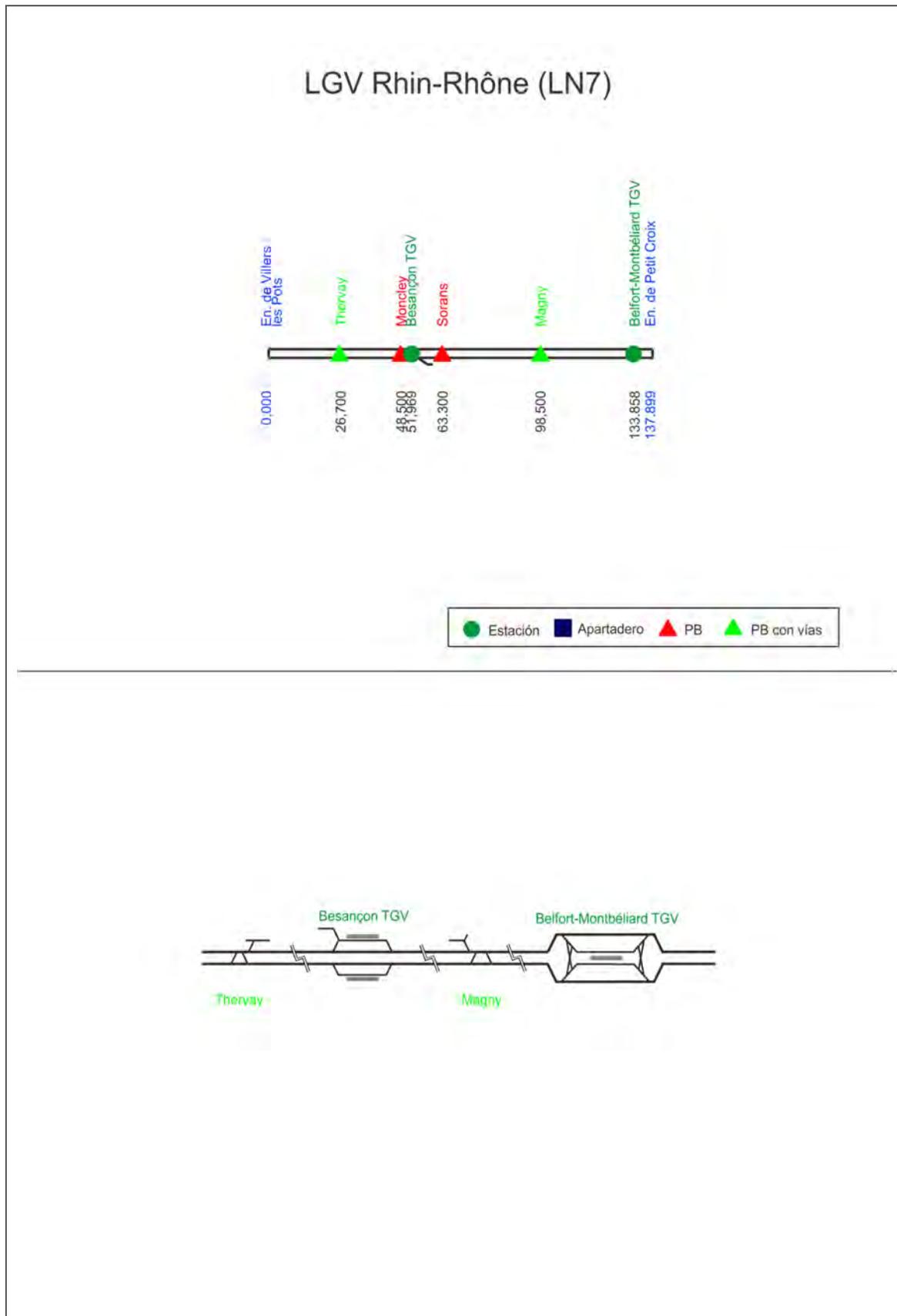


Figura 2.29. Esquema de dependencias de la línea Rhin-Rhône (Francia)
Fuente: Elaboración propia

2.2.3 Líneas de alta velocidad de España

2.2.3.1 Línea de alta velocidad Madrid-Sevilla

En la Tabla 2.15. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.15. Características básicas de la línea Madrid-Sevilla (España)

Año de inauguración	1992
Velocidad máxima (km/h)	300
Tipo de tráfico	Viajeros
Porcentaje de vía doble	100%
Conexiones con la red convencional	3
Longitud total (km)	470,5

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.30. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

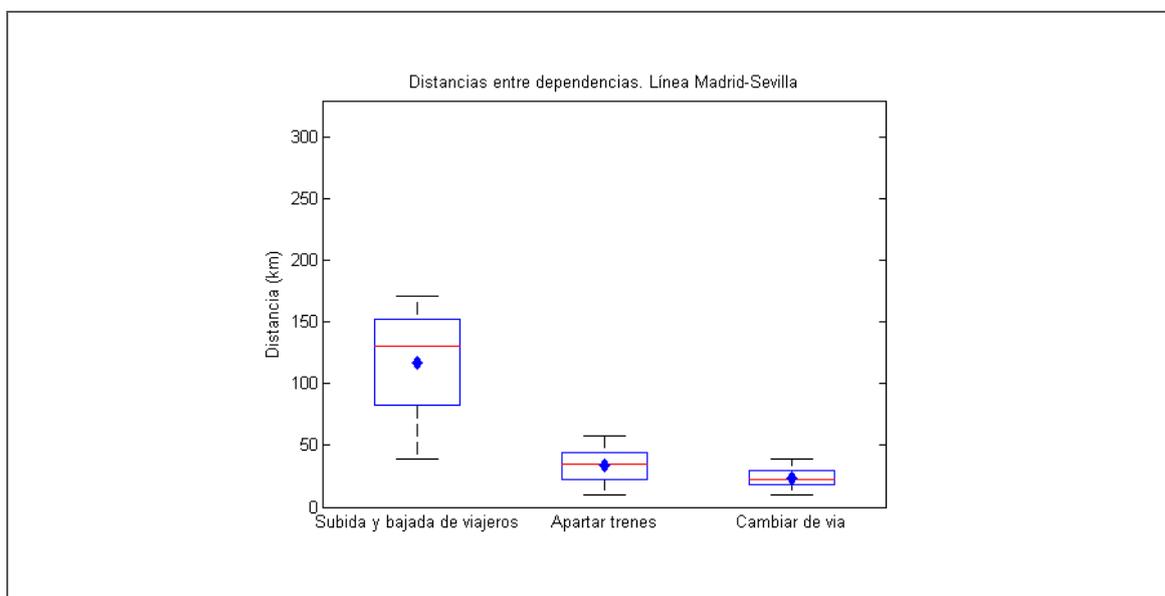


Figura 2.30. Distancia (km) entre dependencias de la línea Madrid-Sevilla (España)
Fuente: Elaboración propia

Enlaza cinco estaciones, separadas por una distancia media de 117,62 kilómetros, aunque existen dos estaciones relativamente próximas, Ciudad Real y Puertollano que distan 39 kilómetros. Cuenta con diez apartaderos, de los cuales seis disponen de dos vías con andén y el resto sólo una. La distancia media entre las dependencias que permiten apartar trenes (estaciones y apartaderos) es de 33,61 kilómetros. A lo largo del trazado se disponen seis puestos de banalización. La distancia media entre dependencias que permiten cambiar de vía (estaciones, apartaderos y puestos de banalización) es de 23,52 kilómetros.

Existen tres bifurcaciones que son el inicio de las líneas de alta velocidad de Toledo, Valencia/Alicante y Málaga y dos baipases de conexión directa sin pasar por Madrid con las líneas de Valencia y Barcelona. Además, cuenta con dos conexiones con la red convencional en las inmediaciones de Madrid y Sevilla (Majarabique).

La compleja planta de vías de la estación de Madrid es compartida por todos los servicios que tienen como destino el sur y levante peninsular además de por los que se encaminan por la línea Madrid-Barcelona-Figueras.

En la Figura 2.31. se muestran los esquemas de vías de la línea.

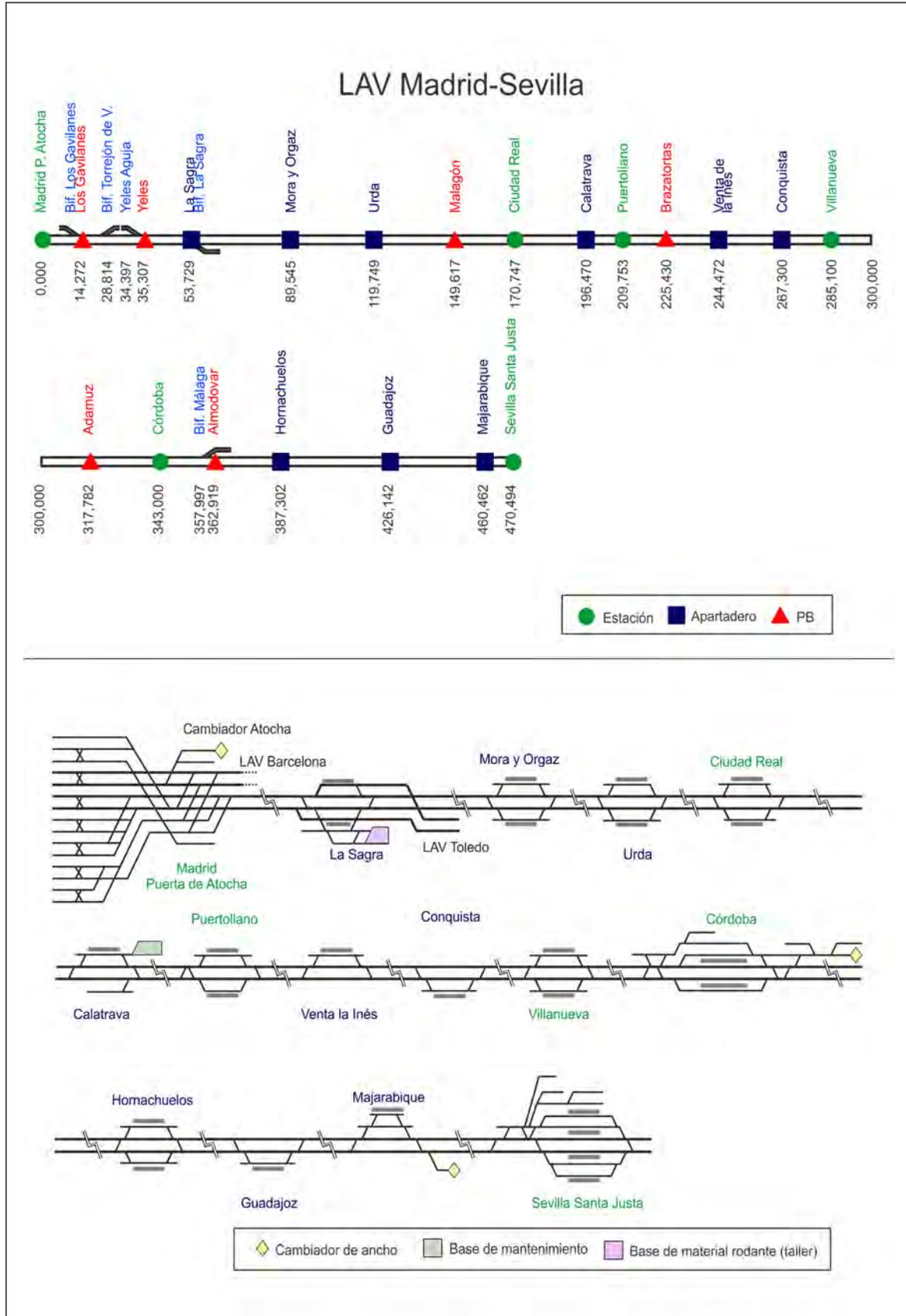


Figura 2.31. Esquema de dependencias de la línea Madrid-Sevilla (España)
Fuente: Elaboración propia

2.2.3.2 Línea de alta velocidad (Madrid) La Sagra-Toledo

En la Tabla 2.16. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.16. Características básicas de la línea Madrid-Toledo (España)

Año de inauguración	2005
Velocidad máxima (km/h)	270
Tipo de tráfico	Viajeros
Porcentaje de vía doble	100%
Conexiones con la red convencional	0
Longitud total (km)	20,8

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.32. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

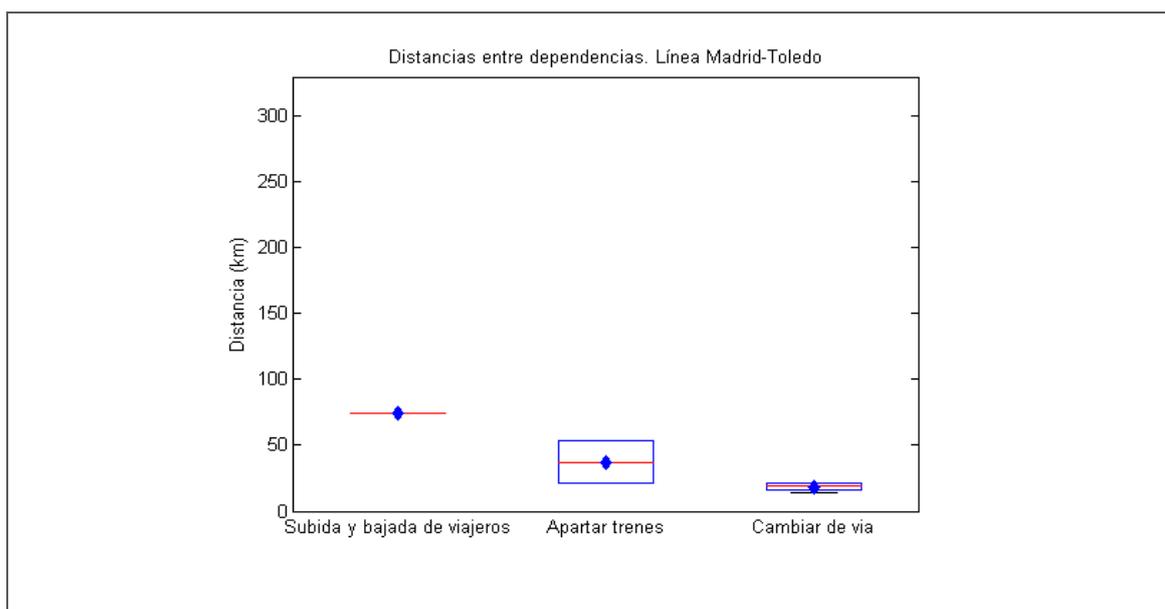


Figura 2.32. Distancia (km) entre dependencias de la línea Madrid-Toledo (España)

Fuente: Elaboración propia

La línea tiene su inicio en la bifurcación de la Sagra, donde confluye con la línea Madrid-Sevilla. La distancia entre las estaciones de Madrid Puerta de Atocha y Toledo es de 75 kilómetros. La bifurcación de La Sagra y Toledo distan 20,84 kilómetros, en los cuales no hay apartaderos ni puestos de banalización.

La distancia media entre dependencias que permiten apartar trenes de 37,29 kilómetros y para cambiar de vía de 18,64 kilómetros.

En la Figura 2.33. se muestran los esquemas de vías de la línea.

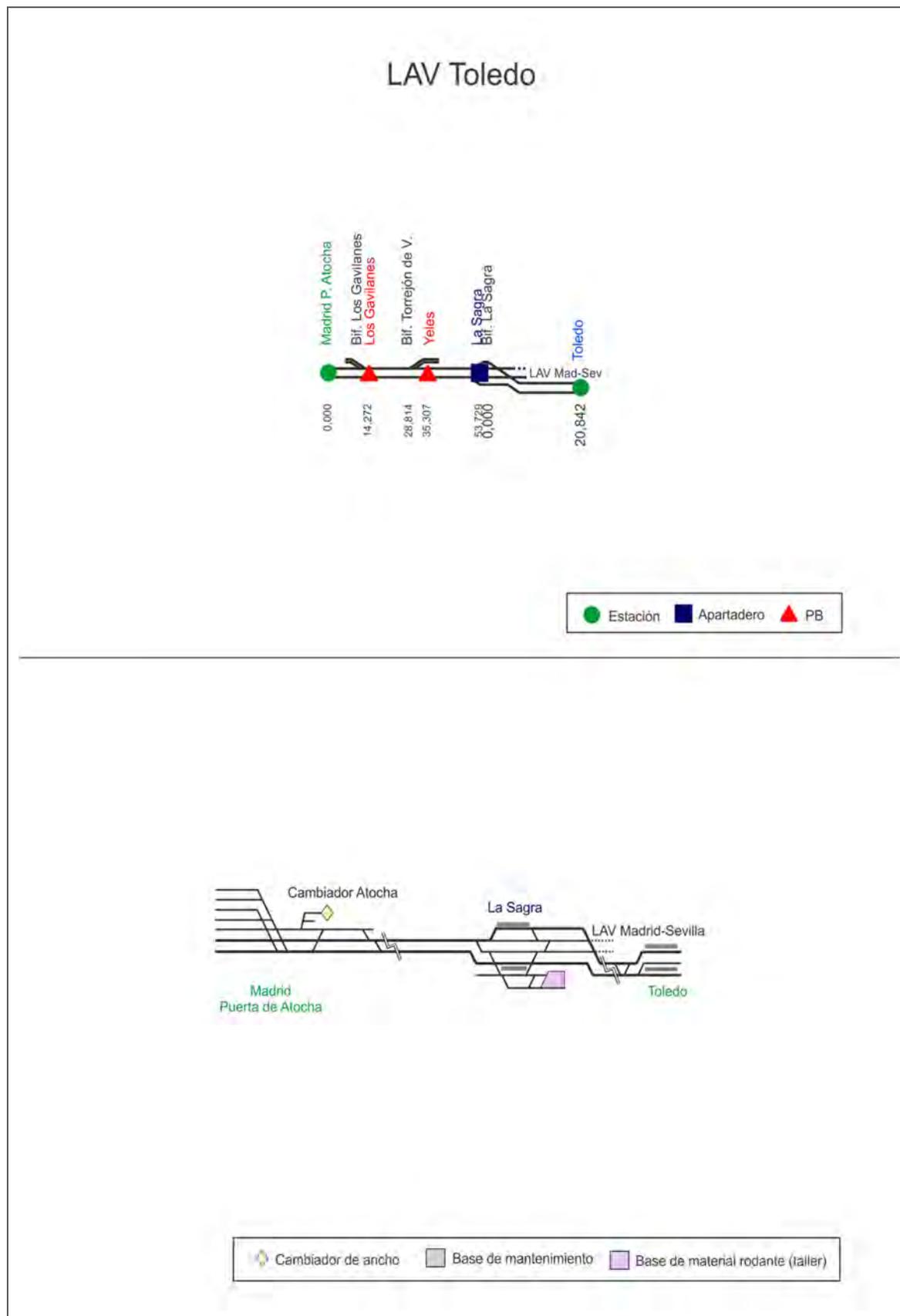


Figura 2.33. Esquema de dependencias de la línea Madrid-Toledo (España)
Fuente: Elaboración propia

2.2.3.3 Línea de alta velocidad Madrid-Barcelona-Figueres

En la Tabla 2.17. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.17. Características básicas de la línea Madrid-Barcelona (España)

Año de inauguración	2003
Velocidad máxima (km/h)	350
Tipo de tráfico	Viajeros*
Porcentaje de vía doble	99%
Conexiones con la red convencional	4
Longitud total (km)	784,8

* El tramo Barcelona-Figueres es de tráfico mixto

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.34. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

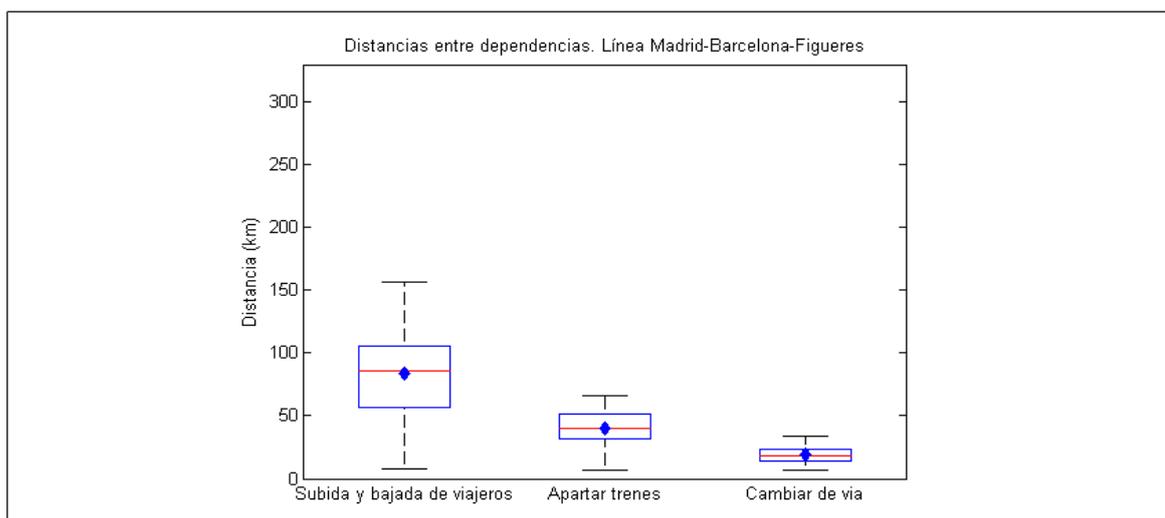


Figura 2.34. Distancia (km) entre dependencias de la línea Madrid-Barcelona-Figueres (España) Fuente: Elaboración propia

La línea enlaza 10 estaciones, separadas por una distancia media de 84,05 kilómetros. Dada la necesidad de lograr un tiempo de viaje entre Madrid y Barcelona inferior a las dos horas y media, se construyeron dos baipases en Zaragoza y Lleida para reducir el recorrido de los trenes directos Madrid-Barcelona y evitar las reducciones de velocidad para atravesar núcleos urbanos.

La línea dispone de nueve apartaderos, todos ellos dotados de dos vías con andén, además en la bifurcación de Sant Andreu Comptal también es posible apartar trenes. La distancia media entre dependencias que permiten apartar trenes es de 39,82 kilómetros. Se dispone de 20 puestos de banalización siendo la distancia media entre dependencias que permiten cambiar de vía de 19,40 kilómetros.

Existe una bifurcación para enlazar con la línea Madrid-Sevilla en las inmediaciones de Madrid, cuatro bifurcaciones para dar acceso a los dos baipases, dos bifurcaciones que conectan con la línea de ancho mixto Barcelona-Port Bou y cinco cambiadores de ancho para conectar con la red convencional.

Desde Figueres Vilafant la línea continúa hasta la Frontera francesa, para conectarse con la red de alta velocidad de Francia a través del túnel de Le Soler.

En la Figura 2.35. se muestran los esquemas de vías de la línea.

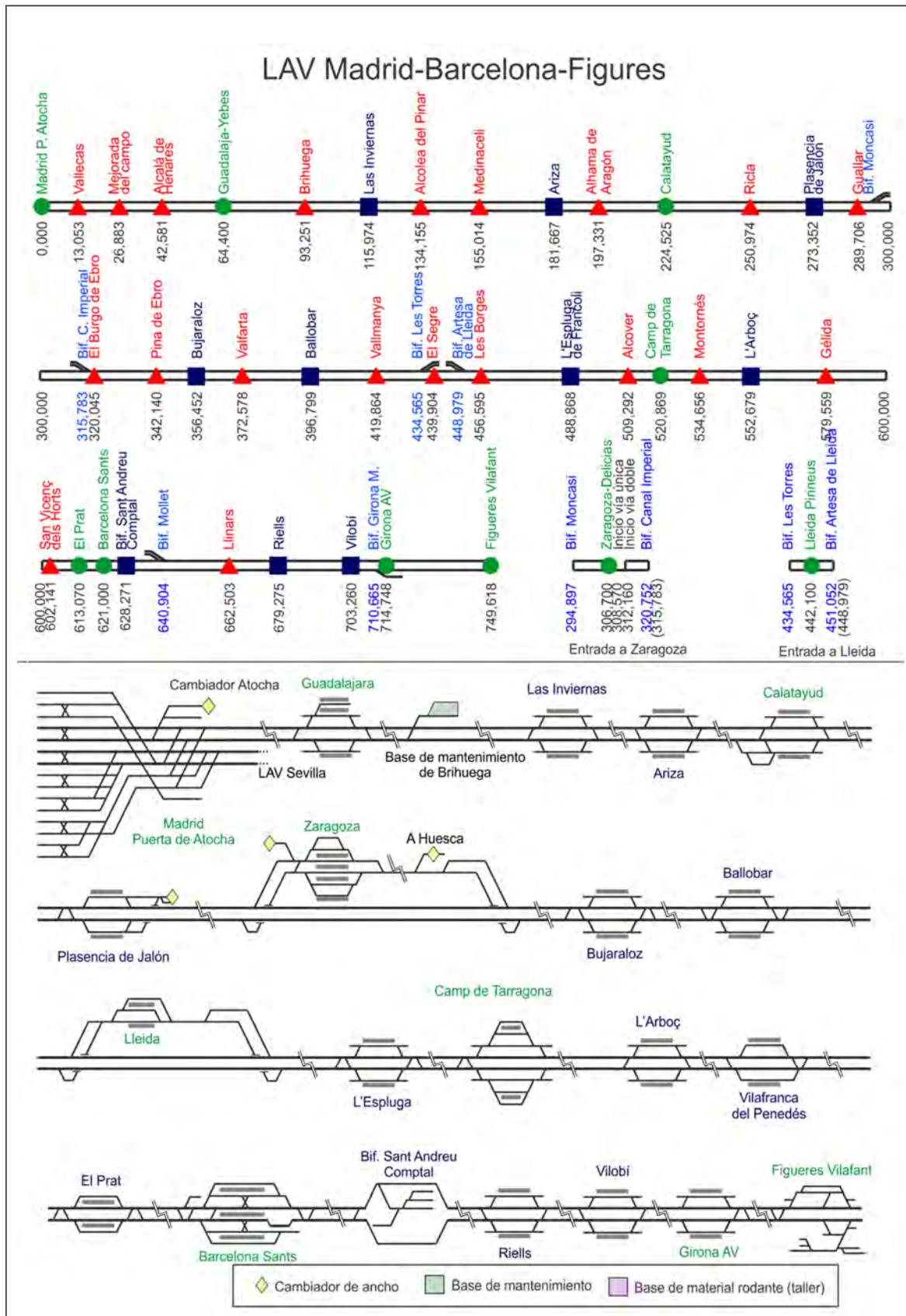


Figura 2.35. Esquema de dependencias de la línea Madrid-Barcelona-Figueres (España) - Fuente: Elaboración propia

2.2.3.4 Línea de alta velocidad Madrid-Valladolid

En la Tabla 2.18. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.18. Características básicas de la línea Madrid-Valladolid (España)

Año de inauguración	2007
Velocidad máxima (km/h)	350
Tipo de tráfico	Viajeros
Porcentaje de vía doble	94%
Conexiones con la red convencional	3
Longitud total (km)	178,4

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.36. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

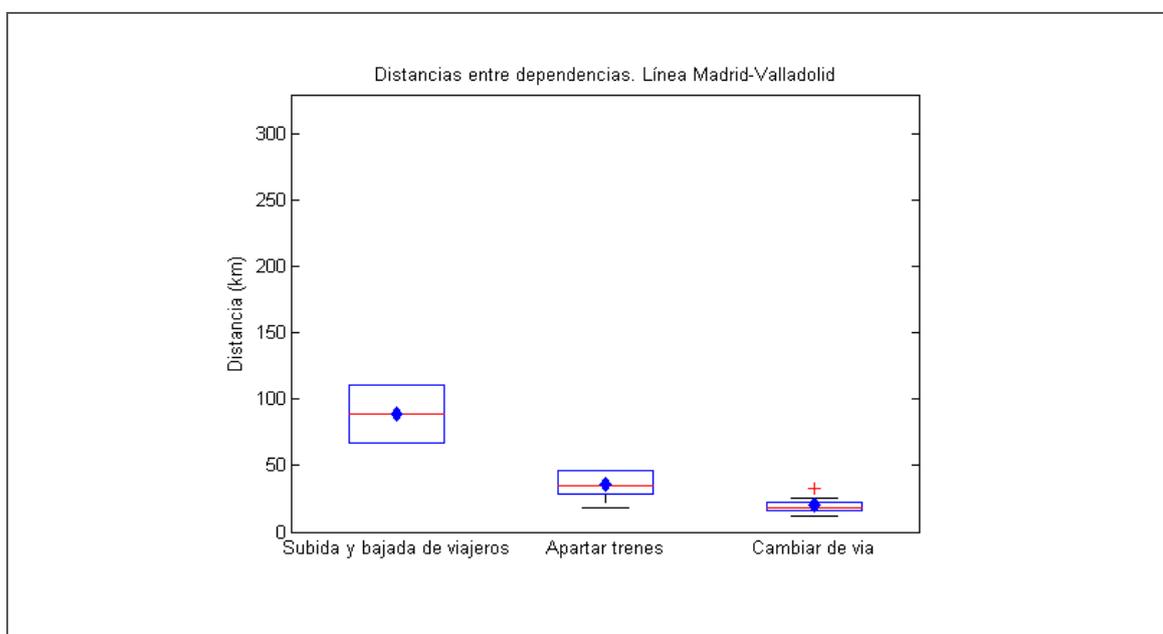


Figura 2.36. Distancia (km) entre dependencias de la línea Madrid-Valladolid (España)

Fuente: Elaboración propia

La línea enlaza tres estaciones separadas por una distancia media de 89,23 kilómetros. La estación de Segovia-Guiomar cuenta con dos peculiaridades en lo que se refiere a la disposición de las vías: las vías generales estén en el exterior de la estación y separadas 40 metros entre sí, y la diferencia de cota entre las vías generales de apartado que llega a ser de casi siete metros en algunos puntos de la estación.

La línea dispone de tres apartaderos, uno con dos vías de apartado y el resto con una única vía de apartado con andén. La distancia media entre dependencias que permiten apartar trenes es de 35,69 kilómetros. Se dispone también de cuatro puestos de banalización, siendo la distancia media entre dependencias que permiten el cambio de vía de 19,83 kilómetros.

Existen cambiadores de ancho en Madrid Chamartín, Valdestillas y Valladolid-Campo Grande que permiten la conexión con la red convencional. Próxima al apartadero de Olmedo se encuentra la Bifurcación de Medina que da acceso al tramo de alta velocidad Olmedo-Medina que finaliza en el cambiador de Medina del Campo.

La entrada a Valladolid se realiza en vía única.

En la Figura 2.37. se muestran los esquemas de vías de la línea.

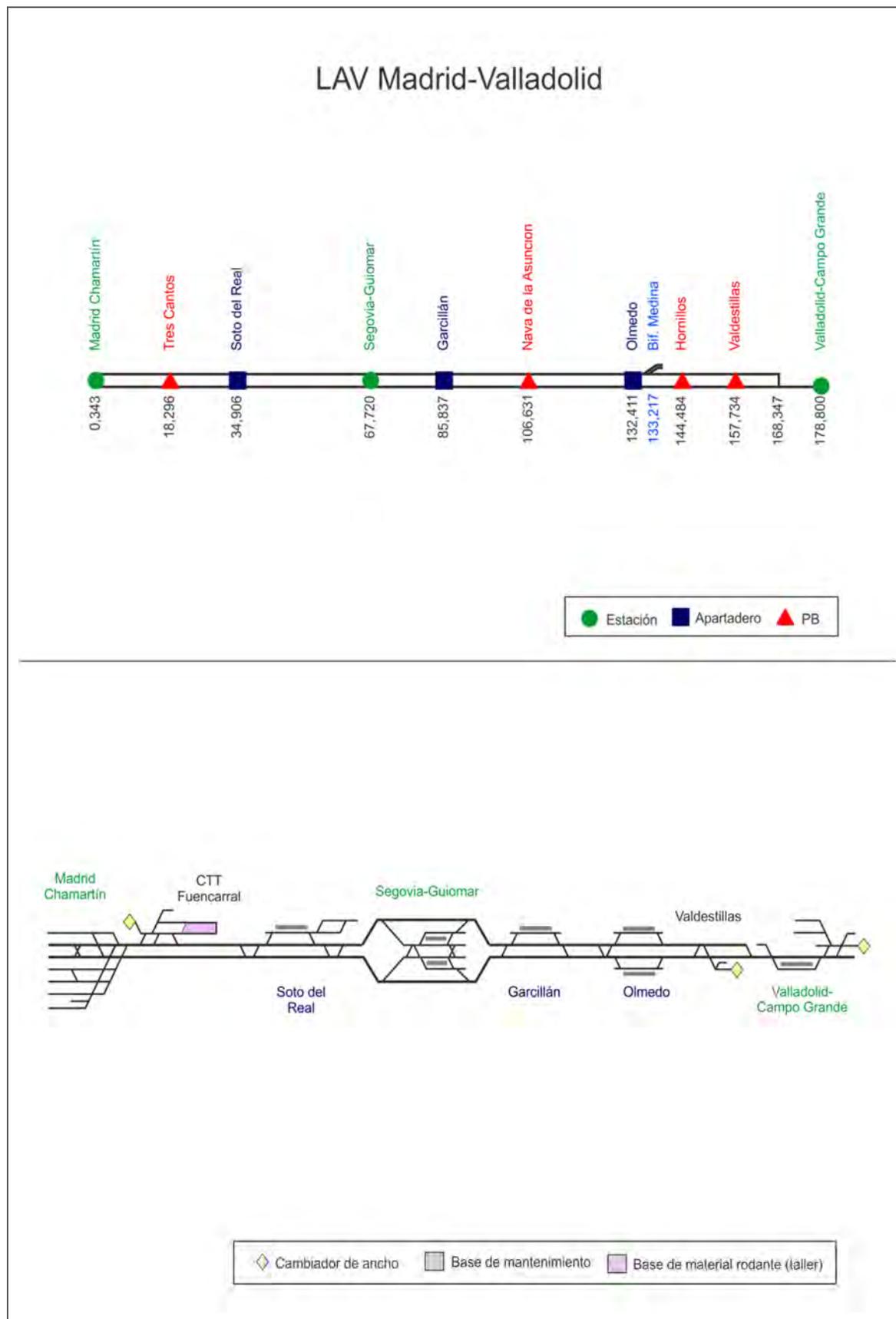


Figura 2.37. Esquema de dependencias de la línea Madrid-Valladolid (España)
Fuente: Elaboración propia

2.2.3.5 Línea de alta velocidad Córdoba (Bif. Málaga) –Málaga

En la Tabla 2.19. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.19. Características básicas de la línea Córdoba-Málaga (España)

Año de inauguración	2006
Velocidad máxima (km/h)	300
Tipo de tráfico	Viajeros
Porcentaje de vía doble	100%
Conexiones con la red convencional	2
Longitud total (km)	154,5

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.38. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

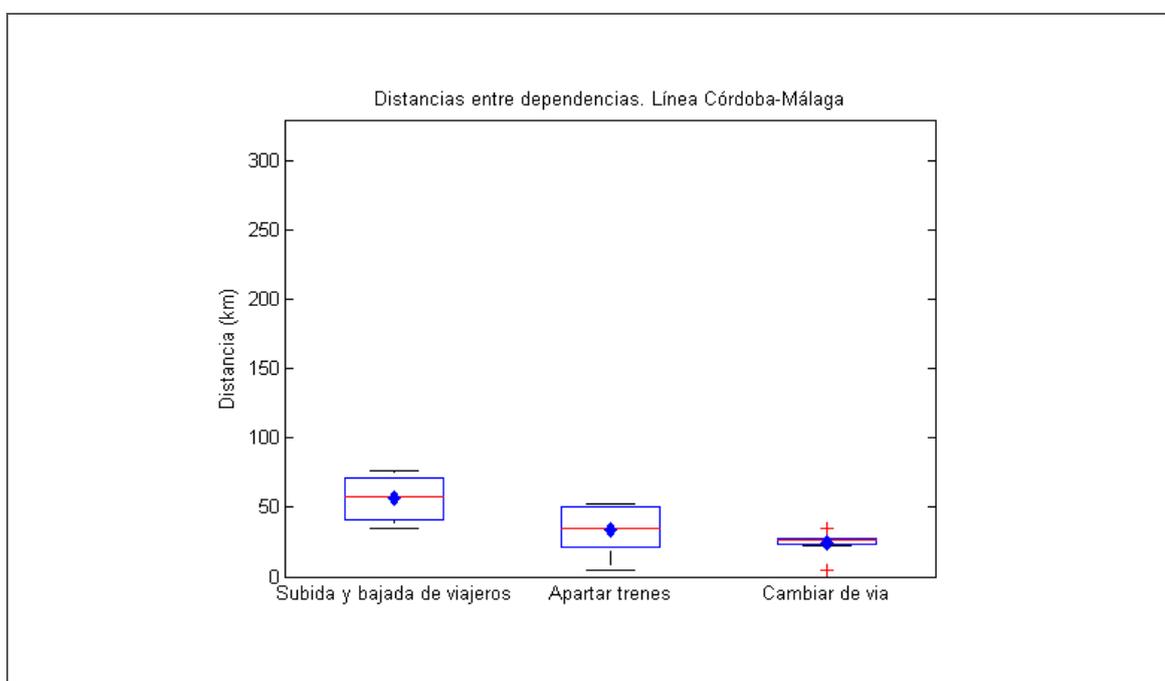


Figura 2.38. Distancia (km) entre dependencias de la línea Córdoba-Málaga (España)

Fuente: Elaboración propia

La línea tiene su origen en la Bifurcación Málaga de la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla que dista 15 kilómetros de Córdoba. Tiene tres estaciones, aunque para realizar el análisis de distancia se ha considerado también la estación de Córdoba que es la última de la línea Madrid-Sevilla antes de la bifurcación. La distancia media entre estaciones es de 56,50 kilómetros.

A lo largo de la línea se localizan dos apartaderos y dos puestos de banalización. La distancia media entre dependencias que permiten apartar trenes es de 33,90 kilómetros y entre dependencias que permiten cambiar de vía de 24,22 kilómetros.

Existen cambiadores de ancho en Córdoba y Antequera Santa Ana que permiten la conexión con la red convencional.

En la Figura 2.39. se muestran los esquemas de vías de la línea.

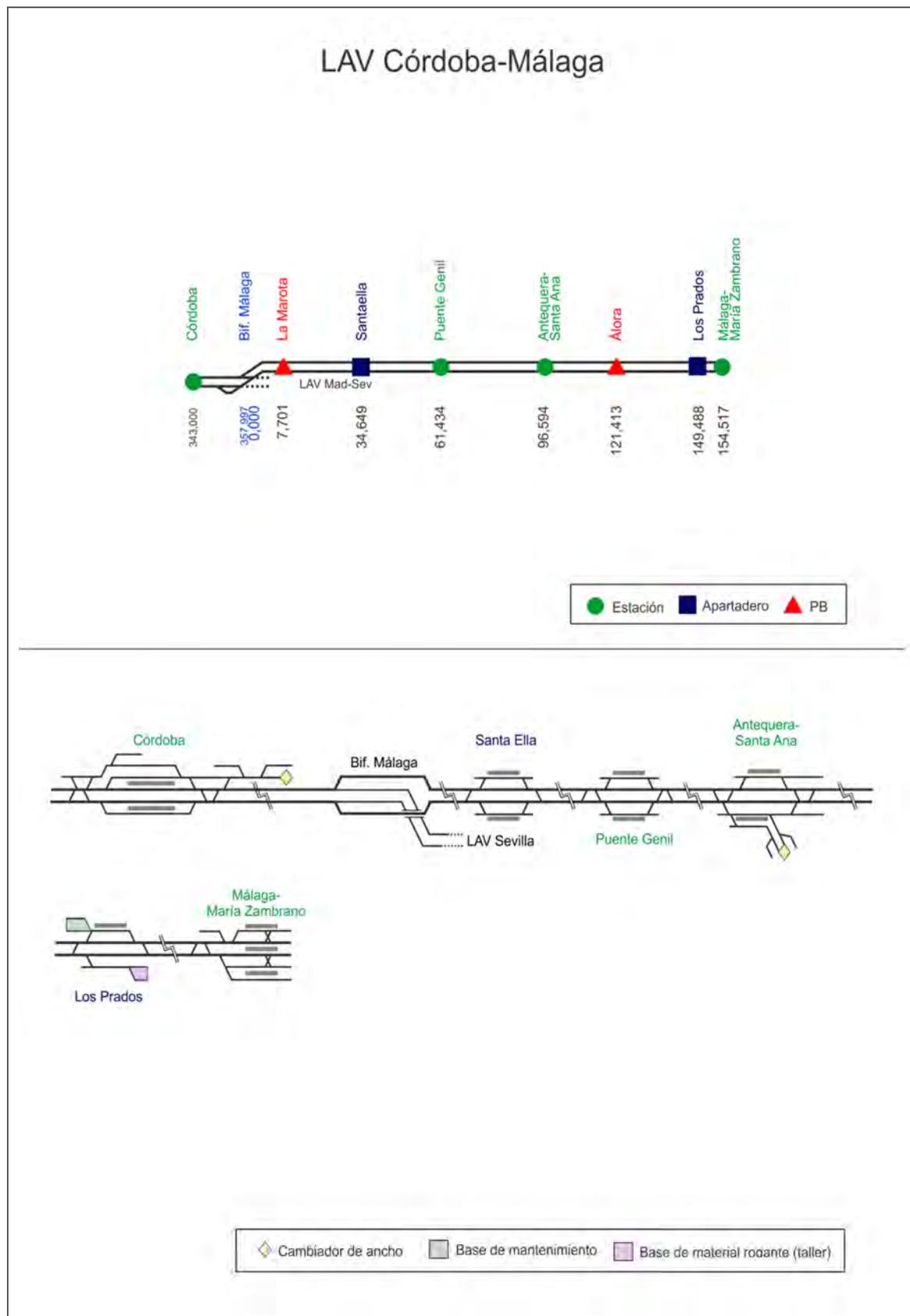


Figura 2.39. Esquema de dependencias de la línea Córdoba-Málaga (España)
Fuente: Elaboración propia

2.2.3.6 Línea de alta velocidad Madrid (Bif Torrejón de Velasco)-Valencia

En la Tabla 2.20. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.20. Características básicas de la línea Madrid-Valencia (España)

Año de inauguración	2010
Velocidad máxima (km/h)	350
Tipo de tráfico	Viajeros
Porcentaje de vía doble	100%
Conexiones con la red convencional	2
Longitud total (km)	362,4

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.40. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

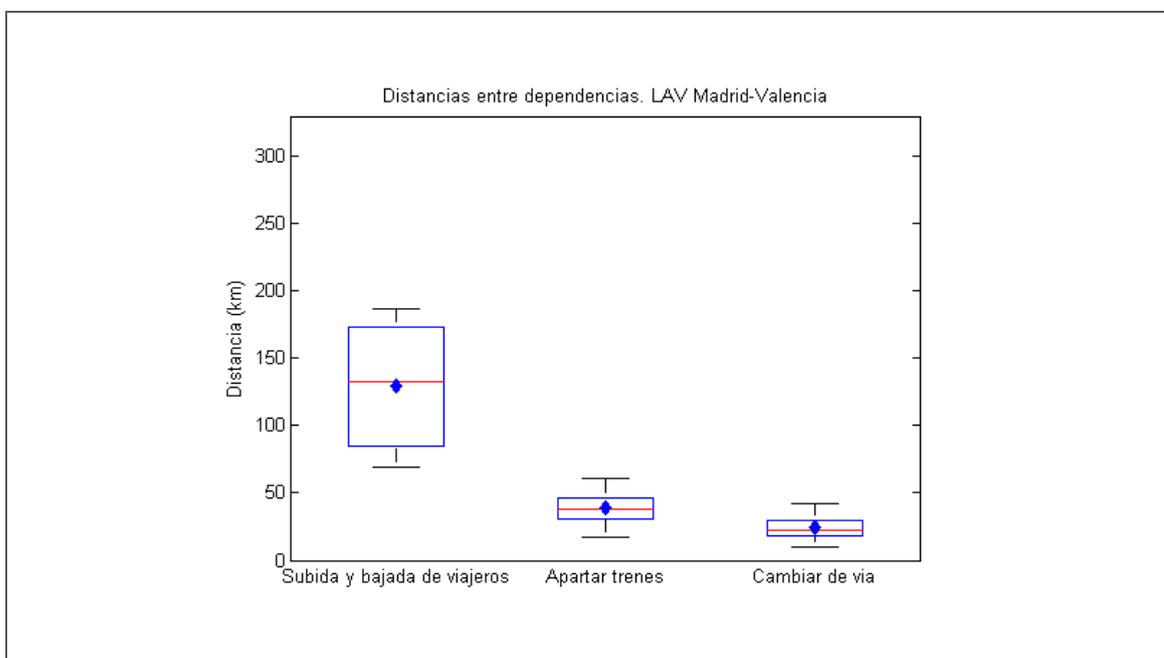


Figura 2.40. Distancia (km) entre dependencias de la línea Madrid-Valencia (España)

Fuente: Elaboración propia

La línea tiene su inicio en la Bifurcación Torrejón de Velasco de la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla. Tiene tres estaciones, aunque para realizar el análisis de distancia se ha considerado también la estación de Madrid Puerta de Atocha. La distancia media entre estaciones es de 129,54 kilómetros.

La línea dispone de siete apartaderos, todos ellos dotados de dos vías con andén, y seis puestos de banalización. La distancia media entre dependencias que permiten apartar material es de 38,86 kilómetros y entre dependencias que permiten cambiar de vía de 24,29 kilómetros.

Dispone de cambiadores de ancho en Madrid y Valencia para posibilitar la conexión con la red convencional. Existe un baipás que permite la conexión directa sin pasar por Madrid con la línea de Sevilla. En el kilómetro 247,025 la línea se bifurca hacia Albacete y Alicante.

En la Figura 2.41. se muestran los esquemas de vías de la línea.

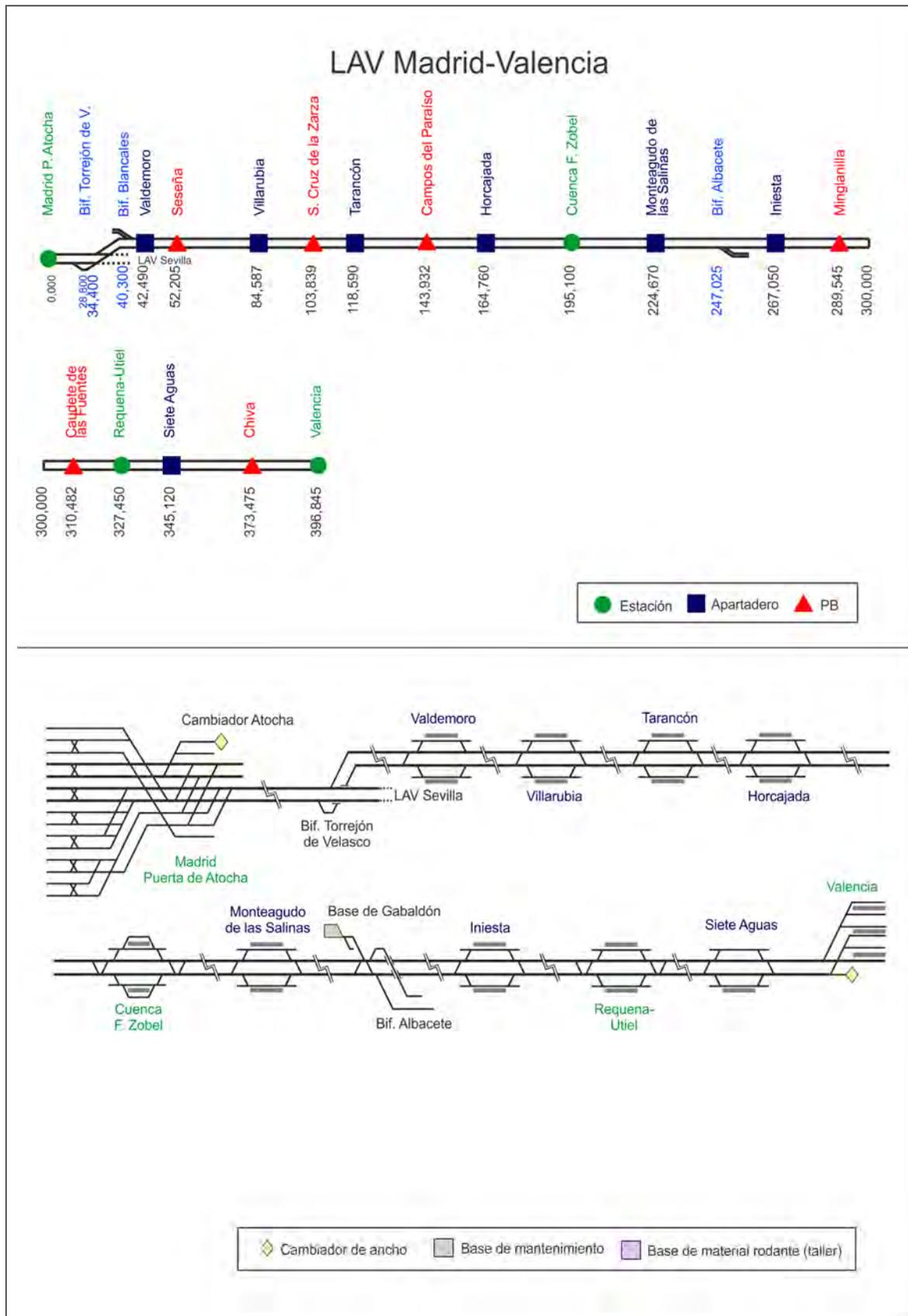


Figura 2.41. Esquema de dependencias de la línea Madrid-Valencia (España)
Fuente: Elaboración propia

2.2.3.7 Línea de alta velocidad Bifurcación Albacete-Alicante

En la Tabla 2.21. se sintetizan las características básicas de la línea.

Tabla 2.21. Características básicas de la línea Bifurcación Albacete-Alicante (España)

Año de inauguración	2010
Velocidad máxima (km/h)	350
Tipo de tráfico	Viajeros
Porcentaje de vía doble	100%
Conexiones con la red convencional	2
Longitud total (km)	717,9

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.42. se muestran las distancias entre dependencias de la línea.

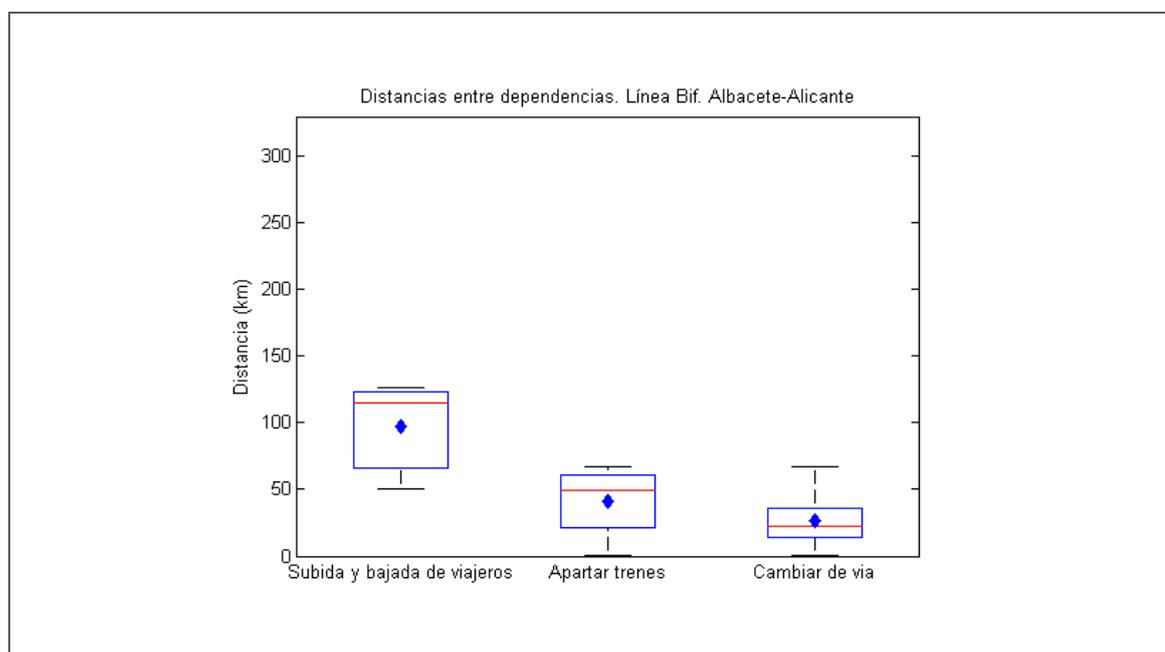


Figura 2.42. Distancia (km) entre dependencias de la línea Bifurcación Albacete-Alicante (España)

Fuente: Elaboración propia

La línea tiene su origen en la Bifurcación Albacete de la línea de alta velocidad Madrid-Valencia. Tiene tres estaciones, siendo la distancia media entre ellas (considerando también la estación de Cuenca que es la última antes de la bifurcación) de 96,91 kilómetros.

Dispone de cuatro apartaderos todos ellos dotados de dos vías con andén, y cuatro puestos de banalización. La distancia media entre dependencias que permiten apartar trenes es de 41,53 kilómetros y entre dependencias que permiten el cambio de vía de 26,43 kilómetros.

En Albacete se encuentra un cambiador de ancho que permite la conexión con la red convencional. Así mismo existen tres bifurcaciones que conectarán en un futuro con Valencia y Murcia.

En la Figura 2.43. se muestran los esquemas de vías de la línea.

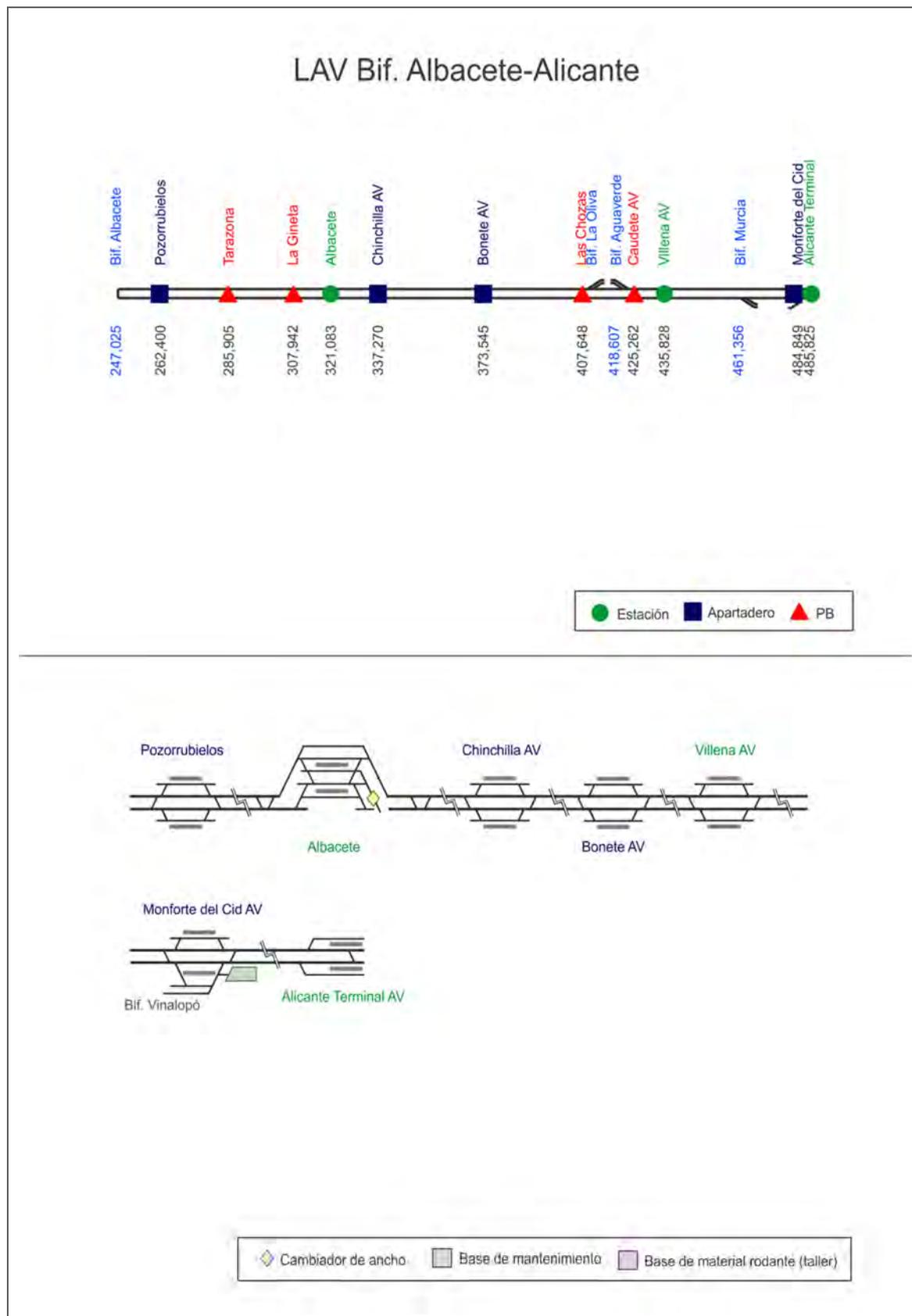


Figura 2.43. Esquema de dependencias de la línea Bifurcación Albacete-Alicante (España)

Fuente: Elaboración propia

2.3 ANÁLISIS DE DISTANCIAS ENTRE DEPENDENCIAS DEL CONJUNTO DE LA REDES

Una vez realizado el análisis de distancias entre dependencias por líneas resulta interesante analizar las distancias en el conjunto de las redes para poder establecer comparaciones entre ellas.

A continuación se analizan las distancias entre las dependencias que permiten apartar composiciones (estaciones y apartaderos). En Figura 2.44, Figura 2.45. y Figura 2.46. se muestran las funciones de densidad de probabilidad de las distancias con intervalos de 10 kilómetros de las redes de España, Francia y Japón respectivamente.

En la red española (Figura 2.44) los valores más frecuentes se localizan en el rango de 30 a 60 kilómetros. Los datos pueden ajustarse mediante una distribución normal de media 37,72 y desviación típica 17,03.

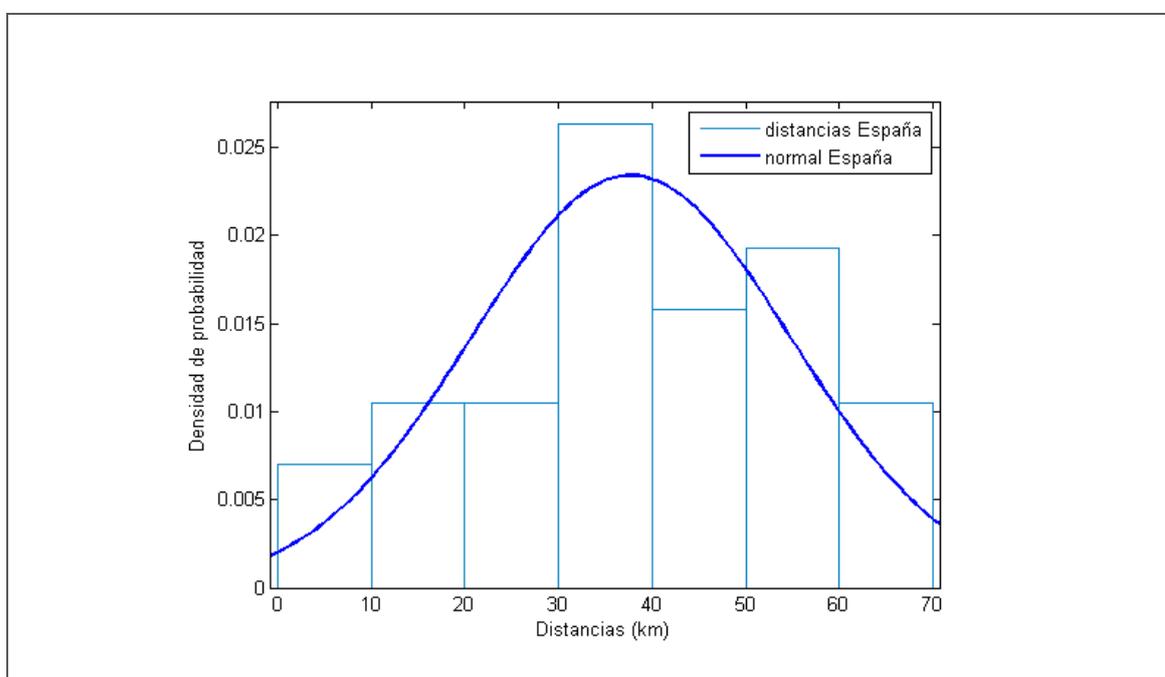


Figura 2.44. Función de densidad de probabilidad de las distancias entre estaciones y apartaderos en la red española de alta velocidad
Fuente: Elaboración propia

En la red francesa (Figura 2.45) los valores más frecuentes se localizan en el rango de 30 a 70 kilómetros. Los datos pueden ajustarse mediante una distribución normal de media 48,65 y desviación típica 21,05.

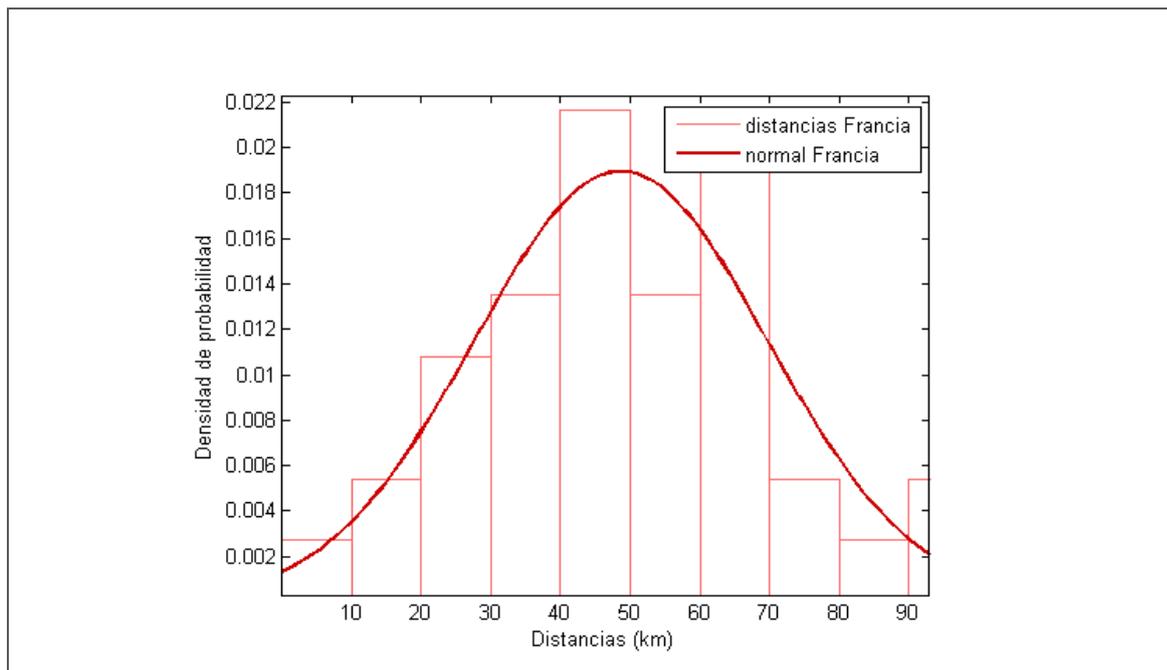


Figura 2.45. Función de densidad de probabilidad de las distancias entre estaciones y apartaderos en la red francesa de alta velocidad
Fuente: Elaboración propia

En la red japonesa (Figura 2.46) los valores más frecuentes se localizan en el rango de 20 a 50 kilómetros. Los datos pueden ajustarse mediante una distribución normal de media 33,63 y desviación típica 15,45.

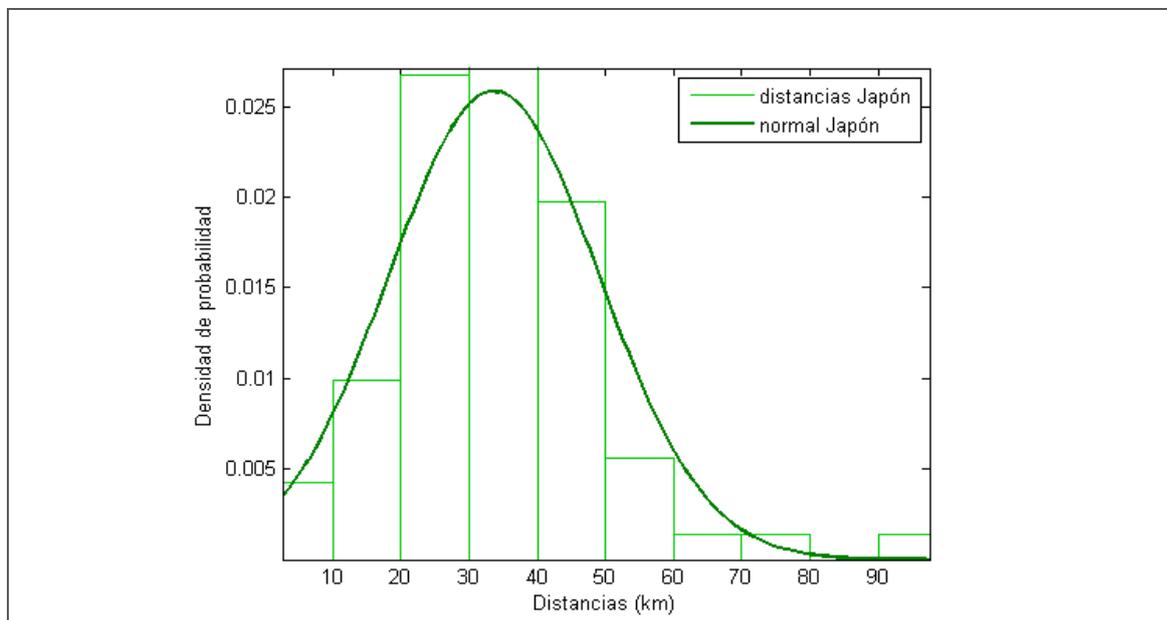


Figura 2.46. Función de densidad de probabilidad de las distancias entre estaciones y apartaderos en la red de alta velocidad japonesa
Fuente: Elaboración propia

Representándose las tres distribuciones en una única gráfica (Figura 2.47) puede observarse cómo la distancia media entre dependencias más reducida se da en Japón, seguida de España y Francia. También en este mismo orden se posicionan las tres redes respecto a la desviación típica lo cual indica una menor dispersión en las distancias de la red japonesa frente a la española y la francesa.

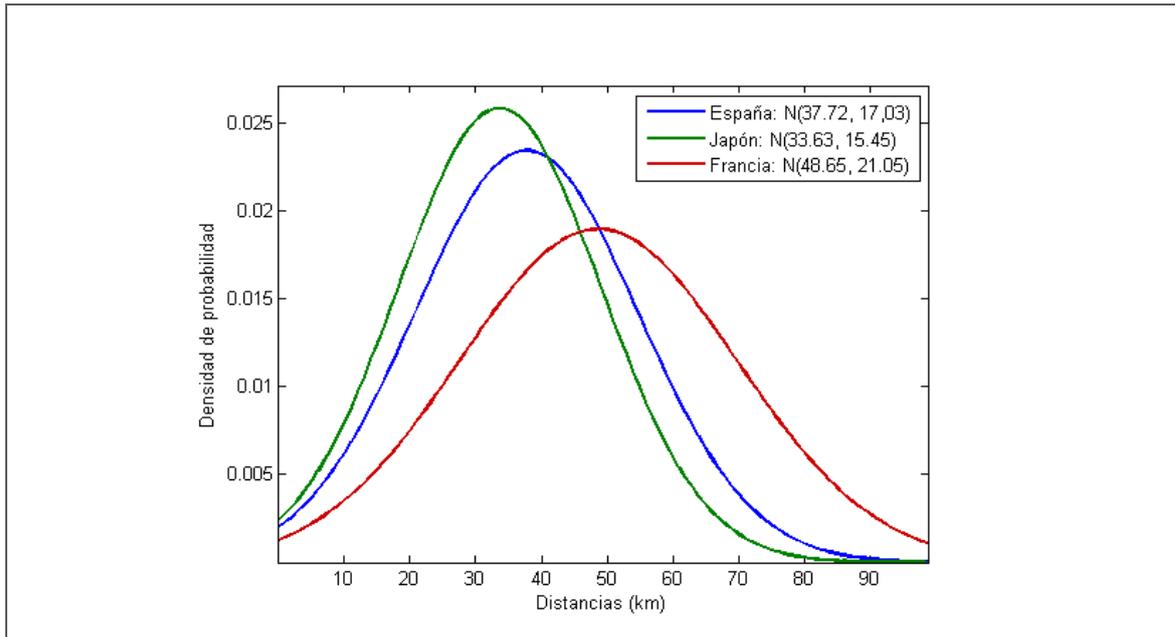
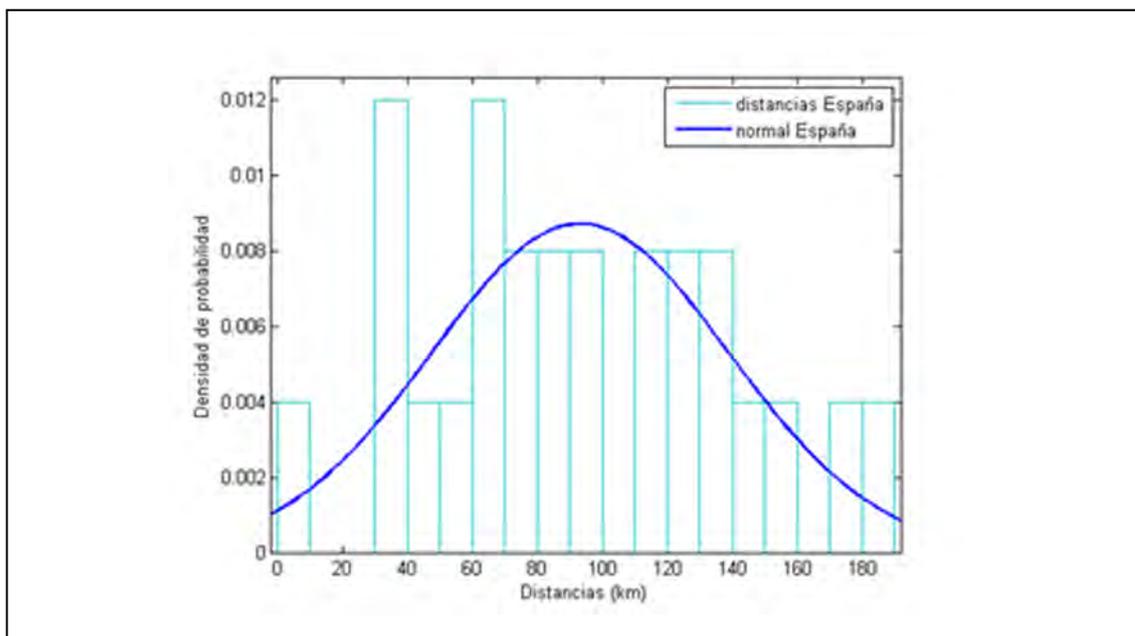


Figura 2.47. Función de densidad de probabilidad de las distancias entre estaciones y apartaderos de las tres redes de alta velocidad
Fuente: Elaboración propia

Se analizan a continuación las distancias entre dependencias que permiten la subida y bajada de viajeros (estaciones y apeaderos) para el conjunto de las redes. En Figura 2.48, Figura 2.49. y Figura 2.50. se muestran las funciones de densidad de probabilidad de las distancias con intervalos de 10 kilómetros de las redes de España, Francia y Japón respectivamente.

En la red española (Figura 2.48) los valores más frecuentes se localizan en el rango de 30 a 140 kilómetros. Los datos pueden ajustarse mediante una distribución normal de media 93,16 y desviación típica 45,82.

Figura 2.48. Función de densidad de probabilidad de las distancias entre estaciones en la red española de alta velocidad.



Fuente: Elaboración propia

En la red francesa (Figura 2.49) los valores más frecuentes se localizan en el rango de 60 a 130 kilómetros. Suprimida una distancia superior a 300 kilómetros por considerarse un valor atípico, los datos pueden ajustarse mediante una distribución normal de media 87,64 y desviación típica 46,15.

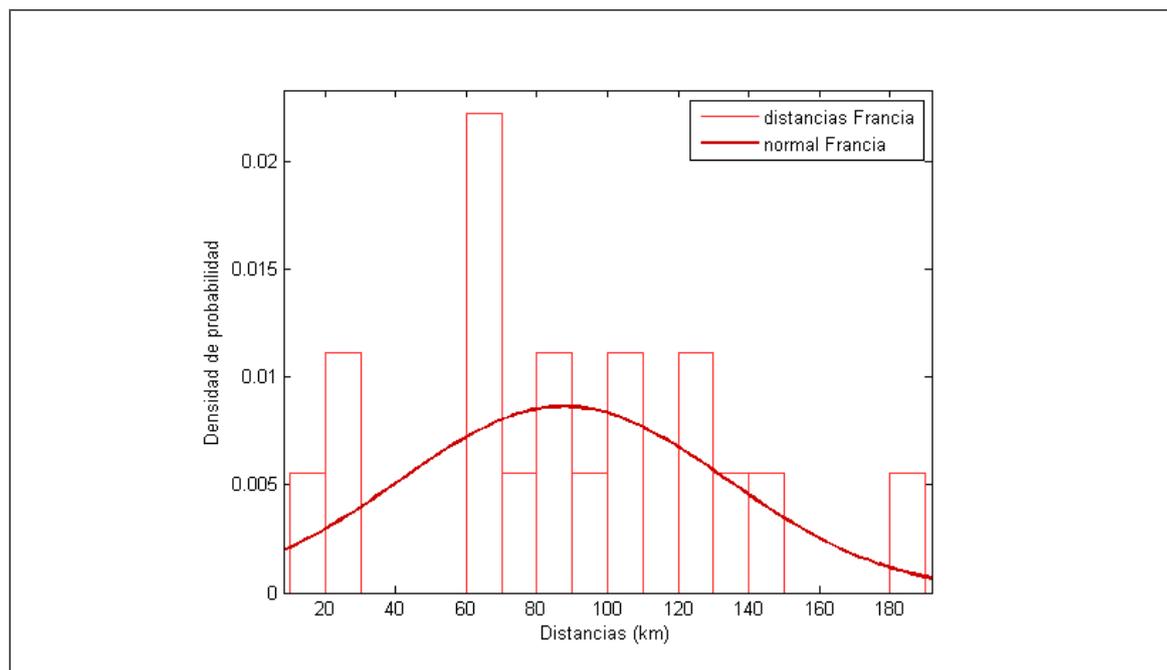


Figura 2.49. Función de densidad de probabilidad de las distancias entre estaciones en la red francesa de alta velocidad
Fuente: Elaboración propia

En la red japonesa (Figura 2.50) los valores más frecuentes se localizan en el rango de 20 a 40 kilómetros. Los datos pueden ajustarse mediante una distribución normal de media 29,18 y desviación típica 11,73.

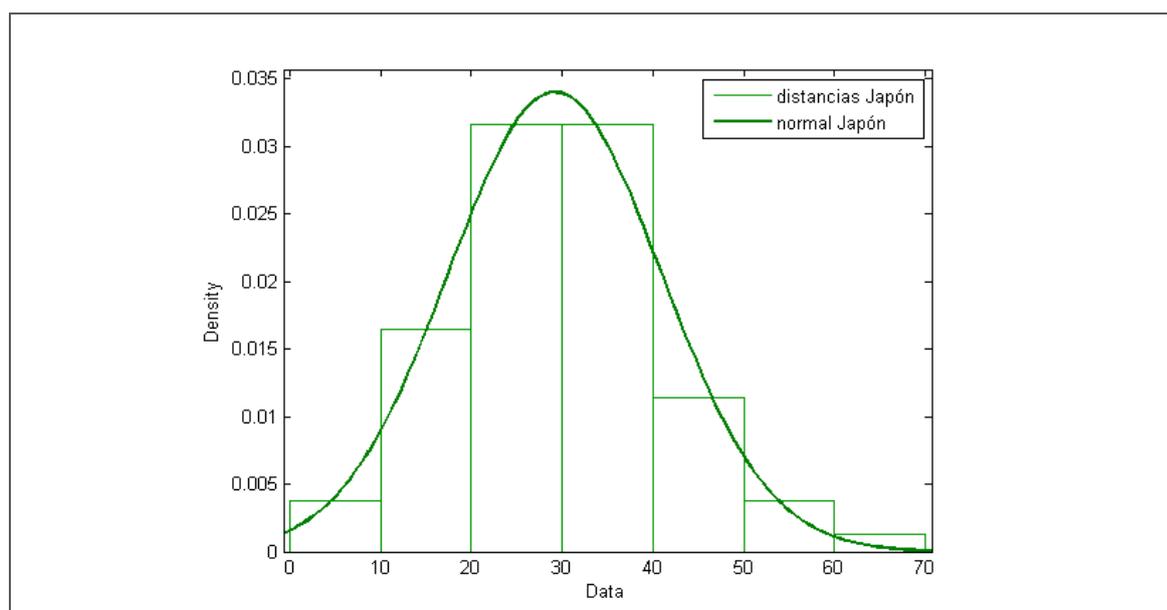


Figura 2.50. Función de densidad de probabilidad de las distancias entre estaciones y apeaderos en la red de alta velocidad japonesa
Fuente: Elaboración propia

Representándose las tres distribuciones en una única gráfica (Figura 2.51) puede observarse como las distancias más reducidas entre estaciones y apartaderos se dan en Japón. Las distancias de España y Francia son muy similares. Las medias de España y Francia llegan a triplicar la media japonesa.

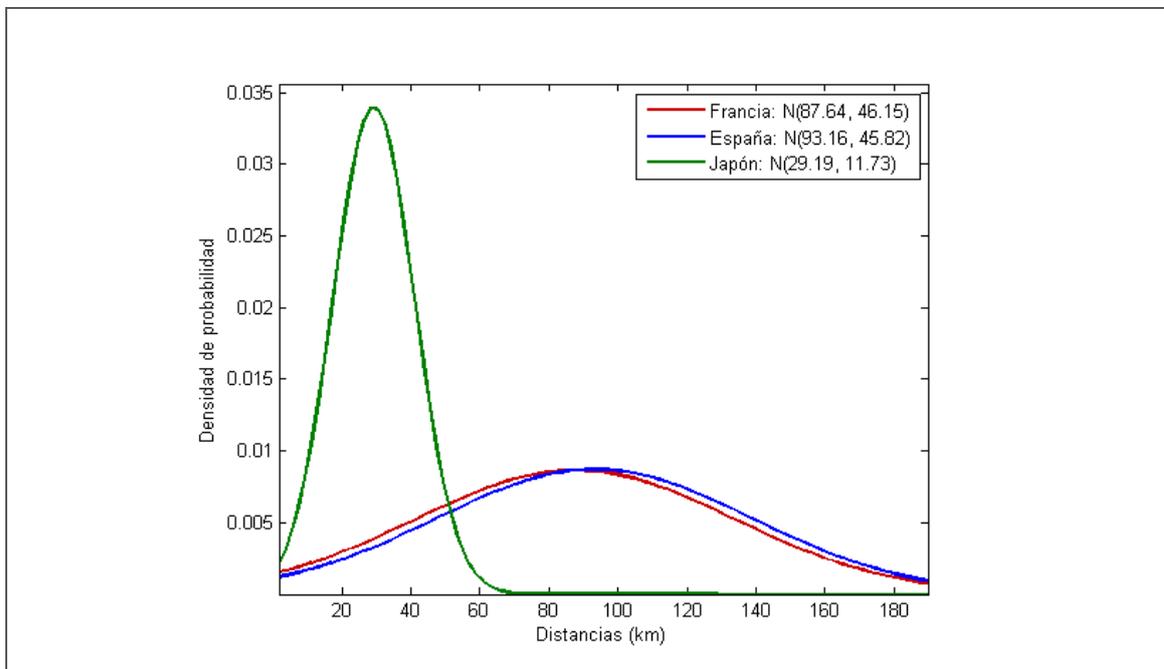


Figura 2.51. Función de densidad de probabilidad de las distancias entre estaciones y apeaderos de las tres redes de alta velocidad
Fuente: Elaboración propia

2.4 SÍNTESIS

Este primer análisis permite constatar:

- La relación entre la estructura de las redes de alta velocidad y las características geográficas y demográficas de cada país.
- Salvo en contadas excepciones, las redes de alta velocidad se dedican exclusivamente al tráfico de viajeros.
- A excepción de algunos tramos de pequeña longitud, las líneas se construyen en su totalidad en vía doble.
- La distancia media entre dependencias de circulación que permiten apartar y estacionar composiciones (estaciones y apartaderos) es de 37,72 kilómetros en la red española de alta velocidad, 48,65 en la francesa y 33,63 en la japonesa.

Sin embargo, el análisis no resulta suficiente, es necesario estudiar la estructura y topología de las redes poniéndolas en relación con los servicios que sobre ellas se operan o se pueden llegar a operar para de este modo comprenderlas mejor y realizar futuros diseños.

3. ANÁLISIS ESPECÍFICO DE LA ESTRUCTURA Y TOPOLOGÍA DE LAS LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD



LAV Madrid-Valencia

3 ANÁLISIS ESPECÍFICO DE LA ESTRUCTURA Y TOPOLOGÍA DE LAS LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD

Este capítulo complementa y profundiza en el análisis de las redes de alta velocidad estudiadas en el Capítulo 2, proponiendo al mismo tiempo una metodología para analizar la estructura y topología de una red de alta velocidad. En la sección 3.1. se realiza una introducción a los métodos matemáticos empleados para el estudio de las redes de transporte. En la sección 3.2 se estudia la estructura de las redes en relación con los servicios. La sección 3.3. se centra en las topologías de conexión de las redes.¹

3.1 INTRODUCCIÓN

El estudio de las redes de transporte, y en particular de las redes ferroviarias, es importante porque su estructura condiciona la operación y los flujos de viajeros y mercancías que por ellas pueden circular. Estas redes tienen generalmente dos características que no son necesariamente compartidas por otros tipos de redes: son pequeñas, en comparación por ejemplo con grandes redes como Internet, y tiene una estructura que es relativamente estable en el tiempo.

Las redes de transporte han sido estudiadas mediante una combinación de la teoría de grafos y lo que puede ser considerada una extensión de ésta, la ciencia de redes. Mientras que la teoría de grafos permite el estudio de redes regulares, que son relativamente pequeñas y que tienen una estructura definida, la ciencia de redes permite analizar redes con estructuras más complejas. Una extensa revisión de la aplicación de estas disciplinas al análisis de redes de transporte se puede encontrar en (Derrible y Kennedy, 2011).

Los estudios existentes abordan diferentes modos de transporte y en particular hay varios dedicados al análisis de redes metropolitanas (Derrible y Kennedy, 2010; Seaton y Hackett, 2004) y ferrocarriles convencionales (Guo y Cai, 2008; Li y Cai, 2007). Muchos de ellos están centrados en el estudio de las características topológicas de las redes considerando que cada vértice tiene una longitud igual a uno y que por tanto la distancia entre dos nodos es la suma de los vértices que forman el camino más corto entre ellos. Sin embargo, este enfoque no es completo para el análisis de redes de transporte, en las que los nodos tienen una posición claramente definida y la distancia entre ellos puede condicionar el tiempo de viaje y la demanda.

Aunque el enfoque metodológico que se emplea para el análisis de las redes de alta velocidad está basado en el establecido en los estudios de redes metropolitanas, es necesario hacer algunas adaptaciones debido a las características particulares de la alta velocidad.

3.2 ESTRUCTURA DE LAS REDES EN RELACIÓN CON LOS SERVICIOS POTENCIALES

En esta sección se trata de determinar si la estructura de las redes condiciona los servicios que sobre ellas se pueden operar. El interés en determinar la estructura de una red de transporte radica en su impacto en la operación y los efectos en el uso del suelo y la configuración de las ciudades.

El concepto de estructura de una red debe diferenciarse del concepto de topología de conexión. Aquí, la estructura de la red se refiere a la configuración en el espacio y la topología a la conectividad de los nodos.

¹ En este capítulo se basa el artículo científico Martín Cañizares, M.P., López Pita, A., García Álvarez, A. (2014). Structure and topology of high-speed rail networks. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*, 168(5), 415-424.

Existen varios trabajos que estudian la estructura de redes de carreteras (Erath, Loechl y Axhausen, 2009; Xie y Levinson, 2007) y ferroviarias (Roanes-Lozano et al., 2009). El análisis que aquí se presenta se basa en la metodología empleada para redes de carreteras pues se considera más apropiada para extraer conclusiones.

3.2.1 Patrones de conexión

Las redes ferroviarias, tanto convencionales como de alta velocidad, pueden tener diferentes configuraciones que están determinadas por las características geográficas y demográficas de cada país y el modelo de operación.

(Xie y Levinson, 2007) identifican los patrones básicos de conexión en redes de transporte: un patrón con un solo circuito se denomina *ring* (anillo) y si contiene más de un circuito se llama *web* (tela de araña); un patrón con un único concentrador se denomina *star* (estrella) y con más de un concentrador es un *hub-and-spoke* (Figura 3.1).

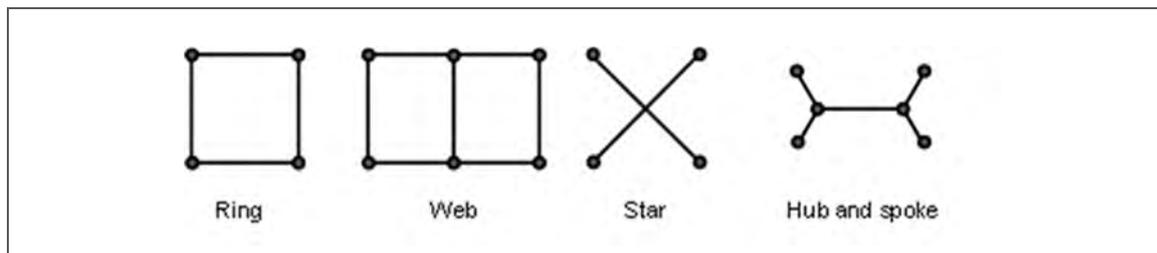


Figura 3.1. Patrones básicos de conexión - Fuente: (Xie y Levinson, 2007)

La combinación de estos patrones da lugar a estructuras más complejas que en el caso del ferrocarril son redes radiales, malladas y lineales (Figura 3.2).

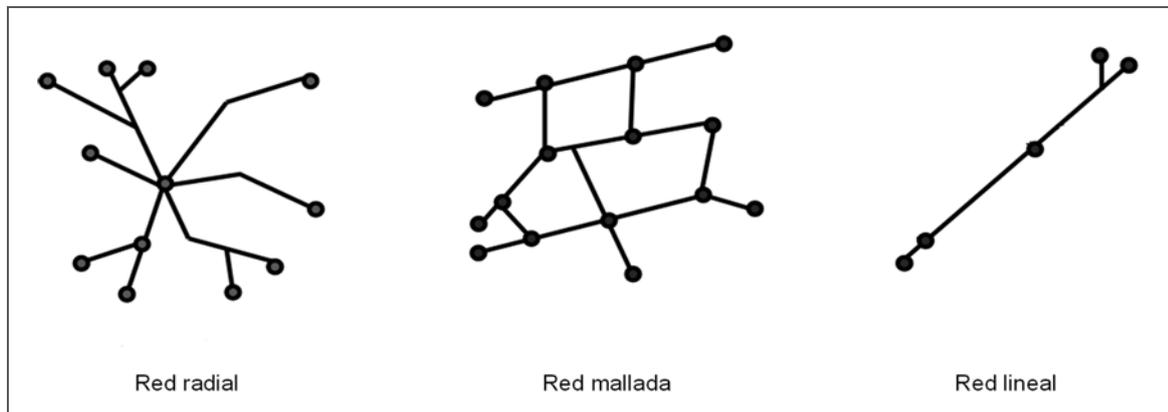


Figura 3.2. Estructuras de red -Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Proceso para determinar la estructura de una red

Una red ferroviaria puede ser representada como un grafo $G = \{V, E\}$ en el que los nodos son las estaciones y bifurcaciones y las aristas los tramos de vías que enlazan los nodos.

El procedimiento seguido aquí para determinar de forma objetiva la estructura de una red es el definido por (Xie y Levinson, 2007). Este método comienza estimando la proporción de aristas que forman parte de estructuras *ring* (ϕ_{ring}) y *web* (ϕ_{web})

$$\phi_{ring} = \frac{\text{Longitud total de aristas en estructura ring}}{\text{Longitud total de aristas}} \quad (3.1)$$

$$\phi_{web} = \frac{\text{Longitud total de aristas en estructura web}}{\text{Longitud total de aristas}} \quad (3.2)$$

Conocidos los índices ϕ_{ring} y ϕ_{web} se puede determinar la proporción de circuitos ($\phi_{circuit}$):

$$\phi_{circuit} = \phi_{ring} + \phi_{web} \quad (3.3)$$

A partir del índice $\phi_{circuit}$ se puede obtener la proporción de aristas en *star* y *hub-and-spoke* (ϕ_{tree}):

$$\phi_{tree} = 1 - \phi_{circuit} \quad (3.4)$$

Un valor alto de ϕ_{tree} indica una estructura radial o lineal mientras que un alto indica una estructura mallada.

3.2.2.1 Estructura de la red japonesa de alta velocidad

Para estudiar la red japonesa de alta velocidad es necesario primero calcular los índices referidos a su estructura. Se observa (Tabla 3.1) que el 100% de las aristas se encuentran en estructuras *star* o *hub-and-spoke*, lo que indica que se trata de una red radial o lineal.

Tabla 3.1. Índices de la estructura de la red japonesa de alta velocidad

ϕ_{ring}	ϕ_{web}	$\phi_{circuit} = \phi_{ring} + \phi_{web}$	$\phi_{tree} = 1 - \phi_{circuit}$
0%	0%	0%	100%

Fuente: Elaboración propia

La red está compuesta por dos subredes, ya que no existe conexión en Tokyo. La subred sur, formada por el Tokaido Shinkansen, Sanyo Shinkansen y Kyushu Shinkansen, tiene una estructura lineal debido a que no existen ramificaciones ni circuitos.

La subred norte, que consta del Tohoku Shinkansen, Hokuriku Shinkansen y Joetsu Shinkansen, tiene una estructura radial. De hecho, si se consideran las líneas Mini-Shinkansen esta estructura es aún más clara. En Omiya (Tohoku Shinkansen) comienza el Joetsu Shinkansen, que a su vez se divide en Takasaki para dar acceso a Nagano y Niigata. En Fukushima se inicia el Mini-Shinkansen Yamagata y en Morioka el Mini-Shinkansen Akita. El impacto de esta estructura en la densidad de tráfico se analiza a continuación.

La Figura 3.3. muestra la densidad de tráfico de cada una de las secciones con tráfico uniforme en la red. Se representa el número medio de circulaciones por sentido y día y sentido conforme al horario de 2012. Las secciones próximas a Tokyo tienen la mayor densidad de tráfico; entre Tokyo y Omiya se alcanzan las 152,5 circulaciones por día y sentido y entre Tokyo y Nagoya 141,1.

El número de servicios decrece en sentido sur con un total de 59,9 servicios que llegan a la estación de Kagoshima-Chuo, menos de la mitad de los que salen de Tokyo. Lo mismo sucede en sentido norte, pero el efecto es todavía más visible debido a la estructura radial. La capacidad de las secciones troncales limita el número de trenes que pueden llegar a los destinos finales desde Tokyo. En las últimas secciones de cada rama hay 29,5 servicios entre Takasaki y Nagano, 27,1 servicios entre Takasaki y Niigata y 17,1 servicios entre Morioka y Shin-Aomori por sentido y día.

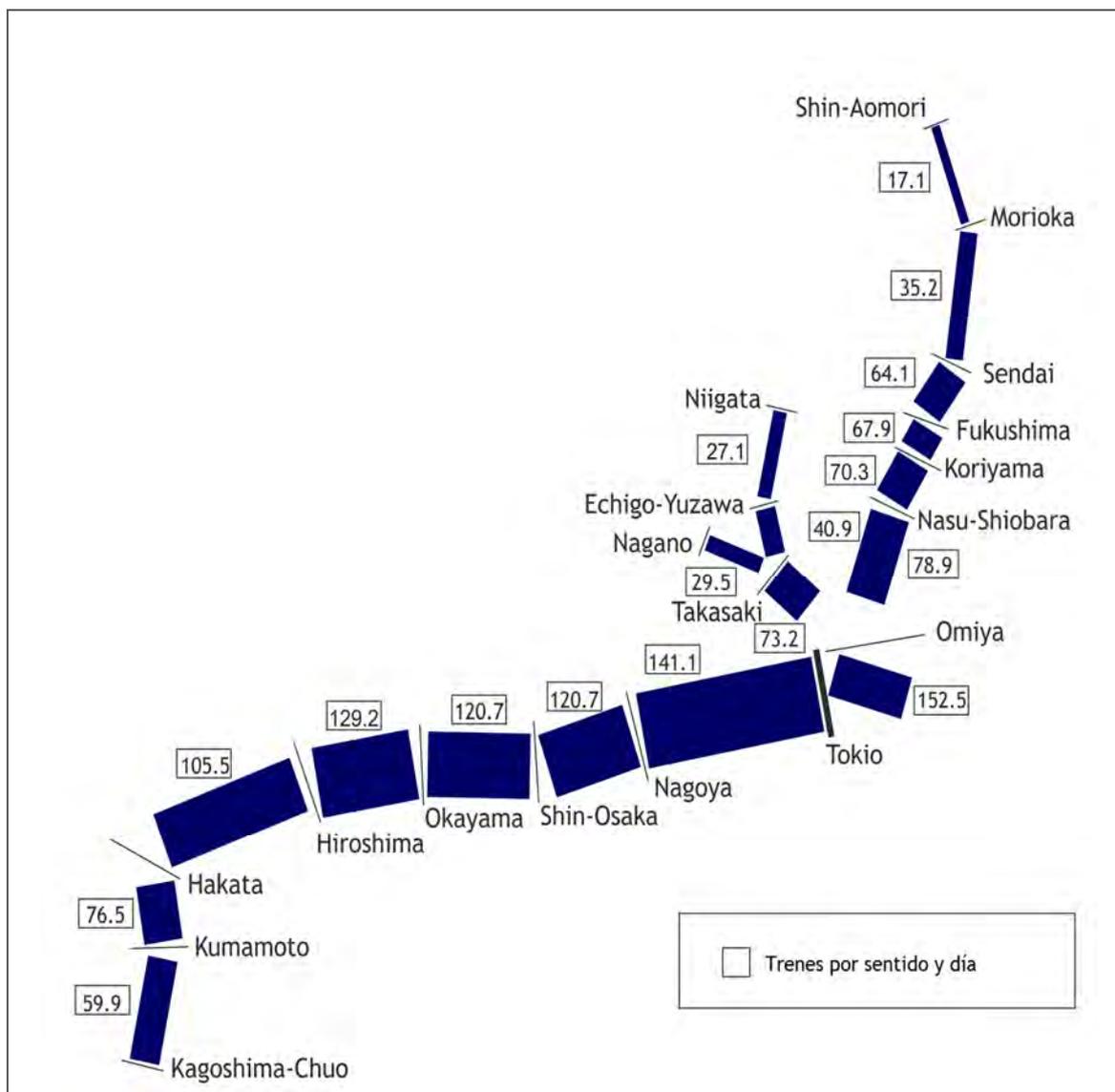


Figura 3.3. Densidad de tráfico en la red japonesa de alta velocidad
Fuente: Elaboración propia

3.2.2.2 Estructura de la red francesa de alta velocidad

Para estudiar la red francesa de alta velocidad es necesario primero calcular los índices referidos a su estructura (Tabla 3.2). Se observa un ϕ_{tree} muy elevado en comparación con el $\phi_{circuit}$ lo que junto con la observación de la red permite concluir que se trata de una red radial

Tabla 3.2. Índices de la estructura de la red francesa de alta velocidad

ϕ_{ring}	ϕ_{web}	$\phi_{circuit} = \phi_{ring} + \phi_{web}$	$\phi_{tree} = 1 - \phi_{circuit}$
4,07%	0%	4,07%	95.93%

Fuente: Elaboración propia

La red de alta velocidad francesa tiene una estructura radial, con centro en París. Sin embargo, cada línea parte de una estación diferente en París: la LGV Nord desde Gare du Nord, la LGV Est-Européenne desde la Gare de l'Est, la LGV Sud-Est desde la Gare de Lyon y la and LGV Atlantique desde la Gare Montparnasse.

La LGV Nord, la LGV Est y la LGV Sud-Est están conectadas mediante la LGV Interconnexion y la LGV Atlantique está conectada a ellas mediante dos secciones de línea convencional y alta velocidad.

La Figura 3.4. muestra la densidad de tráfico de cada una de las secciones con tráfico uniforme representando una estimación del número de circulaciones por sentido y día basado en el horario de 2012.

Las secciones más próximas a París tienen los niveles de tráfico más elevados. En la LGV Nord entre T. Vemars y T. Fretin 98.9 servicios, en la LGV Est-Europenee, entre Claye-Souilly y Bif. Reims 53.1 servicios, en la LGV Atlantique entre Massy y Bif. Courtalain 115.9 servicios y en la LGV Est-Européenne entre Moisenay Junction y R. Saint Florentin 141.1 servicios por día y sentido.

La TGV Est-Européenne no tiene todavía un elevado volumen de tráfico porque su inauguración es relativamente reciente, el caso opuesto es la LGV Sud-Est, que fue la primera línea inaugurada.

El número de trenes que llegan a los destinos periféricos desde París está limitado por la capacidad de las secciones troncales.

Hay que destacar también que la red de alta velocidad da acceso en varios puntos a la red convencional.

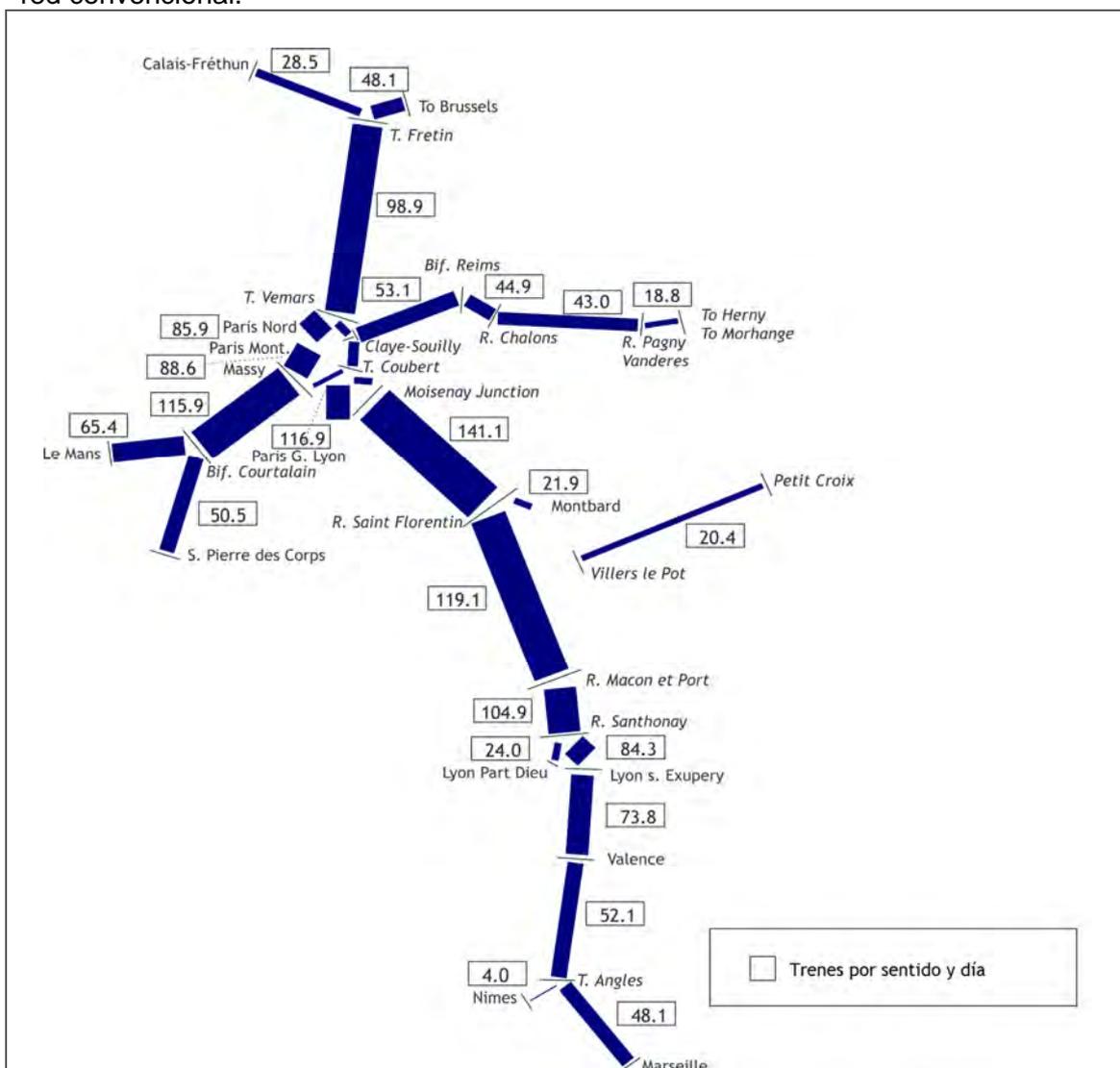


Figura 3.4. Densidad de tráfico en la red francesa de alta velocidad - Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.5 se muestra la evolución del tráfico en las líneas francesas de alta velocidad desde la inauguración de la alta velocidad en 1981 hasta 2011. Pueden observarse diferencias notables en el número de viajeros.kilómetro en el tiempo y por líneas. Por ejemplo, la LGV Paris Sud-Est se encuentra próxima a la saturación y la LGV Nord Europe, con una longitud similar, tiene un tráfico significativamente inferior, sin embargo, ambas (al igual que el resto de líneas de alta velocidad francesas) están dotadas de doble vía en su totalidad como se ha mostrado en los esquemas de las líneas francesas presentados en el Capítulo 2.

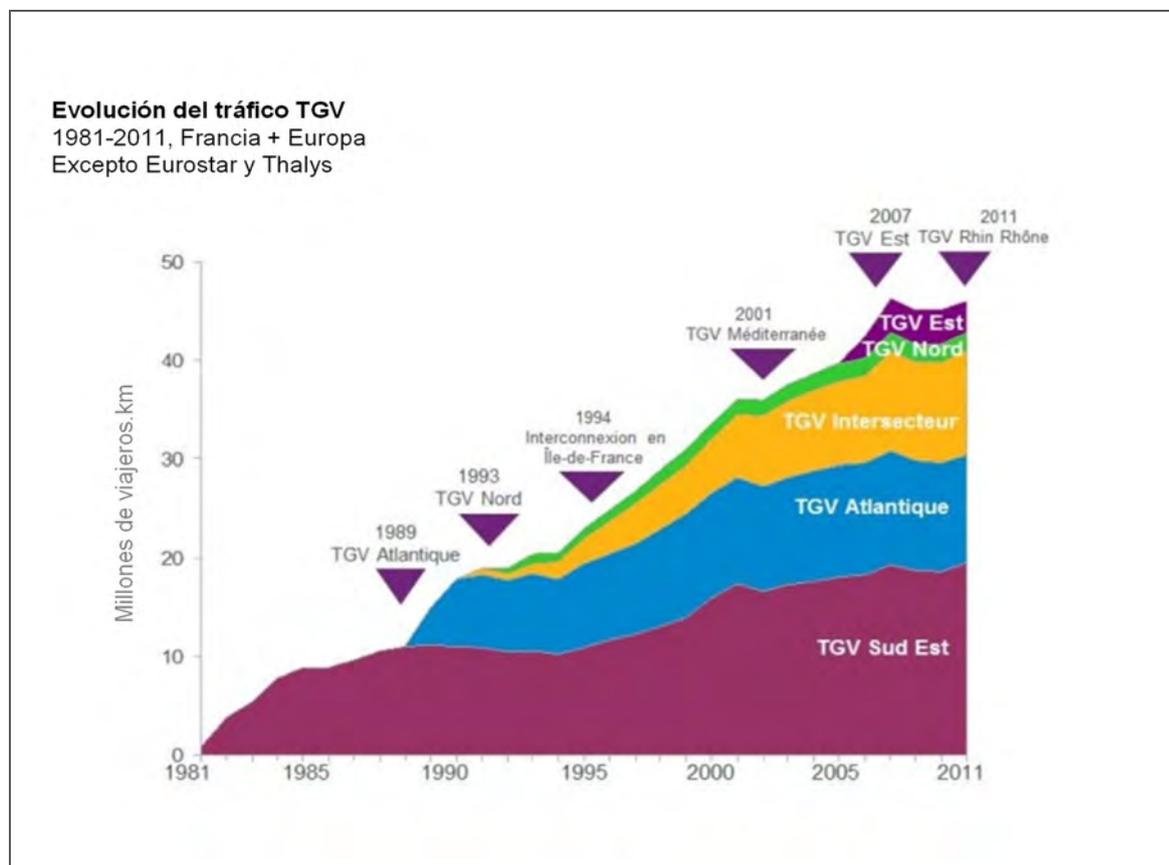


Figura 3.6. Evolución del tráfico en las líneas de alta velocidad francesas
Fuente: (SNCF, 2015)

3.2.2.3 Estructura de la red española de alta velocidad

Para estudiar la red española de alta velocidad es necesario primero calcular los índices referidos a su estructura (Tabla 3.3). Se observa un ϕ_{tree} muy elevado en comparación con el $\phi_{circuit}$ lo que junto con la observación de la red permite concluir que se trata de una red radial

Tabla 3.3. Índices de la estructura de la red española de alta velocidad

ϕ_{ring}	ϕ_{web}	$\phi_{circuit} = \phi_{ring} + \phi_{web}$	$\phi_{tree} = 1 - \phi_{circuit}$
5,62%	0%	5,62%	94,38%

Fuente: Elaboración propia

La red de alta velocidad española tiene una estructura radial con centro en Madrid. Sin embargo, no existe conexión entre la línea Madrid-Valladolid y el resto.

Además, la red radial es claramente troncal. Cuatro ejes principales parten de Madrid (norte-noroeste, noreste, este y sur) y se van ramificando para alcanzar los destinos periféricos. Por tanto, el número de servicios que pueden llegar a los destinos periféricos desde el centro está limitado por la capacidad de los ejes principales.

La Figura 3.7. muestra la densidad de tráfico de cada una de las secciones con tráfico uniforme en la red española. Se representa el número medio de circulaciones por sentido y día basado en datos reales de 2014.

La sección que acumula más tráfico es la delimitada por Bifurcación Los Gavilanes y Torrejón de Velasco, con 105,1 servicios por sentido y día. Esta sección es utilizada por los servicios que se encaminan a Toledo, Sevilla, Málaga y Levante

En la línea Madrid-Valladolid circulan 24,6 trenes por sentido y día. Este número está muy alejado de la capacidad máxima de la línea debido a que en el futuro dará acceso a todo el norte y noroeste peninsular.

Respecto a la línea Madrid-Levante, es de esperar que el tráfico aumente progresivamente en los próximos años ya que está prevista su extensión a Murcia, Cartagena y Almería.

En la línea Madrid-Barcelona el tráfico es más elevado entre Lleida y Barcelona debido a la existencia de servicios de alta velocidad y media distancia, además de los servicios de alta velocidad y transversales hacia el norte de España.

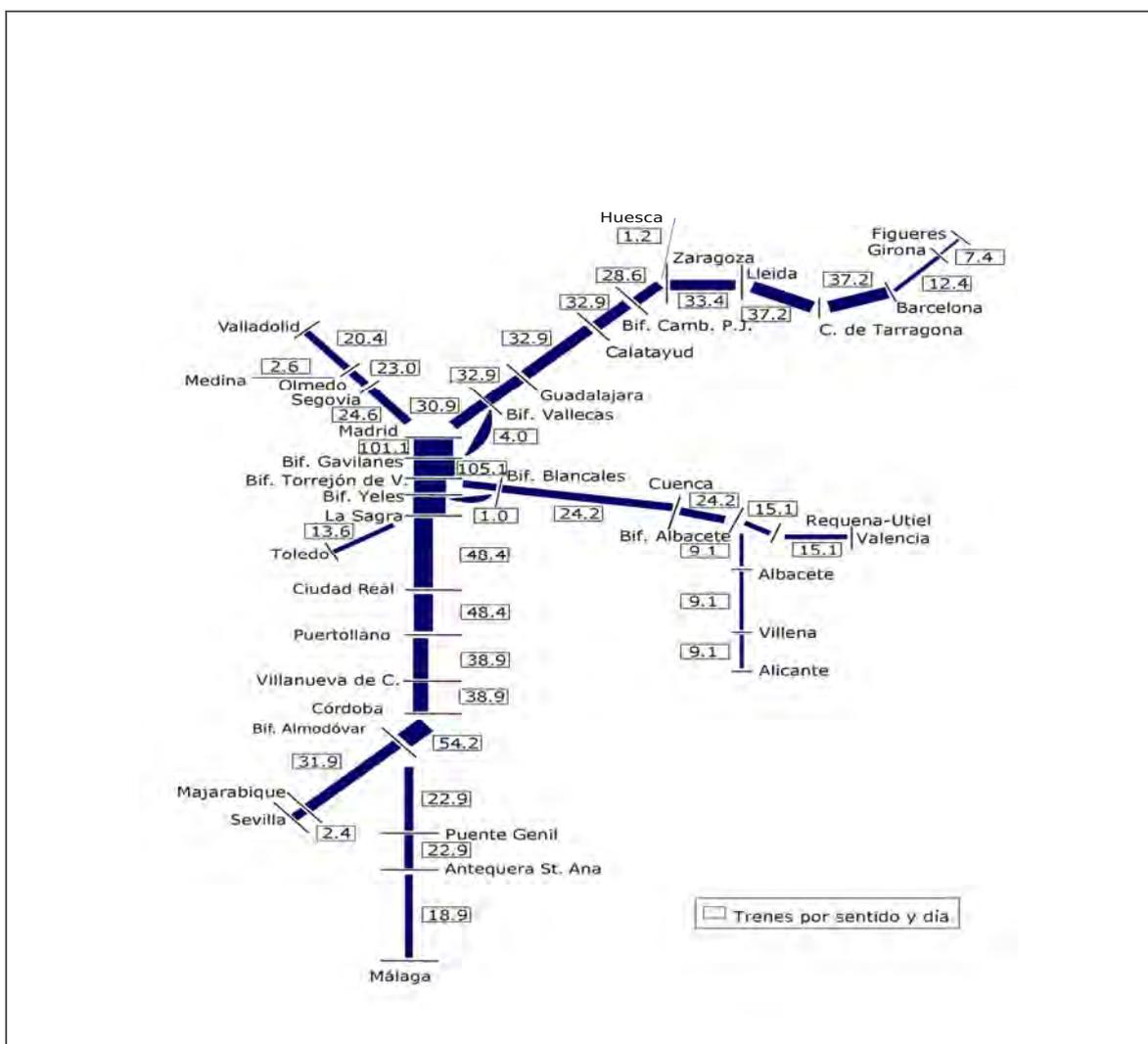


Figura 3.7. Densidad de tráfico en la red española de alta velocidad. Año móvil octubre de 2014 - Fuente: Elaboración propia con datos no oficiales

En la Figura 3.8, extraída de (García Álvarez, 2011b) se muestra la estructura previsible de la red de alta velocidad española una vez concluida. El autor establece el criterio para delimitar los conceptos de tramo troncal y periférico, indicando que los tramos troncales son aquellos en los que el número de vías es menor de tres veces la suma de las vías que se derivan de ellas. Por tanto, en el caso español, son troncales los tramos Madrid-Palencia, Madrid-Figueres, Madrid-Monforte del Cid y Madrid-Antequera.

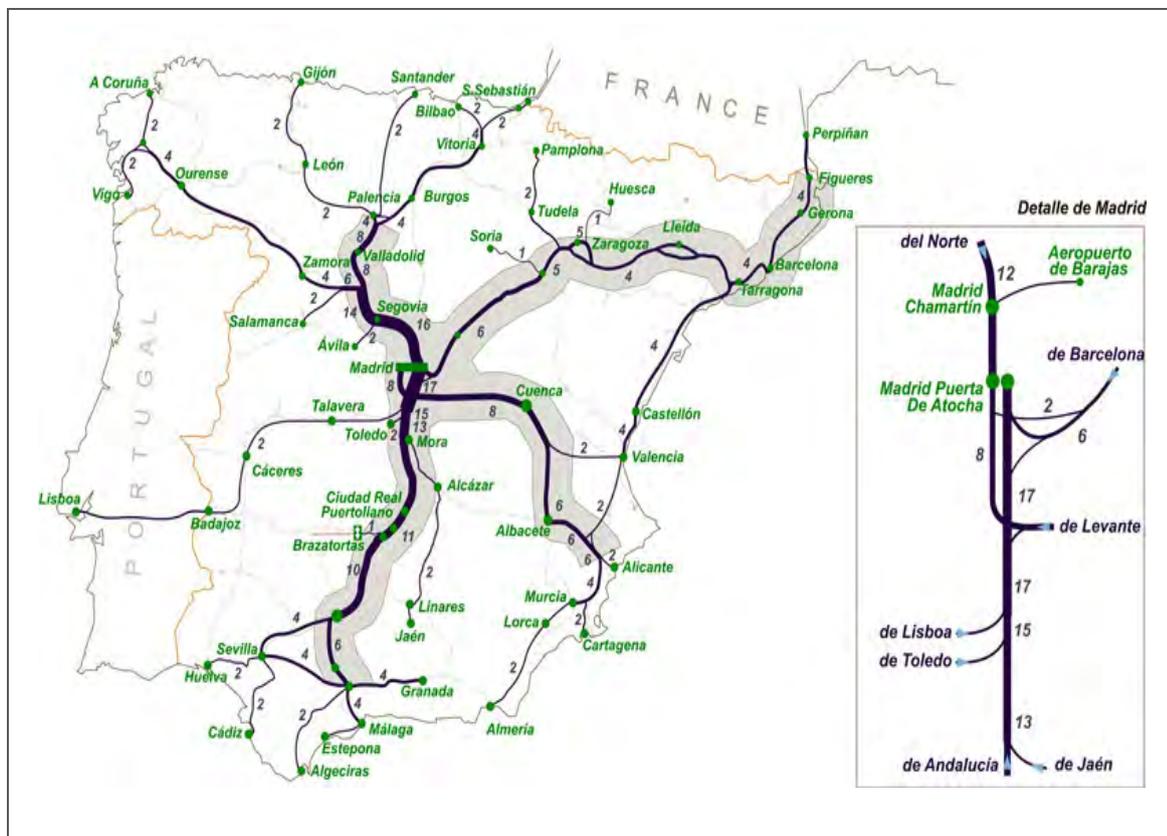


Figura 3.8. Clasificación de los tramos troncales y capilaridad de la red española de alta velocidad - Fuente: (García Álvarez, 2011b)

El estudio del número de viajeros que utilizan cada sección puede permitir extraer algunas conclusiones. Para analizar la influencia de cada tipo de servicio se han agrupado los viajeros en tres tipos: alta velocidad y larga distancia (AVE), larga distancia (Alvia, Altaria y Trenhotel) y alta velocidad y media distancia (Avant). Los datos corresponden al año móvil octubre de 2014 (Figura 3.9).

La sección con el mayor número de viajeros es la delimitada por Bifurcación Los Gavilanes y Torrejón de Velasco con 12,9 millones, y la que tiene menor tráfico es la sección entre Zaragoza y Huesca con 0,1 millones de viajeros.

La sección entre Madrid y La Sagra es empleada por un elevado número de viajeros que utilizan los servicios Avant para continuar hasta Toledo y Puertollano. Estos tráficos reducen las oportunidades de establecer servicios que se dirijan a destinos más lejanos puesto que en la actualidad en cuello de botella de la red de alta velocidad española es la sección Madrid Puerta de Atocha-Torrejón de Velasco, de hecho, esta sección está en obras para pasar de dos a cuatro vías.

No todos los servicios parten de Madrid. Hay un importante tráfico de Avant entre Sevilla-Córdoba-Málaga y Lleida-Figures.

Llama la atención la homogeneidad en los diseños de las líneas españolas, que según se mostró en los esquemas de las líneas presentados en el Capítulo 2 disponen de doble vía en su totalidad (a excepción de Zaragoza-Huesca) desde su inauguración y

ello pese a la ubicación de cada tramo en la red y las diferencias en los volúmenes de tráfico.

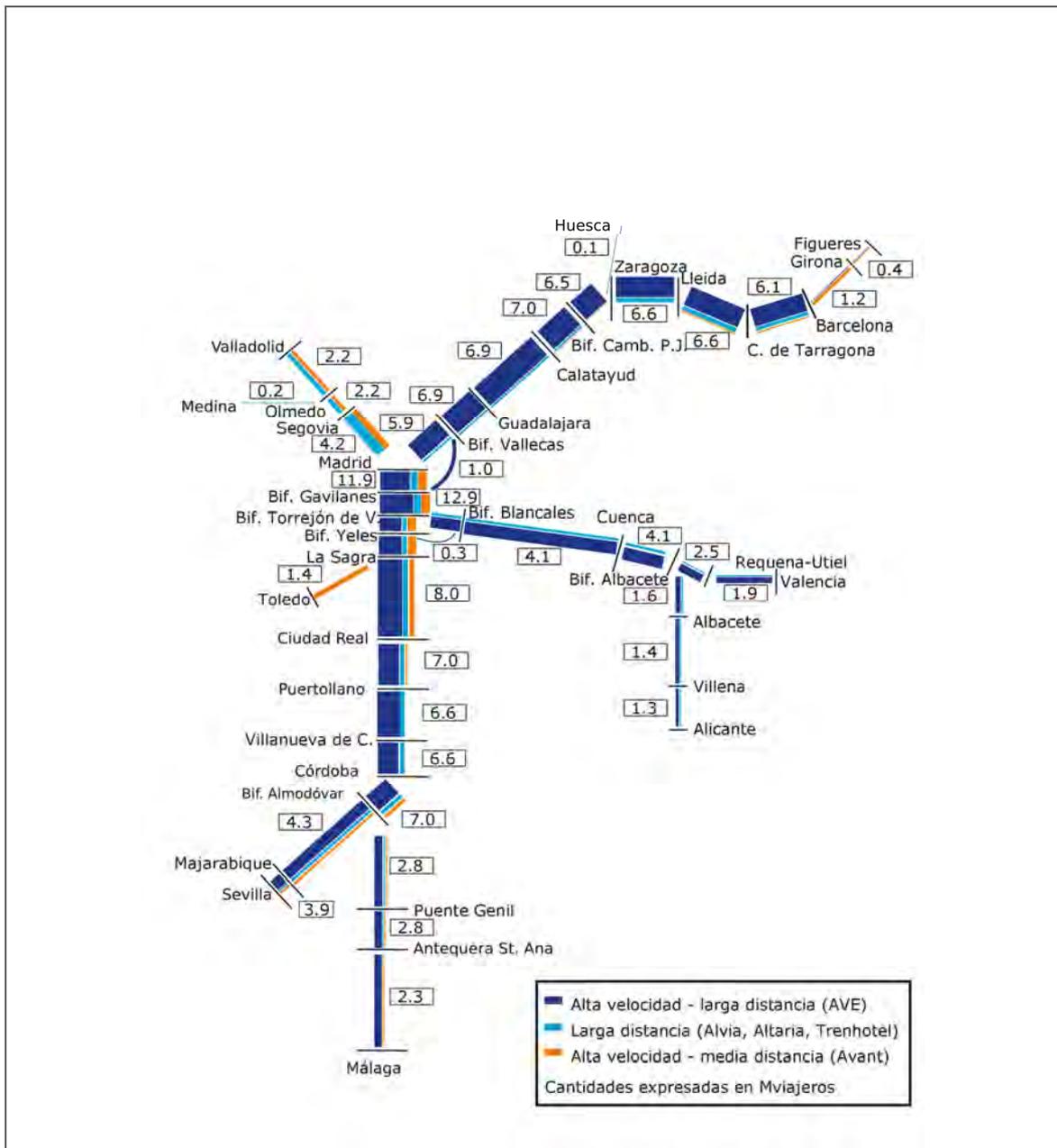


Figura 3.9. Viajeros en cada sección de la red española de alta velocidad. Año móvil octubre de 2014

Fuente: Elaboración propia con datos no oficiales

3.3 TOPOLOGÍAS DE CONEXIÓN DE LAS REDES

En la sección anterior se han considerado los servicios actuales, sin embargo, aquí el objetivo es medir las posibilidades que una determinada configuración ofrece. Generalmente los operadores ferroviarios diseñan los servicios atendiendo a varios criterios (bajo la obligación de prestar servicios de interés público, maximizar los ingresos, minimizar los costes de operación...). Además, los criterios para la definición de servicio son cambiantes y pueden variar de unos operadores a otros. Sin embargo, el interés de analizar la topología de una red de alta velocidad no radica en los servicios que un determinado operador realiza en un periodo temporal concreto, sino en las

posibilidades que ofrece la infraestructura considerando todos los servicios (y no sólo un subconjunto) que se podrían prestar con la configuración de la red existente.

La topología de conexión se refiere en general a cómo una red distribuye información con respecto a cómo están conectados sus nodos. Un concepto relevante a menudo estudiado para determinar la topología de conexión de una red es el de *small-world*. Este concepto fue definido por primera vez en (Watts y Strogatz, 1998), mostrando que algunas redes tales como las sociales, biológicas y tecnológicas, no son ni completamente regulares ni completamente aleatorias. Una red *small-world* está bien conectada localmente mientras que las partes que la componen están próximas entre sí, en cuanto a grados de separación, gracias a la existencia de unos pocos enlaces supra-regionales.

Este concepto ha sido investigado en múltiples disciplinas científicas y en particular en redes ferroviarias (Ru et al., 2008; Sen et al., 2003) y redes de transporte metropolitanas (Derrible y Kennedy, 2010; Latora y Marchiori, 2002; Seaton y Hackett, 2004). Sin embargo, para redes de alta velocidad, en las que las distancias entre nodos pueden tener un fuerte impacto en la demanda y los tiempos de viaje, la definición general no es apropiada y consecuentemente tiene que ser adaptada.

Una red ferroviaria es *small-world* cuando las estaciones y bifurcaciones están bien conectadas localmente y la vez están próximas, con respecto al tiempo de viaje, al resto de estaciones y bifurcaciones de la red gracias a la existencia de algunos enlaces supra-regionales.

3.3.1 Estudio de las topologías de conexión mediante la determinación de la propiedad *small-world*

El procedimiento para determinar si una red es *small-world* fue definido por (Watts y Strogatz, 1998). Sin embargo, para redes de transporte, en las que es necesario considerar el tiempo de viaje este procedimiento no es adecuado, como demuestra (Latora y Marchiori, 2002). Por ello este estudio se basará en dicho trabajo.

Como en las redes de alta velocidad aquí consideradas no existen grandes diferencias en las velocidades máximas autorizadas en sus diferentes secciones y para independizar las redes de los servicios comerciales, se considerarán las distancias entre nodos en lugar de los tiempos de viaje.

Al respecto, (Latora y Marchiori, 2002) definen el concepto de *eficiencia de la red* (E) que entre cualquier par de nodos $i-j$ es inversamente proporcional a la distancia más corta entre ellos (d_{ij}). Por tanto, cuanto menor es la distancia entre nodos, mayor es la eficiencia:

$$E = \frac{1}{v(v-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \tag{3.5}$$

Se diferencian dos conceptos, la *eficiencia global* (E_{global}) como la eficiencia de la red en su conjunto y la *eficiencia local* (E_{local}) como el promedio de las eficiencias del grafo de vecindad de cada nodo. En las redes de alta velocidad la eficiencia local hace referencia a la conexión entre estaciones y nodos de una determinada región y la eficiencia global a la existencia de conexiones entre regiones.

Los indicadores E_{global} y E_{local} se normalizan respecto a la eficiencia del caso ideal en el que la red tenga todas las aristas posibles $v(v-1)/2$, por lo que $0 \leq E \leq 1$. Para normalizar el procedimiento establecido considera que la longitud de una arista que no existe es la distancia en línea recta entre los nodos que la limitan. Sin embargo, en las

redes de alta velocidad las secciones de vía no son rectas por lo que resulta más recomendable calcular la distancia entre dos nodos como la distancia en línea recta multiplicada por el coeficiente C_{dd} , que expresa la ratio entre la distancia real y en línea recta de los tramos de vía existentes. El ratio ha sido calculado para las tres redes estudiadas y es 1,0552 para la red japonesa, 1,14 para la francesa y 1,0966 para la española.

La eficiencia de una red es mayor cuanto mayor es el número de conexiones directas entre nodos. El principal inconveniente es que en la realidad la construcción de un tramo tiene un coste económico asociado. Para cuantificar este efecto se define el coeficiente de desarrollo de la red C_{dr} , como la relación entre la suma de las longitudes de todos los tramos y la longitud de la red si existiera conexión directa entre todos los nodos. El máximo valor (100%) se obtiene para el caso ideal en el que todas las aristas están presentes en el grafo.

3.3.2 Eficiencia y desarrollo de las redes de alta velocidad de Japón, Francia y España

Se calcula la eficiencia global, la eficiencia local y el coeficiente de desarrollo de la red para las tres redes de alta velocidad de acuerdo con la metodología presentada (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Eficiencias global y local y coeficiente de desarrollo de la red

Redes de alta velocidad	E_{global}	E_{local}	C_{dr}
<i>Japón</i>	74,48%	0,00%	0,12%
<i>Francia</i>	62,90%	7,14%	0,62%
<i>España</i>	69,80%	23,37%	1,14%

Fuente: Elaboración propia

La red japonesa de alta velocidad tiene una buena eficiencia global (74,48%) con un desarrollo de red extremadamente bajo (0,12%). Esto significa que el conjunto de los nodos está bien conectado en comparación con una red con todas las aristas. Un factor que penaliza la eficiencia global es el hecho de que la red japonesa está constituida por dos subredes como no existe conexión en Tokyo entre el Tokaido Shinkansen y el Tohoku Shinkansen.

Sin embargo, llama la atención que la eficiencia local es cero. Una posible causa es la linealidad de la red. En general, las estaciones están unidas a una o dos estaciones y en pocos casos (Omiya y Takasaki) a tres. Más allá del concepto matemático de eficiencia local, desde el punto de vista de la operación ferroviaria esta conclusión tiene un impacto negativo en la fiabilidad y robustez de la red. De hecho, si una sección de vía o una estación tienen una incidencia grave se reduciría el tráfico o incluso se dividiría la red en tres subredes.

Respecto a la red francesa de alta velocidad, la eficiencia global es del 62,90%. La eficiencia local es del 7,14% porque, como en el caso de Japón, típicamente las estaciones están conectadas a una o pocas estaciones. Aunque la red de alta velocidad tiene una estructura radial es de esperar que si se analiza conjuntamente con la red convencional (que aquí no se ha tenido en cuenta) la eficiencia sea mayor. Estos niveles de eficiencia global y local se logran con un desarrollo de la red del 0,62%.

En cuanto a la red española de alta velocidad, la eficiencia global es del 69,80%. Este valor es bueno, sobre todo si se tiene en cuenta que la red de alta velocidad no está aislada puesto que existen múltiples conexiones con la convencional. Por tanto, es de esperar que la eficiencia sea mayor si se consideran ambas redes.

La eficiencia local es del 23,37%. Aunque este valor es más elevado que el obtenido para la red japonesa y la francesa, no es especialmente bueno. Como en el caso de las otras redes analizadas, típicamente las estaciones están conectadas sólo a una o dos estaciones debido a la estructura de la red. Mientras que la existencia de tramos que

enlazan dos líneas (en las afueras de Madrid) y los baipases de Zaragoza y Lleida, elevan la eficiencia local, en términos de fiabilidad y robustez no se puede decir que sea una red robusta. Un problema en una estación o sección de línea puede tener una gran incidencia.

Estos niveles de eficiencia se alcanzan en la red española con un desarrollo de red del 1,14%.

En resumen, se puede concluir que las redes radiales tienen una baja eficiencia local lo que supone una baja fiabilidad y robustez. Por tanto, como las redes de alta velocidad requieren elevados índices de puntualidad y fiabilidad, las plantas de vías deben diseñarse de manera tal que se minimicen los impactos de los fallos, por ejemplo evitando la vía única en secciones críticas o localizando puestos de banalización en posiciones estratégicas, para permitir en la medida de lo posible el establecimiento de vías únicas temporales en caso de fallo de una vía.

Por otra parte, los coeficientes de desarrollo de red son extremadamente bajos para la eficiencia global que se alcanza. Cuando se comparan los coeficientes de desarrollo de red, la red japonesa alcanza una eficiencia global similar a la española con un desarrollo de red menor. Esta paradoja se debe al hecho de que si existiera conexión directa entre todas las estaciones de la red japonesa, la longitud total sería extremadamente alta en comparación con la longitud actual, puesto que hay muchas estaciones y algunas de ellas muy distantes entre sí. Sin embargo, en España hay pocas estaciones de alta velocidad.

3.4 SÍNTESIS

Atendiendo a su estructura, las redes de alta velocidad pueden clasificarse en radiales, malladas y lineales.

En una red radial se pueden diferenciar dos tipos de tramos: troncales y periféricos. De manera orientativa pueden definirse los tramos troncales como aquellos en los que el número de vías es menor de tres veces la suma de las vías que se derivan de ellas.

En este tipo de redes la capacidad demandada es muy alta en las secciones troncales ya que dan acceso a múltiples destinos. Sin embargo, en las secciones periféricas, a menos que existan servicios que se limiten exclusivamente a ellas, la capacidad demandada es baja debido a las restricciones de capacidad que imponen las secciones troncales.

Las redes radiales tienen una baja eficiencia local lo que las hace más vulnerables ante incidencias graves. Por ello las plantas de vías deben diseñarse de tal modo que se minimicen las afecciones a la circulación.

Poniendo en relación los esquemas de las líneas analizadas presentados en el Capítulo 2 y los datos de tráfico expuestos en el presente capítulo, llama la atención la homogeneidad en los diseños de las líneas pese a la ubicación de cada tramo en la red y las diferencias en los volúmenes de tráfico.

Este análisis apunta la necesidad de diferenciar los criterios de diseño y explotación de tramos troncales y periféricos, adaptando la capacidad ofertada por la infraestructura a la que realmente puede demandarse en cada caso para de este modo reducir inversión sin que se vea afectada la calidad de la explotación. Por ello resulta conveniente realizar un análisis de las implicaciones económicas de los diferentes diseños que se pueden adoptar en una línea de alta velocidad.

4. EVALUACIÓN Y COSTES DE PROYECTOS DE ALTA VELOCIDAD



Paso de un s130 por el viaducto de Arroyo del Valle (LAV Madrid-Valladolid)

4 EVALUACIÓN Y COSTES DE PROYECTOS DE ALTA VELOCIDAD

El objetivo de este capítulo es exponer la metodología para la evaluación de proyectos de alta velocidad. Se describen todos los términos que deben considerarse, introduciéndose como novedad la identificación de todos los inductores de costes e ingresos. Se aportan valores unitarios orientativos suficientemente desagregados como para poder realizar una evaluación a falta de datos reales. Todas las cifras económicas están expresadas en euros₂₀₁₄. En la sección 4.1. se realiza una introducción a la evaluación financiera y la socioeconómica. Las secciones 4.2 y 4.3 presentan los costes de construcción, mantenimiento y operación de una línea de alta velocidad. La sección 4.4. formula los costes e ingresos de un operador de viajeros. La sección 4.5 se dedica a los costes externos. En la sección 4.6 se abordan los precios sombra.

4.1 EVALUACIÓN FINANCIERA Y EVALUACIÓN SOCIOECONÓMICA

La evaluación de un proyecto de inversión en una línea de alta velocidad tiene por objeto analizar la viabilidad del mismo y cuantificar el beneficio para la sociedad. La herramienta empleada para la evaluación es el análisis coste-beneficio (ACB), que permite decidir si un proyecto debe estimarse o desestimarse, de acuerdo con el saldo entre costes e ingresos, y calcular la tasa de rendimiento o la ganancia social que reportaría, pudiéndose realizar comparaciones entre varias alternativas.

En este sentido, la Unión Europea requiere la realización de este tipo de análisis para los proyectos cuyo presupuesto supere los 50 M€ y para los que se solicite su cofinanciación (Comisión Europea, 2008).

La evaluación puede abordarse desde dos perspectivas:

- *Evaluación financiera* que considera los ingresos y costes financieros generados por el proyecto. Puede realizarse para el administrador de infraestructuras, los operadores ferroviarios o de manera conjunta para el administrador y los operadores. Se relaciona con la viabilidad del proyecto y su capacidad para producir ingresos que superen a los costes. La evaluación debe realizarse en situación “con actuación”, en situación “sin actuación” y en situación diferencial entre ambas.
- *Evaluación socioeconómica* que permite medir el aporte neto del proyecto a la sociedad, considerando los beneficios y costes del mismo. Intenta responder a la cuestión de si el proyecto debe realizarse considerando su repercusión en el bienestar social. Se realiza comparando la situación sin proyecto con la situación con proyecto.

Para realizar la evaluación financiera de una línea de alta velocidad hay que determinar:

- Costes de construcción de la línea.
- Costes de mantenimiento y operación de la línea.
- Costes del operador.

Para realizar la evaluación socioeconómica hay que considerar, además de los términos mencionados para la evaluación financiera, los costes externos.

El método de cálculo de dichos costes se expone en detalle en los apartados 4.2 a 4.5.

En la evaluación socioeconómica los precios de mercado no son adecuados debido a que en el caso de los bienes públicos las tarifas no son reflejo de los costes. Por ello se emplean los *precios sombra* que reflejan los costes de oportunidad de los costes y la

disposición de los consumidores a pagar por los resultados. Tras la exposición detallada de los costes se indicarán los ratios de precios sombra sobre precio de mercado a emplear en cada caso (apartado 4.6).

4.1.1 Indicadores

Los indicadores empleados para medir y comparar los resultados de un proyecto son:

- Valor actual neto (VAN) y valor actual neto social (VAN_s).
- Tasa interna de retorno (TIR) y tasa interna de retorno social (TIR_s).

El valor actual neto (VAN) se obtiene descontando los flujos de beneficios y costes hasta un periodo común de referencia, normalmente el periodo de inicio de la explotación.

El VAN de un proyecto se define como:

$$VAN = \sum_{i=0}^N a_t \cdot S_t = \frac{S_0}{(1+i)^0} + \frac{S_1}{(1+i)^1} + \dots + \frac{S_n}{(1+i)^n} \quad (4.1)$$

Donde S_t es el flujo de caja en el periodo t y a_t es el factor de descuento a emplear en el periodo t para obtener su valor actual que se formula como:

$$a_t = (1+i)^{-t} \quad (4.2)$$

Siendo t el periodo de tiempo y i la tasa de descuento financiera. La tasa de descuento financiera refleja el coste de oportunidad del capital. La Comisión Europea recomienda usar una tasa del 5% (Comisión Europea, 2008).

La tasa interna de retorno es un indicador de la eficiencia de una inversión. Se define como la tasa de descuento financiera que hace el VAN cero, es decir:

$$TIR(S) = \sum \frac{S_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (4.3)$$

(Comisión Europea, 2008) indica que la TIR debe manejarse con cuidado y que realizar una clasificación de los proyecto basada en dicho indicador puede dar lugar a resultados engañosos. El documento continúa diciendo que, puesto que para calcular el VAN y la TIR son necesarios los mismos datos, a excepción de la tasa de descuento, siempre merece la pena calcular el VAN y que son muchas las razones que recomiendan emplear el VAN como criterio de decisión.

La evaluación del proyecto de una línea de alta velocidad no debería limitarse a estimar si el conjunto que forman administrador de infraestructuras y los operadores obtendrán beneficios, sino también lo que dicho proyecto aporta al conjunto de la sociedad en materia de reducción de tiempos de viaje, accidentalidad, ruido, incremento de la movilidad... Por ello, una vez calculados el VAN financiero y el VAN socioeconómico, el criterio general para estimar o desestimar un proyecto podría ser: si ambos son positivos, aceptarlo; si ambos son negativos o el VAN financiero es positivo y el VAN socioeconómico es negativo, rechazarlo; y si el VAN financiero es positivo pero el VAN socioeconómico es negativo dependerá de las circunstancias particulares de cada caso (Figura 4.1).

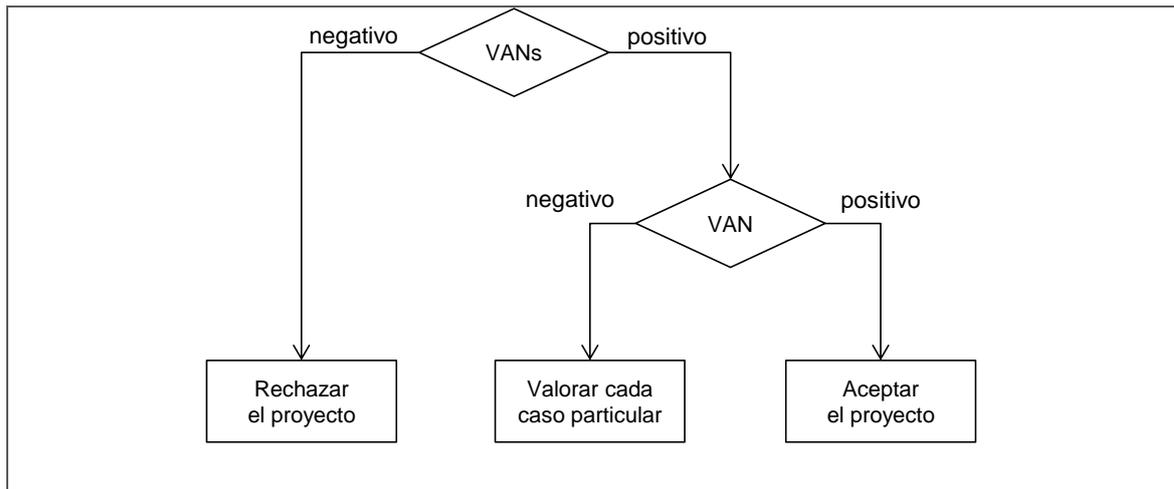


Figura 4.1. Criterios para la estimación o desestimación de un proyecto - Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.2. se muestra el esquema de la evaluación socioeconómica de Adif (Adif, 2011) que se ha seleccionado por su claridad y simplicidad.

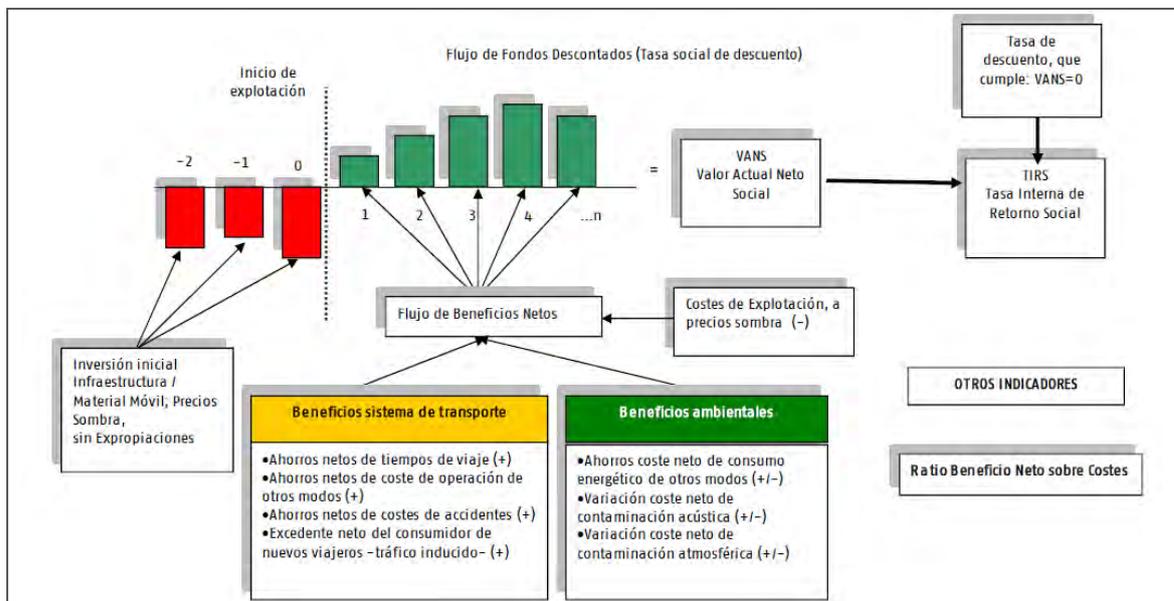


Figura 4.2. Esquema de evaluación socioeconómica Fuente: (Adif, 2011)

4.1.2 Incertidumbre y riesgo

Según la Unión Europea (Comisión Europea, 2008) la evaluación socioeconómica de un proyecto debe incluir un análisis de riesgo para considerar las incertidumbres existentes.

En el caso concreto de una línea de alta velocidad la principal fuente de incertidumbre es la demanda prevista durante el ciclo de vida de la infraestructura, si bien existen otras incertidumbres relacionadas con los costes de construcción y los parámetros utilizados en el proceso de evaluación tales como el valor del tiempo o el reparto modal.

4.1.2.1 Predicción de la demanda e incertidumbre asociada

La predicción de la demanda resulta esencial para tomar decisiones relativas a la planificación de infraestructuras y la definición y gestión de los servicios de transporte. La demanda depende de las características del servicio (tiempo de viaje, frecuencias y

precios) y de factores externos al transporte (población, ingresos...) y está sujeta a incertidumbres.

Además, en un corredor normalmente coexisten varios modos de transporte (vehículo privado, autobús, tren, avión...) y es necesario no sólo estimar la demanda total sino también su distribución por modos.

Una vez estimada la demanda anual por modo en una ruta determinada, hay que distribuirla en el tiempo, identificando periodos punta y valle que pueden ser anuales, semanales y diarios.

No es objeto de esta tesis profundizar en los modelos de estimación de la demanda, sobre los que no existe una teoría comúnmente aceptada pero sí abundante literatura (Ortuzar y Willumsen, 2008). Sin embargo, dada la importancia de la predicción de la demanda en la evaluación socioeconómica de proyectos de transporte, este apartado pretende mostrar los aspectos generales y los factores que determinan la demanda final de un modo de transporte concreto.

Existe un enfoque general de modelización de la demanda denominado *Modelo clásico de transporte* (Figura 4.3).

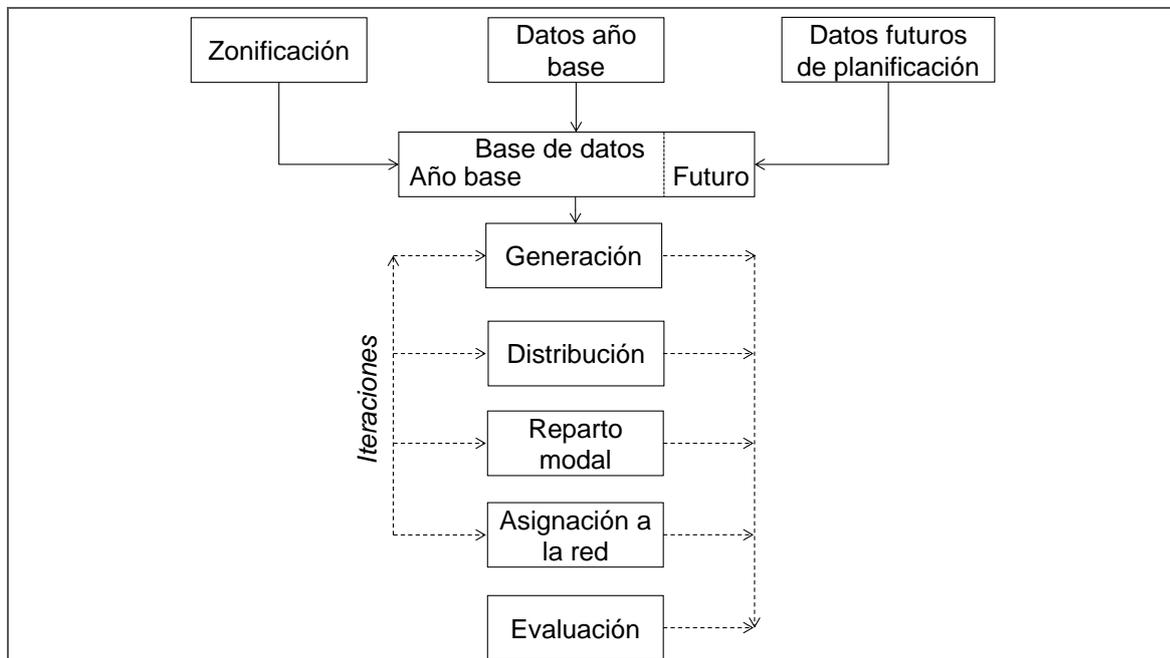


Figura 4.3. El modelo clásico de transporte en cuatro etapas
Fuente: (Ortuzar y Willumsen, 2008)

Se comienza delimitando el área de estudio y definiendo zonas de transporte (*zoning*) con características socioeconómicas, uso del suelo y accesibilidad al sistema de transporte similares.

Se recopilan datos de planificación, calibración y validación, incluyendo información para el año base. Es necesario conocer las matrices de viajes que aportan conocimiento de las relaciones origen/destino que se verán afectadas por el proyecto. También se debe caracterizar la demanda y las redes de transporte, identificando el perfil de los diferentes tipos de usuarios (sexo, edad, renta, motivo de viaje, frecuencia de viaje, razones de la elección modal...) y los atributos de los modos existentes (servicios, frecuencias, velocidades, tarifas...). Se requieren también datos socioeconómicos, con una desagregación espacial según zona de transporte.

Los datos recogidos sirven de entrada a los modelos de *generación de viajes* que tienen por objeto estimar los viajes mecanizados generados y atraídos por las diferentes zonas de transporte en función de los niveles de actividad socioeconómica de cada una de ellas.

A continuación se asignan los viajes generados a los diferentes destinos por medio del modelo de *distribución de viajes* dando como resultados las matrices origen/destino

Las fases de *generación y distribución de viajes* se tratan generalmente de forma conjunta. La formulación es de tipo gravitacional, se considera que los viajes entre cada para de zonas son directamente proporcionales a las variables socioeconómicas en dichas zonas e inversamente proporcionales al coste generalizado del viaje entre ellas.

$$v_{ij} = K \cdot (P_i \cdot P_j)^{\beta_P} \cdot (E_i \cdot E_j)^{\beta_E} \cdot (CG_{i,j})^{\lambda_C} \quad (4.4)$$

Siendo v_{ij} el número de viajes entre las zonas i y j ; P , E variables socioeconómicas en la zona del origen i y destino j ; CG_{ij} el coste generalizado promedio entre cada par de zonas ij y K , β_P , β_E y λ_C los parámetros de ajuste del modelo.

Las variables socioeconómicas más utilizadas son población, renta, producto interior bruto (PIB), empleo, segunda residencia y número de plazas hoteleras.

El coste generalizado o desutilidad es la expresión que integra el conjunto de aspectos que se oponen a la realización de un viaje y que determina los niveles de movilidad en cada momento. Existen numerosas formulaciones del coste generalizado, se presenta aquí la empleada por Renfe Viajeros por considerarse muy completa (MCRIT, 2012).

$$CG_k = Cd_{ini} + \frac{COp \cdot L + Peaje}{Ocupación} + Tarifa \cdot L + Cd_{fin} + T_{disp} \cdot VoT_{disp} + T_{antelación} \cdot VoT_{antelación} + T_{abordo} \cdot VoT_{abordo} \cdot K_{com} + T_{AiD} \cdot VoT_{AiD} \quad (4.5)$$

Donde CG_k es el coste generalizado del modo de transporte k entre las zonas estudiadas; Cd_{ini} es el coste directo inicial de acceso al modo de transporte (€); Cd_{fin} es el coste directo final de dispersión del modo de transporte (€); COp son los costes operativos de funcionamiento del vehículo privado (€/km); $Peaje$ es el coste de peaje de las autopistas (€); $Ocupación$ es el número de ocupantes por vehículo para el vehículo privado (personas/vehículo); $Tarifa$ es la tarifa kilométrica del modo de transporte (€/km); L es la longitud del recorrido (km); T_{disp} es el tiempo de espera según disponibilidad de servicios (horas); $T_{antelación}$ es el tiempo entre la llegada a la estación/aeropuerto y el inicio del servicio (horas); T_{abordo} es el tiempo a bordo de modo de transporte (horas); T_{AiD} es el tiempo de acceso y dispersión al modo (horas); VoT es el valor del tiempo (euros/h) que varía según la etapa del viaje y K_{com} es el factor de comodidad.

Aunque algunos modelos omiten el término del coste generalizado, su consideración es conveniente porque de no hacerlo así, la generación de viajes se trata como inelástica, es decir, independiente del nivel de servicio proporcionado por el sistema de transporte.

El siguiente paso es aplicar un modelo de *reparto modal* entre transporte público y vehículo privado en el año base y estimar las alteraciones producidas al modificarse la oferta de transporte. Los modelos de reparto modal se apoyan en la teoría de elección basada en el concepto de coste generalizado, donde cada individuo elige dentro del conjunto de opciones que se le presentan en función de la desutilidad de cada modo. Los modelos de reparto modal suelen ser de tipo logit:

$$P_k = \frac{e^{(-\lambda \cdot CG_k)}}{\sum_k e^{(-\lambda \cdot CG_k)}} \quad (4.6)$$

Donde P_k es la probabilidad de elección del modo k ; CG_k el coste generalizado del modo k y λ el parámetro que representa la dispersión de la elección modal: cuanto mayor es, disminuye la dispersión y aumenta la probabilidad de elegir el modo de menor coste generalizado.

La selección del modo de transporte depende de:

- Las características del *viajero*: renta, estructura familiar, disponibilidad de vehículo privado, densidad residencial y condicionantes del resto del día.
- Las características del *modo*: tiempo de viaje, tiempo de espera, coste del viaje, coste y disponibilidad de parking, confort, regularidad y seguridad.
- Las características del *viaje*: propósito del viaje, hora del viaje.

Por último, el modelo de asignación tiene por objeto distribuir los viajes de la matriz por la red viaria y los distintos itinerarios posibles entre cada par origen/destino.

Para estimar la evolución de la demanda en el tiempo a igualdad de oferta, puede emplearse la ecuación presentada por (Fernández Jánez, 2015) que relaciona la variación de la demanda con la variación del PIB:

$$VarDemanda(\%) = 0,11698 \cdot (VarPIB - 0,8817)^2 + 1,906 \cdot (VarPIB - 0,8817) \quad (4.7)$$

Dos aspectos importantes para la correcta determinación de la demanda de una nueva infraestructura son la demanda inducida y el *ramp up*.

Demanda inducida

La puesta en servicio de una nueva línea de alta velocidad o en general una mejora de la oferta, supone un aumento del atractivo del transporte, es decir, una disminución del coste generalizado, que da lugar a un aumento de la movilidad. Este incremento de movilidad debido a un cambio radical en la oferta, es decir, aquellos viajes que anteriormente no se realizaban, se denomina demanda inducida.

La demanda inducida puede ser de dos tipos:

- *Demanda redistribuida*: se trata de la demanda procedente de otro corredor y que, por tanto, se desplazaba antes a otro destino. Por ejemplo, la puesta en servicio de una línea de alta velocidad que hace que algunos médicos, notarios o funcionarios cambien su lugar de residencia.
- *Demanda nueva*: viajes que antes no se realizaban y que responden a una mayor movilidad por personas o a las nuevas actividades inducidas por la disminución de los costes de transporte. Por ejemplo, la puesta en servicio de lanzaderas entre Madrid-Ciudad Real y Puertollano, en la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla en 1992 generó un importante flujo de viajeros que fijaron su lugar de residencia en Ciudad Real e iban a trabajar a Madrid o viceversa.

La demanda inducida (*dInd*) puede estimarse conforme a una curva logística en función de la reducción del coste generalizado (*redCG*). Se parte de la curva presentada por (MCRIT, 2012), que relaciona el porcentaje de viajes inducidos con la reducción en el tiempo de viaje de servicios de alta velocidad respecto al servicio ferroviario anterior, adaptada para que la variable independiente sea la reducción del coste generalizado.

$$dInd = \frac{22}{1 + e^{-(-3,9063 + 0,2609 \cdot redCG)}} \quad (4.8)$$

Ramp up

La demanda que se obtiene de los modelos de predicción corresponde a un “año tipo” y por tanto no caracteriza la demanda de los primeros años de operación en los que el servicio ha de consolidarse. El término *ramp up* hace referencia al periodo transitorio de *arranque y puesta en carga* de la línea. La estimación adecuada de este parámetro resulta fundamental por cuanto los ingresos en los primeros años de servicio de una infraestructura pueden tener un peso significativo en la viabilidad económica de la misma.

(Ortuzar y Willumsen, 2008) señala que no existe una buena teoría que soporte la estimación de la duración del periodo de puesta en carga y enumera algunos factores de los que depende:

- Frecuencia de los viajes realizado: cuanto más frecuentes sean los viajes, más breve será el periodo de puesta en carga.
- Relevancia de las ventajas que ofrece la nueva infraestructura: un importante ahorro de tiempo resultará en un periodo de puesta en carga más corto.
- Información sobre la nueva infraestructura y las ventajas que aportará.
- Cultura local: por ejemplo, si los ciudadanos están acostumbrados a utilizar el tren de alta velocidad, les resultará más fácil utilizar un nuevo servicio.
- Establecimiento de un periodo inicial sin coste cuando se pone en marcha una nueva infraestructura y servicio puede facilitar la captación de viajeros, pero el efecto se puede diluir cuando comience a cobrarse el billete. Por ejemplo, Renfe inauguró en junio de 2013 el servicio de alta velocidad Madrid-Alicante ofertando las plazas de la clase turista a mitad de precio el primer mes.

(Adif, 2011) establece que debe considerarse un periodo de consolidación de la demanda de tres años, con índices de viajeros 0,85, 0,90 y 0,95, respectivamente, sobre la demanda del año tipo que corresponde al cuarto año.

Fuentes de incertidumbre

Los elementos que generan incertidumbre en la predicción de la demanda son las variables socioeconómicas empleadas, la oferta de los modos competidores y el efecto red. También la incertidumbre sobre el precio de la oferta ferroviaria, si la predicción no la realiza el propio operador. El efecto del precio del servicio en la demanda y consecuentemente en los resultados de la línea así como los inconvenientes de su determinación son analizados en (García Álvarez, González Franco y Rubio García, 2015).

Variables socioeconómicas empleadas y oferta de los modos competidores

Resulta complejo seleccionar aquellas variables socioeconómicas que se correlacionan con la demanda de un modo de transporte. Además, una vez seleccionadas la misma predicción de dichas variables puede no ser precisa, lo que sucede especialmente cuando se realizan predicciones a largo plazo.

La oferta de los modos competidores también genera incertidumbres ya que sin que se espere puede cambiar a lo largo del tiempo. Por ejemplo, la entrada o salida de una compañía aérea en una ruta tiene una importante repercusión en la demanda del ferrocarril.

Efecto red

Las líneas de alta velocidad suelen integrarse en la red ferroviaria de un país, existiendo conexiones con otras líneas de alta velocidad o con la red convencional, como se ha analizado en el Capítulo 2.

A lo largo de la vida útil de una línea se puede producir la apertura de otra línea que enlace con ella, lo que aumentará el tráfico y por tanto se requerirá un extra de capacidad. Se trata de una situación de algún modo externa a la línea de alta velocidad pero que afecta a su funcionamiento y que además puede estar sujeta a incertidumbre.

Por ejemplo, la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla inaugurada en 1992 es utilizada también desde 2008 por los trenes de alta velocidad de Málaga y en un futuro lo harán los trenes de alta velocidad de Cádiz y Granada.

4.1.2.2 Consideración del riesgo y opciones reales

La manera de incorporar la incertidumbre de la demanda en la evaluación socioeconómica de un proyecto es emplear para calcular el VAN social su distribución de probabilidad en lugar de un valor determinista. Cada valor de dicha distribución de demanda conducirá a un VAN social diferente y el conjunto de valores da lugar a la distribución de probabilidad del VAN social. Generalmente se representa como distribución acumulativa para de este modo mostrar la probabilidad de que el VAN pueda ser inferior o igual a un valor dado.

El profesor del MIT Richard de Neufville da un paso más en la consideración del riesgo en la evaluación de proyectos de infraestructuras demostrando la aplicabilidad del *análisis de opciones reales* como herramienta para justificar y adoptar soluciones de diseño flexibles o escalables y de éste modo reducir el riesgo (de Neufville, Scholtes y Wang, 2006; Hassan, de Neufville y McKinnon, 2005). El autor indica que la flexibilidad supone un sobrecoste inicial que a la larga puede llevar a mejoras importantes en los resultados económicos del proyecto. Supóngase, por ejemplo, una línea de alta velocidad con plataforma para vía doble sobre la que en principio sólo se monta una vía pensando en la posibilidad de montar la segunda vía en el futuro si las cifras de demanda son favorables. Esta solución minimiza el riesgo en caso de que la demanda prevista inicialmente no se alcance.

El *análisis de opciones reales* se define como el conjunto de técnicas para valorar la flexibilidad en la implementación de sistemas técnicos tales como las infraestructuras. Una *opción real* dota de flexibilidad a un proyecto, representado un derecho, pero no una obligación para llevar a cabo una acción como por ejemplo una ampliación de capacidad si el crecimiento de la demanda es favorable.

De este modo, una vez conocida la distribución del VAN social y por tanto cuantificado el riesgo, pueden plantearse y valorarse diversas alternativas de diseño flexible para reducirlo y calcular también para ellas la distribución del VAN social. Si la esperanza de dicha distribución se compara con el VAN social obtenido a partir del valor determinista de la demanda se obtiene el valor de la flexibilidad (Figura 4.4).

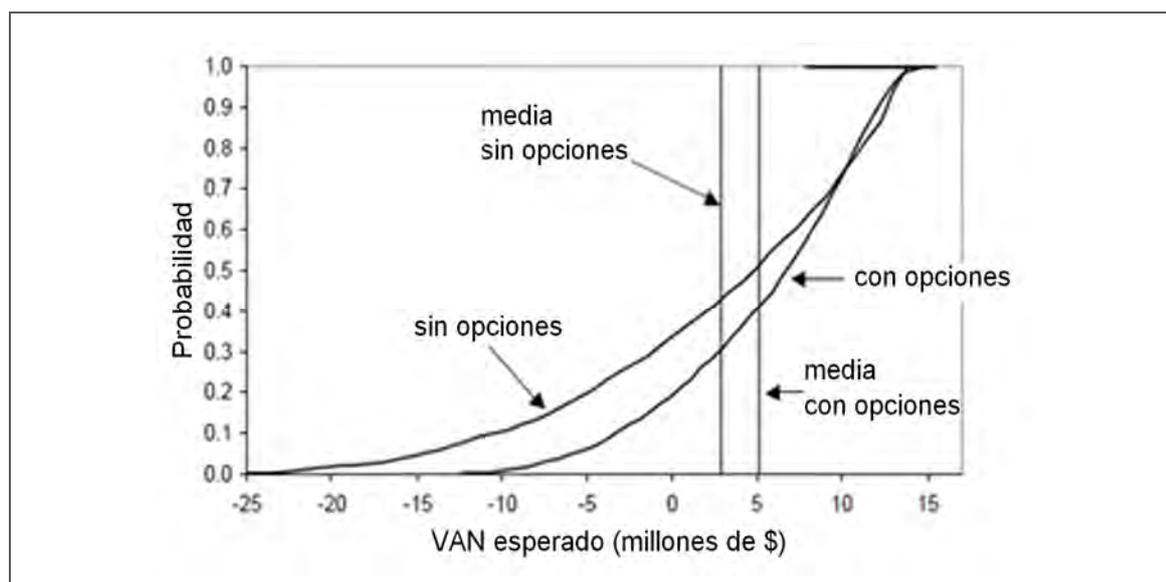


Figura 4.4. Comparativa de VAN para un proyecto con y sin flexibilidad
Fuente: (de Neufville et al., 2006)

4.2 COSTES DE CONSTRUCCIÓN DE UNA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD

El propósito de esta sección es dar un orden de magnitud de los costes de construcción de una línea de alta velocidad incidiendo en sus inductores. La normativa aplicable y procedimientos considerados son los aplicados en España.

La mayor parte de la información y todas las cifras que se muestran en esta sección provienen de las Instrucciones y recomendaciones para la redacción de proyectos de plataforma (IGP) publicadas por Adif y de los estudios informativos de las líneas Burgos-Vitoria, Madrid-Albacete-Valencia, Valladolid-Burgos, Venta de Baños-Palencia, Vigo-Soutomaior, Bobadilla-Granada, Lubian-Ourense y Coruña-Betanzos.

Los costes de construcción de una línea de alta velocidad y los factores de los que dependen se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Costes de construcción de una línea de alta velocidad e inductores

Concepto	Descripción	Factores de los que depende el coste
Infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> - Movimiento de tierras - Drenaje - Reposición de servidumbres y servicios afectados - Estructuras - Túneles - Cerramiento del trayecto y camino de servicio - Integración ambiental 	<ul style="list-style-type: none"> - Orografía - Tipo de terreno - Número de vías - Longitud y tipología de viaductos - Longitud y tipología de túneles
Vía	<ul style="list-style-type: none"> - Balasto o placa - Carril - Traviesas - Sujeciones - Aparatos de vía 	<ul style="list-style-type: none"> - Tipología de vía - Número de vías - Tipología y número de desvíos
Dependencias de circulación	<ul style="list-style-type: none"> - Estaciones - Apartaderos - Puestos de banalización 	<ul style="list-style-type: none"> - Número y longitud de vías de apartado - Número y tipo de desvíos
Sistema de electrificación	<ul style="list-style-type: none"> - Línea de alimentación en alta tensión - Subestaciones de tracción - Autotransformadores - Línea aérea de contacto 	<ul style="list-style-type: none"> - Proximidad de líneas de alta tensión - Tipología - Densidad de tráfico - Número de vías
Sistemas de seguridad y comunicaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Enclavamientos - Sistema de banalización - ATP - Sistema tren-tierra - Telemando de instalaciones y energía - Sistema de monitorización y vigilancia - Centro de control (CRC) 	<ul style="list-style-type: none"> - Número de vías - Dependencias de circulación
Seguridad y salud	<ul style="list-style-type: none"> - Estudio 	<ul style="list-style-type: none"> - Porcentaje fijo
Expropiaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Terreno a ocupar por la línea 	<ul style="list-style-type: none"> - Superficie a expropiar - Porcentaje de túneles - Tipo de suelo

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se profundiza en cada uno de estos costes.

4.2.1 Infraestructura

Dentro de la partida de infraestructura se distinguen los siguientes conceptos:

- *Movimiento de tierras*: el coste de los movimientos de tierras depende de las condiciones geológicas y geotécnicas, el porcentaje de los materiales procedentes de excavación que pueden ser utilizados para la construcción de terraplenes y la altura de terraplenes y desmontes. También en este concepto se incluyen el subbalasto, que constituye la capa superior de la plataforma sobre la que apoya el balasto, y capa de forma, que se ubica bajo la capa de subbalasto.
- *Drenaje*: su finalidad es proveer de un sistema de protección que evite que el agua de escorrentía tanto superficial como subterránea produzca efectos negativos en la infraestructura, garantizando su seguridad.
- *Reposición de servidumbres y servicios afectados*: la construcción de una línea de alta velocidad implica en ocasiones la afección a servidumbres y servicios existentes (ferroviarios o de otro tipo) que deben reponerse. Las servidumbres que comúnmente se ven afectadas son viales (caminos y carreteras), instalaciones de riego, de saneamiento y de abastecimiento de agua. Los servicios que se suelen ver afectados son líneas eléctricas, telefónicas y telegráficas, oleoductos y gaseoductos.
- *Estructuras*: las diferentes estructuras existentes en una línea de alta velocidad se pueden agrupar en grandes estructuras, pasos superiores, pasos inferiores y muros.
- *Túneles*: pueden ser de vía única o doble. A su vez, los túneles de vía doble pueden ser monotubo cuando un único túnel aloja las dos vías o bitubo si se trata de dos túneles separados con una única vía por tubo.
- *Cerramiento del trayecto y camino de servicio*: dadas las elevadas velocidades que se alcanza en una línea de alta velocidad, ésta debe vallarse para evitar la intrusión de personas y animales. Además, debe realizarse un camino de servicio a lo largo de la línea para facilitar el acceso de vehículos y personal de explotación.
- *Integración ambiental*: tiene por objetivo la definición de actuaciones para prevenir las afecciones que pueden producirse en el medio como consecuencia de las obras que se proyectan o cuando ello no sea viable, para corregirlas o minimizarlas. (López Pita, 2010) indica que el coste de integración ambiental de las líneas de alta velocidad francesas está entre el 7% y el 22% del coste total del proyecto y que este porcentaje se ha incrementado progresivamente con el paso de los años debido a la creciente concienciación ambiental. La Orden FOM/3317/2010 (O. FOM/3317/2010, de 17 de diciembre) indica que cualquier valor superior al 15% debe ser justificado. Por tanto, se puede concluir que 15% del coste total del proyecto es una estimación adecuada.

El trazado de una línea está definido por los parámetros funcionales y las secciones tipo. Los parámetros funcionales definen las restricciones geométricas y funcionales que un trazado debe cumplir en planta y en alzado para garantizar el guiado y el soporte de los vehículos. Estos parámetros son función de la velocidad máxima de la línea y de la tipología del tráfico (viajeros, mercancías o mixto).

Las secciones tipo están definidas por la IGP 3.2. (Adif, 2008b) para vía única o doble, alineación recta o curva y secciones en terraplenes o trincheras, túneles o viaductos.

4.2.1.1 Infraestructura sin viaductos ni túneles

Para estimar el coste de construcción de la infraestructura se emplearán las cifras presentadas por la Orden FOM/3317/2010 (O. FOM/3317/2010, de 17 de diciembre).

Para la redacción de dicha orden Adif llevó a cabo un estudio (Meana Martínez y Encinas Nuevo, 2012) para definir unos rangos de precios que permitieran estimar el coste de la plataforma en vía doble de una nueva línea de alta velocidad. Se consideraron los datos de proyectos reales de líneas de alta velocidad españolas que se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Determinación de los tipos de terrenos

Sección			
	Orografía llana	Orografía ondulada	Orografía montañosa o muy montañosa
Tipo 1	Palencia-León Talayuela-Cáceres Mérida-Badajoz	Motilla-Valencia	Orense-Santiago
Tipo 2	Valencia-Castellón	Córdoba-Málaga	Variante Pajares (sin túneles)

Fuente: (Meana Martínez y Encinas Nuevo, 2012)

Se distinguen dos tipos de terreno de acuerdo con las características geológicas y geotécnicas:

- Tipo 1: sin riesgo geotécnico-geológico.
- Tipo 2: con riesgo geotécnico y geológico potencial (suelos blandos, expansivos, colapsables, inestabilidad de ladera, macizos fuertemente tectonizados, afecciones hidrogeológicas...)

El coste de cada uno de los proyectos se muestra en la Figura 4.5. Como puede observarse existe una considerable dispersión en el coste de la infraestructura que varía entre 3 y 17 M€ por kilómetro.

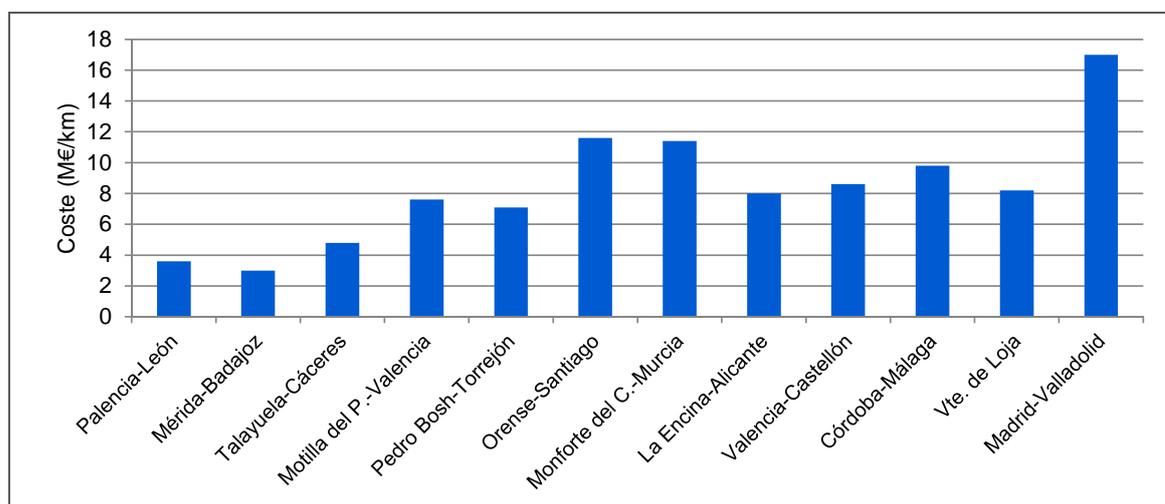


Figura 4.5. Coste de construcción de plataforma de líneas de alta velocidad españolas (M€/km) - Fuente: (Meana Martínez y Encinas Nuevo, 2012)

Los rangos de costes definidos por (O. FOM/3317/2010, de 17 de diciembre) para vía doble se muestran en la Tabla 4.3. Estas cifras incluyen obras de plataforma, reposición de servicios afectados, coste estimado de las asistencias técnicas (5% para redacción de estudios y proyectos, control de obra y dirección ambiental) y 1% cultural. Quedan excluidos los costes de integración urbana, grandes túneles de base y túneles bitubo en general.

Tabla 4.3. Infraestructura para líneas de alta velocidad y vía doble. Coste de ejecución material (M€/km)

	Orografía llana		Orografía ondulada		Orografía montañosa o muy montañosa	
Tipo 1	2,00	4,00	4,00	8,00	8,00	12,00
Tipo 2	4,00	8,00	8,00	12,00	12,00	16,00

Fuente: (O. FOM/3317/2010, de 17 de diciembre)

Dicho documento no aporta costes de plataforma para vía única por lo que se han extrapolado consideran que un 50% del coste es fijo y el 50% restante es proporcional a la sección de la plataforma.

En la Figura 4.6. se muestran los rangos de costes de construcción y los valores medios por kilómetro para plataforma en vía única o doble en función de la orografía. Se observa que el coste de la vía doble es 1,10 veces el de la vía única. En valor absoluto se observa que a medida que el terreno se vuelve más abrupto las diferencias entre vía única y doble son mayores. Las diferencias en terreno llano son poco significativas lo que sugiere preparar plataforma para vía doble independientemente de que se monte vía doble desde el principio o no.

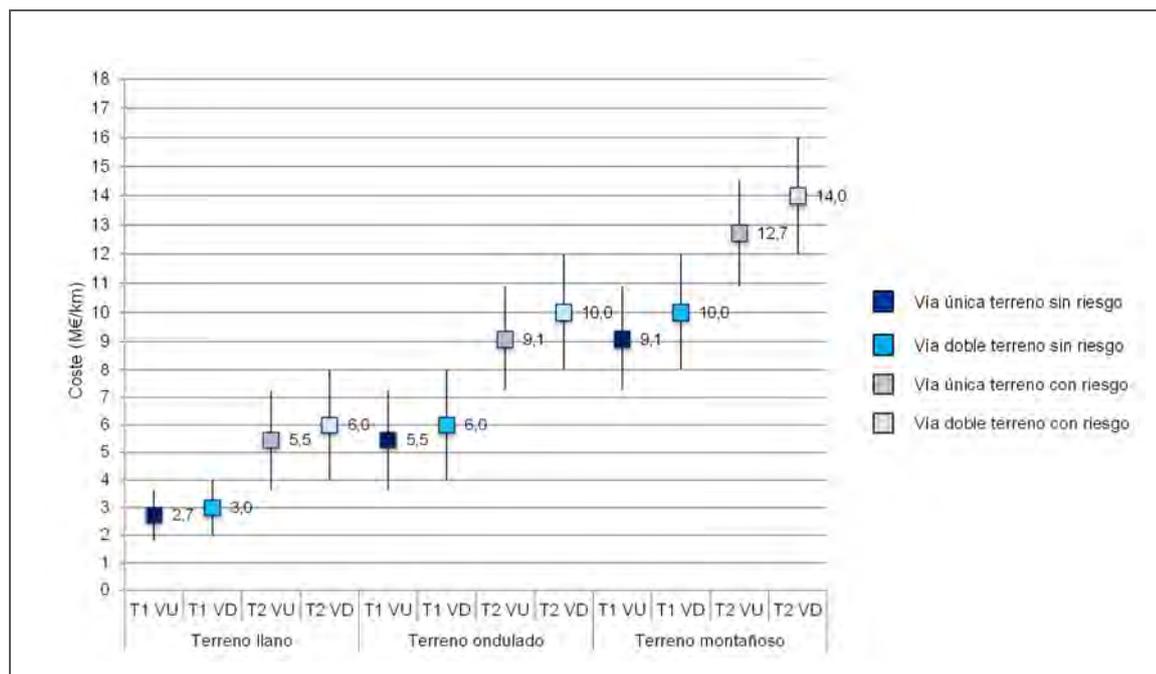


Figura 4.6. Infraestructura para líneas de alta velocidad. Coste de ejecución material (M€/km) - Fuente: Elaboración propia con datos de (O. FOM/3317/2010, de 17 de diciembre)

4.2.1.2 Viaductos

La Orden FOM/3317/2010 (O. FOM/3317/2010, de 17 de diciembre) especifica el coste por unidad de superficie de tablero en viaductos, en función del tipo de terreno y de la cimentación. Los valores definidos se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Coste por unidad de superficie de viaducto. Coste de ejecución material (M€/km)

	Orografía llana		Orografía ondulada		Orografía montañosa o muy montañosa	
Cimentación profunda	2.100	2.300	2.200	2.400	2.300	2.500
Cimentación directa	800	1.100	1.100	1.400	1.400	1.700

Fuente: (O. FOM/3317/2010, de 17 de diciembre)

En la Figura 4.7. se muestran los rangos de costes de construcción y los valores medios por kilómetro para plataforma en vía única o doble en función del tipo de cimentación. Se observa que el coste de la vía doble es 1,6 veces el de la vía única. En valor absoluto se observa que las diferencias son notables en todos los casos, lo que sugiere que, siempre que la capacidad requerida lo permita, se opte por soluciones en vía única.

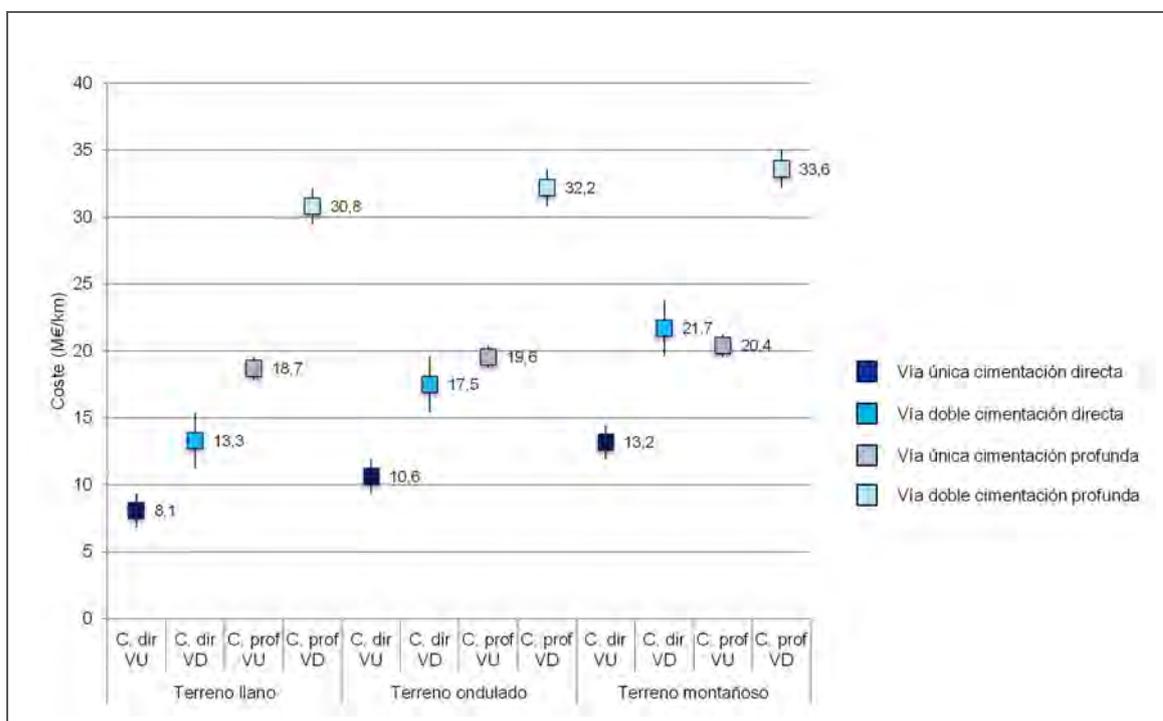


Figura 4.7. Viaductos para línea de alta velocidad. Coste de ejecución material (M€/km) - Fuente: Elaboración propia con datos de (O. FOM/3317/2010, de 17 de diciembre)

4.2.1.3 Túneles

En el caso de túneles en vía doble la elección de una solución monotubo o bitubo viene condicionada por geometría de la sección tipo necesaria, longitud, condicionantes geotécnicos, métodos constructivos, seguridad, etc.

Los túneles pueden clasificarse según su nivel de explotación atendiendo a su longitud y la intensidad de tráfico prevista (O. IOS-98, de 19 de noviembre):

- **Nivel I:** Túneles que por sus especiales condiciones requieren una organización específica y permanente para el control y vigilancia de sus instalaciones.
- **Nivel II:** Túneles que requieren ciertas instalaciones y una vigilancia particular con respecto al resto del trazado.
- **Nivel III:** Túneles cortos o de poco tráfico, que no requieren ningún tipo de instalación específica.

Con el fin de utilizar el nivel de explotación como parámetro para definir las exigencias en cada túnel, (ISTF 2006) establece la correspondencia con la longitud y la intensidad de tráfico (Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Niveles de explotación según tipo de túnel

Longitud del túnel		Intensidad de tráfico prevista (circulaciones/día)		
		Muy alta >200	Media-alta Entre 50 y 200	Baja < 50
Cortos	$L \leq 1.000\text{ m}$	II*	II	III
Medios	$1.000\text{ m} < L \leq 5.000\text{ m}$	I*	I	II
Largos	$5.000\text{ m} < L \leq 10.000\text{ m}$	I*	I	I
Singulares	$L > 10.000\text{ m}$	I*	I*	I*

* Pueden requerir medidas adicionales a las de esta Instrucción.

Fuente: Elaboración propia

Según (ISTF 2006), los túneles de tipo I para doble vía, de longitud mayor de 5.000 m y sin estaciones subterráneas intermedias, se recomienda proyectarlos con sección bitubo de vía única o con galería auxiliar paralela, al objeto de facilitar la evacuación y la actuación de los equipos de intervención y el proyectista deberá evaluar la conveniencia de extender la solución anterior a los de tipo I de longitud inferior. Esta es la razón por la que los largos túneles, que elevan considerablemente el coste de construcción, no pueden ser monotubo. A modo de ejemplo en la red española se pueden citar los túneles de Guadarrama (28,4 kilómetros) y Pajares (24,6 kilómetros).

Los costes de construcción de túneles de un tubo para una vía, un tubo para doble vía y bitubo se en función de la calidad del terreno se muestran en la Figura 4.8. El coste de construcción de túnel monotubo para vía doble es el doble del coste de construcción de túnel monotubo para vía única. Si se comparan las soluciones para doble vía, el sobrecoste del túnel bitubo es un 25%.

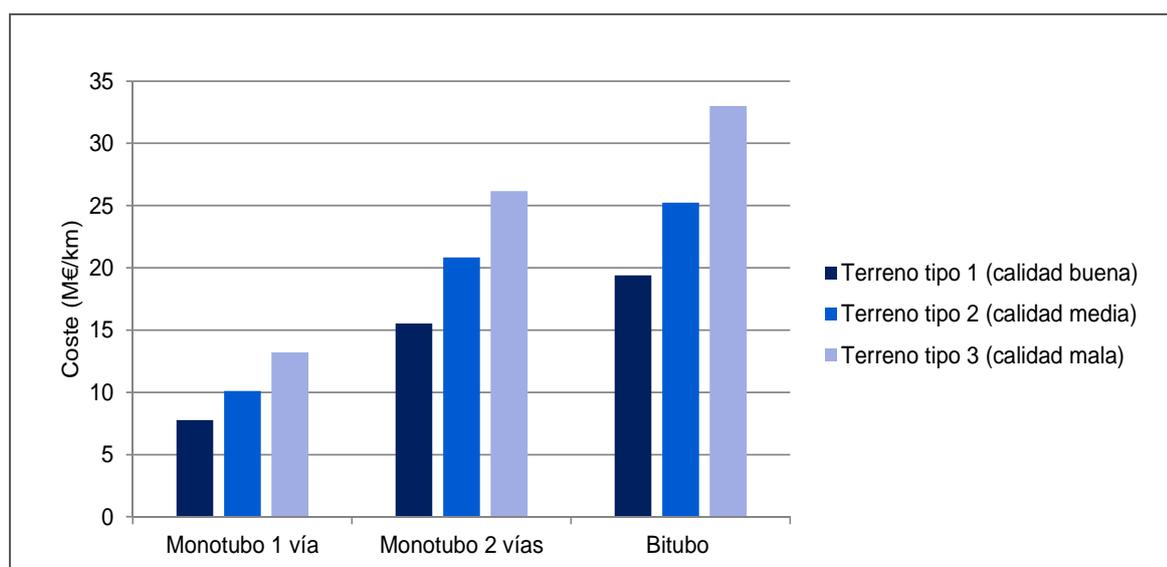


Figura 4.8. Túneles para línea de alta velocidad. Coste de ejecución material (M€/km)

Fuente: Elaboración propia a partir de estudios informativos

4.2.2 Vía

En la actualidad se implementan dos tipologías de vía en líneas de alta velocidad:

- Vía sobre balasto
- Vía en placa

4.2.2.1 Vía sobre balasto

La superestructura tradicional de vía está formada por el conjunto carril, traviesa y balasto, elementos que interactúan conjuntamente con el objeto de transmitir con valores admisibles las tensiones desde el carril a la plataforma.

El balasto se caracteriza por tener un buen comportamiento elástico y de drenaje, por lo que ha venido siendo utilizado sistemáticamente en las líneas ferroviarias europeas. También presenta un buen comportamiento como material amortiguador de los efectos dinámicos y los fenómenos vibratorios.

En España, por las razones mencionadas, así como por criterios de tipo económico, se utiliza en la mayor parte de los trazados vía sobre balasto, sin que por ello se dejen de tener en cuenta otros tipos de superestructura que se adapten mejor en tramos singulares a las exigencias del trazado.

Los materiales empleados en las líneas de alta velocidad deben cumplir requisitos más estrictos para garantizar la circulación a velocidades de hasta 350 km/h.

4.2.2.2 Vía en placa

Este tipo de vía se compone especialmente de una losa de hormigón y asfalto que reemplaza al balasto para transferir las cargas a la plataforma. El objetivo es reducir al máximo los asentamientos y mantener la geometría de vía a lo largo del tiempo sin necesidad de operaciones de mantenimiento frecuentes.

La vía en placa como alternativa al balasto suele plantearse para velocidades por encima de los 200 km/h donde la geometría de vía es más exigente y debe conservarse con un coste de mantenimiento asumible. Se implementa con frecuencia en túneles, en los que los trabajos de mantenimiento del balasto son complejos y facilita la evacuación de viajeros en caso de emergencia. También se utiliza en estaciones de alta velocidad.

Las cifras de coste que se utilizan en esta tesis para estimar el coste de construcción de vías únicas y dobles sobre balasto y en placa, y que se derivan del análisis de los estudios informativos, se muestran en la Figura 4.9.

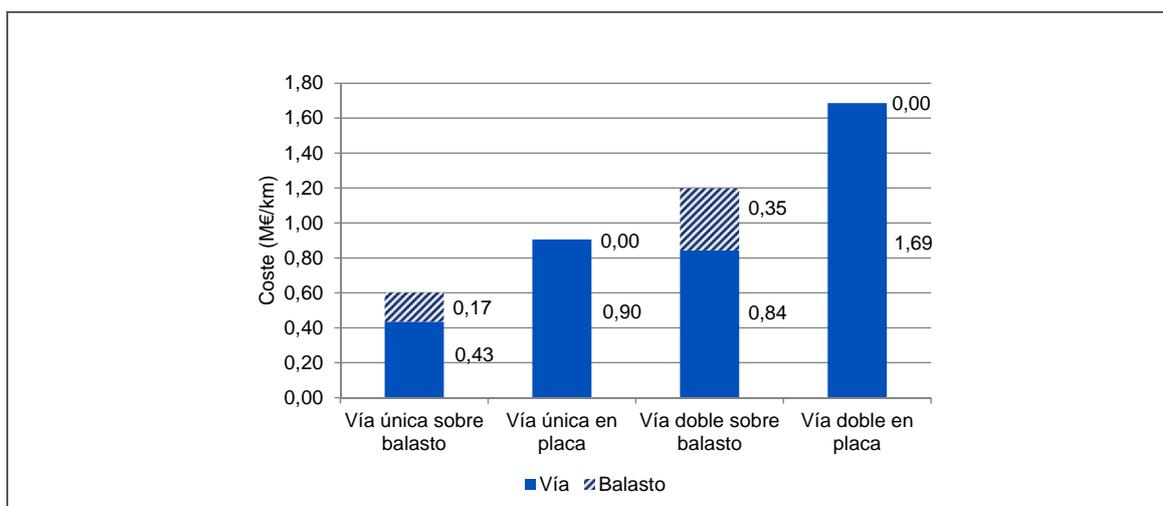


Figura 4.9. Coste por kilómetro de vía única y doble en balasto y placa (M€/km)

Fuente: Elaboración propia a partir de estudios informativos

El coste de la vía única sobre balasto es de 0,60 M€/km y de la vía doble 1,20 M€/km, siendo por tanto el coste de la vía doble dos veces el de la vía única.

El coste de la vía única en placa es de 0,90 M€/km y de la vía doble 1,69 M€/km, es decir, el coste de la vía doble es 1,86 veces el de la vía única.

El coste de la vía única en placa es 1,51 veces el de la vía en balasto, y en vía doble es 1,41 veces.

Desvíos

Los desvíos permiten el paso de una vía a otra y la bifurcación y cruce de líneas. Pueden ser simples o dobles (escapes) y de varios tipos según la velocidad de paso que permitan por vía general y desviada.

En la Figura 4.10. se muestran los costes estimados de desvíos en función de las velocidades de paso.

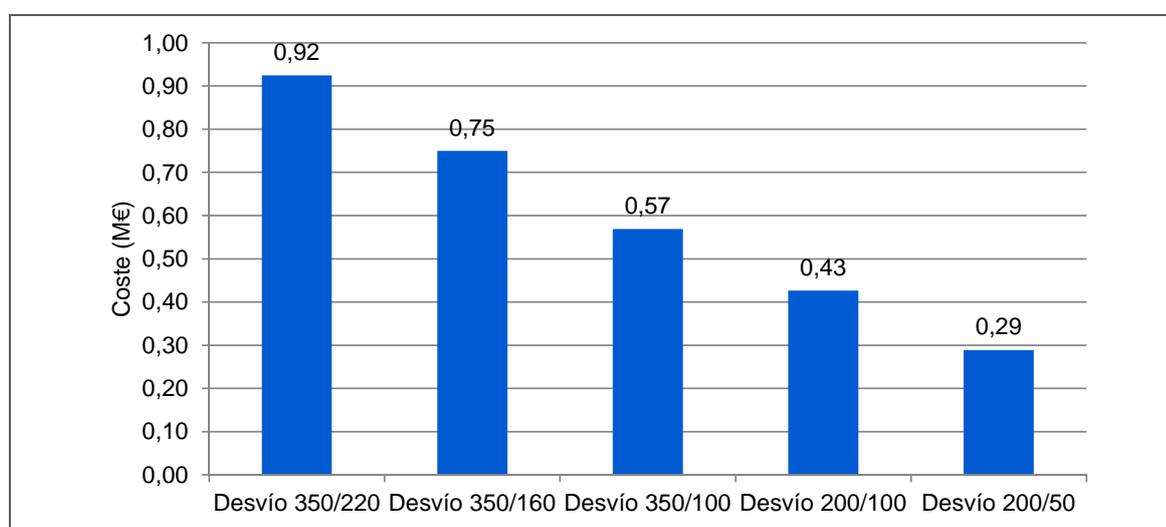


Figura 4.10. Coste de desvíos en función de las velocidades admisibles (M€/km)
Fuente: Elaboración propia a partir de estudios informativos

4.2.3 Dependencias

Bajo la denominación “dependencias” se engloban las estaciones, apartaderos y puestos de banalización.

Apartaderos

Los apartaderos están compuestos por una o más vías de apartado que pueden disponer de mangos para el estacionamiento de trenes y una serie de escapes para permitir el paso de las vías generales a las de apartado y viceversa y entre vías generales.

El coste de un apartadero depende de:

- El número de vías de apartado y la longitud de las mismas.
- El número de desvíos que a su vez viene determinado por el número de vías de apartado.
- La velocidad de paso por vía desviada que determina el tipo de desvíos.

Para estimar el coste de un apartadero hay que sumar el coste de las vías de apartado, los desvíos y los sistemas de seguridad y comunicaciones. Los valores estimados de los dos primeros costes se muestran en la sección 4.2.2. El coste de los sistemas de seguridad y comunicaciones se indica en la sección 4.2.5.

Puestos de banalización

Los puestos de banalización se ubican en líneas de vía doble para permitir la circulación temporal en vía única o en paralelo en una cierta sección de la línea. Están compuestos por dos escapes que enlazan las dos vías en ambos sentidos.

El coste de puesto de banalización depende exclusivamente de la velocidad de paso por vía desviada que determina el tipo de desvíos.

4.2.4 Sistema de electrificación

El sistema de electrificación está compuesto por:

- Líneas de alimentación en alta tensión a las subestaciones de tracción, procedentes de subcentrales de distribución o de líneas integrantes de la red de energía de alta tensión.
- Subestaciones de tracción monofásicas y autotransformadores.
- Línea aérea de contacto (LAC) o catenaria, implantada a lo largo del trazado para permitir la captación de energía por los trenes de alta velocidad.

4.2.4.1 Elección del sistema de alimentación

Los sistemas de electrificación adoptados en España para las líneas de alta velocidad son de corriente alterna monofásica a 25 kV y frecuencia industrial de 50 Hz. Se presentan dos alternativas para estos sistemas de alimentación:

- Sistema 1x25 kV 50 Hz.
- Sistema 2x25 kV 50 Hz.

En el sistema 1x25 kV los transformadores de las subestaciones disponen de una salida a 25 kV con respecto al carril a 0 V. Las subestaciones se localizan a intervalos de 35 kilómetros y las zonas neutras separan secciones colaterales alimentadas en diferentes fases eléctricas. Este sistema es el implementado en la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla.

En el sistema 2x25 kV los transformadores de las subestaciones disponen de una salida a 25 kV que alimenta a la línea aérea de contacto, otra en oposición de fase a -25 kV que alimenta a un feeder y una toma central conectada a la vía, es decir, a tierra.

Este sistema utiliza centros de autotransformación para conectar ambas tensiones y balancear las corrientes. Las subestaciones se localizan cada 70 kilómetros y los centros de autotransformación a 12-15 kilómetros. Las zonas neutras separan secciones alimentadas a diferentes fases eléctricas y también se ubican enfrente de las subestaciones. Este sistema se utiliza cuando las conexiones con la red pública están relativamente lejos de las líneas ferroviarias. Este sistema está implementado en todas las líneas de alta velocidad españolas excepto en la línea Madrid-Sevilla.

4.2.4.2 Línea de alimentación a las subestaciones en alta tensión

La energía llega a las subestaciones eléctricas de tracción a través de las líneas eléctricas de transporte. En España los valores de tensión empleados son de 220 y 400 kV y dichas líneas son operadas por Red Eléctrica de España (REE).

La longitud de la conexión a las líneas de alimentación en alta tensión es variable dependiendo de la distancia a la que se encuentre la red pública de transporte de energía. Como valor medio de dicha longitud, basado en datos reales de líneas de alta velocidad española, se puede considerar 20 kilómetros, siendo el coste estimado de 0,57 M€/km.

4.2.4.3 Subestaciones eléctricas de tracción y centros de autotransformación

El sistema 1x25 kV requiere subestaciones de tracción y el 2x25 kV subestaciones de tracción y centros de autotransformación.

Las subestaciones tienen dos transformadores iguales que pueden operar al mismo tiempo o funcionar uno y el otro estar en reserva, siendo este segundo modo de operación el habitual. Si una subestación está fuera de servicio se utilizan todos los transformadores de las subestaciones colaterales.

La potencia de una subestación está determinada por varios factores:

- Intervalo mínimo entre trenes (I) expresado en minutos.
- Potencia demanda por los trenes (P) en megavatios, solíéndose considerar la potencia en doble composición para contemplar la opción más desfavorable.
- Perfil de velocidades y perfil longitudinal.
- Equipos adicionales a alimentar: algunas subestaciones alimentan no solo la catenaria sino también edificios técnicos, sistemas de señalización, calefacción de agujas...
- Distancia entre subestaciones (L), aproximadamente 35 km en 1x25 kV y 70 km en 2x25 kV.

La potencia y localización final de las subestaciones requiere de simulaciones complejas, pero para hacer una primera estimación del coste se puede emplear el siguiente procedimiento.

A velocidad máxima (V_{max}) un tren recorre en el intervalo mínimo (I) una distancia (d):

$$d = V_{max} \cdot (I/60) \tag{4.9}$$

Por tanto, el número de trenes alimentados por subestación y vía (N_{trenes}) es:

$$N_{trenes} = \frac{L}{d} \tag{4.10}$$

Sabiendo que cada tren demanda una potencia P y que la subestación puede alimentar a varias vías ($N_{vías}$), la potencia de la subestación expresada en MVA es:

$$P_{sub} = N_{trenes} \cdot P \cdot N_{vías} \tag{4.11}$$

Para una subestación de 2x60 MVA puede estimarse que los transformadores suponen el 40% del coste total y que el coste de un transformador es directamente proporcional a su potencia. El 60% restante engloba mando y control, aparamenta, edificación, servicios auxiliares, equipos de medida y control de energía... Por ello, a partir del dato de coste real de una subestación de 2x60 MVA se ha extrapolado el coste de una subestación (M€) como:

$$C_{sub} = 3,60 + P_{sub} \cdot 0,03 = 3,60 + \frac{L}{V_{max} \cdot (I/60)} \cdot P \cdot N_{vías} \cdot 0,03 \tag{4.12}$$

Los centros de autotransformación implementados en 2x25 kV son de dos tipos:

- *ATI*: situados en puntos intermedios de la línea, dotados con dos autotransformadores generalmente de 15 MVA de potencia cada uno. Su coste se estima en 1,14 M€.
- *ATF*: situados en las zonas neutras inter-subestaciones dotados de cuatro autotransformadores generalmente de 15 MVA de potencia cada uno. Su coste se estima en 1,43 M€.

La Figura 4.11. muestra como ejemplo el esquema eléctrico de la línea de alta velocidad Madrid-Levante electrificada en 2x25 kV. Se visualizan las conexiones con la red de alta tensión y la localización de subestaciones y centros de autotransformación.

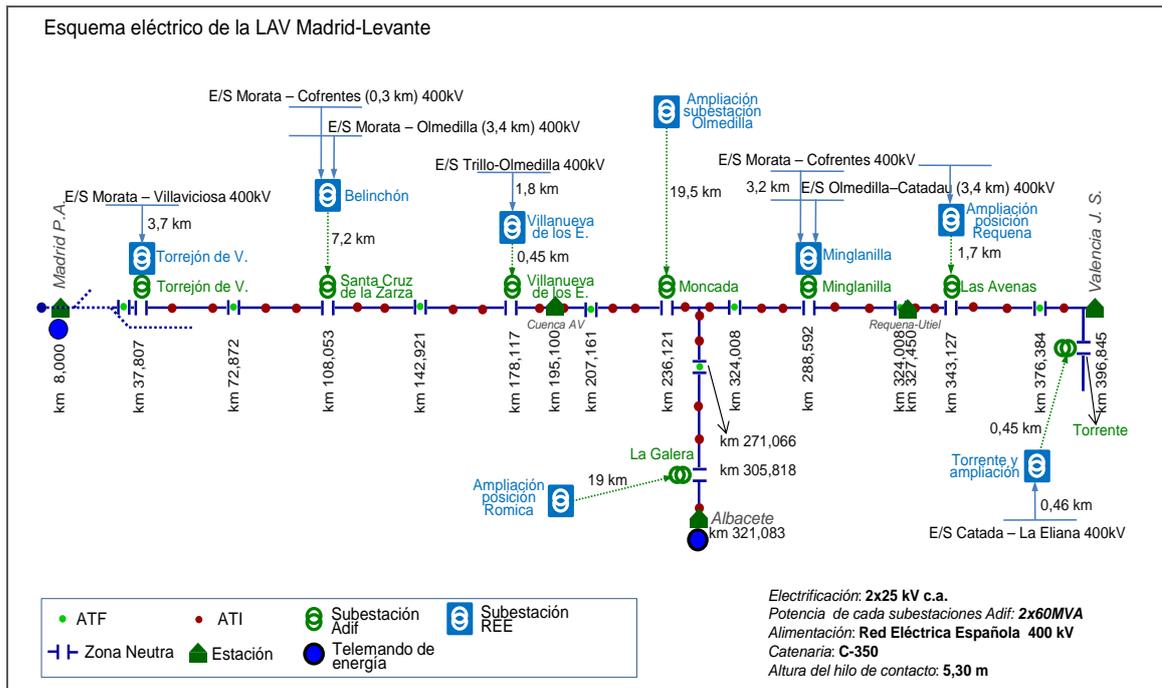


Figura 4.11. Esquema eléctrico de la línea de alta velocidad Madrid-Levante
 Fuente: Elaboración propia

4.2.4.4 Línea aérea de contacto

La línea aérea de contacto apta para velocidades de 350 km/h se alimenta a 25 kV en corriente alterna a 50 Hz. El modelo estándar empleado en las líneas de alta velocidad españolas es el CR-350.

El valor aproximado del coste de inversión de la línea aérea de contacto se estima en 0,21 M€/km para vía única y 0,37 M€/km para vía doble. Es decir, el coste de vía doble es 1,77 veces el de vía única (Figura 4.12).

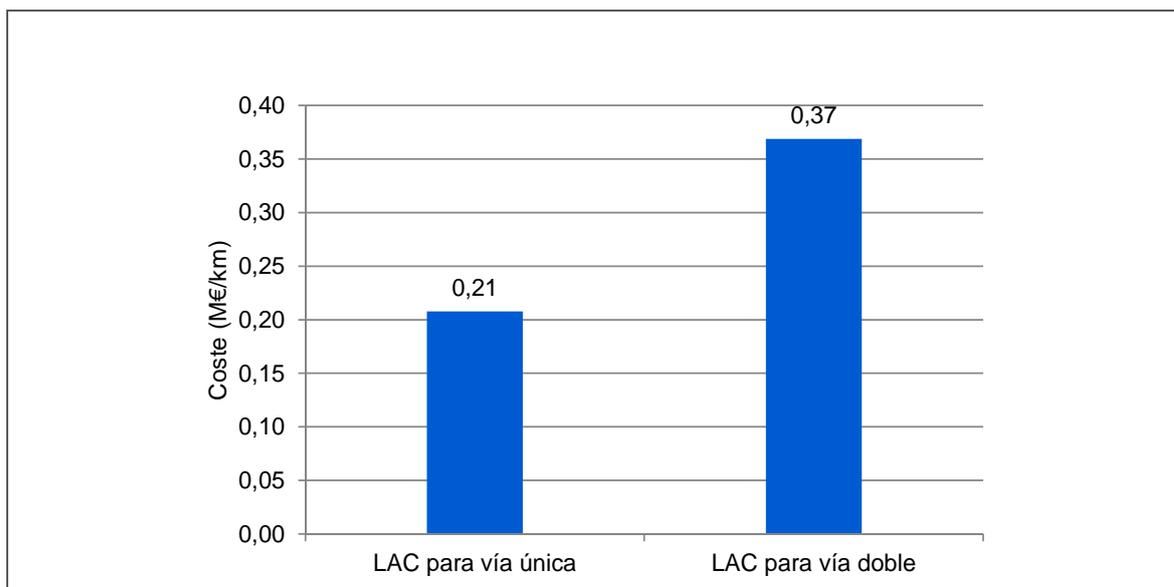


Figura 4.12. Coste de la línea aérea de contacto para vía única y doble (M€/km)
 Fuente: Elaboración propia a partir de estudios informativos

4.2.5 Sistemas de seguridad y comunicaciones

El sistema de seguridad o señalización está compuesto por:

- *Sistema de protección automática del tren (ATP)* que vigila en todo momento la conducción, regulando el proceso de frenado, de forma que no se permite que el tren circule a una velocidad superior a la autorizada en cada punto. En España las líneas de alta velocidad están equipadas con diferentes sistemas ATP (LZB, ETCS y ASFA de respaldo) si bien la tendencia es hacia el ETCS nivel 2 para cumplir los requerimientos de interoperabilidad, por ello en esta tesis se supondrá que las líneas disponen dicho sistema. El ETCS nivel 2 supervisa el tren utilizando como medio de transmisión continua la radio (GSM-R) y permite el intercambio de información bidireccional entre tren y vía. El equipamiento de vía del ETCS nivel 2 consta de circuitos de vía, centros de bloqueo por radio (RBC) y balizas para determinar la posición exacta de los trenes. Las señales luminosas no son obligatorias en el nivel 2 pero en España se implementan.
- *Enclavamientos electrónicos* que monitorizan y controlan el movimiento de los trenes en estaciones y apartaderos, mostrando la información por medio de las señales luminosas.
- *Centro de control (CRC)* desde el que se gestiona de manera centralizada la circulación en la línea.

El sistema de comunicaciones consiste en:

- Sistema tren-tierra.
- Telemando de instalaciones fijas y sistema de energía.
- Sistemas de monitorización y vigilancia.

El coste de los sistemas de seguridad y comunicaciones puede estimarse en 0,77 M€/km para vía única y 1,10 M€/km para vía doble; es decir, el coste para vía doble es 1,43 veces el coste de los sistemas para vía única (Figura 4.13). Estos costes incluyen obra civil y cableado, telemando de tráfico, energía e instalaciones fijas, sistema de energía para la alimentación de las instalaciones y sistemas de seguridad y asistencia a la conducción.

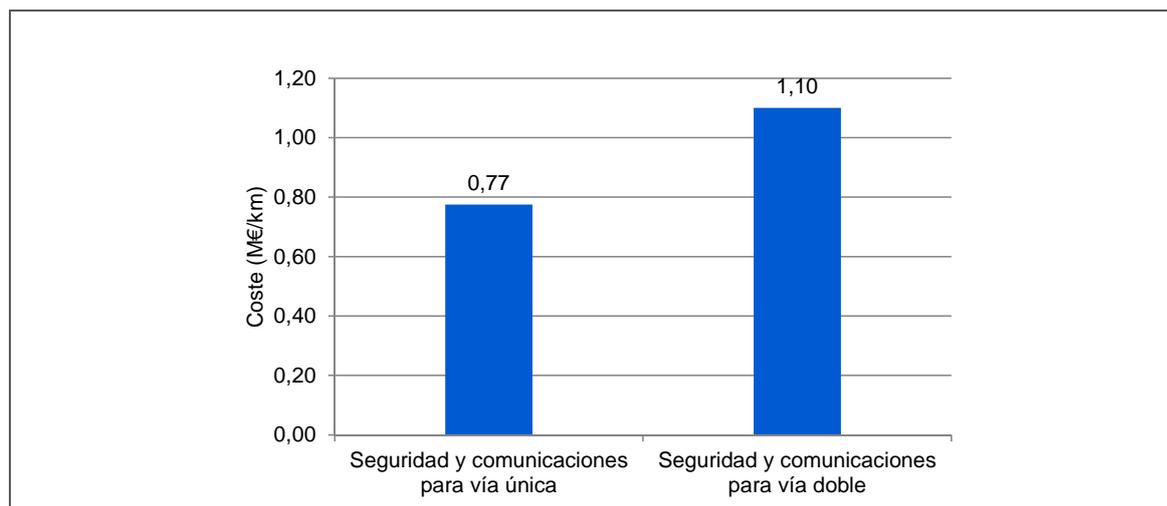


Figura 4.13. Coste de los sistemas de seguridad y comunicaciones para vía única y doble (M€/km) - Fuente: Elaboración propia a partir de estudios informativos

La estimación del coste adicional de estos sistemas en estaciones, apartaderos y puestos de banalización se muestra en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Coste de los sistemas de seguridad y comunicaciones en dependencias (M€)

Enclavamiento para PAET o estación	4,12
Señales	
Señal alta 3 focos + blanco con balizas (entrada, salida, avanzada) (ud)	0,07
Señal alta 3 focos con balizas (ud)	0,07
Señal baja con balizas (ud)	0,01
Accionamiento de aparatos de vía	
Accionamiento 12 motores + 4 comprob (ud)	0,15
Accionamiento 11 motores (ud)	0,13
Accionamiento 3 motores (ud)	0,03
Circuitos de vía de audiofrecuencia	
PAET con dos vías de apartado total	0,98
PAET con una vía de apartado total	0,56

Fuente: Elaboración propia

4.2.6 Seguridad y salud

El estudio de seguridad y salud, cuyo contenido reglamentario se establece en el art. 5 del RD 1627/97 (RD 1627/1997, de 24 de octubre), constituye la herramienta preventiva básica en fase de proyecto y tiene como finalidad establecer las medidas preventivas de carácter mínimo que deberán ser observadas y desarrolladas por el empresario contratista principal en su plan de seguridad y salud.

El presupuesto asignado se estima en un 1,5% del importe total de la obra.

4.2.7 Expropiaciones

De acuerdo con (RD 2387/2004, de 30 de diciembre) “Es necesario realizar la expropiación de pleno dominio de las superficies ocupadas por la explanación de la línea férrea, de sus elementos funcionales y de las instalaciones permanentes que tengan por objeto una correcta explotación, así como todos los elementos y obras anexas o complementarias definidas en el proyecto que coincidan con la rasante del terreno o que sobresalgan de él, y en todo caso las superficies que sean imprescindibles para cumplimentar la normativa legal vigente para este tipo de obras, en especial las contenidas en el Capítulo III, Sección II. Artículo 25 relativo a Normas particulares de la zona de dominio público”.

Criterios sobre el límite de expropiación Los criterios sobre el límite de expropiación están establecidos por la IGP-10.5 (Adif, 2008a). Basándose en estos criterios se definen a continuación las anchuras a expropiar considerando las diferentes secciones tipo que pueden existir en una línea de alta velocidad.

Plataforma normal a cielo abierto: para vía doble se estima una anchura media de 66 metros, correspondiente a un terraplén de 8 metros de altura, que supone una ocupación de 46 metros de anchura, a la cual se añaden 16 metros de las franjas laterales de dominio (8 metros a cada lado) y 4 metros por los incrementos de ocupación que pueden suponer las reposiciones de caminos. Para vía única se estima una anchura media de

60,5 metros con una ocupación de 40,5 metros de anchura, 16 metros de franjas laterales de dominio y 4 metros por los incrementos de ocupación.

La expropiación correspondiente a un PAET se considera incluida dentro de la franja general.

Viaductos: se estima para vía doble una anchura media de 34 metros, correspondiente a la suma de los 14 metros de la estructura más los 16 metros de las franjas laterales de dominio más 4 metros por el incremento de caminos. Para vía única se estima una anchura media de 28,5 metros, correspondiente a 8,5 metros de la estructura, 16 metros de franjas laterales y 4 metros por el incremento de caminos.

Túneles: no se considera expropiación, excepto en las boquillas (100 metros) que se tratan como tramos normales a cielo abierto. En los túneles artificiales se ha considerado una anchura media de 70 metros, como si fuera plataforma normal a cielo abierto.

Subestaciones y centros de autotransformación: se estima una superficie de 5.000 m² para las subestaciones y 10.400 m² para los accesos (carretera de 400 metros en total). Para los centros de autotransformación se han considerado cinco metros con una superficie de 160 m² y uno final de 300 m².

4.2.7.1 Tipos de suelos y valoración

Se considerarán en esta tesis a efectos del cálculo del importe de las expropiaciones, tres tipos de suelos según su uso: urbano, urbanizable y no urbanizable cuyas valoraciones se muestran en la Figura 4.14.

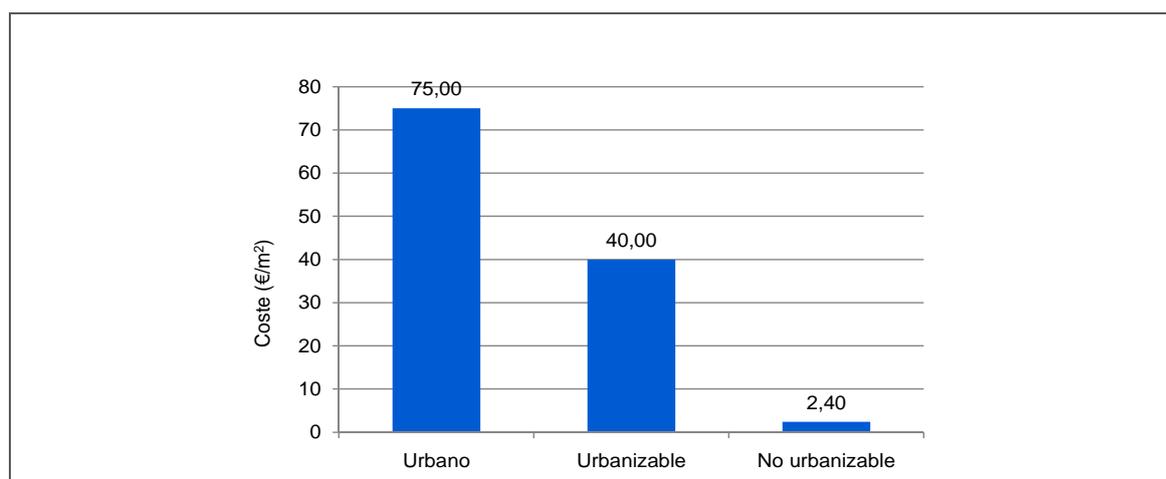


Figura 4.14. Valoración de suelos según su uso (€/m²)
Fuente: Elaboración propia a partir de estudios informativos

4.2.8 Resumen de costes de construcción de una línea de alta velocidad

Se muestra a continuación (Tabla 4.7) el resumen de costes de construcción para vía única, vía única que posteriormente se duplica (vía única + vía única) y vía doble.

En el caso de vía única que posteriormente se duplica los datos presentados se han calculado con las siguientes hipótesis:

- Infraestructura sin viaductos ni túneles: en terreno llano la plataforma es desde un principio para vía doble, y que en ondulado y montañoso inicialmente es para vía única y posteriormente se amplía para vía doble.
- Viaductos: dimensionados para vía doble.
- Túneles: inicialmente monutobo para vía única posteriormente se construye un segundo túnel monutobo para la segunda vía.

- Vía: inicialmente se monta una vía y posteriormente la segunda.
- Sistemas de electrificación: inicialmente se monta para una vía y posteriormente para la segunda.
- Sistemas de seguridad y comunicaciones: inicialmente se montan para una vía y posteriormente para la segunda.
- En las expropiaciones a cielo abierto y para viaductos se supone que desde un principio se expropia para dos vías.

En cualquier caso, estas hipótesis se han hecho solamente para poder estimar unas ratios que relacionen los costes de las diferentes configuraciones. Cada caso concreto requerirá su propia evaluación por ejemplo para determinar si la infraestructura de una línea en vía única que posteriormente se vaya a duplicar se prepara desde un principio para vía doble.

Tabla 4.7. Coste de construcción de una línea de alta velocidad

Concepto		Vía única	Vía única + Vía única	Vía doble	Ratio (VD/VU)	Ratio (VD/VU+VU)
Infraestructura						
Infraestructura sin viaductos ni túneles						
Terreno llano sin riesgo	M€/km	2,70	3,00	3,00	1,11	1,00
Terreno llano con riesgo	M€/km	5,50	6,00	6,00	1,09	1,00
Terreno ondulado sin riesgo	M€/km	5,50	6,00	6,00	1,09	1,00
Terreno ondulado con riesgo	M€/km	9,10	10,00	10,00	1,10	1,00
Terreno montañoso sin riesgo	M€/km	9,10	18,20	10,00	1,10	0,55
Terreno montañoso con riesgo	M€/km	12,70	25,40	14,00	1,10	0,55
Viaductos						
Terreno llano, cimentación directa	M€/km	8,10	13,30	13,30	1,64	1,00
Terreno llano, cimentación profunda	M€/km	18,70	30,80	30,80	1,65	1,00
Terreno ondulado, cimentación directa	M€/km	10,60	17,50	17,50	1,65	1,00
Terreno ondulado, cimentación profunda	M€/km	19,60	32,20	32,20	1,64	1,00
Terreno montañoso, cimentación directa	M€/km	13,20	21,70	21,70	1,64	1,00
Terreno montañoso, cimentación profunda	M€/km	20,40	33,60	33,60	1,65	1,00
Túneles						
Terreno calidad buena	M€/km	7,77	19,41	15,52	2,00	0,80
Terreno calidad media	M€/km	10,10	25,24	20,85	2,06	0,83
Terreno calidad mala	M€/km	13,21	33,00	26,17	1,98	0,79
Vía						
Vía sobre balasto	M€/km	0,60	1,20	1,20	2,00	1,00
Vía sobre placa	M€/km	0,90	1,80	1,69	1,88	0,94
Desvíos						
Desvío 350/220	€/ud	0,92	0,92	0,92		
Desvío 350/100	€/ud	0,57	0,57	0,57		
Desvío 200/100	€/ud	0,43	0,43	0,43		
Desvío 200/50	€/ud	0,29	0,29	0,29		
Electrificación						
Línea de alimentación a las subestaciones en AT	M€/km	0,57	0,57	0,57		
Subestación eléctrica de tracción	€/ud	$c_{sub}(P_{sub}, V_{max}, N_{vias})$				
ATI	€/ud	1,14	1,14	1,14		
ATF	€/ud	1,43	1,43	1,43		
Línea aérea de contacto	M€/km	0,21	0,42	0,37	1,76	0,88
Sistemas de seguridad y comunicaciones						
Seguridad y comunicaciones	M€/km	0,77	1,54	1,10	1,43	0,71
Expropiaciones						
Plataforma a cielo abierto, terreno urbano	M€/km	4,54	4,95	4,95	1,09	1,00
Plataforma a cielo abierto, terreno urbanizable	M€/km	2,42	2,64	2,64	1,09	1,00
Plataforma a cielo abierto, terreno no urbanizable	M€/km	0,15	0,16	0,16	1,09	1,00
Viaductos, terreno urbano	M€/km	2,14	2,55	2,55	1,19	1,00
Viaductos, terreno urbanizable	M€/km	1,14	1,36	1,36	1,19	1,00
Viaductos, terreno no urbanizable	M€/km	0,07	0,08	0,08	1,19	1,00

Fuente: Elaboración propia

4.3 COSTES DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN DE UNA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD

El propósito de esta sección es realizar una aproximación a los de costes de mantenimiento y operación de una línea de alta velocidad que pueda ser empleada en la evaluación socioeconómica. Quedan fuera del alcance de esta tesis los costes de renovación de la infraestructura.

Típicamente en las evaluaciones, y a falta de valores reales, se emplean valores medios. Ello no resultada especialmente recomendable ya que no se tienen en cuenta los inductores de costes, en una actividad en la que los costes variables son en relación con los totales elevados. En este sentido el manual de evaluación de inversiones del administrador de infraestructuras de Suecia (Banverket, 2005) recomienda separar los costes fijos de los marginales pues aunque la estimación no se haga con precisión, el error cometido es menor que cuando se utilizan valores medios.

Resulta complejo aportar cifras generales de costes fijos y marginales de mantenimiento pues éstos son el resultado de la combinación de múltiples variables:

- *Características del tráfico:* velocidades, carga por eje, masas no suspendidas, número de frecuencias y tipos de servicios.
- *Políticas de mantenimiento:* disponibilidad de medios humanos y materiales y bandas de mantenimiento utilizables.
- *Características de la infraestructura:* antigüedad, número de vías, número de aparatos de vía, perfil en planta y alzado, sistemas de electrificación, señalización y comunicaciones, tipología de suelos y condiciones climáticas.
- *Niveles de calidad:* requerimientos de disponibilidad, fiabilidad y seguridad.

Las metodologías para la determinación de los costes marginales por uso de la infraestructura han sido desarrolladas en los últimos años al objeto de realizar una adecuada tarificación por uso de las infraestructuras, especialmente importante en entornos ferroviarios liberalizados. Los enfoques empleados pueden clasificarse en *top-down* y *bottom-up*.

El enfoque *top-down* a partir de los costes de mantenimiento y renovación de la infraestructura trata de determinar qué parte es variable con el tráfico. Para ello se emplean modelos econométricos o técnicas de asignación de costes que los distribuyen por actividades y posteriormente mediante criterios ingenieriles se determina que parte es variable con el uso. Si bien este enfoque permite obtener datos suficientemente desagregados, la principal desventaja es que se basa en datos históricos que pueden estar sesgados por las políticas de mantenimiento implementadas o restricciones presupuestarias. Este enfoque surgió a partir de un estudio académico elaborado en Suecia (Johansson y Nilsson, 2002) y fue el adoptado por el administrador de infraestructuras de dicho país.

El enfoque *bottom-up* emplea modelos y criterios ingenieriles para determinar el desgaste y deterioro que se produce por la circulación de un tren adicional en cada uno de los elementos que constituyen una línea ferroviaria. Posteriormente a dicha cifra se le asigna un coste. Si bien este enfoque aporta cifras acordes a las necesidades reales de mantenimiento y renovación, requiere modelos complejos y realizar numerosas hipótesis por lo que en general se utiliza para realizar la asignación de costes del enfoque *top-down*. Dicha combinación de enfoques fue elegida por el administrador de infraestructuras británico Network Rail para determinar el canon variable por uso de la infraestructura (Booz Allen Hamilton Ltd., 2005)

A la vista de las ventajas e inconvenientes de cada uno de los enfoques, en esta tesis se emplea una combinación de ambos con datos reales de costes de mantenimiento de líneas de alta velocidad españolas.

4.3.1 Mantenimiento de infraestructura y vía (sin aparatos)

El grueso de los contratos de mantenimiento de infraestructura y vía engloba mantenimiento de vía, reparación, conservación y vigilancia de desvíos, conservación de la plataforma, reparación y conservación de vallados y cerramientos y mantenimiento de edificios. Dichos trabajos en el caso español se agrupan bajo la denominación de canon de mantenimiento.

Se prefiere tratar aquí por separado el mantenimiento de plena vía y el mantenimiento de desvíos y edificios ya que ello permite analizar la influencia del número de desvíos y edificios en los costes totales.

Se ha partido de las cifras recogidas en los Pliegos de condiciones técnicas para el mantenimiento de infraestructura, vía y apartados de vía de las líneas de alta velocidad Madrid-Sevilla, La Sagra-Toledo, Córdoba-Málaga y Madrid-Figueroles, para el periodo 2014-2017 (Adif, 2013a; Adif, 2013b; Adif, 2013c) de las que se ha sustraído una estimación de la parte correspondiente a mantenimiento de desvíos. Dichos datos se han puesto en relación con los de tráfico por tramos, considerándose tanto su cuantía como su tipología que están recogidos en la publicación anual de Adif denominada CIRTRA (Adif, 2014). Dado que la tipología del tráfico en los tramos analizados es muy similar, pues en ninguno de los casos existe tráfico de mercancías y la mayor parte de los servicios son AVE y Avant, es posible realizar una primera aproximación de los costes de mantenimiento en función del volumen de tráfico, expresado en millones de toneladas.kilómetro anuales (Mtkm). Como se muestra en la Figura 4.15, mediante un ajuste lineal de los datos el coste de mantenimiento anual por kilómetro puede formularse como:

$$c_{mantVía} = 813,49 \cdot Mtkm + 2.720 \quad (4.13)$$

De esta ecuación puede deducirse que existe una parte fija, que se estima en 2.720 €/km para vía doble. Respecto a la parte variable, dependiente del volumen de tráfico es necesario afinar el análisis para hacerla depender de las características del mismo.

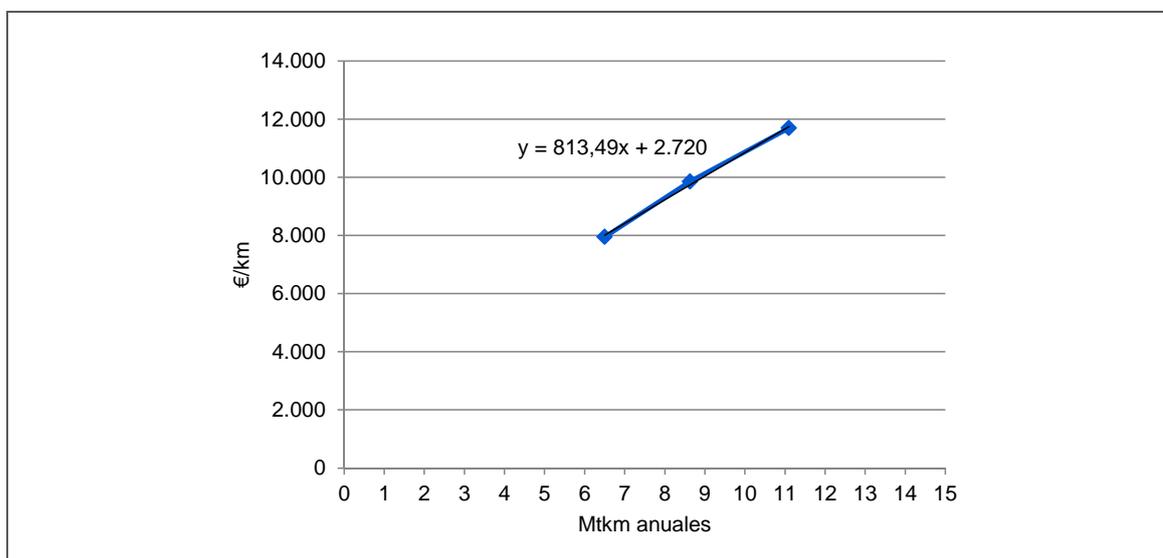


Figura 4.15. Coste de mantenimiento anual por kilómetro de infraestructura y vía (sin aparatos) en las líneas de alta velocidad españolas

Fuente: Elaboración propia

El administrador de infraestructuras británico Network Rail, al objeto de poder imputar a cada operador ferroviario la parte que le corresponde del coste variable por uso de la infraestructura cuantifica el desgaste que cada vehículo produce a la vía y la

infraestructura en función de sus características. Para ello identifica tres componentes (Network Rail, 2013):

- *Desgaste vertical variable de la vía:* está asociado a las fuerzas verticales que un tren ejerce sobre la vía. Los principales inductores del deterioro de vía por esta causa y consecuentemente de los trabajos de mantenimiento y renovación son la velocidad media de circulación, la carga por eje y las masas no suspendidas.
- *Desgaste horizontal variable de la vía:* está asociado a los fenómenos de fatiga y desgaste del carril producidos por el contacto rueda-carril. Depende del tipo de suspensión del vehículo, radio de curvas e insuficiencia de peralte.
- *Desgaste de la infraestructura:* asentamiento excesivo de terraplenes que conlleva deformaciones de la vía y daño producido a estructuras de hormigón. Depende de la carga por eje, la distancia entre ejes y la tipología de los materiales empleados para la construcción de terraplenes.

(Serco commercial, 2013) propone un modelo que permite estimar el desgaste vertical variable por eje.milla en función de algunas características del tren y el servicio. Debe remarcar que dicha ecuación no da un valor económico, sino un valor adimensional del desgaste vertical variable.

$$DR_{eje.milla} = 0,473 \cdot e^{0,133 \cdot A} + 0,015 \cdot S \cdot U - 0,009 \cdot S - 0,284 \cdot U - 0,442 \quad (4.14)$$

Donde:

- $DR_{eje.milla}$ es el desgaste vertical variable por eje.milla
- A es la carga por eje expresada en toneladas
- S es la velocidad media sin contar los tiempos de parada que en esta tesis se denomina $\bar{V}_{sinParadas}$ expresada en millas por hora (mph)
- U es la masa no suspendida expresada en toneladas por eje.

Por tanto, el desgaste vertical variable por tren.km es:

$$DR_{tren.km} = \frac{0,473 \cdot e^{0,133 \cdot A} + 0,015 \cdot \bar{V}_{sinParadas} \cdot U - 0,009 \cdot \bar{V}_{sinParadas} - 0,284 \cdot U - 0,442}{1,609} \cdot NE \quad (4.15)$$

Donde:

- A es la carga por eje expresada en toneladas.
- $\bar{V}_{sinParadas}$ es la velocidad media sin contar los tiempos de parada en km/h.
- U es la masa no suspendida expresada en toneladas por eje.
- NE es el número de ejes del tren.

El estudio muestra cómo la relación del desgaste relativo con la velocidad es lineal, con la carga por eje exponencial, y con la masa no suspendida es lineal.

(Burstow, 2012) demuestra que no existe desgaste horizontal variable para radios superiores a 1.500 m, como es el caso de las líneas de alta velocidad.

Respecto al desgaste de la infraestructura, (Serco commercial, 2013) indica que aunque se han llevado a cabo estudios del deterioro de terraplenes todavía no se ha encontrado un modelo que lo describa y resulta recomendable utilizar el mismo modelo que para el desgaste vertical.

El reparto del coste variable entre las dos componentes puede estimarse en 85% para el daño vertical relativo y 15% para el daño a la infraestructura.

Aplicando el modelo para la estimación del daño variable al caso español, se puede extrapolar que el coste de mantenimiento por tren.kilómetro expresado en euros es:

$$c_{variableVía} = DR_{tren.km} \cdot 0,0034 \quad [€/tren.km] \quad (4.16)$$

A modo de ejemplo se ha estimado el coste de mantenimiento de vía y plataforma por tren.km para algunos trenes de alta velocidad españoles (Tabla 4.8).

Tabla 4.8. Coste de mantenimiento de vía y plataforma por tren.km para trenes de alta velocidad españoles

Tren	Velocidad (km/h)	€/tren.km
S102	300	0,29
S103	300	0,40
S104	250	0,22

Fuente: Elaboración propia

En el caso de existir túneles largos se supondrá un incremento del coste de mantenimiento de la infraestructura del 40%, porcentaje basado en las cifras de los túneles de Abdalajis y Guadarrama.

Además, se deben prever partidas para la atención a incidencias y recursos especiales en mantenimiento preventivo, pequeñas obras de inversión y prevención de incendios que pueden considerarse fijas y más bien ligadas a la política de mantenimiento del administrador de infraestructuras. Puede estimarse para el caso español una cuantía anual para vía doble de 3.200 €/km.

En el caso de líneas de vía única se considera como hipótesis que los costes fijos son la mitad de los de líneas de vía doble ya que se requiere menos maquinaria, aunque ésta tenga que realizar mayor recorrido para llegar a la zona a intervenir.

En resumen, el coste anual de mantenimiento por kilómetro de infraestructura y vía (sin aparatos) para líneas de vía doble es:

$$C_{\text{mantPlatyVia}_{VD}} = 2.720 + \sum_t DR_{\text{tren.km}_t} \cdot 0,0034 \cdot NT_t + 3.200 \quad [\text{€/km}] \quad (4.17)$$

Y para líneas de vía única es:

$$C_{\text{mantPlatyVia}_{VU}} = 1.360 + \sum_t DR_{\text{tren.km}_t} \cdot 0,0034 \cdot NT_t + 1.600 \quad [\text{€/km}] \quad (4.18)$$

Donde:

- $DR_{\text{tren.km}_t}$ es el desgaste vertical variable expresado en euros por tren.km
- NT_t es el número de trenes del tipo t.

4.3.2 Mantenimiento de aparatos de vía

El coste anual de mantenimiento de los aparatos de vía es de media un diez por ciento de su coste de inversión según (Baumgartner, 2001). De dicho coste, y de acuerdo con (Booz Allen Hamilton Ltd., 2005), para un volumen de tráfico medio puede suponerse que el 47% es variable en función del tráfico y el 53% restante es fijo.

Partiendo de los costes de inversión de los desvíos presentados en el apartado 4.2.2 se puede estimar el coste fijo anual de mantenimiento en función del tipo de desvío.

En cuanto al coste variable de mantenimiento es necesario hacerlo depender del volumen y las características del tráfico. Para ello se emplea el modelo de desgaste vertical que se ha utilizado anteriormente para la imputación del coste variable de mantenimiento de vía. Se considera como volumen de tráfico medio el existente en la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona (8,63 millones tkm/km) para realizar la imputación del 47% del coste de mantenimiento.

Conforme a esta metodología el coste de mantenimiento por kilómetro de los aparatos de vía puede calcularse como:

$$\begin{aligned}
 c_{\text{mantDesvías}} = & \left(49.001 + \sum_t DR_{\text{tren.km}_t} \cdot 0,0194 \cdot NT_t \right) \cdot ND_{350/220} + \\
 & \left(39.750 + \sum_t DR_{\text{tren.km}_t} \cdot 0,0157 \cdot NT_t \right) \cdot ND_{350/160} + \\
 & \left(30.154 + \sum_t DR_{\text{tren.km}_t} \cdot 0,0119 \cdot NT_t \right) \cdot ND_{350/100} + \left(22.616 + \sum_t DR_{\text{tren.km}_t} \cdot 0,0090 \cdot NT_t \right) \cdot ND_{200/100} + \\
 & \left(15.303 + \sum_t DR_{\text{tren.km}_t} \cdot 0,0061 \cdot NT_t \right) \cdot ND_{200/50}
 \end{aligned}$$

[€/km] (4.19)

Donde:

- $DR_{\text{tren.km}_t}$ es el desgaste vertical variable expresado en euros por tren.km
- NT_t es el número de trenes del tipo t.
- $ND_{350/220}$ es el promedio de desvíos por kilómetro del tipo 350/220.
- $ND_{350/160}$ es el promedio de desvíos por kilómetro del tipo 350/160.
- $ND_{350/100}$ es el promedio de desvíos por kilómetro del tipo 350/100.
- $ND_{200/100}$ es el promedio de desvíos por kilómetro del tipo 200/100.
- $ND_{220/50}$ es el promedio de desvíos por kilómetro del tipo 200/50.

4.3.3 Mantenimiento del sistema de electrificación

Para estimar el coste de mantenimiento del sistema de electrificación se debe tener en cuenta que existen elementos cuyo desgaste está asociado al uso (principalmente hilo de contacto y en menor medida péndolas y otros elementos de la línea aérea de contacto) y otros cuyo mantenimiento es independiente del uso (cimentaciones, postes y dinteles, subestaciones, centros de autotransformación, alumbrado de túneles, calefacción de agujas...).

Se dispone del importe de licitación del mantenimiento de línea aérea de contacto de la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona (ABC, 2009) y el contrato de mantenimiento de las instalaciones de energía de toda la red de alta velocidad (Sala de Prensa Adif, 2014).

De (Network Rail, 2012) se desprende la distribución de costes entre las tareas de mantenimiento y renovación de los elementos que se desgastan con el uso y el porcentaje de los mismos que es variable, no se consideran las grandes renovaciones (Tabla 4.9).

Tabla 4.9. Distribución de costes de mantenimiento de LAC y variabilidad con el uso

	Distribución del coste	Variabilidad
Renovación del hilo de contacto/catenaria	1%	72%
Cambio de componentes	7%	10%
Mantenimiento de LAC	92%	12%

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de (Network Rail, 2012)

Cruzando estas últimas cifras con las de las licitaciones y el volumen de tráfico de la red española de alta velocidad se puede estimar un coste de mantenimiento variable de 0,039 €/tren.km.

La parte fija del coste de mantenimiento de estos elementos se puede estimar en 5.800 €/km para líneas de vía doble.

Respecto al coste de mantenimiento de los elementos del sistema de electrificación cuyo mantenimiento es independiente del uso, para el caso español puede estimarse una cuantía anual de 2.100 €/km para vía doble.

En resumen, el coste anual de mantenimiento por kilómetro del sistema de electrificación para vía doble es:

$$c_{mantEleVD} = 0,039 \cdot NT + 5.800 + 2.100 \quad [€/km] \quad (4.20)$$

Y para líneas de vía única es:

$$c_{mantEleVU} = 0,039 \cdot NT + 2.900 + 1.050 \quad [€/km] \quad (4.21)$$

Donde:

- NT es el número de trenes.

4.3.4 Mantenimiento de los sistemas de seguridad y comunicaciones

El mantenimiento de los sistemas de seguridad incluye enclavamientos, CTC, circuitos de vía, accionamiento de desvío y sensores de rueda, señalización lateral, sistemas de protección del tren, ERTMS, telemando de sistemas de energía, detectores de caída de objetos y cajas calientes, cables de alimentación y señalización, cajas de conexión y edificios técnicos.

Respecto a la diferenciación de costes fijos y variables, según (Booz Allen Hamilton Ltd., 2005) puede suponerse que el coste de mantenimiento variable con el uso del sistema de seguridad es del 5%, ya que sólo algunos elementos de los desvíos sufren desgastes asociados al volumen de tráfico (trenes.kilómetro) y la carga soportada (toneladas.kilómetro). Sin embargo, la misma fuente señala que no existen evidencias que justifiquen dicha cifra. Por otra parte, según (Serco commercial, 2013) dado que el porcentaje estimado es tan bajo puede considerarse que todos los costes son fijos.

El coste de mantenimiento del sistema de seguridad por kilómetro depende del número de desvíos, ya que estos están protegidos por señales. La "densidad" del resto de elementos que componen el sistema puede considerarse similar en las líneas de alta velocidad. Por ello a partir del importe de licitación del mantenimiento de sistemas de señalización de las líneas de alta velocidad Madrid-Barcelona (Sala de Prensa Adif, 2013) y Madrid-Sevilla, La Sagra-Toledo y Córdoba-Málaga (Europa Press, 2012) y conocido el número de desvíos de cada una de ellas, se puede extrapolar la siguiente ecuación para el cálculo del coste de mantenimiento por kilómetro del sistema de seguridad para vía doble en función del número de desvíos por kilómetro (ND).

$$c_{mantSeg} = 47227 \cdot ND + 16822 \quad [€/km] \quad (4.22)$$

Para vía única se considera que la parte fija del coste de vía doble se reduce a la mitad.

Las labores de mantenimiento del sistema de telecomunicaciones afectan a todos los aparatos de señalización y transmisión de datos a través de la fibra óptica, existentes tanto en la vía como en los centros de control (red IP, telecomunicaciones móviles GSM-R, redes de datos, etc.) y de la red que asegura la cobertura GSM.

El mantenimiento de las comunicaciones es independiente del volumen de tráfico y está ligado al deterioro producido por las condiciones ambientales.

Se dispone de las cifras presentadas por el contrato de mantenimiento de la línea Córdoba-Málaga (Sala de Prensa Adif, 2009) de donde se puede estimar un coste anual de 15.405 €/km para líneas de vía doble.

En resumen, el coste anual de mantenimiento por kilómetro de los sistemas de seguridad y comunicaciones para vía doble es:

$$c_{mantSegyComVD} = 47227 \cdot ND + 16822 + 15.405 \quad [€/km] \quad (4.23)$$

Y para vía única es:

$$c_{mantSegyCmVU} = 472,27 \cdot ND + 84,11 + 7,702 \quad [€/km] \quad (4.24)$$

Donde:

- ND es el número de desvíos por kilómetro.

4.3.5 Operación de la infraestructura y seguridad

A partir de datos de las líneas de alta velocidad españolas correspondientes al periodo 2005-2012 se ha calculado un promedio de los costes anuales de gestión del tráfico de 5.000 €/km para vía doble. Puede considerarse que el coste para vía única es el 75% del coste de vía doble.

En el capítulo de seguridad se consideran los costes de personal y vehículos necesarios para vigilar la vía y las instalaciones, sin contar las estaciones, para evitar robos e intrusiones. De acuerdo con (Adif, 2011) se estima un coste de 6.026 €/km, que por su naturaleza se considera independiente del número de vías.

4.3.6 Mantenimiento y operación de estaciones

Conforme al manual de evaluación de inversiones de Adif (Adif, 2011) se estima un coste anual de 1.000.000 euros para una estación grande, 260.000 euros para una estación mediana y 50.000 euros para una estación pequeña.

Por tanto, el coste de mantenimiento del conjunto de estaciones de una línea puede formularse como:

$$c_{mantYopEstaciones} = 1.000.000 \cdot NE_G + 260.000 \cdot NE_M + 50.000 \cdot NE_P \quad [€] \quad (4.25)$$

Siendo:

NE_G , NE_M y NE_P el número de estaciones grandes, medianas y pequeñas respectivamente que hay en la línea.

4.3.7 Costes generales y de estructura

De acuerdo con (Adif, 2011) se valoran en un 5% del total de costes de mantenimiento y operación.

4.3.8 Resumen de costes de mantenimiento de una línea de alta velocidad

Por tanto, el coste anual mantenimiento y operación de una línea de alta velocidad por kilómetro se puede estimar como:

$$c_{mantYopLAV} = c_{mantPlatyVia} + c_{mantDesvío} + c_{mantElec} + c_{mantSegyCm} + c_{operación} \quad (4.26)$$

Siendo para vía doble:

$$c_{mantPlatyViaVD} = 5,920 + \sum_t DR_{tren.km_t} \cdot 0,0034 \cdot NT_t \quad [€/km] \quad (4.27)$$

$$c_{mantDesvios} = \left(49,001 + \sum_t DR_{tren.km_t} \cdot 0,0194 \cdot NT_t \right) \cdot ND_{350/220} + \left(30,154 + \sum_t DR_{tren.km_t} \cdot 0,0119 \cdot NT_t \right) \cdot ND_{350/100} + \left(22,616 + \sum_t DR_{tren.km_t} \cdot 0,0090 \cdot NT_t \right) \cdot ND_{200/100} + \left(15,303 + \sum_t DR_{tren.km_t} \cdot 0,0061 \cdot NT_t \right) \cdot ND_{200/50} \quad [€/km] \quad (4.28)$$

$$c_{mantElevD} = 0,039 \cdot NT + 7.900 \quad [€/km] \quad (4.29)$$

$$c_{mantSegyCmVD} = 472,27 \cdot ND + 15.573 \quad [€/km] \quad (4.30)$$

$$c_{operaciónVD} = 11.026 \quad [€/km] \quad (4.31)$$

Y para líneas de vía única:

$$c_{mantPlatyViaVU} = 2.960 + \sum_t DR_{tren.km_t} \cdot 0,0034 \cdot NT_t \quad [€/km] \quad (4.32)$$

$$c_{mantDesvios} = \left(49.001 + \sum_t DR_{tren.km_t} \cdot 0,0194 \cdot NT_t \right) \cdot ND_{350/220} +$$

$$\left(30.154 + \sum_t DR_{tren.km_t} \cdot 0,0119 \cdot NT_t \right) \cdot ND_{350/100} + \left(22.616 + \sum_t DR_{tren.km_t} \cdot 0,0090 \cdot NT_t \right) \cdot ND_{200/100} +$$

$$\left(15.303 + \sum_t DR_{tren.km_t} \cdot 0,0061 \cdot NT_t \right) \cdot ND_{200/50}$$

$$[€/km] \quad (4.33)$$

$$c_{mantElevU} = 0,039 \cdot NT + 3.950 \quad [€/km] \quad (4.34)$$

$$c_{mantSegyCmVU} = 472,27 \cdot ND + 7.786 \quad [€/km] \quad (4.35)$$

$$c_{operaciónVU} = 9.776 \quad [€/km] \quad (4.36)$$

A lo que hay que añadir el coste de mantenimiento y operación del conjunto de estaciones de la línea:

$$c_{mantYopEstaciones} = 1.000.000 \cdot NE_G + 260.000 \cdot NE_M + 50.000 \cdot NE_P \quad [€] \quad (4.37)$$

Y los costes generales y de estructura que son un 5% del total.

4.4 COSTES E INGRESOS DE UN OPERADOR DE VIAJEROS EN ALTA VELOCIDAD

El propósito de esta sección es establecer una aproximación a la función de costes de un operador ferroviario de viajeros en alta velocidad identificando los inductores de costes.

Este análisis se basa en la metodología establecida por el Alberto García Álvarez en su tesis doctoral (García Álvarez, 2012), informe elaborado para la UIC (García Álvarez, 2010b) y monográfico sobre costes de operación (García Álvarez, 2011a). Se han actualizado los costes unitarios y se han agrupado los diferentes términos en función de sus inductores. Se propone también un método para estimar los consumos de energía a falta de datos reales.

Los costes en los que incurre un operador por la prestación de un servicio de viajeros los denominan *costes operativos*. Dentro de los costes operativos pueden diferenciarse los costes ligados propiamente al movimiento del tren que se denominan *costes de explotación* (derivados de la tenencia del tren, mantenimiento y limpieza, energía y personal y canon marginal) y aquellos otros costes relacionados con los servicios a los viajeros y ventas, costes generales de la empresa e impuestos y tasas pagados a la administración y canon de la infraestructura por encima del coste marginal.

4.4.1 Conceptos previos

Para poder estimar los costes operativos es necesario clarificar algunos conceptos previamente:

- Coste de adquisición del tren (P_{tren}), valor inicial en euros
- Horas de funcionamiento anuales (AT) en minutos
- Recorrido anual (AR) expresado en kilómetros

A continuación se presentan estos conceptos y cómo se calculan.

4.4.1.1 Coste de adquisición del tren (P_{tren})

El coste de adquisición de un tren nuevo se puede estimar en función de algunas de sus características: número de cabinas de conducción (C), masa en vacío (M), potencia continua, expresada en kW (P), número de motores (NM), número de plazas (s), coeficiente de confort (CC) por ejemplo 0,8 en clase turista, 1 en preferente y 1,5 en primera clase.

$$P_{tren} = 162.857 \cdot C + 28.771 \cdot M + 1.086 \cdot P + 27.143 \cdot NM + 6.514 \cdot s \cdot CC \quad (4.38)$$

Puede existir un recargo por serie corta, derivado de la necesidad de llevar a cabo trabajos de I+D, por multicorriente y por el sistema de seguridad.

El recargo por el sistema de seguridad para trenes de alta velocidad, englobando sistemas de señalización, comunicaciones y protección del tren (ATP) se puede estimar en 585.360 euros.

4.4.1.2 Horas de funcionamiento anuales (AT)

El número de horas de funcionamiento anuales depende de la velocidad, la estacionalidad de la demanda, la frecuencia del servicio, la política de oferta en las horas punta y la política de reserva y mantenimiento. Pueden estimarse como:

$$AT = 365 \cdot H_t \quad (4.39)$$

Siendo H_t las horas diarias de uso del tren, que en alta velocidad suelen ser en promedio 7 u 8.

4.4.1.3 Recorrido anual (AR)

La distancia anual recorrida por un tren depende del número de horas diarias de servicio comercial (H_t), el tiempo de viaje (T_T) y el tiempo de rotación (T_R).

El número de viajes que puede realizar un tren al día es:

$$J = \frac{H_t}{T_T + T_R} \quad (4.40)$$

Por tanto, la distancia anual recorrida, considerando que la longitud del servicio es L es:

$$AR = 365 \cdot \left(\frac{H_t}{T_T + T_R} \right) \cdot L \quad (4.41)$$

4.4.2 Función de costes del operador de alta velocidad

En el transporte de viajeros por ferrocarril los costes pueden estar determinados por el tiempo de viaje, la distancia recorrida o el número de paradas intermedias realizadas y otros se imputan por viaje. Mientras algunos costes son independientes del tamaño del tren, otros dependen del número de coches que forman la composición. Algunos se relacionan con el número de viajeros. Por todo ello los costes del operador pueden desglosarse en función de sus inductores en función de sus inductores en:

- Costes por tren y tiempo de viaje ($ctrmin$)

- Costes por tren y kilómetro recorrido ($ctrkm$)
- Costes por coche y tiempo de viaje ($ctrmin$)
- Costes por coche y kilómetro recorrido ($cckm$)
- Costes por coche y parada ($ccpar$)
- Coste por coche y viaje ($ccviaje$)
- Costes por viajero ($cviajero$)
- Canon por uso de las infraestructuras ($canon$)

$$C_{op} = ctrmin + ctrkm + cckm + ccpar + ccviaje + cviajero + canon \quad (4.42)$$

A continuación se describen y formulan cada uno de los componentes de la función de costes del operador.

4.4.2.1 Costes por tren y tiempo de viaje ($ctrmin$)

Los costes que se imputan por tren y dependen del tiempo de viaje se pueden formular como:

$$ctrmin = (c_{maquinista} + c_{posesión} + c_{potenciaContrada}) \cdot TT \quad (4.43)$$

Donde:

- $c_{maquinista}$ es el coste del personal de conducción por minuto. Se considera un coste de personal de conducción de 1,14 €/minuto, cifra actualizada del valor más representativo estimado por (García Álvarez, 2012)
- $c_{posesión}$ es el coste de posesión del tren, que engloba:

- o *Coste anual de amortización*: depende del valor inicial del tren, es decir, el precio de adquisición (P_{tren}), el periodo de amortización (YR), su valor residual transcurrido ese periodo (RV) y el criterio con el que se imputa la amortización. En Renfe Viajeros el método de amortización empleado es lineal, sin valor residual y con un periodo de 40 años, por lo que el coste de amortización (c_{amor}) es:

$$c_{amor} = \frac{P_{tren} - RV}{YR} = \frac{P_{tren} - 0}{40} = \frac{P_{tren}}{40} \quad [€/año] \quad (4.44)$$

- o *Coste financiero de capital invertido (propio y ajeno)*: es el coste necesario para remunerar fondos económicos propios (que son aportados por los accionistas) y ajenos (aportados por bancos y otras entidades financieras) que son necesarios para la adquisición del tren. Como la amortización que se emplea es de tipo lineal, el saldo neto a financiar va disminuyendo y consecuentemente el coste de capital también. Considerando un tipo de interés r , el coste de capital para el año Y es:

$$c_{capY} = r \cdot \left(P_{tren} - Y \cdot \frac{P_{tren} - RV}{YR} \right) \quad (4.45)$$

Suponiendo un tipo de interés r del 3%, que es el empleado por Renfe Viajeros, en el año medio el coste financiero de capital es:

$$c_{cap} = 0,03 \cdot \left(P_{tren} - 20 \cdot \frac{P_{tren}}{40} \right) = 0,015 \cdot P_{tren} \quad [€/año] \quad (4.46)$$

- o *Seguro del tren*: cubre los daños propios y a terceros. Según (García Álvarez, 2012) el coste del seguro o de los riesgos del tren (c_{seg}) puede calcularse como el 3% del coste de adquisición.

$$c_{seg} = 0,03 \cdot P_{tren} \quad [€/año] \quad (4.47)$$

Por lo que el coste de posesión por minuto de un tren de alta velocidad se puede expresar como:

$$c_{posesión} = \frac{\left(\frac{1}{40} + 0,015 + 0,03\right) \cdot P_{tren}}{AT \cdot 60} = \frac{1,167 \cdot 10^{-3} \cdot P_{tren}}{AT} \quad [€/min] \quad (4.48)$$

- $c_{potenciaContratada}$ es el coste de la potencia contratada para el funcionamiento de trenes de tracción eléctrica que se paga con independencia de su utilización efectiva. Para su estimación se tiene en cuenta la potencia del tren (P) que no es demandada siempre, por lo que se afecta por un factor de simultaneidad (ξ) y por la densidad de tráfico (δ) y el precio ligado a la potencia contratada P_c , expresado en €/kW.mes:

$$c_{potenciaContratada} = \frac{P \cdot \xi \cdot \delta \cdot P_c \cdot 12}{AT \cdot 60} = \frac{P \cdot 3,03 \cdot 1,92 \cdot 12}{AT \cdot 60} = \frac{1,164 \cdot P}{AT} \quad [€/min] \quad (4.49)$$

- TT es el tiempo de viaje expresado en minutos.

Por tanto, los costes totales por tren y tiempo de viaje para un tren de alta velocidad se pueden calcular como:

$$ctrmin = \left(1,14 + \frac{1,167 \cdot 10^{-3} \cdot P_{tren} + 1,164 \cdot P}{AT} \right) \cdot TT \quad [€] \quad (4.50)$$

4.4.2.2 Costes por tren y kilómetro recorrido (ctrkm)

Los costes que se imputan por tren y dependen del recorrido realizado se pueden formular como:

$$ctrkm = (c_{mantVigCon}) \cdot L \quad (4.51)$$

Donde:

- $c_{mantVigCon}$ es el coste del mantenimiento de los sistemas de vigilancia y control de los trenes de alta velocidad. Según (García Álvarez, 2012) y actualizando las cifras se puede calcular como:

$$c_{mantVigCon} = \frac{34,090}{AR} \quad [€/km] \quad (4.52)$$

- L es la distancia recorrida expresada en kilómetros.

Por tanto, los costes totales por tren y kilómetro recorrido para un tren de alta velocidad se pueden calcular como:

$$ctrkm = \left(\frac{34,090}{AR} \right) \cdot L \quad [€] \quad (4.53)$$

4.4.2.3 Costes por coche y tiempo de viaje (ccmin)

Los costes que se imputan por coche y depende del tiempo de viaje se pueden formular como:

$$ccmin = (c_{energiaAux} + c_{tripulacion} + c_{mantTiempo}) \cdot NC \cdot TT \quad (4.54)$$

Donde:

- $c_{energiaAux}$ es el coste de la energía para alimentar a los servicios auxiliares que se puede obtener multiplicando el consumo en la subestación, que es el punto contratado de suministro, por el precio unitario del kWh.

Los servicios auxiliares de un tren comprenden los auxiliares de confort (climatización, iluminación, enchufes y equipamiento de aseos y cafeterías) y los auxiliares técnicos (cargador de baterías, ventiladores de los motores...).

El consumo de climatización (e_{cli}) es muy variable, depende principalmente de la diferencia entre la temperatura exterior y la de consigna y del tiempo que permanecen las puertas abiertas. Un método para calcularlo se puede encontrar en (Fundación de los Ferrocarriles Españoles, 2011). Para dar un orden de magnitud se puede estimar en 0,2 kWh/h.m², medidos directamente en los equipos.

El consumo de iluminación (e_{ilu}) puede estimarse en 0,05 kWh/h.m². El consumo del resto de auxiliares de confort, en caso de disponerse de ellos, se puede estimar en 0,02 kWh/h.m².

El consumo de los auxiliares técnicos (e_{tec}) depende de la potencia instalada y los factores de simultaneidad, pues algunos equipos están redundados o no funcionan durante todo el viaje. La potencia de estos equipos está relacionada con la potencia del tren, que a su vez depende del tamaño del mismo. A partir de datos reales de un tren de alta velocidad de 200 metros de longitud se puede estimar un consumo de auxiliares técnicos, teniendo en cuenta los factores de simultaneidad, de 0,2 kWh/h.m².

A estos consumos hay que añadirles las pérdidas por rendimientos de los equipos de auxiliares para obtener la energía medida en pantógrafo y las pérdidas en la catenaria para obtener el consumo a la salida de la subestación.

El rendimiento de los equipos auxiliares se estima en $\rho=0,85$. Las pérdidas en catenaria dependen del sistema de electrificación, para corriente alterna en 2x25kV 50 Hz se puede considerar un valor $\pi=1,02$ (Pilo de la Fuente et al., 2009).

El precio de la energía (PE_{sub}) que se deriva de la adjudicación del suministro eléctrico de la red ferroviaria gestionada por Adif para el año 2014 es de 0,067 €/kWh.

Por tanto, el coste de la energía destinada a los equipos auxiliares para un coche de superficie interior S_{int} es:

$$C_{energíaAux} = \frac{((e_{cli} + e_{ilu} + e_{tec})/60) \cdot S_{int} \cdot \pi \cdot PE_{sub}}{\rho} = \frac{((0,2 + 0,05 + 0,02 + 0,2)/60) \cdot S_{int} \cdot 1,02 \cdot 0,067}{0,85}$$

$$= 6,30 \cdot 10^{-4} \cdot S_{int} \quad [€/coche.min] \quad (4.55)$$

- $C_{tripulación}$ es el coste de la tripulación por minuto. Considerándose un coste unitario para el personal de 0,80 €/minuto basado en el dato actualizado de (García Álvarez, 2012) se puede calcular como:

$$C_{tripulación} = 0,80 \cdot n_{tripCoche} \quad [€/coche.min] \quad (4.56)$$

Siendo $n_{tripCoche}$ el número de personas de la tripulación por coche.

- $C_{mantTiempo}$ es el coste del mantenimiento que depende de las horas de funcionamiento del tren, es una parte del coste de mantenimiento variable.

El coste variable de mantenimiento de un tren tiene una parte que se corresponde con la sustitución de elementos cuyo desgaste está directamente relacionado con los kilómetros recorridos (ruedas, zapatas, pantógrafos, discos de freno y ejes). Por otra parte, el mantenimiento de los elementos relacionados con el confort de los viajeros está relacionado con el tiempo de uso (equipos de climatización, iluminación, aseos, así como la limpieza de los mismos).

En alta velocidad los costes relacionados con el recorrido son más reducidos por sus mayores radios de curva, menor uso del freno neumático y menor número de cables conductores en la catenaria.

Para un tren de alta velocidad se puede estimar que el 40% de los costes variables de mantenimiento son proporcionales a la distancia recorrida, el 25% son por avituallamiento de agua y descarga de wáteres (relacionados con las horas de funcionamiento) y el 35% al resto de elementos cuyo desgaste es proporcional al tiempo de viaje. Según (García Álvarez, 2010b) el coste de mantenimiento variable de un tren de alta velocidad es de 1,06 c€ por metro lineal y kilómetro

Los costes dependientes del recorrido deben expresarse en c€/m.km y los dependientes del tiempo de viaje en c€/m.min. Para pasar de c€/m.km a c€/m.min se ha supuesto un recorrido anual y velocidad media característicos de los servicios de alta velocidad (Tabla 4.10).

Tabla 4.10. Costes de mantenimiento del material rodante e inductores

	<i>Inductor</i>	<i>Tren de alta velocidad</i>	
<i>Ruedas, discos de freno, pantógrafos...</i>	Recorrido	40%	0,42 c€/m.km
<i>Climatización, iluminación, aseos...</i>	Tiempo	35%	1,23 c€/m.min
<i>Avituallamiento de agua y descarga de wáteres</i>	Tiempo	25%	0,88 c€/m.min

Fuente: Elaboración propia

Así pues, el coste de mantenimiento variable que depende del tiempo de viaje para un tren de alta velocidad se calcula a partir del coste de mantenimiento por metro lineal de tren y kilómetro (c_{mt}) y la longitud del coche (L_c):

$$c_{mantTiempo} = c_{mt} \cdot L_c - (0,0123 + 0,0088) \cdot L_c - 0,0211 \cdot L_c \quad [€/coche.min] \quad (4.57)$$

- NC es el número de coches que forman la composición.
- TT es el tiempo de viaje expresado en minutos.

Por tanto, los costes totales por coche y tiempo de viaje para un tren de alta velocidad se pueden calcular como:

$$ccmin = (6,30 \cdot 10^{-4} \cdot S_{int} + 0,80 \cdot n_{tripCoche} + 0,02 \cdot L_c) \cdot NC \cdot TT \quad [€] \quad (4.58)$$

4.4.2.4 Costes por coche y kilómetro recorrido (cckm)

Los costes que se imputan por coche y dependen del recorrido realizado se pueden formular como:

$$cckm = (c_{energiaMov} + c_{mantRec} + c_{mantFijo} + c_{fijoTaller}) \cdot NC \cdot L \quad (4.59)$$

Donde:

- $c_{energiaMov}$ es el coste de la energía para el movimiento del tren, sin incluir consumo de los servicios auxiliares ni energía disipada en las reducciones de velocidad. El consumo de energía de un tren depende de múltiples factores pero para dar un orden de magnitud se ha realizado una estimación con la herramienta de simulación de consumos ALPI2810 del consumo por tonelada en función de la velocidad media sin paradas (Figura 4.16).

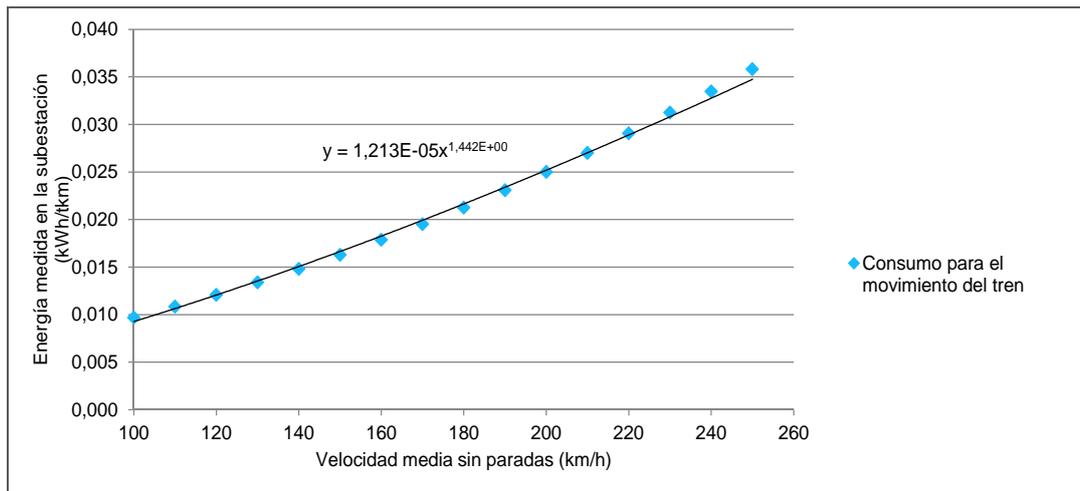


Figura 4.16. Consumo de energía para el movimiento del tren medida en la subestación - Fuente: Elaboración propia

Por lo que el consumo medido a la salida de la subestación puede expresarse en función de la velocidad media ($\bar{V}_{sin\ paradas}$) y la masa del coche (M_c) como:

$$e_{mov} = 1,213 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{V}_{sinParadas}^{1,442} \cdot M_c \quad [\text{kWh}] \quad (4.60)$$

Y el coste de la energía, sabiendo que el coste unitario (PE_{sub}) es de 0,067 €/kWh:

$$c_{energiaMov} = e_{mov} \cdot PE_{sub} = (1,213 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{V}_{sinParadas}^{1,442} \cdot M_c) \cdot 0,067$$

$$= 8,127 \cdot 10^{-7} \cdot \bar{V}_{sinParadas}^{1,442} \cdot M_c \quad [€/coche.km] \quad (4.61)$$

- $C_{mantRec}$ es el coste del mantenimiento variable proporcional al recorrido realizado. Este coste incluye la sustitución de elementos como ruedas, discos de freno, zapatas, ejes y pantógrafos. Como se ha expuesto anteriormente para trenes que circulen por líneas de alta velocidad el coste se pueda calcular en función del coste unitario por metro lineal de tren y kilómetro (c_{mr}) y la longitud del coche (L_c):

$$C_{mantRec} = c_{mr} \cdot L_c = 0,0042 \cdot L_c \quad [€/coche.km] \quad (4.62)$$

- $C_{mantFijo}$ es el coste de mantenimiento fijo. Este coste es independiente de la distancia recorrida o el tiempo de funcionamiento. Corresponde a la dirección del mantenimiento, documentación, almacenes, gastos generales de la oficina técnica, talleres, inversiones, etc. Según (García Álvarez, 2010b) se puede estimar el coste de mantenimiento fijo por kilómetro recorrido a partir del coste de mantenimiento fijo anual por metro de tren y año (c_{mf}), la longitud del coche (L_c) y el recorrido anual (AR):

$$C_{mantFijo} = \frac{c_{mf} \cdot L_c}{AR} = \frac{1,18 \cdot L_c}{AR} \quad [€/coche.km] \quad (4.63)$$

- $C_{fijoTaller}$ es el coste fijo del taller. Este coste incluye la amortización, el coste de capital y el coste de operación del mismo. El uso que cada tren hace del taller, y por tanto su coste, depende del tamaño del tren, en concreto de su longitud que está relacionada con el número de plazas y la densidad de las mismas, y del número de kilómetros que se pueden recorrer entre intervenciones de mantenimiento (si se admiten menores recorridos entre intervenciones tiene que entrar con más frecuencia a taller, y por ello la repercusión del coste de taller por kilómetro recorrido es mayor). (García Álvarez, 2010b) indica el valor típico para

trenes de alta velocidad del coste fijo del taller por metro de tren y kilómetro (c_t), por lo que junto con la longitud del coche (L_c) puede determinarse el coste fijo del taller como:

$$c_{\text{fijoTaller}} = c_t \cdot L_c = 1,90 \cdot 10^{-7} \cdot L_c \quad [\text{€/coche.km}] \quad (4.64)$$

- NC es el número de coches.
- L es la distancia recorrida expresada en kilómetros.

Por tanto, los costes totales por coche y kilómetro recorrido para un tren de alta velocidad se pueden calcular como:

$$cckm = \left(8,127 \cdot 10^{-7} \cdot \bar{V}_{\text{sinParadas}}^{1,442} \cdot M_c + L_c \cdot \left(0,0042 + \frac{1,18}{AR} + 1,90 \cdot 10^{-7} \right) \right) \cdot NC \cdot L \quad [€] \quad (4.65)$$

4.4.2.5 Costes por coche y parada (ccpar)

Los costes adicionales que se imputan por coche y parada se pueden formular como:

$$ccpar = (c_{\text{energiaAuxP}} + c_{\text{energiaNoReg}} - c_{\text{energiaReg}}) \cdot NC \cdot NP \quad (4.66)$$

Donde:

- $c_{\text{energiaAuxP}}$ es el coste de la energía para alimentar a los servicios auxiliares durante la parada. Como se ha presentado anteriormente el coste de la energía para alimentar los servicios auxiliares (de confort y técnicos) es para trenes de larga distancia:

$$c_{\text{energiaAux}} = 6,30 \cdot 10^{-4} \cdot S_{\text{int}} \quad [€/coche.min] \quad (4.67)$$

Por lo que conocida la duración de la parada (T_p) el consumo de energía se puede calcular como:

$$c_{\text{energiaAuxP}} = c_{\text{energiaAux}} \cdot T_p = 6,30 \cdot 10^{-4} \cdot S_{\text{int}} \cdot T_p \quad [€/coche.parada] \quad (4.68)$$

- $c_{\text{energiaNoReg}}$ es el coste de la energía no regenerada y $c_{\text{energiaReg}}$ es el coste de la energía regenerada.

En cada reducción de velocidad para efectuar una parada, ya sea comercial o técnica, el tren disipa energía. Esta energía se puede calcular según (Fundación de los Ferrocarriles Españoles, 2011) como:

$$E_{\text{redV}} = \left(\frac{1}{2} \cdot (M_{\text{cargado}} + M_{\text{rot}}) \cdot (V_{\text{origenP}})^2 - E_{\text{ravd}} \right) \cdot \frac{1}{3,6^3 \cdot 10^3} \quad [\text{kWh}] \quad (4.69)$$

Donde M_{cargado} es la masa del tren cargado, M_{rot} son las masas rotativas, V_{origenP} es la velocidad origen de las paradas y E_{ravd} es la energía empleada para vencer la resistencia al avance.

Como puede observarse, parte de esta energía se emplea para vencer la resistencia al avance y el resto es disipada en el freno. No toda la energía disipada en el freno se pierde: si el tren dispone de freno regenerativo parte de la energía, puede ser recuperada. La cantidad de energía recuperada depende de la fuerza del freno eléctrico y del rango de velocidades en el que éste es aplicable.

Empleado la herramienta de simulación ALPI2810 se ha estimado la energía disipada y no regenerada en una parada y la regenerada considerando diferentes velocidades origen de la parada.

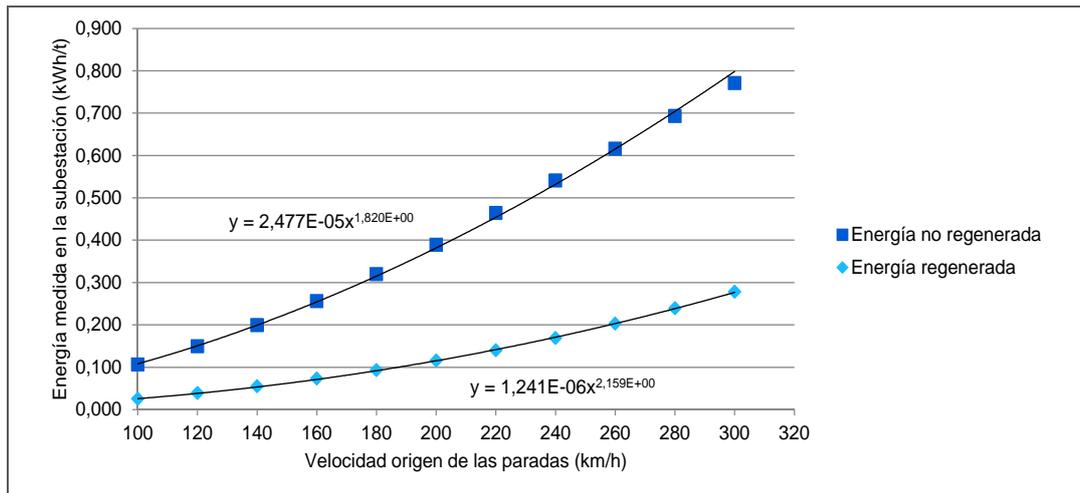


Figura 4.17. Energía no regenerada

Fuente: Elaboración propia

Por lo que el coste de la energía disipada en cada parada y no regenerada, expresado en función de la masa del coche (M_c) es:

$$c_{\text{energiaNoReg}} = E_{\text{noReg}} \cdot M_c \cdot EP_{\text{sub}} = 2,477 \cdot 10^{-5} \cdot V_{\text{origenP}}^{1,820} \cdot M_c \cdot 0,067 = 1,659 \cdot 10^{-6} \cdot V_{\text{origenP}}^{1,820} \cdot M_c$$

[€/coche.parada] (4.70)

El coste de la energía regenerada en una parada, suponiendo que el precio unitario de la energía devuelta es igual al precio de la energía consumida:

$$c_{\text{energiaReg}} = -E_{\text{Reg}} \cdot M_c \cdot EP_{\text{sub}} = -1,241 \cdot 10^{-6} \cdot V_{\text{origenP}}^{2,159} \cdot M_c \cdot 0,067 = -8,314 \cdot 10^{-8} \cdot V_{\text{origenP}}^{2,159} \cdot M_c$$

[€/coche.parada] (4.71)

Obsérvese que la energía regenerada es de signo negativo ya que no supone un coste para el operador sino un ingreso.

- NC es el número de coches que forman la composición.
- NP es el número de paradas en el recorrido.

Por tanto, los costes totales por coche y parada para un tren de alta velocidad se pueden calcular como:

$$ccpar = \left(6,30 \cdot 10^{-4} \cdot S_{\text{int}} \cdot T_p + M_c \cdot \left(1,659 \cdot 10^{-6} \cdot V_{\text{origenP}}^{1,820} - 8,314 \cdot 10^{-8} \cdot V_{\text{origenP}}^{2,159} \right) \right) \cdot NC \cdot NP$$

[€] (4.72)

4.4.2.6 Coste por coche y viaje (ccviaje)

Los costes que se imputan por coche y viaje se pueden formular como:

$$ccviaje = c_{\text{limpieza}} \cdot NC$$

(4.73)

Donde:

- c_{limpieza} es el coste de limpieza interior y exterior del tren. En los trenes de media y larga distancia la limpieza se realiza antes de cada viaje. Este coste depende de la superficie total del tren y por tanto de su longitud. (García Álvarez, 2010b) indica el valor típico para trenes de alta velocidad por metro de tren y kilómetro

(c_l), por lo que junto con la longitud del coche (L_c) puede determinarse el coste de limpieza como:

$$c_{limpieza} = c_l \cdot L_c = 1,44 \cdot L_c \quad [€/coche] \quad (4.74)$$

- NC es el número de coches que forman la composición.

Por tanto, los costes totales por coche y viaje para un tren de alta velocidad se pueden calcular como:

$$c_{viaje} = 1,44 \cdot L_c \cdot NC \quad (4.75)$$

4.4.2.7 Costes por viajero (cviajero)

Los costes que se imputan por viajero se pueden formular como:

$$c_{viajero} = NV \cdot rMedio \cdot \frac{percMedia}{100} \cdot (c_{distribControl} + c_{publicidad} + c_{generales}) + NV_S \cdot (c_{servicios}) \quad (4.76)$$

Donde:

- NV es el número de viajero.
- $rMedio$ es el recorrido medio del viajero que multiplicado por NV permite obtener los viajeros.km
- $percMedia$ es la percepción media, expresada en céntimos de euro por viajero.km (ver sección 4.4.4), multiplicada por los viajeros.km permite obtener los ingresos.
- $c_{distribControl}$ son los costes de distribución y venta de billetes y control de acceso. Se estima en un 5% de los ingresos.
- $c_{publicidadVentas}$ son los costes de publicidad y red de ventas. Se estima en un 1% de los ingresos.
- $c_{generales}$ son los costes generales y de estructura. Se estiman en un 6,5% de los ingresos.
- NV_S es el número de viajero en las clases superiores
- $c_{servicios}$ es el coste de los servicios al viajero adicionales a bordo y en tierra. Se estima en 5 €/viajero para las clases superiores.

Por tanto, los costes totales por viajero para un tren de alta velocidad se pueden calcular como:

$$c_{viajero} = NV \cdot rMedio \cdot \frac{percMedia}{100} \cdot (0,05 + 0,01 + 0,065) + NV_S \cdot 5 =$$

$$NV \cdot rMedio \cdot \frac{percMedia}{100} \cdot 0,125 + NV_S \cdot 5 \quad [€] \quad (4.77)$$

4.4.2.8 Canon por uso de las infraestructuras (canon)

El canon por uso de las infraestructuras ferroviarios es una transferencia monetaria entre agentes, puesto que constituye un ingreso para el administrador de infraestructuras y un coste para el operador ferroviario. Por ello no se considera en la evaluación financiera y socioeconómica conjunta y queda fuera del alcance de esta tesis. Se apuntan sin embargo algunas ideas generales.

Al definir el canon es necesario determinar su cuantía y estructura. La cuantía hace referencia a los costes cubiertos que pueden ser los costes corrientes de la infraestructura (fijos o variables), los costes de capital de la infraestructura y otros costes del transporte (contaminación, congestión...).

Respecto a la estructura del canon se pueden diferenciar cánones fijos, que son aquellos que no están directamente relacionados con el volumen de tráfico o que son independientes de él, y cánones variables que, están ligados a cualquier variable del tráfico. También puede hablarse de cánones al coste marginal, orientados a cubrir los costes marginales de la infraestructura (típicamente costes variables) y cánones para cubrir costes, con el objetivo de equilibrar la cuenta de resultados del administrador de infraestructura.

(López Pita y Fonseca Teixeira, 2012) compara los sistemas de cánones de países europeos bajo una condiciones homogéneas, demostrando la enorme dispersión tanto en cuantía como en estructura. El valor medio es de 13,57 euros por tren.km, siendo el máximo 29,10 euros/tren.km y el mínimo 0,60 euros/tren.km (Tabla 4.11).

Tabla 4.11. Canon por tren.km en líneas de alta velocidad en 2012

	€/tren.km
Media	13,57
Desviación típica	10,46
Máximo	29,10
Mínimo	0,60

Fuente: (López Pita y Fonseca Teixeira, 2012)

En cualquier caso, el sistema de cánones debe transmitir señales económicas coherentes a los operadores ferroviarios, favoreciendo la adopción de decisiones racionales.

4.4.3 Resumen de costes de un operador de viajeros en alta velocidad

En resumen, la función de costes de un operador de viajeros en alta velocidad

$$es: C_{op} = ctrmin + ctrkm + ccmin + cckm + ccpar + ccviaje + cviajero$$

Siendo cada uno de los términos expresados en euros:

$$ctrmin = \left(1,14 + \frac{1,167 \cdot 10^{-3} \cdot P_{tren} + 1,164 \cdot P}{AT} \right) \cdot TT \quad (4.78)$$

$$ctrkm = \left(\frac{34090}{AR} \right) \cdot L \quad (4.79)$$

$$ccmin = (6,30 \cdot 10^{-4} \cdot S_{int} + 0,80 \cdot n_{tripCoche} + 0,02 \cdot L_c) \cdot NC \cdot TT \quad (4.80)$$

$$cckm = \left(8,127 \cdot 10^{-7} \cdot \bar{V}_{sinParadas}^{1,442} \cdot M_c + L_c \cdot \left(0,0042 + \frac{1,18}{AR} + 1,90 \cdot 10^{-7} \right) \right) \cdot NC \cdot L \quad (4.81)$$

$$ccpar = \left(6,30 \cdot 10^{-4} \cdot S_{int} \cdot T_p + M_c \cdot \left(1,659 \cdot 10^{-6} \cdot V_{origenP}^{1,820} - 8,314 \cdot 10^{-8} \cdot V_{origenP}^{2,159} \right) \right) \cdot NC \cdot NP \quad (4.82)$$

$$ccviaje = 1,44 \cdot L_c \cdot NC \quad (4.83)$$

$$cviajero = NV \cdot r_{Medio} \cdot \frac{percMedia}{100} \cdot 0,125 + NV_S \cdot 5 \quad (4.84)$$

4.4.4 Ingresos y tarifas o precios

Antes de abordar este tema hay que remarcar la diferencia entre ingresos y tarifas o precios. Las tarifas o precios incluyen los impuestos, sin embargo, los ingresos no.

Una de las variables que más influye en la demanda es el precio del billete o la tarifa. Este precio es la cantidad que un viajero paga por realizar un recorrido concreto.

Para un mismo servicio puede haber varias tarifas (primera clase, segunda clase, tarifa de grupo, tarifas promocionales...) y consecuentemente no todos los viajeros pagan lo mismo. Así, el indicador más utilizado para medir los ingresos es la percepción media (de un tren, de un servicio en un periodo...). La percepción media se calcula dividiendo los ingresos (netos, sin impuestos) entre los viajeros.kilómetro del servicio en el periodo contemplado. Este indicador refleja lo que de media ingresa la empresa por recorrer cada viajero un kilómetro.

La percepción media de diferentes rangos de distancias no se debe comparar porque normalmente el precio por kilómetro disminuye cuando la distancia recorrida se incrementa.

La Figura 4.18. muestra la evolución de la percepción media en España por tipo de servicio. Es significativa la disminución de la percepción media en los años 2012 y 2013 en los servicios AVE y larga distancia, ello es debido a la nueva política comercial adoptada por Renfe Viajeros.

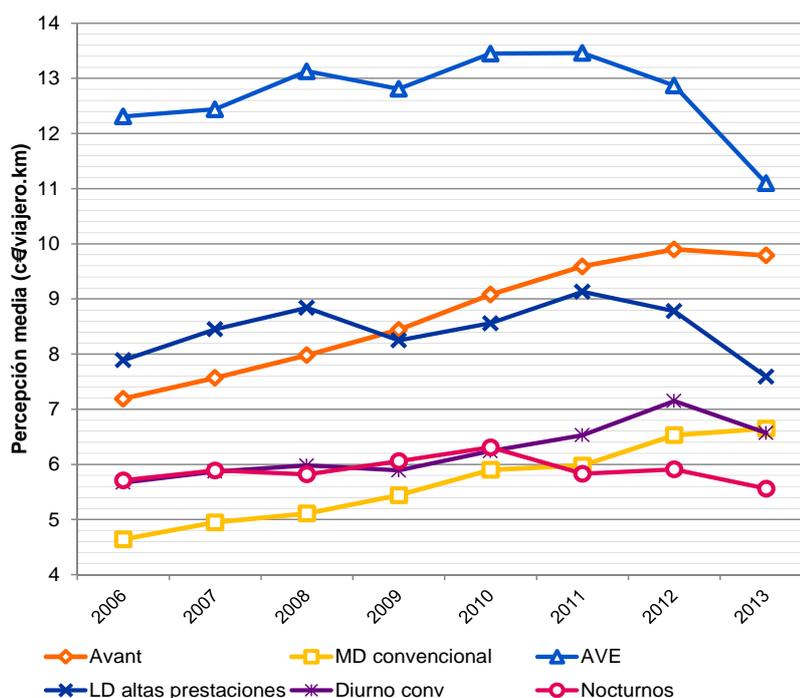


Figura 4.18. Evolución de la percepción media de los servicios de media y larga distancia en España - Fuente: (Fundación de los Ferrocarriles Españoles, 2013)

4.5 COSTES EXTERNOS

El transporte genera beneficios y costes, sin embargo, no todos recaen sobre aquellos que pagan por utilizarlo, ya que algunos costes pueden afectar a otras personas o a la sociedad en su conjunto.

Los costes que recaen sobre los usuarios del transporte se denominan *internos* o *privados* (tiempo, combustible, vehículo, seguros...) y los *costes externos* son aquellos

que soportan otros (costes ambientales, accidentes, congestión...). La suma de ambas categorías de costes son los costes sociales.

Los costes externos deben ser internalizados para permitir a los usuarios de transporte seleccionar el modo más adecuado conociendo todos los costes que conlleva.

Los costes externos del transporte están estrechamente vinculados al medio de transporte, el país y el momento en el tiempo. Por ejemplo, el coste de accidentes no es el mismo para el tren de alta velocidad que para el tren convencional; los costes ambientales del ferrocarril no son iguales en Grecia que en Suecia, pues el mix de generación de electricidad es diferente.

Los costes externos pueden agruparse según su impacto en:

- Costes externos con impacto sobre la funcionalidad y eficiencia del sistema de transporte.
- Costes externos con impacto ambiental.

4.5.1 Impactos sobre la funcionalidad y eficiencia del sistema de transporte

Los impactos sobre la funcionalidad y eficiencia del sistema de transporte son los ahorros netos de tiempo de viaje, costes de operación y accidentes y el excedente neto del consumidor de nuevos viajeros (tráfico inducido). A continuación se describen y cuantifican cada uno de ellos.

4.5.1.1 Ahorros netos de tiempo de viaje

Para su estimación se calcula el tiempo de viaje para el conjunto de viajeros que emplean el tren de alta velocidad y se compara con el tiempo de viaje de dichos viajeros en la situación base en el modo de transporte de origen. La diferencia se multiplica por el valor del tiempo. El manual para la evaluación económica de proyectos de transporte (de Rus et al., 2010) recomienda usar a falta de valores concreto los aportados por (Bickel et al., 2006). La actualización de dichos valores a euros₂₀₁₄ da como resultado las cifras de la Tabla 4.12.

Tabla 4.12. Valor del tiempo (€2014)

Viajeros. Motivo de trabajo	30,00 €/hora
Viajeros. Otros motivos	14,69 €/hora

Fuente: (Bickel et al., 2006) actualizado

4.5.1.2 Ahorros netos de coste de operación de otros modos

Se calculan los viajeros.km por modos con y sin proyecto de alta velocidad considerando las distancias que corresponden a cada modo, se multiplican por los costes expresados en €/vkm y se calcula la diferencia.

Los costes unitarios para vehículo privado, autocar, avión y camión son los indicados por (Adif, 2011) actualizados a 2014. Los costes del tren de alta velocidad serán los reales que correspondan al proyecto conforme a la metodología expuesta en el apartado 3.2. Para el tren convencional (García Álvarez, 2012) indica 0,0541 €/plaza.km para eléctrico y 0,0581 €/plaza.km para diésel, a falta del valor real se considerará un aprovechamiento medio del 60%, característico de los servicios de larga distancia, para obtener el coste por viajero.km (Tabla 4.13).

Tabla 4.13. Costes de explotación por modos de transporte - viajeros (€2014)

Vehículo privado	0,108 €/vkm
Autocar	0,037 €/vkm
Avión	0,099 €/vkm
Tren de alta velocidad	Los que correspondan al proyecto
Tren convencional eléctrico	0,090 €/vkm
Tren convencional diésel	0,097 €/vkm

Fuente: (Adif, 2011) actualizado y (García Álvarez, 2012)

4.5.1.3 Ahorros netos de costes de accidentes

Dentro de los costes generados por el transporte se distinguen cinco categorías (INFRAS y IWW, 2004): valor del riesgo o valor estadístico de la vida humana, pérdidas de capital humano, cuidados médicos, costes administrativos y daños materiales.

Para estimar los ahorros netos de costes de accidentes se calculan los viajeros.km por modos con y sin proyecto de alta velocidad considerando las distancias que corresponden a cada modo, se multiplican por los costes expresados en €/1000vkm y se calcula la diferencia.

Se emplean los datos del estudio más reciente y exhaustivo (CE Delft, Infrasy y Fraunhofer ISI, 2011) actualizados a euros de 2014 (Tabla 4.14).

Tabla 4.14. Costes de accidentes por modos de transporte – (€2014/1.000 vkm)

Vehículo privado	35,65
Autocar	13,57
Avión	0,55
Tren de viajeros	0,66

Fuente: (CE Delft et al., 2011) actualizado

4.5.1.4 Excedente neto del consumidor de nuevos viajeros (tráfico inducido)

El excedente neto del consumidor se define como lo que los viajeros están dispuestos a pagar de más sobre el coste generalizado existente para un determinado viaje.

De acuerdo con (Comisión Europea, 2008) el excedente neto del consumidor de nuevos viajeros se calcula con la regla de la mitad como:

$$EC = 0,5 \left(CG_{con\ proyecto} - CG_{sin\ proyecto} \right) N_{viajeros\ inducidos} \quad (4.85)$$

4.5.2 Impacto ambiental

Para estimar los ahorros netos de los diferentes costes que componen el impacto ambiental se calculan los viajeros.km o toneladas.km por modos con y sin proyecto de alta velocidad considerando las distancias que corresponden a cada modo, se multiplican por los costes unitarios expresados en €/1000vkm y se calcula la diferencia.

A continuación se describen brevemente cada uno de los costes enumerados por (CE Delft et al., 2011):

- *Congestión*: la congestión incrementa el tiempo de viaje y los costes operativos y reduce la fiabilidad.
- *Contaminación ambiental*: las emisiones que tienen impacto en la calidad del aire (EICA) son: monóxido de carbono (CO), compuestos hidrocarburos sin quemar (HC), partículas (PM) u hollín, óxidos de nitrógeno (NOX) y dióxido de azufre (SO₂). La emisión de estos gases es de efecto local.
- *Procesos aguas arriba y aguas abajo*: emisiones ligadas a la producción y distribución de electricidad y combustibles (*well-to-tank*) y producción y mantenimiento de vehículos e infraestructuras.
- *Ruido*: los ruidos generados por el transporte pueden producir daños físicos y psicológicos en las personas.
- *Efectos adicionales en áreas urbanas*: se recogen en este concepto los efectos en los peatones y ciclistas, por ejemplo, las pérdidas de tiempo por el efecto barrera de las infraestructuras ferroviarias y carreteras o la escasez de espacio para las bicicletas ocasionada por el abundante tráfico de vehículos motorizados.
- *Afección a la naturaleza y el paisaje*: incluye los efectos sobre el ecosistema, cambios drásticos en el paisaje y pérdida de las funciones ecológicas de los suelos tales como almacenamiento de CO₂, absorción de agua de lluvia o producción de biomasa.
- *Contaminación de suelos y aguas*: el transporte contamina aguas y suelos por la emisión de metales pesados e hidrocarburos aromáticos policíclicos. Esta contaminación puede ocasionar daños en la fauna, disminuir la fertilidad de la tierra y afectar a las aguas potables.
- *Pérdida de biodiversidad*: las pérdidas de biodiversidad están incrementándose significativamente a consecuencia del transporte.
- *Contribución al cambio climático*: la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) producen el calentamiento global del planeta, con consecuencias negativas para el medioambiente y la salud de las personas. El principal de los gases de efecto invernadero (GEI) emitidos a la atmósfera por el hombre es el dióxido de carbono (CO₂) que es consecuencia de la quema de combustibles fósiles utilizados para la producción de energía y en el transporte. Además del dióxido de carbono, existen otros gases de efecto invernadero que son los gases no fluorados (metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O)) y los gases fluorados (hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC) y hexafluoruros de azufre (SF₆)), aunque en el caso del transporte prácticamente no se emiten gases de efecto invernadero diferentes del dióxido de carbono.

En esta tesis se emplean los valores presentados por (CE Delft et al., 2011), excepto para la contribución al cambio climático ya que dada la variabilidad del consumo de energía y consecuentemente de las emisiones en función de las características de la infraestructura, los vehículos y el servicio analizado se prefiere afinar el cálculo. Por ello, las emisiones para los diferentes modos serán:

- *Vehículo privado*: considerando el parque automovilístico español actual (vehículos diésel y de gasolina, pequeños y grandes) pueden estimarse unas emisiones de 0,065 kgCO₂/viajero.km en ámbito urbano y 0,087 kgCO₂/viajero.km en ámbito interurbano.
- *Autocar*: suponiendo un consumo de 40 litros/100 kilómetros en ámbito urbano y 34 litros/100 kilómetros en ámbito interurbano (Cillero Hernández, Martinelli y Bouzada Outeda, 2009) para un autobús de 48 plazas con un aprovechamiento del 55% y sabiendo que el factor de emisiones del gasóleo para automoción es de 2,67 kg CO₂/litro, las emisiones son 0,040 kgCO₂/viajero.km en ámbito urbano y 0,034 kgCO₂/viajero.km en ámbito interurbano.

- *Avión*: se estima el consumo de queroseno (en litros) en función de la distancia volada (L) con la ecuación que se puede derivar de (Knörr, 2008):

$$C_{\text{avión}} = (39,599 \cdot L + 4.750,4) / 9,18 \quad (4.86)$$

Dicho consumo se multiplica por el factor de emisiones del queroseno (3,16 kgCO₂/litro) para obtener las emisiones de CO₂, y se divide entre el número de viajeros considerando como hipótesis un aprovechamiento del 65%. A esta cifra hay que añadirle las emisiones del vehículo privado en los recorridos de acceso y dispersión a los aeropuertos que se calcularán tal y como se ha expuesto para vehículo privado en ruta corta.

- *Tren de viajeros (alta velocidad o convencional)*: se obtiene mediante la herramienta de simulación de consumos ALPI2810, diseñada conforme a la metodología (Fundación de los Ferrocarriles Españoles, 2011). Se añaden las emisiones del vehículo privado en los recorridos de acceso y dispersión a las estaciones.

Conocidas las emisiones por viajero.km y sabiendo que el precio medio del CO₂ entre julio de 2013 y junio de 2014 fue de 5,08 €/tonelada CO₂ (sendeco2, 2014) puede estimarse la contribución al cambio climático.

Los costes por viajero.km para el resto de costes ambientales se resumen en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15. Impacto ambiental por modos de transporte – viajeros (€2014/1000 vkm)

	Vehículo privado	Autocar	Avión	Tren eléctrico	Tren diésel
Contaminación ambiental	6,1	6,6	1,0	2,0	8,4
Procesos aguas arriba y aguas abajo	3,8	1,7	4,3	3,0	12,6
Ruido	1,9	1,8	1,1	1,3	1,3
Efectos adicionales en áreas urbanas	1,1	0,4	0,0	0,7	0,7
Afección a la naturaleza y el paisaje	0,7	0,3	0,7	0,2	0,2
Contaminación de suelos y aguas	0,3	1,0	0,0	0,6	0,6
Pérdida de biodiversidad	0,2	0,4	0,1	0,0	0,0
Total	8,0	12,2	7,2	7,8	23,8

Fuente: (CE Delft et al., 2011) actualizado

4.6 PRECIOS SOMBRA

En la evaluación socioeconómica, a diferencia de las evaluaciones financieras, se valoran las inversiones y los costes bajo la estimación de *precios sombra*, ya que la valoración a precios de mercado difiere de la que correspondería bajo una situación de eficiencia. Los ratios de precio sombra/precio de mercado se muestran en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16. Ratio de precio sombra/precio de mercado

Concepto	$P_{\text{sombra}}/P_{\text{mercado}}$
Costes del administrador de infraestructuras	
Inversión en infraestructura	0,72
Coste de mantenimiento de la infraestructura	0,70
Costes generales y de estructura	0,88
Costes del operador	
Inversión en material móvil	0,70
Ligados a la venta	0,70
Ligados al viajero	0,88
Costes de personal	0,70
Energía	0,82
Mantenimiento y limpieza	0,88
Generales y de estructura	0,88

Fuente: (Jaro Arias, 2011)

4.7 SÍNTESIS

La evaluación del proyecto de una línea de alta velocidad no debería limitarse a estimar si el conjunto que forman administrador de infraestructuras y los operadores obtendrán beneficios, sino también lo que dicho proyecto aporta al conjunto de la sociedad en materia de reducción de tiempos de viaje, accidentalidad, ruido, incremento de la movilidad...

Para realizar la evaluación socioeconómica de una línea de alta velocidad hay que determinar:

- Costes de construcción de la línea.
- Costes de mantenimiento y operación de la línea.
- Costes del operador.
- Costes externos.

En este capítulo se han aportado valores unitarios orientativos de todos los costes suficientemente desagregados como para poder realizar una evaluación a falta de datos reales y considerando infraestructuras de vía única y doble, así como la duplicación de vía.

Las diferencias presentadas en los costes de construcción y mantenimiento de infraestructura en función del número de vías hacen necesario disponer de una metodología adecuada para planificar el diseño de las plantas de vías las diferentes fases del ciclo de vida de la infraestructura considerando los requerimientos de capacidad y tipología del tráfico en cada una de ellas y las posibles ampliaciones. Dicha metodología debe permitir generar diferentes alternativas de diseño que se someterán a la evaluación socioeconómica para seleccionar la más adecuada.

5. PROPUESTA METODOLÓGICA DE DISEÑO BIDIMENSIONAL DE LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD



Entrada de un s103 en la estación de Camp de Tarragona (LAV Madrid-Barcelona-F. francesa)

5 PROPUESTA METODOLÓGICA DE DISEÑO BIDIMENSIONAL DE LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD

El objetivo de este capítulo es presentar una nueva metodología para apoyar el diseño de líneas de alta velocidad teniendo en cuenta las dimensiones temporal y espacial.

La concepción del diseño de una línea de alta velocidad tiene mucho de artesanal pues cada caso tiene sus condicionantes propios de terreno, localización en la red ferroviaria, tipología de tráfico, volumen de demanda a atender, limitaciones presupuestarias... Por ello, este capítulo no aporta soluciones generales de diseño, sino que presenta los aspectos técnicos que deben tenerse en cuenta y cómo pueden ser abordados y puestos en relación con los aspectos económicos que han sido presentados en el capítulo anterior.

En la sección 5.1. se definen algunos conceptos básicos. Las secciones 5.2. y 5.3 abordan respectivamente las dimensiones temporal y espacial; y en la sección 5.4 ambas dimensiones se consideran conjuntamente.

5.1 CONCEPTOS PREVIOS

Antes de estudiar en detalle las dimensiones temporal y espacial es necesario definir algunos conceptos que se van a utilizar.

Se define la **capacidad de circulación** (*capacity*) como el número de trenes que pueden circular por una línea en un intervalo determinado de tiempo. Si bien lograr la capacidad necesaria es fundamental a la hora de dimensionar una línea de alta velocidad, como se expondrá a lo largo del capítulo, no es el único aspecto a considerar.

La **marcha mínima** (*minimal running time*) de un tren es el mínimo tiempo requerido por un material rodante concreto para realizar un recorrido entre dos puntos de una línea. A dicho tiempo se le añade un suplemento que se denomina **margen** (*allowance*) que permite absorber retrasos y garantizar de este modo un alto grado de cumplimiento del horario. Además del tiempo añadido sobre el tiempo mínimo de cada tren, es normal añadir un tiempo adicional al intervalo mínimo de sucesión de trenes para reducir la propagación de retrasos entre ellos, dicho tiempo se denomina **margen de separación adicional entre trenes** (*buffer time*).

Además, puede ser necesario programar un tiempo adicional al tiempo mínimo de marcha de un tren para permitir cruces, adelantamientos u homogeneizar las velocidades máximas de circulación. En la literatura inglesa dicho tiempo se denomina "retraso programado" (*scheduling delays*) pero la traducción literal al español da lugar a confusión por lo que se denominará *incremento de tiempo por operación técnica*.

Los **retrasos** (*unscheduling delays*) surgen en la operación y no están incorporados en la marcha del tren. Dentro de los retrasos se distinguen:

- Retrasos primarios (*primary delays*) que afectan únicamente a un tren, por ejemplo por problemas de la infraestructura, condiciones meteorológicas, mayores tiempos de parada de los previstos...
- Retrasos consecutivos (*knock-on delays*) ocasionados por la interacción de los trenes.

La **heterogeneidad** de un horario puede referirse a las diferencias en la velocidad media de los trenes ya sea porque tienen distintas prestaciones o porque los patrones de paradas son distintos. Por otra parte, la heterogeneidad también hace referencia a la distribución de los trenes en el tiempo, en concreto a que los intervalos entre trenes sean distintos.

Un **horario robusto** es aquel en el que los trenes circulan conforme a lo planificado a pesar de que existan pequeños retrasos y sin causar retrasos no recuperables a otros trenes.

5.2 DIMENSIÓN TEMPORAL: DISEÑO ESCALABLE

Los requerimientos de capacidad de una línea de alta velocidad no son constantes a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura. Por lo general, la tendencia es creciente en cuanto a la capacidad requerida, pero existen múltiples incertidumbres sobre el signo y el ritmo de la evolución. Por ello en la dimensión temporal se aborda el estudio de la escalabilidad del diseño, de manera que la capacidad ofertada sea acorde a la demanda y evolucione con ésta, evitándose así sobrecostos.

El *diseño escalable* de una línea de alta velocidad permite adecuar el ritmo de inversión a los requerimientos reales de la demanda, realizando sucesivas actuaciones destinadas a aumentar progresivamente la capacidad de la línea.

Las ventajas de construir una línea por fases, y por tanto retrasar parte de la inversión son:

- *Retrasar la imputación de costes financieros y amortizaciones* al momento en que los ingresos por tráfico sean mayores, y por tanto el balance sea más favorable. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el coste puede incrementarse con respecto a la construcción en una única fase y que las fluctuaciones de los precios debidas a la inflación pueden afectar de manera positiva o negativa al balance total.
- *Permitir adelantar la puesta en servicio*, y por tanto la línea comienza a generar ingresos antes.

Si se adopta la decisión de construir una línea de alta velocidad por fases, desde un principio se deben contemplar las posibles ampliaciones para evitar o minimizar los desmontajes y sobrecostos. Por ello se aportan en este apartado algunas ideas al respecto, así como un método para evaluar las diferentes configuraciones de vías.

En este apartado se analizan exclusivamente los aspectos referidos al dimensionamiento de las plantas de vías, no se aborda el sistema de electrificación, que también permite un diseño escalable, porque ya se ha abordado en el Capítulo 4 bajo el epígrafe de “Costes de construcción de la infraestructura”.

5.2.1 Evolución de vía única a vía doble

La configuración de vías más sencilla que puede adoptarse en una línea ferroviaria es la vía única con apartaderos convencionales. Dichos apartaderos permiten el cruce y adelantamiento entre dos o más trenes, siendo en la práctica necesaria la detención de uno de ellos dado que las vías se dimensionan considerando solamente la longitud del tren más largo.

Para aumentar la capacidad de la línea de vía única es necesario reducir la distancia entre apartaderos, y de este modo disponer de un mayor número de localizaciones en las que sea posible el cruce de trenes.

Sin embargo, al incrementarse el número de cruces se incrementa también el tiempo de viaje, especialmente en servicios de alta velocidad, debido al tiempo requerido para acelerar y decelerar y el propio de la parada. Por ello, es recomendable hacer coincidir los cruces con paradas comerciales. En esta configuración, el horario está muy condicionado por la planta de vías y además los cruces son una fuente de retrasos consecutivos. Por otra parte, la calidad del servicio y la robustez que debe garantizar una línea de alta velocidad pueden verse comprometidas en caso de incidencias importantes que supongan el corte de un tramo de vía al no existir otra vía alternativa.

La funcionalidad puede mejorarse empleando *apartaderos dinámicos*, concebidos para permitir el cruce o adelantamiento de dos trenes sin que ninguno de ellos tenga que detenerse. Para determinar su ubicación y longitud deben analizarse las velocidades desarrolladas por los trenes en cada tramo ya que ello influirá en la longitud requerida con dos vías y su efectividad. La longitud de los apartaderos se suele incrementar para

permitir una cierta flexibilidad horaria y absorber pequeños retrasos. Para minimizar retrasos superiores se pueden emplear apartaderos convencionales colaterales.

En caso de requerirse más capacidad, flexibilidad y robustez puede optarse por diseñar una *vía doble parcial* en la que se alternan tramos de vía única y doble. La localización de los tramos de vía doble suele hacerse atendiendo a criterios económicos, evitando desdoblarse los tramos con un coste por kilómetro elevado, típicamente los que incluyen viaductos y túneles.

Por último, en los casos en los que la densidad de tráfico sea elevada, y especialmente si además el tráfico es heterogéneo, se debe optar por la vía doble. Habrá que determinar la distancia entre los apartaderos y los puestos de banalización, así como su diseño, en función del modelo de explotación que se prevea y el nivel de robustez y calidad de servicio que se quiera ofertar.

En la Figura 5.1. se muestra de manera esquemática esta evolución desde la vía única con apartaderos convencionales a la vía doble. Puede observarse cómo según se va completando la planta de vías pueden reutilizarse los elementos de las fases anteriores evitando así desmontajes y sobrecostes. Por ejemplo, dos apartaderos convencionales pueden adaptarse para dar lugar a un apartadero dinámico y un apartadero de vía única puede convertirse en un puesto de banalización en vía doble.

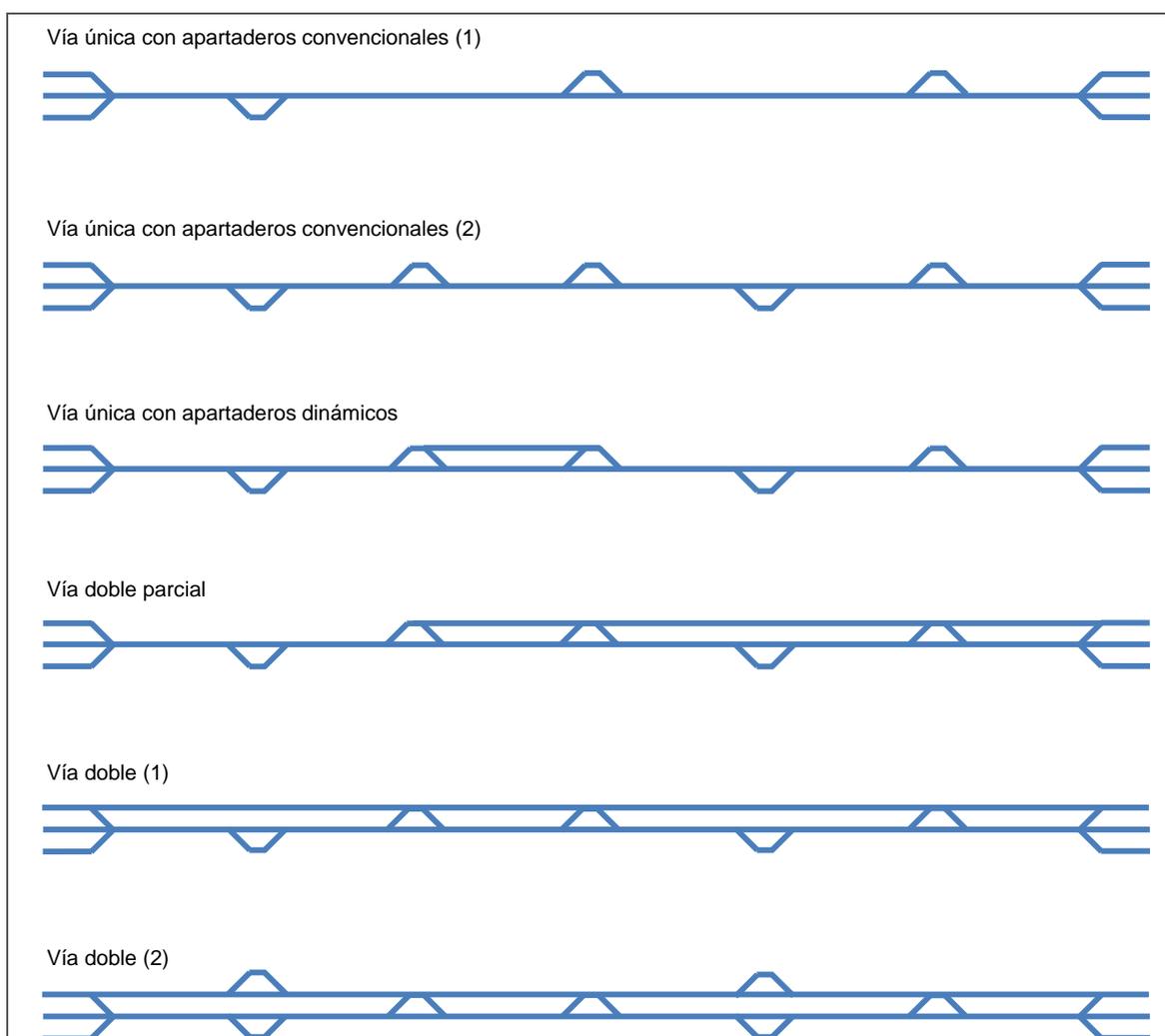


Figura 5.1. Evolución desde vía única a vía doble
Fuente: Elaboración propia

A continuación se analiza en detalle cada una de las soluciones planteadas:

- Vía única con apartaderos convencionales
- Vía única con apartaderos dinámicos
- Vía doble parcial
- Vía doble

5.2.1.1 Vía única con apartaderos convencionales

En una vía única se emplean apartaderos para permitir el cruce de trenes que circulan en sentidos opuestos. La necesidad de hacer coincidir los cruces con las dependencias habilitadas a tal efecto limita el número de horarios factibles en una infraestructura dada. Si además los trenes que circulan tienen diferentes velocidades máximas puede ser necesario efectuar adelantamientos entre trenes del mismo sentido, apartando los más lentos para dar paso a los rápidos, lo que reduce el número de variantes de horarios que se pueden plantear, y también la capacidad. A modo de ejemplo la Figura 5.2 se muestra una malla en vía única en la que se combinan trenes a 300 km/h (azules) y a 250 km/h (naranja), pueden observarse los numerosos cruces en los apartaderos.

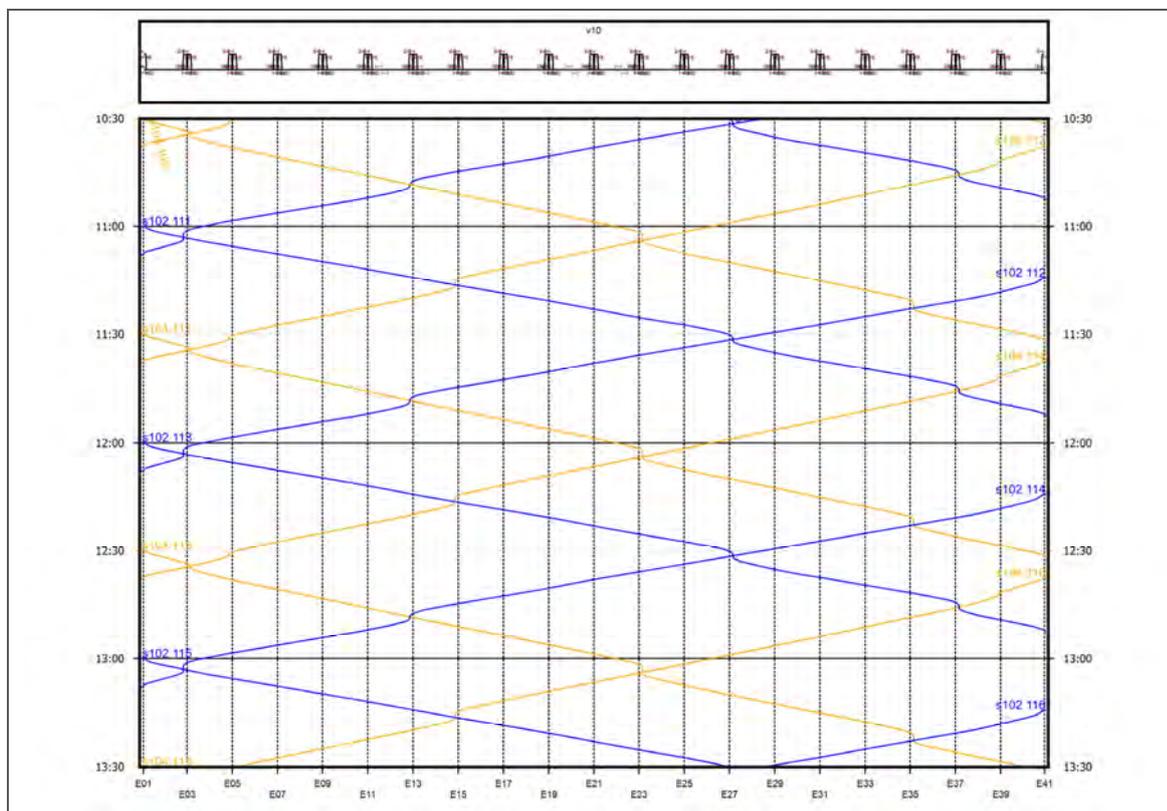


Figura 5.2. Gráfico horario de una vía única
Fuente: Elaboración propia

Los adelantamientos y cruces de trenes generan un incremento del tiempo de viaje, por los procesos de deceleración, parada y aceleración (incremento de tiempo por operación técnica) y además, dado que ambos sentidos de circulación no son independientes, existe un mayor riesgo de propagación de retrasos (retrasos secundarios).

Las características de diseño que determinan la capacidad de una vía única son:

- *Distancia entre apartaderos*: cuanto menor sea la distancia entre apartaderos, menor puede ser el intervalo entre trenes del mismo sentido, y por lo tanto mayor es la capacidad. El intervalo mínimo entre trenes está determinado principalmente por el tiempo que tardan los trenes en recorrer los tramos de vía única. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que al incrementarse el número de cruces se incrementa también el tiempo de viaje.
- *Tipo de desvíos*: para entrar en la vía de apartado los trenes tienen que reducir su velocidad para no superar la velocidad máxima admisible al paso por los desvíos. Si la velocidad de los desvíos es baja, los trenes tienen que empezar a frenar mucho antes en la vía general lo que incrementa el tiempo de recorrido de los tramos de vía única y por tanto reduce la capacidad de la línea, además de incrementar el tiempo de viaje del tren que se aparta.
- *Longitud de las vías de apartado*: debe definirse en consonancia con la velocidad de los desvíos y ser suficiente para permitir la deceleración desde la velocidad de paso por vía desviada hasta la parada. La longitud de las vías de apartado limita también la longitud máxima de los trenes que pueden apartarse en ellas.
- *Planta de vías de apartaderos*: las vías de apartado son utilizadas en ambos sentidos de circulación para permitir cruces y en algunos casos adelantamientos, por lo que un diseño adecuado aporta flexibilidad a la operación e incrementa la capacidad, permitiendo incluso baterías de varios trenes seguidos en el mismo sentido.

Las tres últimas características están estrechamente relacionadas entre sí, por lo que a continuación se realiza un análisis conjunto de las mismas. La distancia entre apartaderos será abordada posteriormente en el apartado 5.2.2.

La determinación de la velocidad óptima de paso por vía desviada y de la longitud de las vías de apartado debe hacerse conjuntamente. De nada sirve utilizar desvíos que permitan una velocidad muy alta por vía desviada si a continuación no hay distancia suficiente para decelerar hasta la parada.

En la Figura 5.3. se muestra la curva de frenado de un tren tipo de alta velocidad desde 300 km/h hasta la completa detención en horizontal suponiendo una deceleración de $0,65 \text{ m/s}^2$. Los valores resaltados se corresponden con las velocidades de paso por desviada más comunes (220 km/h, 160 km/h y 100 km/h). Se observa cómo si la velocidad de paso por desviada es 220 km/h la longitud mínima para frenar es de 2.900 metros, para 160 km/h de 1.500 metros y para 100 km/h de 600 metros. A estas longitudes es necesario añadir las longitudes de deslizamiento y descontar la longitud de los desvíos para obtener la longitud de la vía de apartado.

En la misma gráfica se muestra el tiempo adicional que induce la reducción de velocidad sobre la marcha a velocidad constante a 300 km/h. Gráficamente queda patente que la relación entre velocidad de paso por vía desviada el tiempo adicional no es lineal. Pasar por el desvío de entrada a 220 km/h supone un incremento del tiempo de 7 segundos, a 160 km/h de 19 segundos y a 100 km/h de 35 segundos. Dicho incremento supone una ligera reducción de la capacidad puesto que los trenes deben distanciarse.

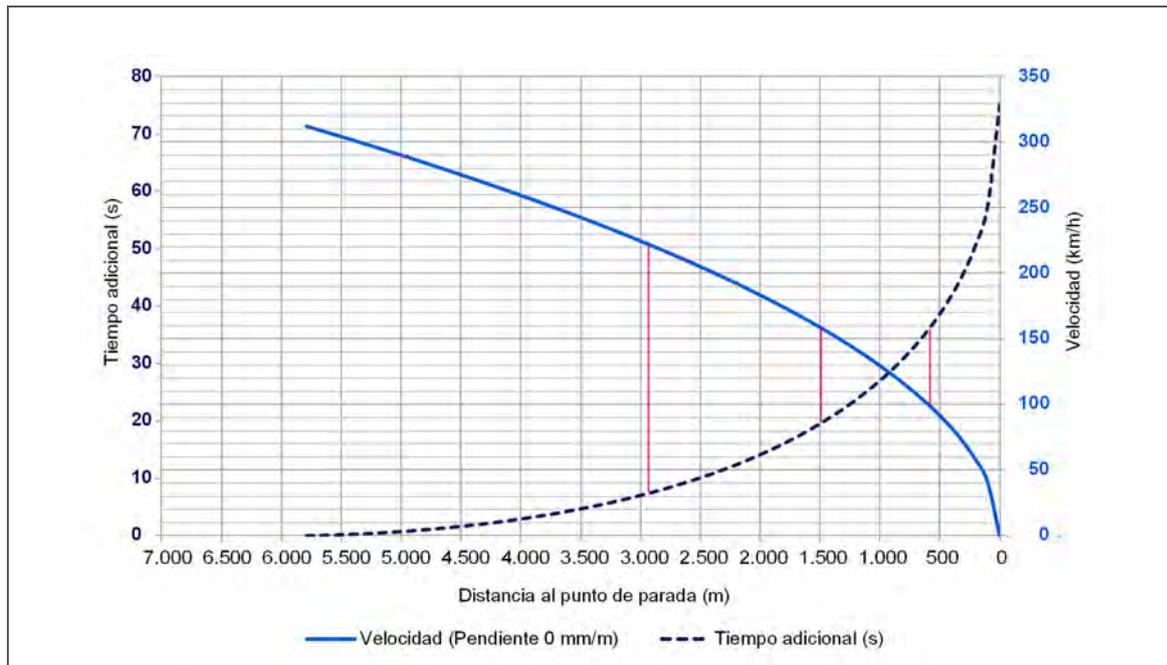


Figura 5.3. Curva de frenado y tiempo adicional para un tren de alta velocidad (decel. $0,65 \text{ m/s}^2$)

Fuente: Elaboración propia

Los cálculos anteriores se han hecho para un tramo en horizontal. En un tramo en pendiente la distancia de frenado se incrementa como se muestra en la Figura 5.4. para pendientes de 5 y 10 mm/m.

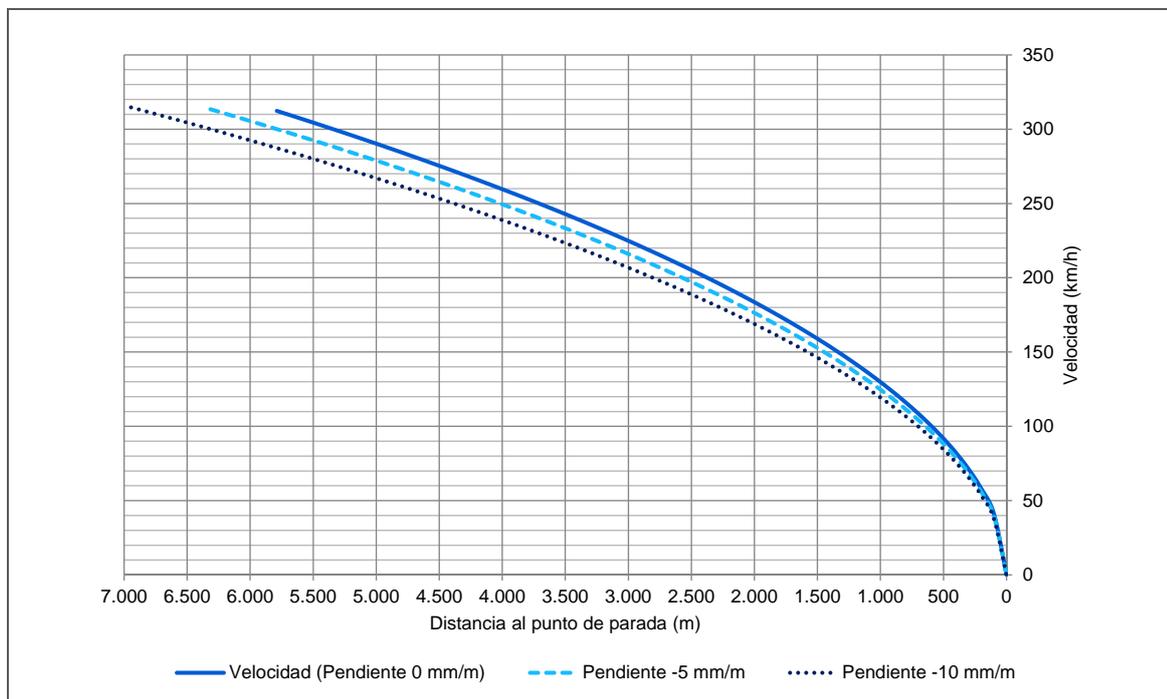


Figura 5.4. Curvas de frenado de un tren de alta velocidad (decel. $0,65 \text{ m/s}^2$) en función de la pendiente

Fuente: Elaboración propia

Si la longitud de las vías de apartado se determina considerando únicamente la longitud del tren más largo (típicamente 400 metros en doble composición en el caso de trenes de alta velocidad), pueden emplearse aparatos de vía que permitan el paso por desviada

a 100 km/h (Figura 5.5). En caso de preverse la circulación en baterías se disponen vías de apartado en paralelo, tantas como trenes tenga la batería.

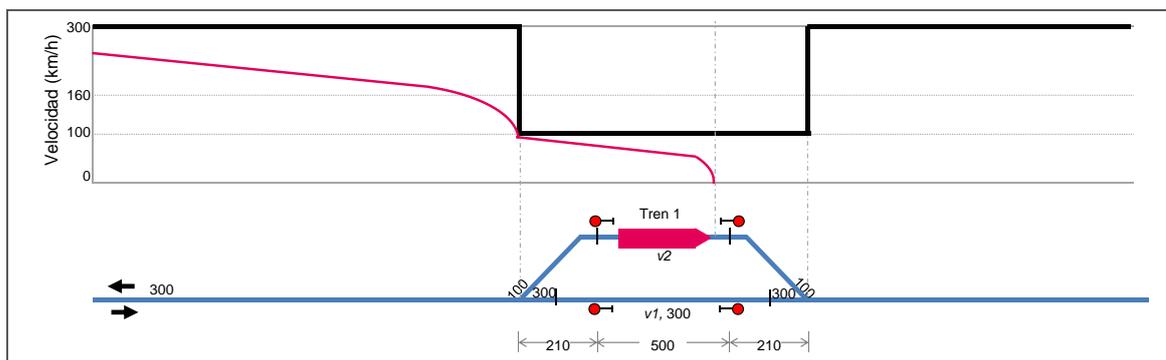


Figura 5.5. Apartadero convencional corto
Fuente: Elaboración propia

Como alternativa a este diseño se propone adoptar un apartadero de mayor longitud (aproximadamente 1.600 metros entre piquetes en horizontal) con aparatos de vía que permitan el paso por vía desviada a 160 km/h. Como se representa de manera esquemática en la Figura 5.6, en el caso de no existir baterías los trenes se estacionarían en el extremo opuesto del desvío de entrada (sector B), pasando por vía desviada a 160 km/h y reduciéndose de este modo el tiempo adicional en vía general. Si circularan dos trenes en batería, el segundo se estacionaría en el lado más próximo al desvío de entrada (sector A) para lo cual deberían pasar por el desvío a velocidad inferior, aproximadamente a 100 km/h. En el caso de preverse baterías de un mayor número de trenes sería necesario disponer una o más vías de apartado adicionales en función del número de trenes de la batería.

Resulta recomendable disponer dos escapes en el centro del apartadero para aumentar la robustez en caso de avería de un aparato de vía e incluso permitir el adelantamiento entre trenes de un mismo sentido tras un cruce. Dichos escapes, dada su ubicación, podrían ser para menor velocidad por vía desviada.

Una configuración similar a la sugerida, pero adaptada al tráfico mixto de mercancías y viajeros es propuesta por el administrador de infraestructuras sueco Trafikverket para aumentar la capacidad de la línea convencional en vía única Skånebanan (Hässleholm-Kristianstad). La salvedad es que los escapes se encuentran descentrados respecto al eje del apartadero para permitir el estacionamiento de composiciones largas de mercancías (Allouko y Lindborg, 2010).

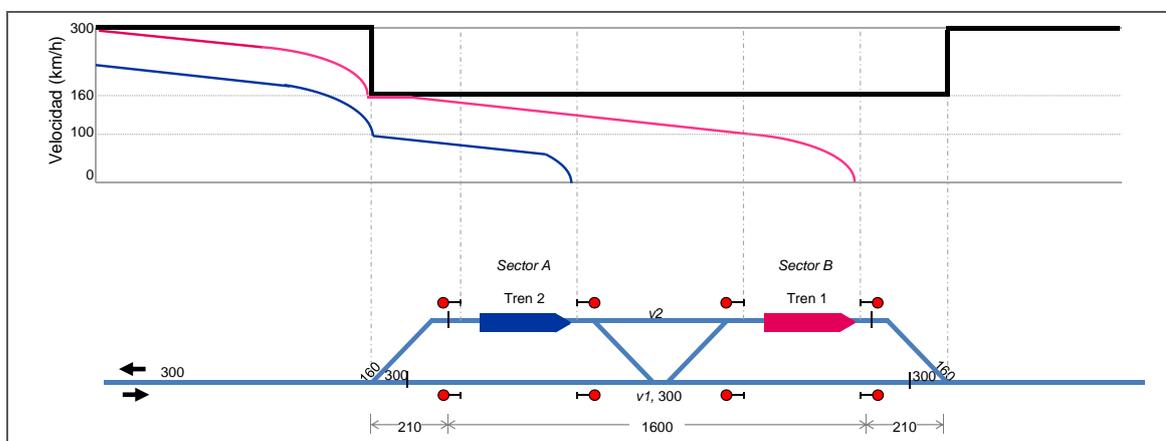


Figura 5.6. Apartadero convencional largo
Fuente: Elaboración propia

5.2.1.2 Vía única con apartaderos dinámicos

Los apartaderos dinámicos son considerados por algunos autores como una vía doble parcial (Lindfeldt, 2007a; Réseau Ferré de France, 2009) ya que pueden ser muy largos, pues se dimensionan para permitir el cruce de dos trenes que circulan en sentidos opuestos sin que uno de ellos tenga que detenerse en el apartadero para dar paso al de sentido contrario, lo que se denomina cruce dinámico (*flying meet*). El tren que se aparta sólo reduce su velocidad, si fuera necesario, para pasar por vía desviada por los aparatos de vía del apartadero.

La longitud mínima que debe tener un apartadero para permitir el cruce dinámico es la suma de la distancia de frenado (DF) del tren más rápido, la longitud del tren más largo (L_T) y la longitud recorrida en el tiempo de establecimiento de la ruta y reacción (T_{E+V}).

Como se muestra en la Figura 5.7, para que no se produzca reducción de velocidad ni detención de ninguno de los dos trenes que se cruzan, cuando un tren completo rebasa el piquete, el tren del sentido contrario debe estar a distancia de frenado de la señal de salida del apartadero. En dicha figura, suponiendo fija la marcha del tren 1 se ha representado la posición más tardía y temprana que podría tener el tren 2 para que realizar el cruce dinámico.

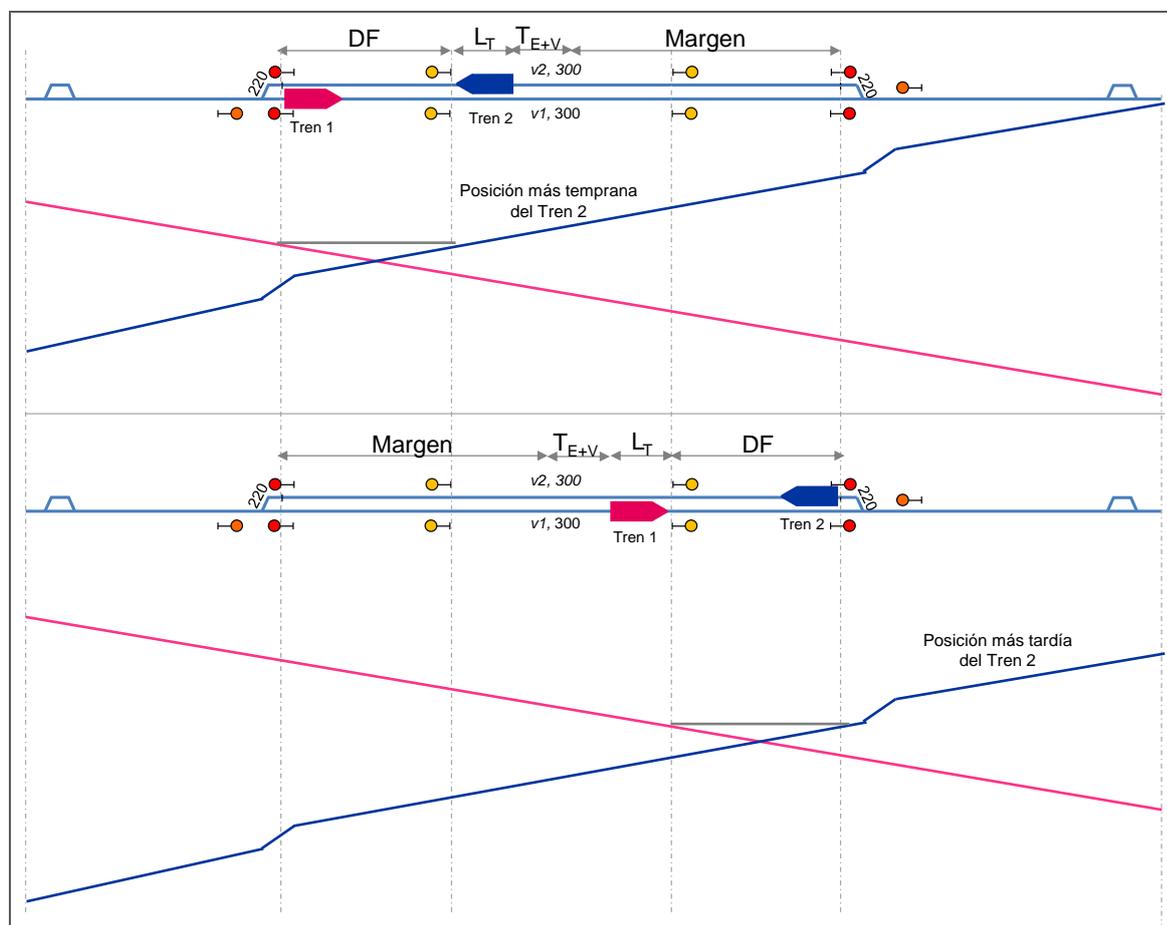


Figura 5.7. Esquema del cruce dinámico
Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, puesto que el cruce de trenes en una vía única no siempre se realiza de forma perfectamente sincronizada y de acuerdo con lo planificado. Debido a los retrasos que acumulan los trenes, es necesario proveer una longitud adicional. Dicha longitud

adicional depende de la velocidad máxima de circulación y del retraso que se quiera poder absorber (Figura 5.8).

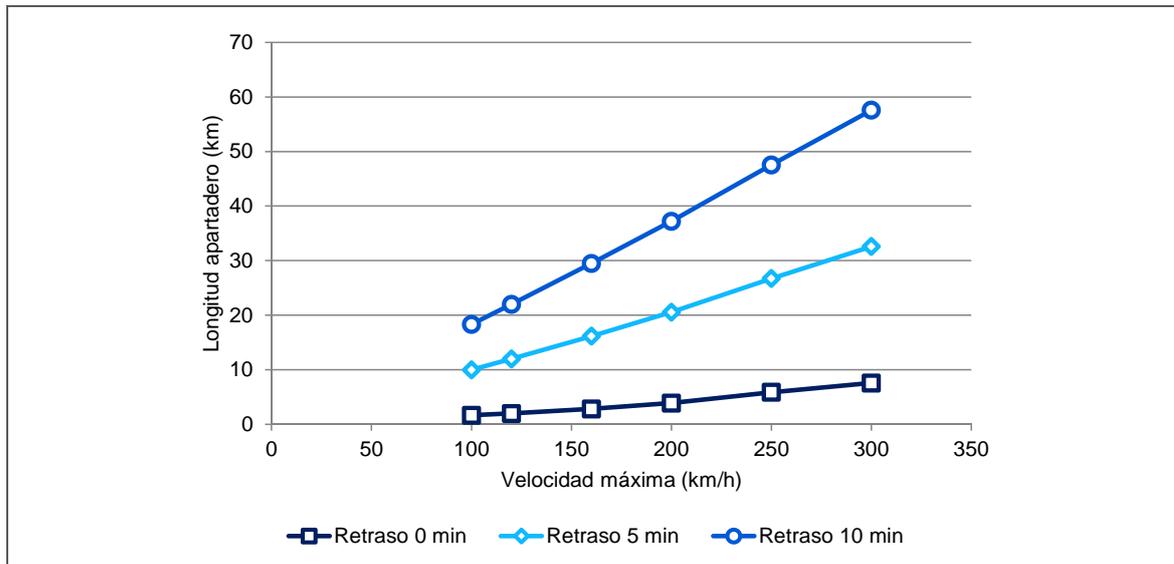


Figura 5.8. Longitud de los apartaderos para cruce dinámico en función del retraso asumible

Fuente: Elaboración propia

Por ejemplo, si se pretende absorber retrasos menores o iguales a diez minutos, se debe incrementar la longitud del apartadero en la distancia que recorre el tren de mayor velocidad a velocidad máxima durante diez minutos. Para retrasos mayores, lo normal es disponer apartaderos convencionales colaterales.

La Figura 5.8. permite extraer una conclusión interesante y es que, puesto que a mayor velocidad de circulación mayor es la distancia de frenado y consecuentemente la longitud del apartadero dinámico, la ubicación en las proximidades de estaciones terminales permitiría reducir su longitud y por tanto su coste.

Si se contempla la circulación de trenes en baterías, el apartadero debe dimensionarse para que ninguno de los trenes de la batería tenga que detenerse. Así, por ejemplo, si los trenes de la batería circulan con una separación de cinco minutos, la longitud a incrementar sería la misma que se prevé para absorber un retraso de cinco minutos y habría que considerar la longitud adicional para absorber los retrasos.

(Réseau Ferré de France, 2009) plantea el diseño y la explotación de la línea de alta velocidad Poitiers-Limoges en vía única. Se trata de una nueva línea de 175 kilómetros de longitud en la que la capacidad requerida es de un tren por hora. El planteamiento general consiste en disponer de tramos de vía doble de longitud suficiente para permitir el cruce dinámico de trenes de alta velocidad contemplando un retraso de hasta 10 minutos y disponer apartaderos clásicos a lo largo del tramo de vía única para gestionar retrasos de más de 10 minutos. Plantea dos soluciones, una consiste en situar el tramo de vía doble en el centro de la línea con una longitud de 75 kilómetros, realizándose los extremos y accesos a Poitiers y Limoges en vía única. La otra solución consiste en realizar en vía doble los extremos y el tramo central en vía única. En este último caso, al ser la velocidad de circulación en las proximidades a las estaciones más reducida, la longitud total requerida de vía única es menor y además resulta más adecuada por la necesidad de garantizar enlaces en Poitiers y Limoges. Analiza la robustez del horario ante retrasos de diversa consideración, averías en el material rodante y de los aparatos de vía. Concluye que el diseño presentado permite obtener las mismas prestaciones

que la vía doble para la capacidad requerida. Se contempla el futuro crecimiento de la demanda que se atendería operando trenes de dos pisos, en doble composición y en baterías.

5.2.1.3 Vía doble parcial

A diferencia de la vía única con apartaderos dinámicos, en la vía doble parcial los tramos de vía doble no se ubican atendiendo a criterios de capacidad sino económicos, buscando reducir el coste de construcción de la línea y para ello evitando instalar la doble vía en aquellos tramos donde la infraestructura presenta un coste elevado, por ejemplo, en zonas de túneles o viaductos o de orografía complicada.

Como se ha expuesto en el Capítulo 4, el coste de plataforma para vía doble es un 10% superior al de plataforma para vía única, por lo que en general resultará adecuado construir plataforma para vía doble independientemente de que se monte vía doble desde un principio o inicialmente una vía para posteriormente ampliar a dos. Sin embargo, el coste de viaductos y túneles en vía doble es un 60% superior al de dichas obras para vía única y además suelen retrasar la puesta en servicio de las líneas debido a su complejidad, por lo que debe analizarse la conveniencia de diseñarlos para vía única.

En cualquier caso, la solución debe analizarse desde el punto de vista de la capacidad para detectar si los tramos de vía única suponen cuellos de botella que puedan mermar las prestaciones del conjunto de la línea.

5.2.1.4 Vía doble

La implantación de vía doble en la totalidad de una línea de alta velocidad permite independizar ambos sentidos de circulación, pudiendo cruzarse los trenes de sentido opuesto en cualquier punto de la línea. De este modo, en condiciones normales de operación, los apartaderos son empleados sólo para realizar adelantamientos entre trenes del mismo sentido. Por ello, la capacidad de la línea es sustancialmente mayor que la de la vía única dotada con apartaderos convencionales o dinámicos, y también es posible planificar un mayor número de horarios.

En condiciones degradadas, los apartaderos son empleados para apartar material rodante averiado y permitir cruces. La línea se dota de *puestos de banalización* para permitir el paso de una vía a otra y de este modo poder establecer vías únicas temporales en caso de producirse una incidencia en una de las vías. Por ello, la vía doble presenta una mayor robustez ante fallos que la vía única. La ubicación de apartaderos y su incidencia en la robustez de la línea se analiza en detalle en el apartado 5.2.2.

Planta de vías de puestos de banalización y apartaderos

Para posibilitar el diseño escalable de la línea, reduciendo de este modo los sobrecostes asociados a las incertidumbres propias de la puesta en servicio de una nueva infraestructura de transporte, se propone un diseño de puestos de banalización y apartaderos que pueden ampliar en el futuro sus prestaciones sin que ello suponga desaprovechar los trabajos realizados.

Se parte de un *puesto de banalización* en el que los escapes se sitúan a una distancia suficiente como para permitir el estacionamiento de una composición averiada en una de las vías y al mismo tiempo la circulación en modo de degradado por la otra. Esta distancia debe estar comprendida entre 2.140 metros y 1.814 metros si existe la posibilidad de convertirlo en apartadero en el futuro (puesto de banalización tipo A.1) y puede ser de sólo 500 metros en caso de no estar prevista dicha conversión pero sí permitir el apartado de un tren (tipo A.2) tal y como se muestra en la Figura 5.9.

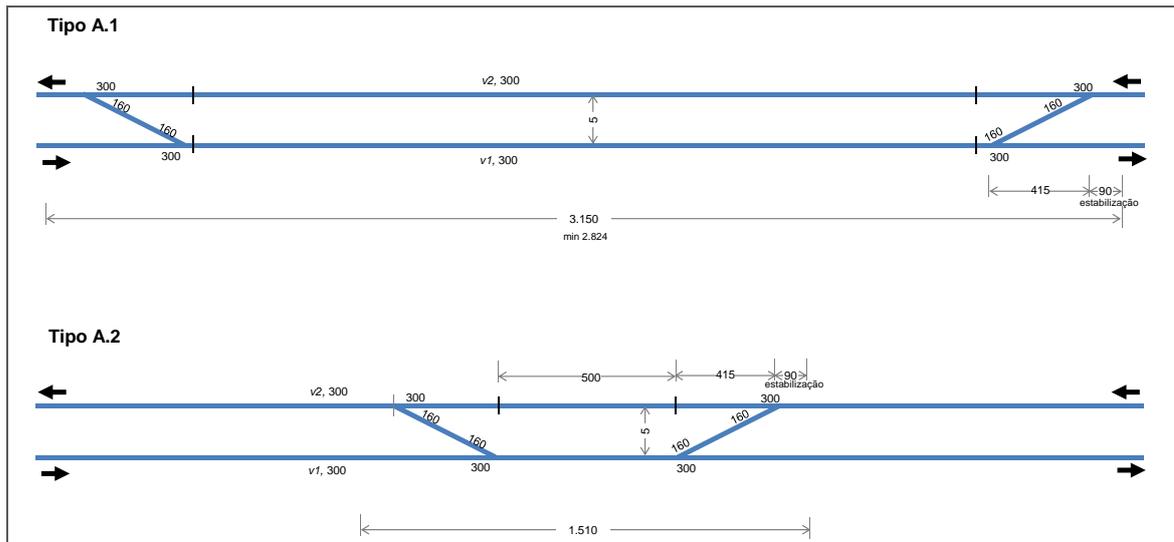


Figura 5.9. Esquema de vías de puestos de banalización
Fuente: Elaboración propia

Los desvíos empleados permiten la circulación a 350 km/h por vía general y 160 km/h por vía desviada (350/160). No es necesaria una mayor velocidad de paso por vía desviada porque estos desvíos no tienen un uso intensivo, sino que se limita a situaciones puntuales.

En cuanto a los apartaderos se proponen cuatro diseños.

- Tipos B.1 y B.2: semiapartaderos
- Tipo C: apartadero con dos vías de apartado
- Tipo D: apartadero con tres vías de apartado y acceso a base de mantenimiento o taller
- Tipo E: apartadero con vía de apartado entre las generales

La elección de uno u otro está determinada por la funcionalidad que deban prestar. En cualquier caso, como se ha mencionado, el diseño inicial se debe realizar previendo futuras ampliaciones.

Todos los diseños de apartaderos que se proponen comparten algunas características comunes y recomendables:

- El entreeje entre vías generales es de 5 metros (o el mismo que en vía general); el entreeje entre vía general y vía de apartado es de 5,5 metros y 6,35 para las vías mango.
- Los andenes tienen una longitud de 475 metros, siendo la distancia útil entre piquetes de 550 metros. El ancho de los andenes es de 9 metros. La altura del andén sobre el carril es de 760 mm o 550 mm (la escogida para las estaciones de la línea). La distancia horizontal del borde del andén al eje de la vía es de 1.650 mm.
- La longitud total de un apartadero completo es de 3.150 metros (mínima 2.824 metros)
- Las vías de apartado están equipadas con dos vías *mango* o *culatón*, de 300 metros de longitud en el sentido preferente de circulación para deslizamiento y/o el estacionamiento de una máquina de socorro y de 100 metros en el otro sentido. Los primeros 100 metros del mango largo están electrificados.

- Los escapes de banalización permiten velocidades máximas de 350 km/h en vía directa y 160 km/h en vía desviada.
- Los desvíos de apartado permiten, en general, velocidades de 350 km/h en vía directa y 100 km/h en vía desviada.
- En caso de disponerse dos vías con andén se diseña un paso inferior de anchura 4 metros y altura libre 3 metros, siendo la cota del piso del paso con respecto al carril de -4,5 metros. El acceso a dicho paso inferior se realiza a través de rampas fijas que garantizan la accesibilidad incluso con equipajes voluminosos y de PMRs y minimizan los trabajos de mantenimiento.

A continuación se presentan cada uno de los tipos de apartaderos propuestos.

Tipos B.1 y B.2: semiapartaderos

Los *semiapartaderos* disponen de una única vía de apartado provista de andén. Para permitir el acceso a dicha vía y la banalización de la línea se diseñan dobles escapes en los dos extremos.

Los postes de electrificación de la vía de apartado se colocan entre dicha vía y la general.

Se han previsto dobles escapes de banalización en ambos lados, pero el diseño podría en la mayoría de los casos simplificarse y abarataarse dejando un único escape en cada lado (Figura 5.10).

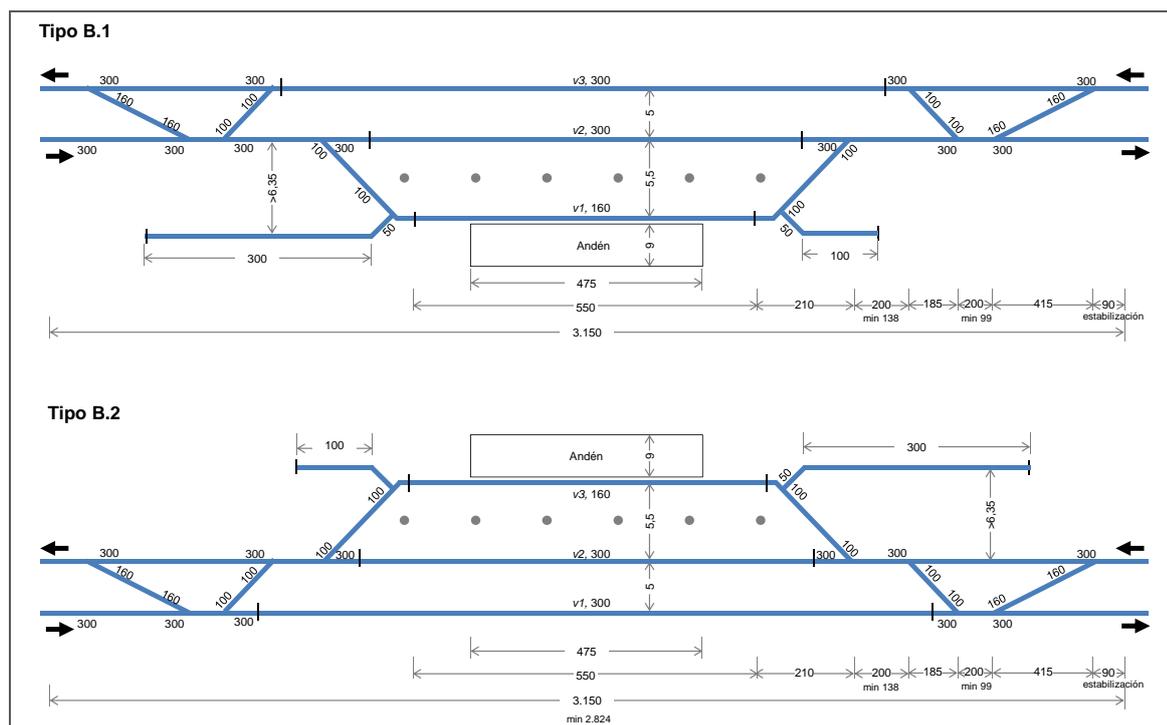


Figura 5.10. Esquema de vías de semiapartaderos tipo B
Fuente: Elaboración propia

Tipo C: apartadero con dos vías de apartado

Dispone de dos vías de apartado con andén, una a cada lado de las vías generales (Figura 5.11).

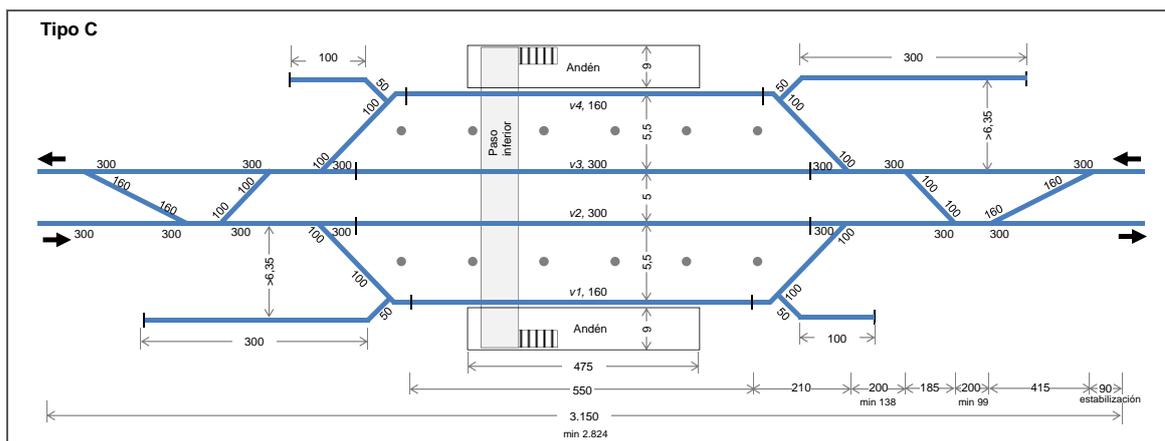


Figura 5.11. Esquema de vías de apartaderos tipo C
Fuente: Elaboración propia

Tipo D: apartadero con tres vías de apartado y acceso a base de mantenimiento o taller

Replica el diseño del apartadero tipo C y añade un acceso a un taller de material rodante o una base de mantenimiento de infraestructura y una vía de apartado de apartado más (Figura 5.12).

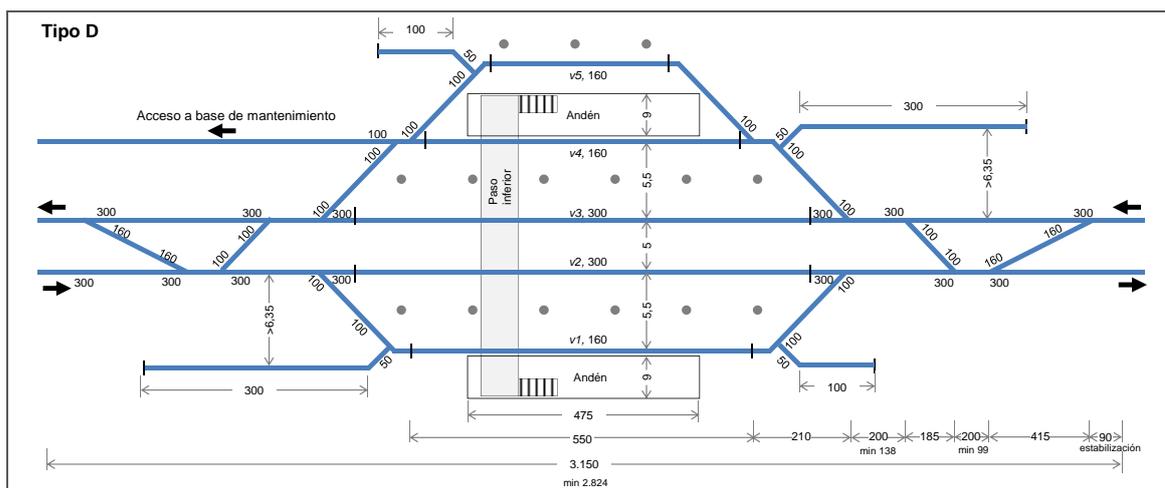


Figura 5.12. Esquema de vías de apartadero tipo D
Fuente: Elaboración propia

Tipo E: apartadero con vía de apartado entre las generales

Como alternativa a los diseños anteriores se propone ubicar una única vía de apartado entre las vías generales (Figura 5.13). Ello supone una mejora para la explotación al permitir el “rebote” de trenes sin cizallar la trayectoria de los que circulan en sentido contrario. Con esta configuración se reducen los costes de construcción y mantenimiento ya que el número de desvíos es inferior y se facilitan las labores del mantenimiento al reducirse el número de desvíos en la vía general. En contraposición, no permite la banalización de vía si hay un tren apartado.

Para su ampliación podrían ubicarse vías de apartado adicionales entre las vías 2 y 3 o entre las vías 1 y 2 sin que su longitud tenga que ser inferior ni aumentar la plataforma o afectar a las vías generales.

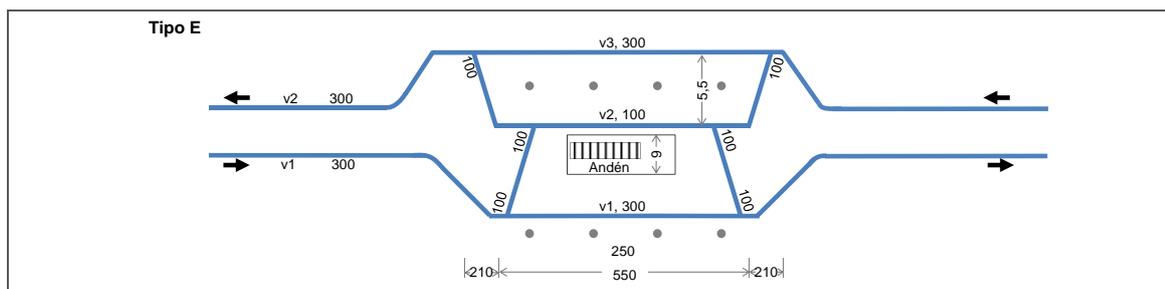


Figura 5.13. Esquema de vías de apartadero tipo E
Fuente: Elaboración propia

Restricciones de trazado para la localización de puestos de banalización y apartaderos

Existen algunas restricciones en cuanto al trazado de la línea que deben observarse al establecer las localizaciones de los puestos de banalización:

- Los puestos de banalización cortos (tipo A.1) se ubican en alzado con pendiente longitudinal constante. La zona de desvíos se localiza en alineación recta, la zona central puede estar en curva.
- En los puestos de banalización largos (tipo A.2) se ubican los desvíos en pendiente longitudinal constante y alineación recta. Si se prevé la futura conversión en apartadero, la zona central debe tener pendiente constante no superior a 2,5 mm/m y encontrarse en alineación recta.
- Se debe evitar proyectarlos en túneles o viaductos y en zonas de difícil acceso.

En lo que se refiere a los apartaderos:

- Se ubican en alineación recta y se dispondrá pendiente longitudinal constante nunca superior a 2,5 milésimas en la zona de andenes.
- Se debe evitar ubicarlos en túneles o viaductos, en tramos de grandes movimientos de tierras y en zonas de difícil acceso.

5.2.2 Análisis de capacidad de diferentes configuraciones de vías

Tras la presentación de las diferentes configuraciones de vías que pueden adoptarse en una línea de alta velocidad, en esta sección se realiza un análisis comparativo de las mismas, basado en simulación, desde el punto de vista de capacidad y tiempo de viaje.

5.2.2.1 Investigaciones relacionadas

Los métodos comúnmente empleados para analizar configuraciones de vías y horarios pueden agruparse en:

- *Analíticos*: emplean fórmulas matemáticas para determinar la capacidad de una línea e incluso los retrasos previsible.
- *Optimización*: se basan en obtener horarios saturados óptimos para determinar la capacidad de una línea.
- *Simulación*: los modelos reproducen la realidad y permiten evaluar diseños de infraestructura, material rodante y horarios.

Los modelos analíticos y de optimización requieren datos de entrada con menor nivel de detalle que la simulación, realizan numerosas hipótesis que en ocasiones pueden alejarse mucho de la realidad y son útiles para obtener cifras generales. Las potentes herramientas de simulación existentes en el mercado tales como RailSys, OpenTrack o Viriato permiten realizar análisis muy precisos y realistas de líneas concretas, incorporando incluso perturbaciones y permitiendo el análisis de situaciones degradadas.

A continuación se repasan los estudios existentes. Los trabajos más recientes y exhaustivos son los realizados por los miembros del grupo de ferrocarriles de Kungliga Tekniska Högskolan (KTH Järnvägsgruppen, Estocolmo)².

(Yokota, 1979) analiza la eficiencia de dos diseños de apartaderos en vía doble así como su ubicación en la línea. Mediante análisis probabilístico estudia la relación entre el número de trenes que circulan al día considerando que pueden tener diferentes velocidades máximas (contempla incluso mercancías) y el tiempo de viaje entre apartaderos que indica la distancia a la que éstos se ubican. Concluye que desde el punto de vista de la capacidad es mejor pasar de apartaderos dotados de una vía de apartado a dos que añadir apartaderos de una vía.

(Yokota, 1980) estudia el número de apartaderos necesarios en una vía única así como la distancia óptima entre los mismos. La capacidad de los apartaderos que depende de la disposición de vías es analizada mediante teoría de colas. La distancia entre apartaderos se estudia siguiendo la metodología empleada en (Yokota, 1979).

(Petersen y Taylor, 1987) es el primer trabajo que plantea la alta velocidad en vía única. Presenta un método para determinar la localización y longitud óptima de apartaderos en una vía única para poder llevar a cabo la explotación en alta velocidad. Estudia la robustez del sistema frente a pequeños retrasos para lo que diseña vías de apartado de mayor longitud e incorpora márgenes de tiempo. Para hacer frente a retrasos mayores incorpora apartaderos adicionales. Compara el rendimiento de una línea de vía única frente a una de vía doble. Concluye que el porcentaje adicional de vía única requerido para obtener un rendimiento similar es del 13% y que para que la operación sea exitosa es fundamental establecer reglas de prioridad adecuadas. Asume que la distancia entre apartaderos, la velocidad de los trenes y la distancia entre los mismos son constantes.

(Higgins, Kozan y Ferreira, 1997) propone un modelo de programación entera mixta no lineal para determinar el número y la ubicación de apartaderos en una vía única e identificar al mismo tiempo el horario óptimo. Contempla trenes de distinta velocidad, así como horarios no cadenciados. Aplica el modelo a la mejora de una línea existente y a la planificación de una nueva línea de vía única. El modelo asume que el coste de construcción de un apartadero es independiente de su ubicación y no tiene en cuenta las restricciones por la alineación vertical del terreno.

(Lindfeldt, 2006) desarrolla un modelo analítico para cuantificar el tiempo que se pierde en una vía única por los cruces entre trenes de sentidos opuestos. Este modelo permite evaluar distintos diseños de infraestructuras, en concreto variando la distancia entre apartaderos y la longitud de tramos de vía doble. Cuando evalúa la localización de tramos de vía doble lo hace para uno o unos pocos horarios concretos. Sin embargo, el trabajo es un paso importante para comprender el funcionamiento de la vía única y las posibilidades que tiene para operar servicios rápidos con un índice alto de puntualidad.

(Lindfeldt, 2007b) es una extensión de (O. Lindfeldt, 2006). Desarrolla un modelo analítico para estimar el tiempo de cruce en una vía única. Dada una infraestructura y los parámetros de los trenes, el modelo calcula las propiedades del tráfico de una línea y permite realizar un primer análisis sin necesidad de conocer el horario que se establecerá. Aplica el modelo a la evaluación del caso en el que el cruce de trenes se simultánea con una parada comercial. Este trabajo se puede emplear en la construcción o mejora de infraestructuras, así como en la definición de horarios para infraestructuras ya existentes. Como futuras líneas de investigación señala el análisis en profundidad de las desviaciones que se producen sobre el horario establecido para la incorporación de fuentes de perturbación estocásticas tales como los retrasos que se producen en las paradas comerciales.

² La autora tuvo la oportunidad de realizar una estancia de investigación con dicho grupo en el marco de la tesis doctoral en noviembre de 2013.

(Lindfeldt, 2007c) es una continuación de (O. Lindfeldt, 2006) y (O. Lindfeldt, 2007b). La novedad que presenta es el análisis conjunto de seis factores: la longitud de las vías de apartado o vías dobles parciales; la distancia entre interestaciones; el tiempo de parada comercial; las restricciones debidas al paso por vías desviadas en los puntos de cruce; el tipo de tren y la puntualidad en las llegadas. Adopta dos valores para cada parámetro y los combina para evaluar los efectos de la interacción en el tiempo de cruce y la flexibilidad del horario.

(Lindfeldt, 2010) trata de determinar cómo los retrasos adicionales dependen de la configuración de la infraestructura, el horario y los factores de perturbación debidos al tráfico mixto en líneas de vía doble. De la infraestructura evalúa exclusivamente la distancia entre apartaderos.

(Lindfeldt, 2011a) presenta el modelo combinatorio TVEM (*Timetable Variant Evaluation Model*) que permite evaluar el impacto de la circulación de diferentes tipos de trenes y el diseño de la infraestructura en la capacidad de una línea de vía doble. El análisis que lleva a cabo muestra que el impacto en la capacidad del diseño de la infraestructura se incrementa al aumentar las diferencias de velocidades y el volumen de tráfico, mientras que la importancia del diseño de la infraestructura es menor cuando el tráfico es homogéneo. Las pérdidas de capacidad debidas a las diferencias de velocidades máximas pueden compensarse con apartaderos adicionales. Los trenes lentos sufren un considerable incremento de tiempo de viaje cuando el tráfico es heterogéneo.

(Lindfeldt, 2011b) estudia el diseño de una línea de alta velocidad en vía única considerando tráfico heterogéneo y distancias entre apartaderos de 10 o 20 kilómetros. Concluye que cuando coexisten trenes de alta velocidad (300 o 250 km/h) y regionales (200 km/h) o mercancías (140 km/h) el número de horarios factibles es reducido. En una vía única que no se haya construido considerando un horario en particular pueden programarse 0,5 trenes de alta velocidad por sentido y hora y 0,5 trenes regionales o mercancías por sentido y hora. Si la infraestructura está optimizada pueden llegar a programarse 1 y 0,5 trenes por sentido y hora respectivamente. Cuando el tráfico es homogéneo, puede circular 1 tren de alta velocidad por sentido y hora si la infraestructura no está optimizada y 2 trenes por sentido y hora si la infraestructura está optimizada. La reducción de la distancia entre apartaderos no tiene un efecto notable, dado que el estudio limita el tiempo adicional por cruces asumible, sin embargo, sí que permite diseñar un mayor número de horarios.

(Lindfeldt, 2012) analiza la operación en doble vía empleando la herramienta de simulación RailSys. Simula cientos de escenarios, con horarios cadenciados, para analizar la influencia de la densidad de tráfico, la heterogeneidad del horario, los retrasos primarios y la distancia entre apartaderos en los retrasos secundarios y el margen empleado para su recuperación. Concluye que es posible programar más trenes cuando se reduce la distancia entre apartaderos, lo que es más notable cuando el tráfico es heterogéneo. Sin embargo, este incremento de capacidad supone un aumento significativo de los tiempos de viaje. En horarios heterogéneos la transición de un horario estable a inestable es muy rápida. El retraso desarrollado, junto con el incremento de tiempo por operación técnica, pueden utilizarse para definir cuando un horario ha alcanzado su capacidad máxima, normalmente es el retraso desarrollado por los trenes de prioridad alta o el incremento de tiempo por operación técnica en trenes de baja prioridad.

(Castillo Ron et al., 2013) propone una metodología para racionalizar las inversiones en líneas de alta velocidad y la aplica al caso español de la línea Palencia-Santander. El estudio considera diversas soluciones para la construcción de la línea, desde todo en vía única hasta todo en vía doble pasando por soluciones mixtas en las que las secciones de vía única y doble se alternan. La implantación de vía única en tramos de topografía compleja (con múltiples viaductos y túneles) supondría una reducción de los costes de construcción de 1.532 millones de euros. El análisis se realiza para un tráfico de hasta 20 trenes por sentido y día, evaluándose la calidad de la explotación mediante los indicadores de tiempo medio de todos los trenes y tiempo relativo del tren más lento.

Supone que todos los trenes circulan a la misma velocidad máxima y los horarios se obtienen mediante un modelo de optimización. No aborda el tratamiento de retrasos ni la gestión de incidencias.

(Sogin et al., 2013) analiza el retraso desarrollado en las configuraciones intermedias entre vía única y doble considerando diferentes factores (volumen de tráfico, heterogeneidad, porcentaje de vía doble, velocidad máxima de los trenes de viajeros y de mercancías y estrategia seguida para la duplicación de vía). Indica que cuando no hay restricciones presupuestarias o en tramos con un coste de duplicación muy elevado, pueden seguirse cuatro estrategias para duplicar la vía (Figura 5.14). Concluye que los retrasos se reducen de manera lineal por cada kilómetro de vía doble instalado, que la localización de la vía doble tiene un modesto efecto sobre los retrasos y que la velocidad de los trenes de viajeros y la heterogeneidad tienen un efecto aún menor. El análisis se limita a líneas convencionales, la velocidad máxima considerada para trenes de viajeros es de 110 mph (177 km/h).

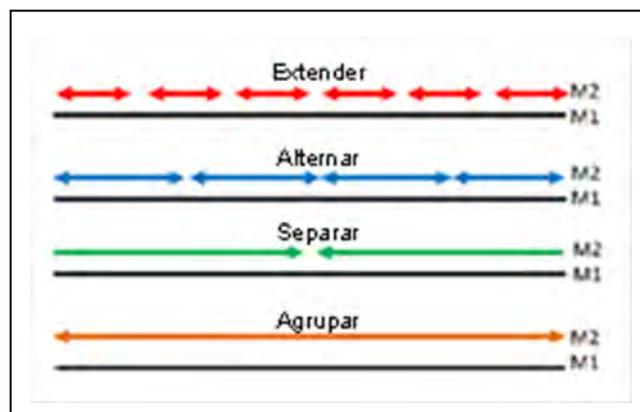


Figura 5.14. Diferentes estrategias para ubicar las secciones de vía doble en una vía única - Fuente: (Sogin et al., 2013)

5.2.2.2 Metodología adoptada para el análisis de capacidad y tiempo de viaje

Se analizan y combinan tres factores principales cada uno con varias opciones:

- *Configuración de vías:* desde vía única a vía doble pasando por todas las variantes intermedias.
- *Tipología de tráfico:* homogéneo (todos los trenes con la misma velocidad máxima) y heterogéneo (diferentes velocidades máximas de circulación).
- Frecuencia de servicio y posición relativa de los trenes en el horario.

Las configuraciones de vías analizadas son:

- *Vía única con apartaderos convencionales* ubicados cada 40 kilómetros (VU40), 30 kilómetros (VU30), 20 kilómetros (VU20) y 10 kilómetros (VU10). Los apartaderos se diseñan como convencionales largos (Figura 5.6), siendo la longitud de las vías de apartado de 1.600 metros y la velocidad de paso por vía desviada de 160 km/h.
- *Vía única con apartaderos dinámicos* de 40 kilómetros de longitud ubicados en los extremos y el centro de la línea (60% de vía doble) (VUDi1) y vía única con un único apartadero dinámico central de 80 kilómetros de longitud para permitir baterías de dos trenes (40% de vía doble) (VUDi2).
- *Alternancia de vía única y doble* con un porcentaje de vía única del 70% ubicado de manera aleatoria (VA).

- *Vía doble* con apartaderos ubicados cada 30 kilómetros (VD30) y 40 kilómetros (VD40).

Todas las infraestructuras que se analizan tienen una longitud de 200 kilómetros, se supone alineación recta puesto que en las líneas de alta velocidad los radios de curvatura son generosos y no suelen suponer limitaciones de velocidad. Respecto al alzado se replica el existente en la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona saliendo desde Madrid y hasta el kilómetro 200 para obtener resultados más realistas. La velocidad máxima es de 300 km/h aunque de manera aleatoria se han generado cinco limitaciones de velocidad de hasta 250 km/h.

Las líneas están dotadas de ERTMS nivel 2, con cantones de tres kilómetros de longitud, excepto en las inmediaciones de las estaciones donde el cantón más próximo es de un kilómetro y el siguiente de dos kilómetros.

El material rodante empleado es:

- *Tren de alta velocidad y larga distancia, tipo 300*: basado en la serie Renfe 103, de 200 metros de longitud y limitando su velocidad máxima a 300 km/h.
- *Tren de alta velocidad y media distancia, tipo 250*: basado en la serie Renfe 104 de 107 metros de longitud y velocidad máxima 250 km/h.

Se consideran variantes de horarios de 1, 2, 3 y 4 trenes por hora. En los casos en los que circula más de un tren por sentido y hora se analizan dos opciones: servicios cadenciados y servicios que distan 5 minutos para analizar la repercusión de la circulación en batería. Los horarios son simétricos. Se asume un margen del 6% sobre el tiempo mínimo de viaje.

Se muestran a continuación de manera esquemática las 20 variantes de horario que se analizan. Por simplicidad sólo se representan las salidas desde una de las cabeceras de la línea. Para tráfico homogéneo a 300 km/h se consideran siete variantes de horario, tres de las cuales son con baterías (Figura 5.15).

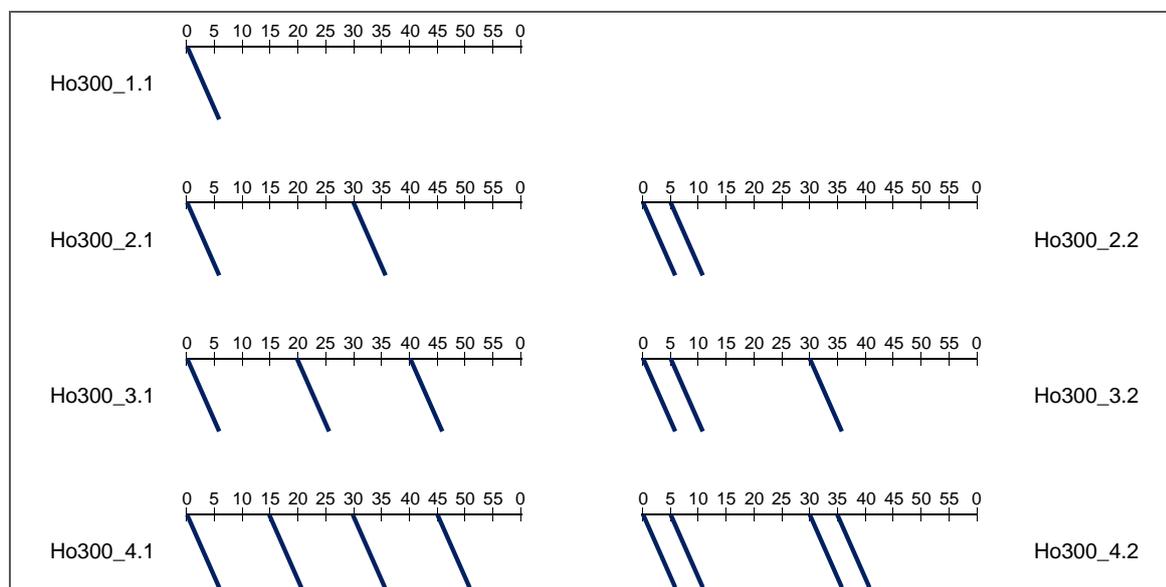


Figura 5.15. Horarios homogéneos (300 km/h)
Fuente: Elaboración propia

Para tráfico homogéneo a 250 km/h se consideran siete variantes de horario, tres de las cuales son con baterías (Figura 5.16).

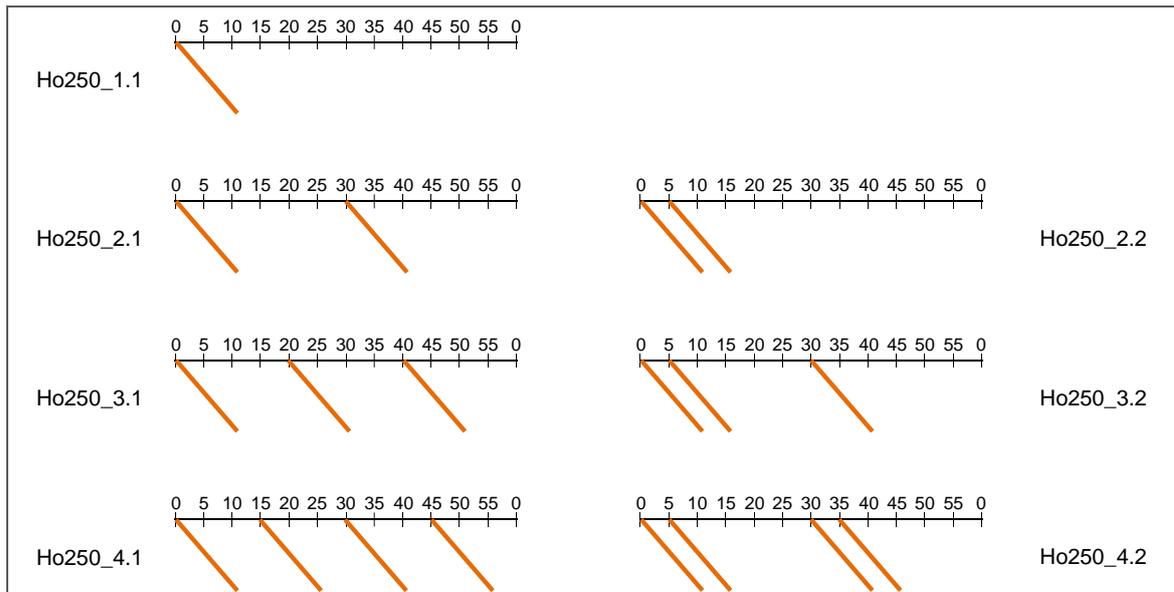


Figura 5.16. Horarios homogéneos (250 km/h)
Fuente: Elaboración propia

Para tráfico heterogéneo a 300 km/h y 250 km/h se consideran seis variantes de horario, tres de las cuales son con baterías (Figura 5.17).

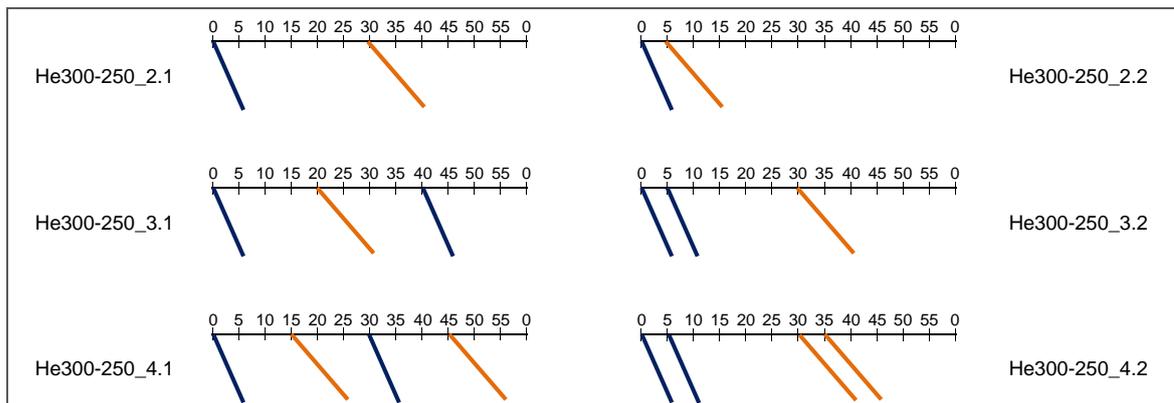


Figura 5.17. Horarios heterogéneos (300 km/h y 250 km/h)
Fuente: Elaboración propia

El indicador que se calculan para cada combinación de factores es:

Tiempo adicional por cruces y adelantamientos: una infraestructura puede estar dimensionada para permitir la circulación de un determinado número de trenes por hora, pero es necesario conocer cuánto se incrementa el tiempo de viaje a causa de la interacción de unos trenes con otros, pues un incremento significativo no resulta comercialmente atractivo y además supone un aumento del coste socioeconómico que puede hacer inútil la menor inversión.

Para su obtención se introducen los horarios en el simulador, especificando únicamente la hora de salida, patrón de paradas y velocidad de los trenes. A continuación se simula el horario, dejando que sea el enrutador del simulador el que encuentre la localización adecuada de los cruces y adelantamientos si los hay y conforme a los parámetros que se hayan especificado. Para cada tren se calcula la diferencia entre el tiempo de viaje así calculado y el tiempo de viaje sin interferencias con otros trenes. A partir de estos datos se calcula el tiempo medio adicional por cruces y adelantamientos expresado en minutos.

5.2.2.3 Resultados del análisis de capacidad y tiempo de viaje

A continuación se muestran los resultados de simulación para tráfico homogéneo a 300 km/h, tráfico homogéneo a 250 km/h y tráfico heterogéneo a 300 km/h y 250 km/h.

Tráfico homogéneo a 300 km/h

Se ha calculado el tiempo adicional por cruces y adelantamientos para los horarios de tráfico homogéneo a 300 km/h. Los tiempos de viaje de referencia sobre los que se estima el incremento son 45 minutos y 38 segundos en un sentido y 46 minutos y 45 segundos en el contrario, correspondientes a trenes que circulan a 300 km/h sin interactuar con otros y con un margen del 6%. Los resultados se muestran en la Figura 5.18.

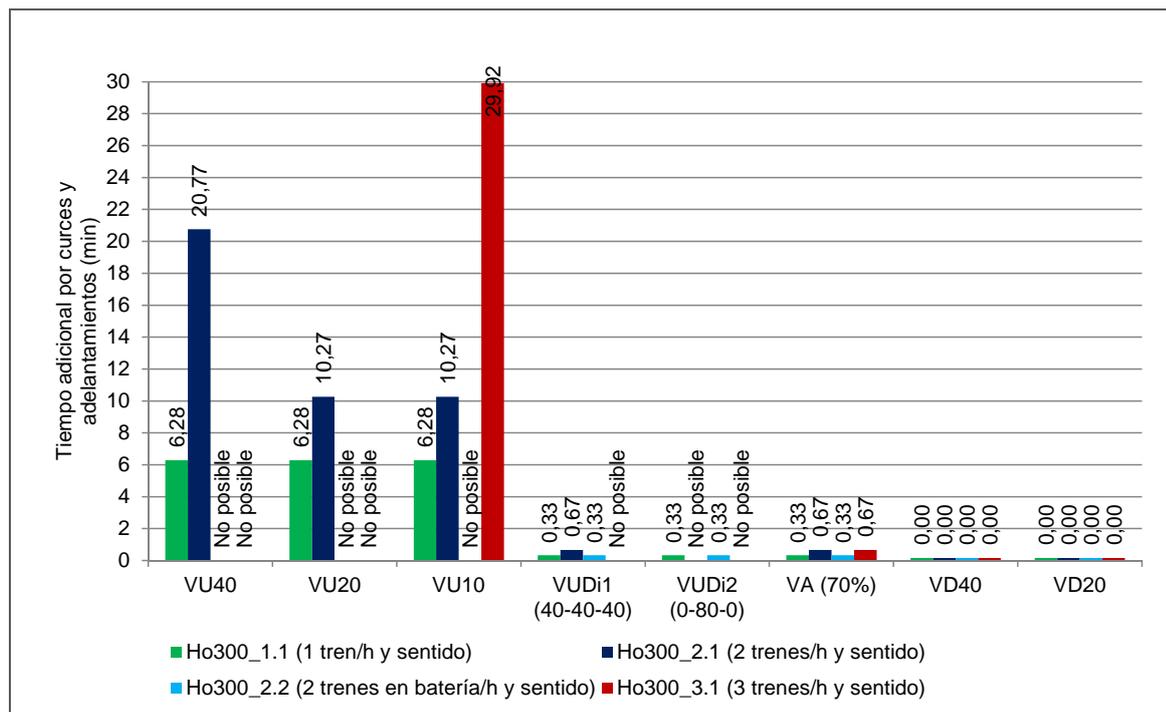


Figura 5.18. Tiempo adicional por cruces y adelantamientos. Tráfico homogéneo (300 km/h) - Fuente: Elaboración propia

Un tren por sentido y hora es admisible en todas las configuraciones de vías (Ho300_1.1). En vía única con apartaderos convencionales el tiempo de viaje se incrementa en 6,28 minutos (14,0%) no apreciándose mejoras al disminuir la distancia entre apartaderos. En vía única con apartaderos dinámicos y en alternancia de vía única y doble (VA) el incremento es de 0,33 minutos (0,7%).

Respecto a los horarios en los que se consideran dos trenes por sentido y hora (Ho300_2.1), en vía única con apartaderos convencionales ubicados cada 40 km el tiempo de viaje se incrementa en 20,77 minutos (45,0%), dicho incremento se reduce a la mitad cuando los apartaderos distan 20 kilómetros y no se observan mejoras al disminuir la distancia entre apartaderos a 10 kilómetros. En ningún caso es posible programar baterías de dos trenes (Ho300_2.2).

En vía única con apartaderos dinámicos es posible programar dos trenes por hora y sentido con unos incrementos del tiempo de viaje muy reducidos. En el caso de la configuración con tres apartaderos dinámicos equidistantes (VUDi1) sin baterías (Ho300_2.1) el tiempo de viaje se incrementa en 0,67 minutos (1,4%) y con baterías (Ho300_2.2) en 0,33 minutos (0,7%). En la configuración con un único apartadero dinámico central sólo es posible el horario con baterías (Ho300_2.2), con el que el tiempo de viaje se incrementa en 0,33 minutos (0,7%).

En alternancia de vía única y doble (VA) sin baterías (Ho300_2.1) el tiempo de viaje se incrementa en 0,67 minutos (1,4%) y con baterías (Ho300_2.2) en 0,33 minutos (0,7%).

En cuanto a la programación de tres trenes por sentido y hora en vía única convencional sólo se encuentran horarios (Ho300_3.1) en la configuración con apartaderos cada 10 kilómetros, siendo el incremento del tiempo de viaje de 29,92 minutos (64,8%). En vía única con apartaderos dinámicos no se encuentran horarios factibles. En alternancia de vía única y doble (VA) el incremento de tiempo es de 0,67 minutos (1,4%).

En las configuraciones de vía única tanto convencional como con apartaderos dinámicos, así como en la alternancia de vía única y doble no es posible programar ni tres trenes por hora con baterías (Ho300_3.2) ni cuatro trenes por hora (Ho300_4.1 y Ho300_4.2).

Tráfico homogéneo a 250 km/h

Del mismo modo se ha calculado el tiempo adicional por cruces y adelantamientos para los horarios de tráfico homogéneo a 250 km/h. Los tiempos de viaje de referencia sobre los que se ha calculado el incremento son 52 minutos y 39 segundos en un sentido y 53 minutos y 34 segundos en el contrario, correspondientes a trenes que circulan a 250 km/h sin interactuar con otros y con un margen del 6%. Los resultados se muestran en la Figura 5.19.

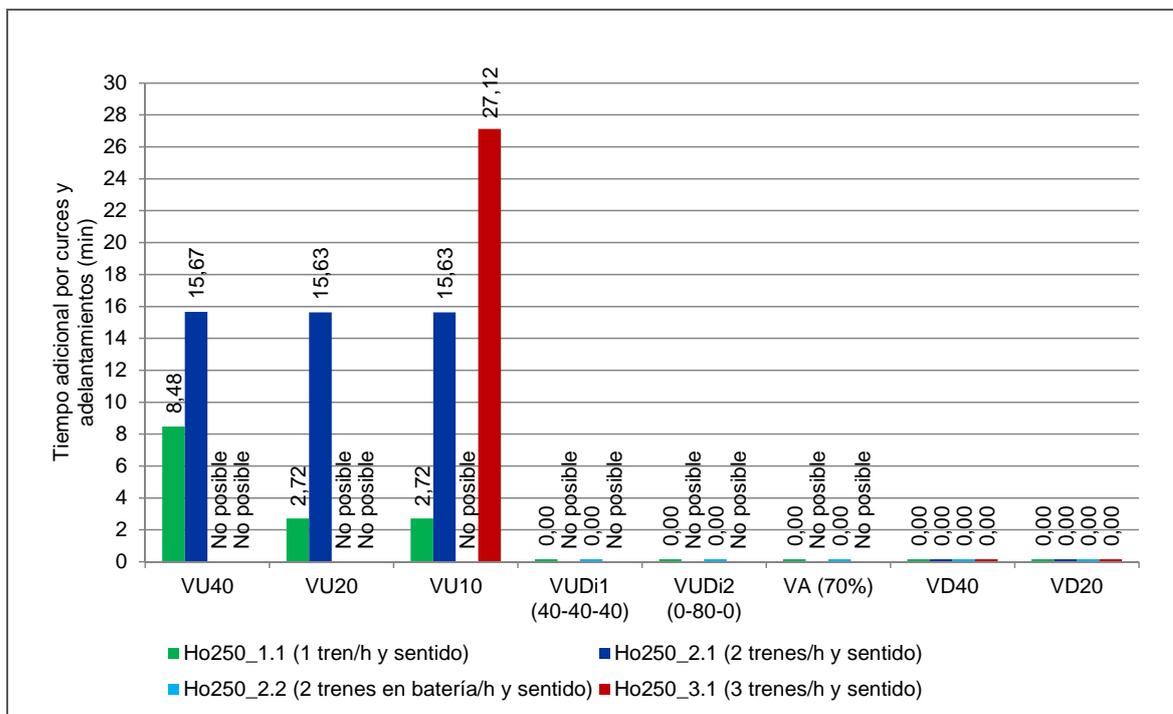


Figura 5.19. Tiempo adicional por cruces y adelantamientos. Tráfico homogéneo (250 km/h) - Fuente: Elaboración propia

Es posible programar un tren por sentido y hora en todas las configuraciones (Ho250_1.1). En vía única con apartaderos convencionales ubicados cada 40 kilómetros el tiempo de viaje se incrementa en 8,48 minutos (16,0%), dicho incremento se puede reducir a 2,72 minutos (5,1%) ubicando los apartaderos cada 20 kilómetros. Sin embargo, no se observa mejora al reducir la distancia entre apartaderos a 10 kilómetros. En las configuraciones en vía única con apartaderos dinámicos y alternancia de vía única y doble (VA) el tiempo de viaje no sufre incrementos.

En todos los casos es posible programar dos trenes por hora y sentido. En las configuraciones en vía única convencional el tiempo de viaje se incrementa en 15,67 minutos (29,5%) (Ho250_2.1) no apreciándose mejoras al reducir la distancia entre

apartaderos, no son factibles las baterías de trenes. Sin embargo, en vía única con apartaderos dinámicos y alternancia de vía única y doble (VA) sólo se encuentran horarios cuando se programan baterías de dos trenes (Ho250_2.2), sin que se vea incrementado el tiempo de viaje.

Tres trenes por sentido y hora (Ho250_3.1) sólo pueden programarse en la vía única convencional con apartaderos ubicados cada 10 kilómetros, con un incremento del tiempo de viaje de 27,12 minutos (51,1%).

En las configuraciones de vía única tanto convencional como con apartaderos dinámicos, así como en la alternancia de vía única y doble no es posible programar ni tres trenes por hora con baterías (Ho300_3.2) ni cuatro trenes por hora (Ho300_4.1 y Ho300_4.2).

Tráfico heterogéneo (300 km/h y 250 km/h)

Se han calculado también los incrementos para horarios heterogéneos (Figura 5.20). Pueden programarse dos trenes por hora y sentido sin baterías (He300-250_2.1) en la vía única convencional con apartaderos cada 10 kilómetros, con un incremento medio del tiempo de viaje de 6,90 minutos, siendo el incremento para trenes de 300 km/h de 6,32 minutos (13,7%) y para trenes de 250 km/h de 7,48 minutos (14,1%). En la vía única con apartaderos dinámicos repartidos (VUDi1) y en la alternancia de vía única y doble (VA) pueden programarse dos trenes por hora y sentido con baterías (He300-250_2.2) con un incremento medio del tiempo de viaje de 0,42 minutos, siendo el incremento para trenes de 300 km/h de 0,72 minutos (1,6%) y para trenes de 250 km/h de 0,12 minutos (0,2%).

En las configuraciones de vía única no son factibles las baterías de dos trenes (He300-250_2.2) ni tres trenes por hora (He300-250_3.1 y He300-250_3.2).

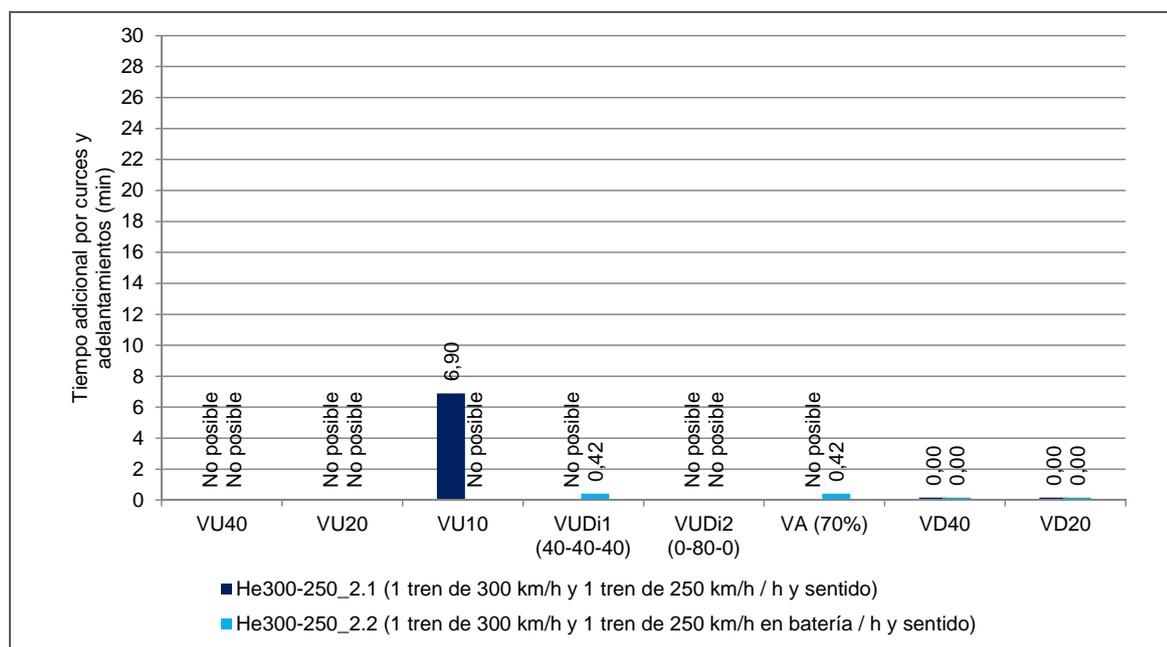


Figura 5.20. Tiempo adicional por cruces y adelantamientos. Tráfico heterogéneo (300 km/h y 250 km/h)
Fuente: Elaboración propia

5.2.3 Pautas de diseño en la dimensión temporal

Los resultados obtenidos en el análisis de capacidad y tiempo de viaje en la dimensión temporal permiten extraer algunas ideas generales de diseño en esta dimensión:

- Cuando el tráfico es homogéneo:
 - Las configuraciones en vía única con apartaderos convencionales sólo son factibles con niveles de tráfico muy bajos (un tren por hora y sentido) pues en el resto de los casos o no es posible encontrar horarios o los incrementos de tiempo de viaje experimentados no son asumibles en servicios de alta velocidad.
 - Los tiempos de viaje en vía única con apartaderos convencionales cuando sólo circula un tren por hora y sentido mejoran al reducirse la distancia entre apartaderos de 40 kilómetros a 20 kilómetros, pero no se observan mejoras al ubicarlos cada 10 kilómetros. Sin embargo, es de suponer que una reducción de la distancia entre apartaderos siempre suponga una mejora de la respuesta ante incidencias y retrasos.
 - Las configuraciones en vía única con apartaderos dinámicos reducen notablemente los incrementos de tiempo de viaje con respecto a la vía única convencional. Los incrementos de tiempo son reducidos y asumibles en servicios de alta velocidad. Estas configuraciones permiten programar uno o dos trenes por hora y sentido.
 - El comportamiento de una configuración en la que se alterne vía única y doble es igual que el de la vía única con apartaderos dinámicos cuando el tráfico es de uno o dos trenes por hora y sentido y tiene la ventaja de permitir tres trenes por hora y sentido en algunos casos.
 - En las configuraciones de vía única es posible programar tres trenes por hora y sentido cuando la distancia entre apartaderos es de 10 kilómetros, pero el incremento del tiempo de viaje obtenido no es adecuado para alta velocidad. No es posible programar más de dos trenes por hora y sentido en el resto de las variantes de vía única y en la alternancia de vía única y doble.
- Cuando el tráfico es heterogéneo:
 - La vía única no es una solución adecuada porque en general no es posible encontrar horarios y, cuando lo es, el incremento de tiempo es elevado.
 - Las configuraciones de vía única con apartaderos dinámicos y alternancia de vía única y doble permiten programar un tren de 300 km/h y uno de 250 km/h por hora y sentido con un incremento muy reducido del tiempo de viaje, pero siempre en batería.
 - No es posible programar más de dos trenes por hora y sentido en cualquiera de las variantes de vía única y en la alternancia de vía única y doble.

Como se ha indicado, éstas son ideas generales que pueden orientar al comenzar a diseñar una línea, pero cada caso concreto debe ser objeto de un estudio exhaustivo basado en simulación.

5.3 DIMENSIÓN ESPACIAL

En la dimensión espacial se analiza cómo dependiendo de la tipología de los tramos, que como se enunció en el Capítulo 3 pueden ser troncales o periféricos, los criterios de diseño y explotación deben ser diferentes.

Por otra parte, una nueva línea de alta velocidad se integra en la red de alta velocidad de un país o llega a hacerlo con el tiempo. Dicha red de alta velocidad normalmente coexiste con la red convencional con la que se conecta de manera directa o por medio de cambiadores de ancho permitiendo una mayor capilaridad y por tanto acceso a un mayor número de poblaciones.

En ocasiones las nuevas líneas de alta velocidad se plantean para enlazar poblaciones que hasta la fecha disponían de línea convencional, con el objetivo de reducir los

tiempos de viaje. En estos casos es necesario determinar qué hacer con la línea existente, pudiéndose plantear dos alternativas:

- *Desviar los tráficos preexistentes en la línea convencional a la de alta velocidad y dar de baja la línea convencional.* Típicamente los servicios de larga distancia convencional preexistentes pasarán a ser de alta velocidad, algunos servicios de media distancia convencional podrán convertirse en servicios de media distancia en alta velocidad y otros seguirán siendo convencionales, y los servicios de cercanías y mercancías se mantendrán con las mismas prestaciones. La inclusión de tráficos convencionales requiere adaptar algunos parámetros de diseño de la línea tales como las rampas máximas, peraltes y el número y localización de vías de apartado.
- Mantener en operación la línea convencional y dedicar la línea de alta velocidad exclusivamente a los servicios de alta velocidad. Esta opción permite independizar los tráficos convencionales de los de alta velocidad. En general, los servicios de larga distancia convencional y algunos servicios de media distancia convencional pasarán a ser de alta velocidad y la línea convencional será empleada por trenes de media distancia convencional, cercanías y mercancías. La línea de alta velocidad se diseña exclusivamente para tráficos de alta velocidad, pero a cambio es necesario seguir manteniendo la línea convencional.

Cabría una tercera posibilidad, consistente en adecuar la vía convencional para permitir el tráfico de alta velocidad que no será abordada, puesto que esta tesis se centra en el diseño de nuevas líneas de alta velocidad. Simplemente mencionar que en 1987 se aprobó la remodelación de la línea que actualmente se conoce como Corredor Mediterráneo para elevar su velocidad máxima a 220 km/h, en 2015 la línea sigue en obras para alcanzar esta velocidad. Las obras han supuesto dificultades en la explotación comercial y un incremento de los tiempos de viaje. En el año 1997 el tiempo de viaje entre Barcelona y Valencia era de dos horas y 55 minutos y sin embargo en 2015 el tiempo mínimo es de dos horas y 59 minutos. En comparación, en 1988 se aprobó la construcción de la primera línea de alta velocidad (Madrid-Sevilla) que fue inaugurada en 1992.

Por tanto, en la dimensión espacial se abordan aquellos aspectos relacionados con la ubicación de la línea y sus tramos en la red y la preexistencia o no de línea convencional.

5.3.1 *Opciones de diseño en la dimensión espacial*

Para abordar el diseño en la dimensión espacial deben identificarse primero los tramos que constituyen la línea atendiendo a la tipología y volumen de tráfico esperado, pues cuando coexisten diferentes tipos de servicios o cuando un tramo sirve a varios destinos puede haber diferencias significativas como se mostró al analizar la estructura de las redes en el apartado 3.2.2 para las redes de alta velocidad de Japón, Francia y España. Lo mismo ocurre con las líneas convencionales paralelas.

De manera simplificada, cuando con anterioridad exista línea convencional, ante las opciones de conservarla o darla de baja pueden plantearse seis situaciones como se muestra en la Figura 5.21. La nueva línea de alta velocidad puede ser de vía única (con apartaderos convencionales o dinámicos) o doble (en su totalidad o parcial) y la línea convencional, que puede ser de vía única o doble, puede cerrarse o mantenerse en operación.

El diseño de la línea de alta velocidad puede ser cualquiera de los presentados en el apartado 5.2.1. contemplándose su ampliación si fuera necesario. Como consideración adicional en el diseño hay que tener en cuenta que cuando se opta por el cierre de la línea convencional puede ser necesario disponer un mayor número de apartaderos y vías de apartado en la línea de alta velocidad para permitir la coexistencia de tráficos de diferentes velocidades.

En caso de no existir línea convencional las opciones de diseño serían la 1 o la 4, y pudiera darse el caso de que se creen nuevos servicios de media distancia o cercanías sobre dicha línea.

	Línea de alta velocidad	Línea convencional preexistente
1		
2		
3		
4		
5		
6		

Figura 5.21. Coexistencia de línea de alta velocidad y convencional
Fuente: Elaboración propia

5.3.2 **Análisis de capacidad y tiempos de viaje**

Tras la presentación de las diferentes opciones de diseño que pueden adoptarse en la dimensión espacial, en esta sección se realiza un análisis comparativo de las mismas desde el punto de vista de tiempo de viaje basado en simulación.

5.3.2.1 **Investigaciones relacionadas**

La investigación más próxima al análisis que aquí se realiza es (Nelldal, 2012) que analiza cómo la puesta en servicio de una nueva línea de alta velocidad incide en la capacidad de la línea convencional preexistente. Estudia el caso concreto de la línea que enlaza las ciudades suecas de Malmö y Katrineholm (Södra stambanan) con el modelo TVEM (Lindfeldt, 2011a), comparando la situación actual, con la línea convencional mejorada o con una nueva línea de alta velocidad que coexista con la convencional. Concluye que, al separar los tráficos de alta velocidad de los convencionales, disponiendo además de la línea convencional existente una nueva línea de alta velocidad, la capacidad disponible para mercancías se duplicaría e incluso triplicaría y la capacidad para trenes de alta velocidad se cuadruplicaría. También se reducirían los conflictos y dependencias entre diferentes tipos de servicios y se incrementaría la puntualidad. Finaliza mostrando que construir una línea de alta velocidad sería más económico que mejorar la línea convencional.

Varios autores analizan el efecto de la heterogeneidad del tráfico en la capacidad (Dingler, Lai y Barkan, 2009; Vromans, Dekker y Kroon, 2006).

(Civity, 2013) compara tres alternativas de desarrollo de un corredor ferroviario: construcción de una nueva línea de muy alta velocidad apta para circular a 300-350 km/h, construcción de una nueva línea de media-alta velocidad diseñada para velocidades de 250-280 km/h y mejora de la infraestructura existente. El análisis se limita a la comparación del beneficio socioeconómico. Concluye que la elección de una de las alternativas de desarrollo mencionadas depende de una compleja serie de parámetros de operación, infraestructura y mercado. Cuando la demanda y su elasticidad son altas la muy alta velocidad es a menudo la mejor opción, mientras que en otros escenarios la mejora de la infraestructura convencional permite obtener mejores ratios coste-beneficio. La opción de media-alta velocidad suele tener ratios inferiores ya que los costes de infraestructura son aproximadamente los mismos que los de muy alta velocidad mientras que la demanda es menor. Cada corredor potencial debe ser analizado de manera individual para elegir la alternativa óptima.

5.3.2.2 Metodología adoptada para el análisis de capacidad y tiempo de viaje

Se analizan y combinan tres factores principales, cada uno con varias opciones:

- *Opciones de infraestructura:* manteniendo o cerrando la línea convencional preexistente, pudiendo ser tanto la línea de alta velocidad como la convencional de vía única o doble.
- *Frecuencia de servicio y tipología de tráfico:* servicios de diferentes velocidades con varias combinaciones de frecuencias.

Las opciones de infraestructura analizadas son las que se han presentado en la Figura 5.21. cuyas configuraciones de vías se detallan en la Tabla 5.1. Se considera la configuración de la infraestructura en la última etapa de su ciclo de vida, siendo posible haber llegado a dicha configuración por medio de un diseño escalable a lo largo del tiempo (como se expuso en el apartado 5.2.2) que aquí no se considera para limitar el análisis a los aspectos de la dimensión espacial.

Tabla 5.1. Infraestructuras definidas para el análisis en la dimensión espacial

<i>Opción</i>	<i>Línea de alta velocidad</i>	<i>Línea convencional</i>
1	Vía única, apartaderos dinámicos repartidos	
2	Vía única, apartadero dinámico central	Vía única, apartaderos cada 20 km
3	Vía única, apartadero dinámico central	Vía doble, apartaderos cada 20 km
4	Vía doble, apartaderos cada 20 km	
5	Vía doble, apartaderos cada 40 km	Vía única, apartaderos cada 20 km
6	Vía doble, apartaderos cada 40 km	Vía doble, apartaderos cada 20 km

Fuente: elaboración propia

Las infraestructuras de alta velocidad analizadas tienen una longitud de 200 kilómetros y se suponen en alineación recta. Respecto al alzado, se replica el existente en la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona saliendo desde Madrid y hasta el kilómetro 200 para la línea dedicada exclusivamente a alta velocidad (opciones 2, 3, 5 y 6) y el mismo alzado limitando la pendiente máxima a 12,5 milésimas para la línea de tráfico mixto (opciones 1 y 4). La velocidad máxima es de 300 km/h aunque de manera aleatoria se han generado tres limitaciones de velocidad de hasta 250 km/h. Las líneas están dotadas de ERTMS nivel 2, con cantones de tres kilómetros de longitud, excepto en las inmediaciones de las estaciones donde el cantón más próximo es de un kilómetro y el siguiente de dos kilómetros. Las estaciones se ubican en los kilómetros 0, 110, 162, 169, 175, 186, 195 y 200.

Las infraestructuras convencionales analizadas tienen una longitud de 220 kilómetros y se considera el perfil de velocidades, alineación y alzado de la línea Madrid-Soria hasta el kilómetro 220 desde Madrid-Chamartín. Se dota a la línea del sistema de señalización nacional ASFA. Las estaciones se ubican en los kilómetros 0, 110, 162, 169, 175, 186, 190, 200 y 220.

En el tramo final de las líneas (kilómetros 160 a 200) en el que la densidad de estaciones es elevada no se ubican apartaderos convencionales ya que los cruces y adelantamientos se programan en las mismas estaciones.

Los servicios que se contemplan son de alta velocidad y larga distancia (AV-LD); alta velocidad y media distancia (AV-MD); media distancia convencional (MD conv); cercanías y mercancías.

Si bien en esta tesis de manera expresa se ha excluido el análisis de la idoneidad de la circulación de trenes de mercancías en líneas de alta velocidad, por tratarse de una materia que requiere de un estudio particular, en este apartado sí se considera tráfico de mercancías solamente desde el punto de vista de la capacidad, ya que las líneas convencionales preexistentes suelen ser utilizadas por trenes de mercancías.

La Figura 5.22. muestra un esquema de los diferentes servicios, indicando los recorridos realizados y los patrones de paradas. Los tiempos de parada son de 60 segundos para alta velocidad y media distancia y regionales, y 30 segundos para cercanías.

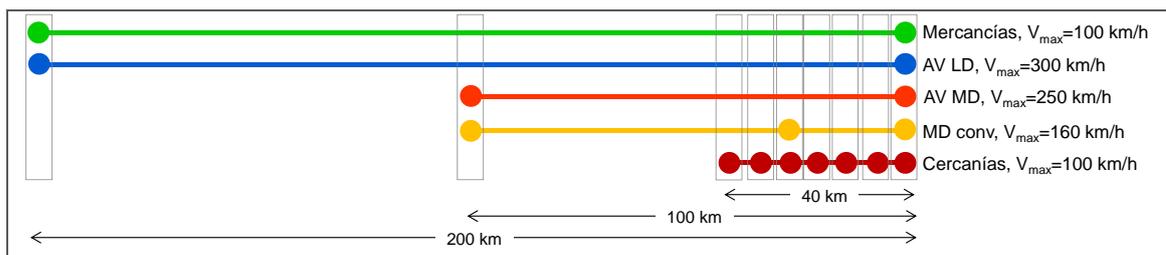


Figura 5.22. Servicios definidos para el análisis en la dimensión espacial
Fuente: Elaboración propia

Para la definición de los horarios se considera un periodo temporal representativo en el que, como sucede en la realidad, las puntas de tráfico de los diferentes servicios no coinciden. Se asumen las frecuencias por hora y sentido de cada uno de los servicios que se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Horarios definidos para el análisis en la dimensión espacial

Horario	AV-LD	AV-MD	MD conv.	Cercanías	Mercancías
H1	1	2	1	2	0,5
H2	1	1	2	4	1
H3	2	2	1	2	0,5
H4	2	1	2	4	1
H5	3	2	1	2	0,5
H6	3	1	2	4	1
H7	4	2	1	2	0,5
H8	4	1	2	4	1

Fuente: elaboración propia

Todos los horarios son cadenciados y simétricos a excepción de los tráficos de mercancías que se programan tras definir la malla de trenes de viajeros en los surcos disponibles. Las prioridades se definen en función de la velocidad máxima de circulación, siendo los trenes de prioridad mayor los de alta velocidad y larga distancia.

En los casos en los que coexisten la línea de alta velocidad y la convencional se supone que los tráficos de media distancia convencional, cercanías y mercancías siguen empleando la convencional.

El material rodante empleado es:

- *Tren de alta velocidad y larga distancia, tipo 300*: basado en la serie Renfe 103, de 200 metros de longitud y limitando su velocidad máxima a 300 km/h.
- *Tren de alta velocidad y media distancia, tipo 250*: basado en la serie Renfe 104 de 107 metros de longitud y velocidad máxima 250 km/h.
- *Tren de media distancia convencional, tipo 160*: basado en la serie Renfe 449, de 99 metros de longitud y velocidad máxima 160 km/h.
- *Tren de cercanías, tipo 120*: basado en la serie Renfe 465 (Civia), de 98 metros de longitud y velocidad máxima 120 km/h.
- *Tren de mercancías tipo 100*: 16 vagones JJ92 portabobinas remolcados por la locomotora eléctrica serie Renfe 253, de 212 metros de longitud, 1.473 toneladas y velocidad máxima 100 km/h.

Así pues, se analizan 6 opciones de infraestructura y en cada una de ellas 8 horarios, lo que da lugar a 48 casos de simulación.

El indicador que se calcula para cada caso de simulación es:

Tiempo de viaje: para su obtención se van introduciendo los diferentes servicios en la malla comenzando por los de prioridad mayor y se van adecuando las horas de salida, cruces y adelantamientos con la ayuda del simulador hasta conseguir un horario libre de conflictos. Para cada tipo de servicio se calcula el tiempo medio de viaje considerando ambos sentidos de circulación.

5.3.2.3 Resultados del análisis de capacidad y tiempo de viaje

A continuación se analizan los resultados de cada uno de los ocho horarios en las seis opciones de infraestructura. A modo de ejemplo se presentan algunas de las mallas de circulación que se han diseñado.

Horario 1 (1-2-1-2-0,5)

En el horario 1 se programan por hora y sentido 1 AV-LD, 2 AV-MD, 1 MD convencional, 2 cercanías y 0,5 mercancías. Los tiempos de viaje obtenidos se muestran en la Figura 5.23.

No es posible implementar este horario en la opción de infraestructura 1 en la que sólo se dispone de vía única de alta velocidad y tráfico mixto. En las opciones de infraestructura 2 y 3 los trenes AV-LD tienen un tiempo ligeramente superior (4:11, 9,2%) que en las opciones de infraestructura 4, 5 y 6 debido a las reducciones de velocidad para pasar por los desvíos y los trenes de AV-MD (3:39, 13,4%) por la necesidad de realizar un cruce convencional. El resto de servicios experimentan una reducción del tiempo de viaje al pasar de vía única convencional a vía doble convencional por la desaparición de los cruces; el tiempo de los MD convencional se reduce en 3:39 (-11,8%); el de los cercanías, en 7:58 (13,9%); y el de mercancías, en 24:48 (14,1%).

Para todos los servicios los menores tiempos de viaje se obtienen con la opción de infraestructura 4, en la que sólo se dispone de vía doble de alta velocidad y tráfico mixto ya que se evitan los cruces y los trenes convencionales se benefician de una menor longitud del recorrido y un perfil de velocidades más homogéneo y favorable.

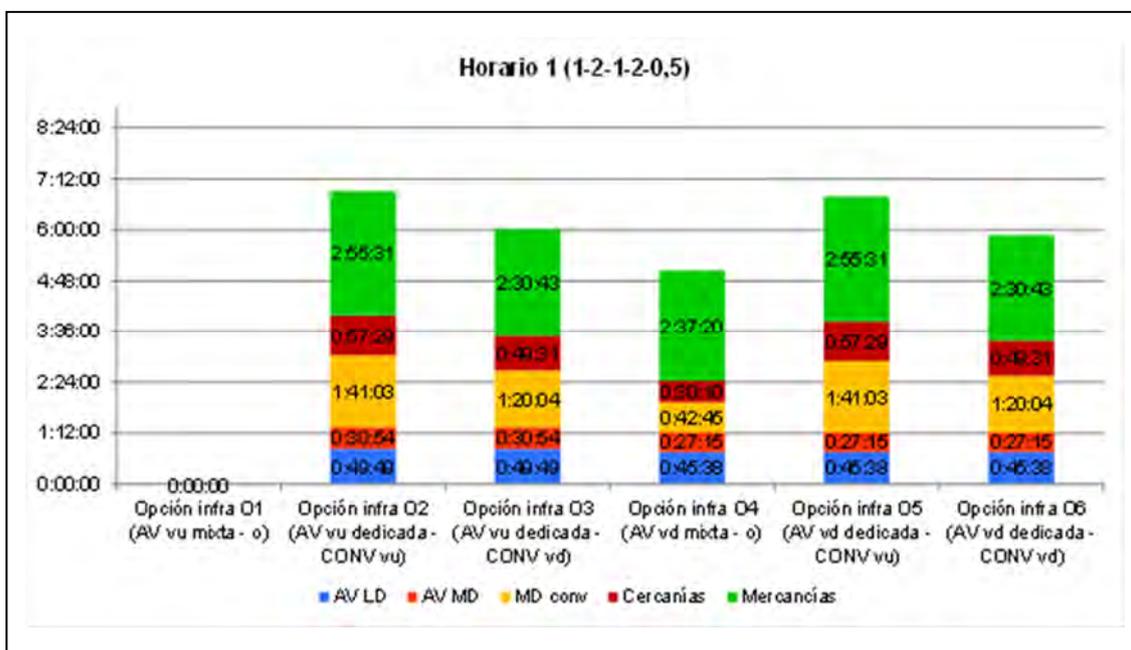


Figura 5.23. Tiempo de viaje por tipos de servicios. Horario 1 (1-2-1-2-0,5)
Fuente: Elaboración propia

Se muestra la malla del horario 1 en la infraestructura 4 (Figura 5.24). Como se trata de una vía doble y ambos sentidos de circulación son independientes, se presenta sólo un sentido.

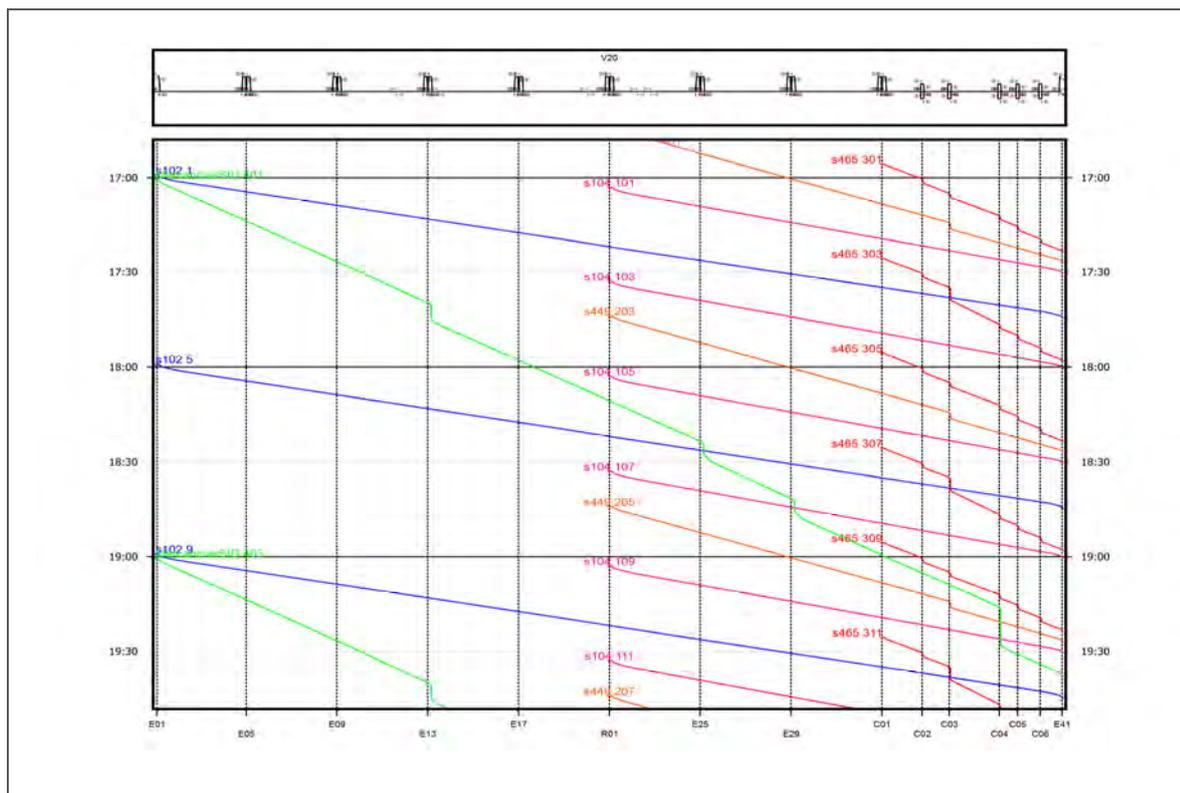


Figura 5.24. Malla del horario 1 (1-2-1-2-0,5) en la opción de infraestructura 4
Fuente: Elaboración propia

Horario 2 (1-1-2-4-1)

En el horario 2 se programan por hora y sentido 1 AV-LD, 1 AV-MD, 2 MD convencional, 4 cercanías y 1 mercancías. Con respecto al horario 1, se reduce a la mitad el tráfico de AV-MD y se duplica el de trenes convencionales. Los tiempos de viaje obtenidos se muestran en la Figura 5.25.

No es posible implementar este horario en la opción de infraestructura 1 en la que sólo se dispone de vía única de alta velocidad y tráfico mixto. Tampoco son admisibles las configuraciones en las que la línea convencional es de vía única (opciones de infraestructura 2 y 5) pues tal y como está diseñada no admite la circulación de 6 trenes por hora y sentido con velocidades máximas heterogéneas. En la opción de infraestructura 3 los tiempos de los AV-LD y AV-MD son ligeramente superiores que en la opción de infraestructura 6 (0:42, 1,5% para el AV-LD y 2:22, 7,4% para el AV-MD) debido a las limitaciones impuestas por la vía única con cruce dinámico.

Para todos los servicios los menores tiempos de viaje se obtienen con la opción de infraestructura 4, en la que sólo se dispone de vía doble de alta velocidad y tráfico mixto por las mismas razones que se han indicado en el horario 1. Comparando ambos horarios en la opción de infraestructura 4 no se observan cambios notables en los tiempos de viaje al variar la composición del tráfico.

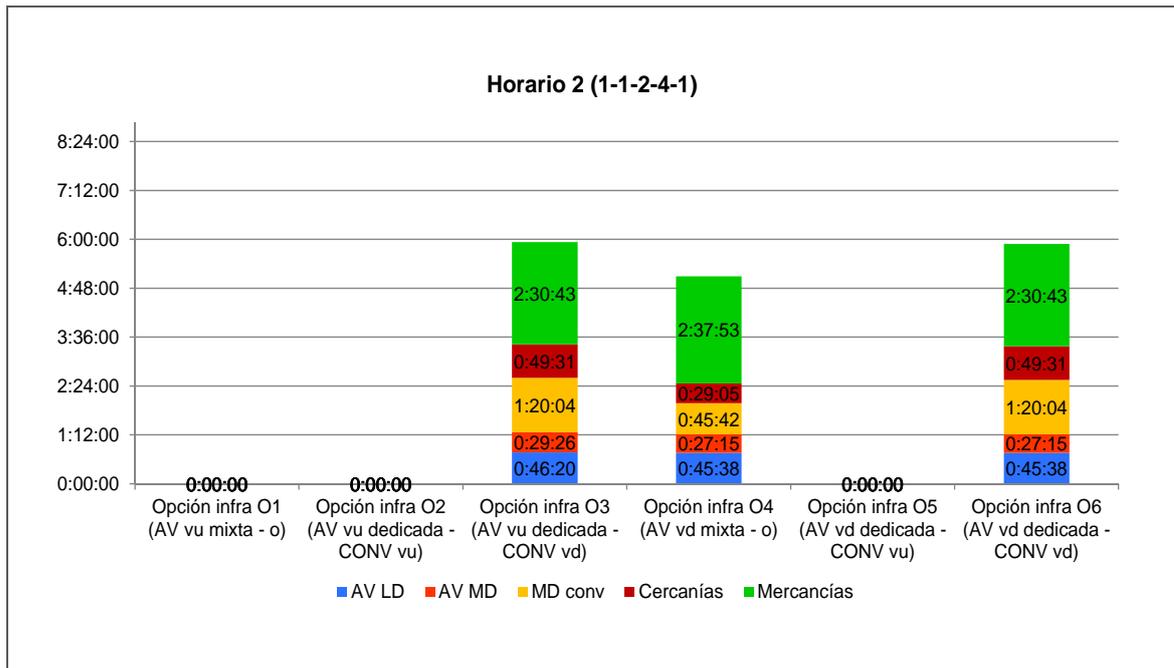


Figura 5.25. Tiempo de viaje por tipos de servicios. Horario 2 (1-1-2-4-1)
Fuente: Elaboración propia

Se muestran las mallas del horario 2 en la opción de infraestructura 3 (Figura 5.26). Para la vía doble convencional sólo se muestra un sentido de circulación.

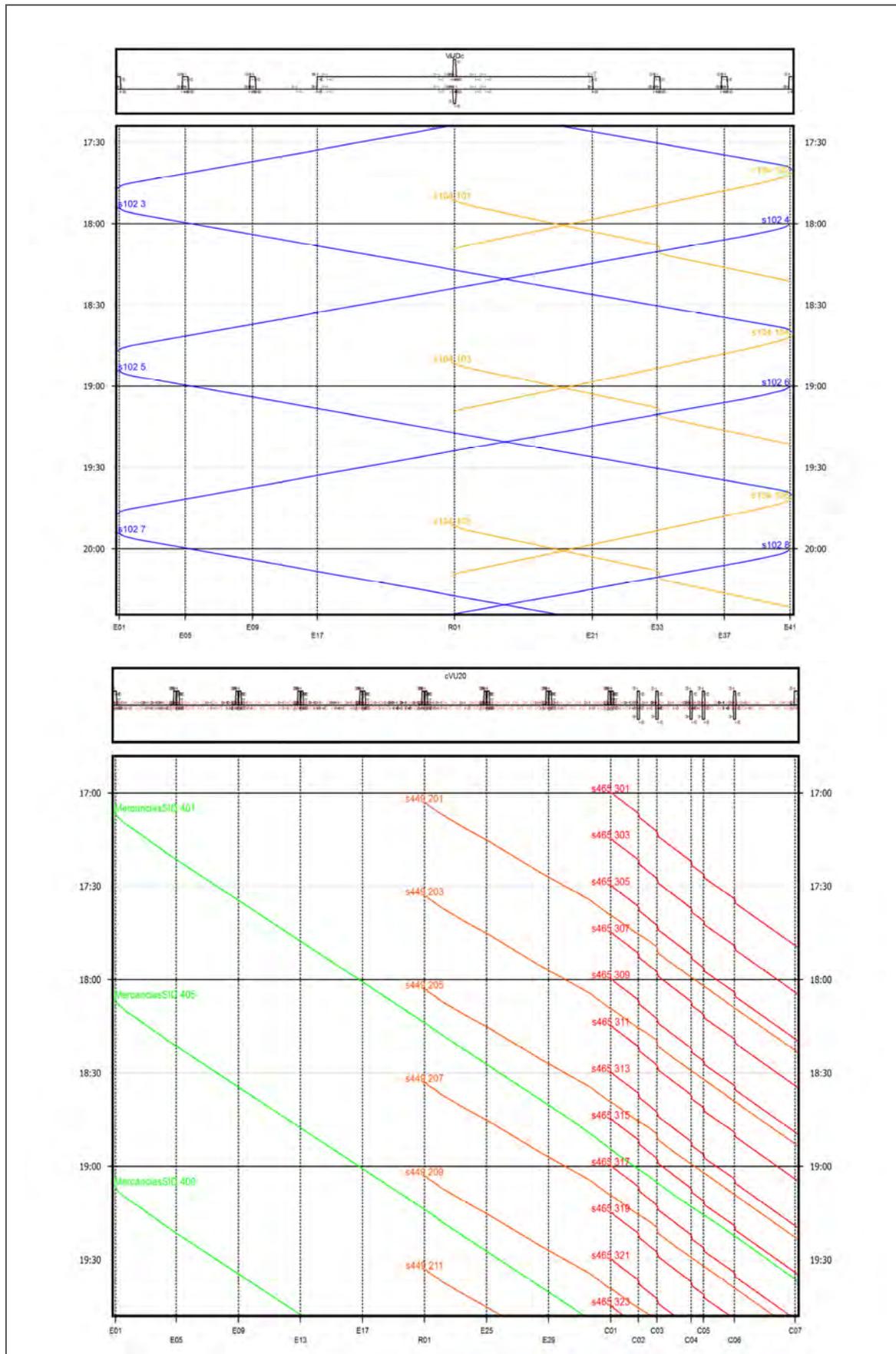


Figura 5.26. Malla del horario 2 (1-1-2-4-1) en la opción de infraestructura 3
Fuente: Elaboración propia

Horario 3 (2-2-1-2-0,5)

En el horario 3 se programan por hora y sentido 2 AV-LD, 2 AV-MD, 1 MD convencional, 2 cercanías y 0,5 mercancías. Con respecto al horario 1 lo único que varía es que se duplica el número de trenes AV-LD. Los tiempos de viaje obtenidos se muestran en la Figura 5.27.

La única opción de infraestructura que no es admisible es la 1, en la que sólo se dispone de vía única de alta velocidad y tráfico mixto. En las infraestructuras de alta velocidad dedicadas y de vía doble los trenes de alta velocidad experimentan una mejora significativa del tiempo de viaje con respecto a las de vía única, los trenes AV-LD de 6:30 (-12,5%) y los AV-MD de 5:48 (-18,5%). Lo mismo les sucede a los servicios convencionales al pasar de vía única convencional a vía doble convencional, con variaciones del -20,8%, -13,9% y 14,1% para MD convencional, cercanías y mercancías respectivamente.

Al igual que ocurre con los horarios 1 y 2, los mejores tiempos de viaje para todos los servicios se obtienen con la opción de infraestructura 4, aunque comparando los tres horarios, en el 3 se experimenta un incremento de los tiempos de viaje de los trenes convencionales.

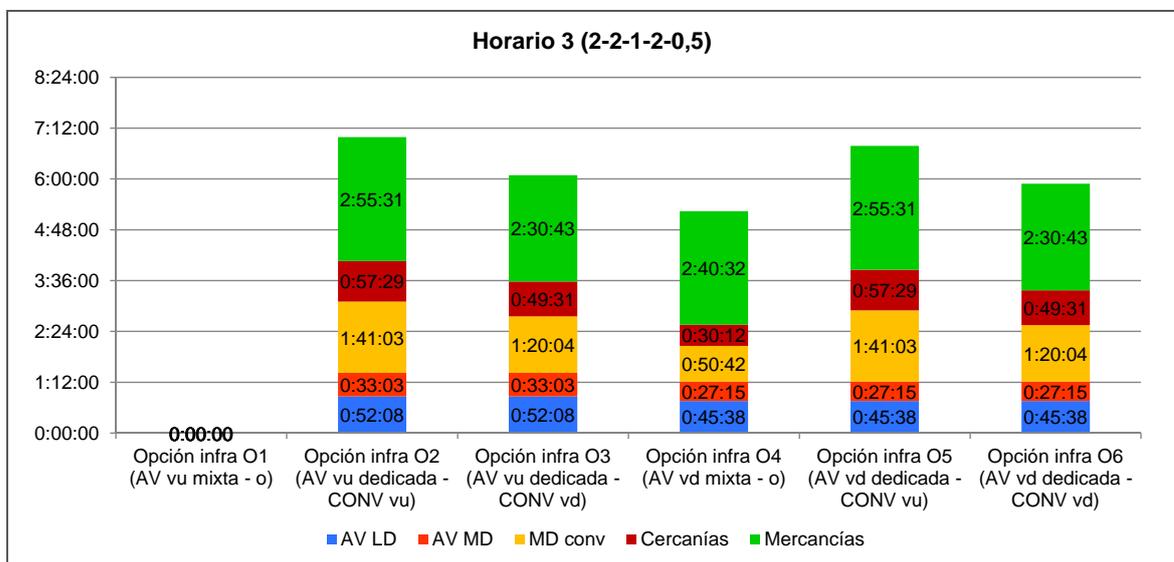


Figura 5.27. Tiempo de viaje por tipos de servicios. Horario 3 (2-2-1-2-0,5)
Fuente: Elaboración propia

Horario 4 (2-1-2-4-1)

En el horario 4 se programan por hora y sentido 2 AV-LD, 1 AV-MD, 2 MD convencional, 4 cercanías y 1 mercancías. Con respecto al horario 2 se duplica el número de trenes AV-LD. Los tiempos de viaje obtenidos se muestran en la Figura 5.28.

Sólo son admisibles las opciones de infraestructura en las que se segregara el tráfico de alta velocidad y convencional y la línea convencional es de vía doble (opciones 3 y 6) y aquella en la que se dispone únicamente de infraestructura de alta velocidad de vía doble y tráfico mixto (opción 4).

Los trenes de alta velocidad experimentan una reducción del tiempo de viaje al pasar de vía única a doble de 7:43 (14,5%) para los AV-LD y 6:35 (19,5%) para los AV-MD.

De nuevo los menores tiempos de viaje para todos los servicios se obtienen con la opción de infraestructura 4, sin que existan incrementos con respecto al horario 2 al duplicarse la frecuencia de los AV-LD.

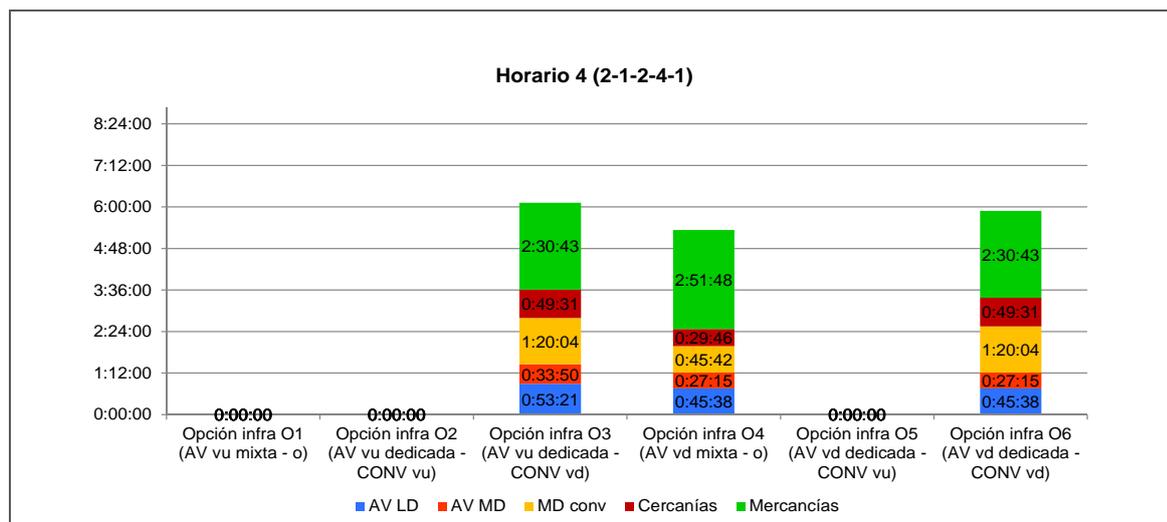


Figura 5.28. Tiempo de viaje por tipos de servicios. Horario 4 (2-1-2-4-1)
Fuente: Elaboración propia

Horario 5 (3-2-1-2-0,5)

En el horario 5 se programan por hora y sentido 3 AV-LD, 2 AV-MD, 1 MD convencional, 2 cercanías y 0,5 mercancías. Con respecto al horario 3 lo único que varía es que se incrementa el número de trenes AV-LD. Los tiempos de viaje obtenidos se muestran en la Figura 5.29.

Las opciones de infraestructura 1, 2 y 3 no son admisibles pues el volumen de tráfico de alta velocidad requiere vía doble ya sea para tráfico mixto o dedicada. Si se comparan las opciones de infraestructura 5 y 6 se observa, como en casos anteriores, la reducción del tiempo de viaje para los servicios convencionales al pasar de vía única a doble. El tiempo de viaje de los MD convencional se reduce en 20:59 (-20,8%), el de cercanías en 7:58 (13,9%) y el de mercancías en 1:09:27 (31,5%).

La opción de infraestructura 4 permite obtener en conjunto los mejores tiempos de viaje. Los trenes de alta velocidad al tener las prioridades más altas no ven incrementados sus tiempos de viaje. Los trenes de MD convencional y cercanías se benefician de la menor longitud del recorrido y el perfil de velocidades más favorable y homogéneo. En comparación con la vía doble convencional la reducción es de 28:29 (-35,6%) para los MD convencional y 19:19 (-39%) para los cercanías. Los trenes de mercancías incrementan su tiempo de viaje (1:09:27; 56,1%) con respecto a las opciones en las que se segrega los tráficos de alta velocidad y convencionales, ello es debido a la necesidad de programar mayores tiempos de parada para ser adelantados por trenes rápidos.

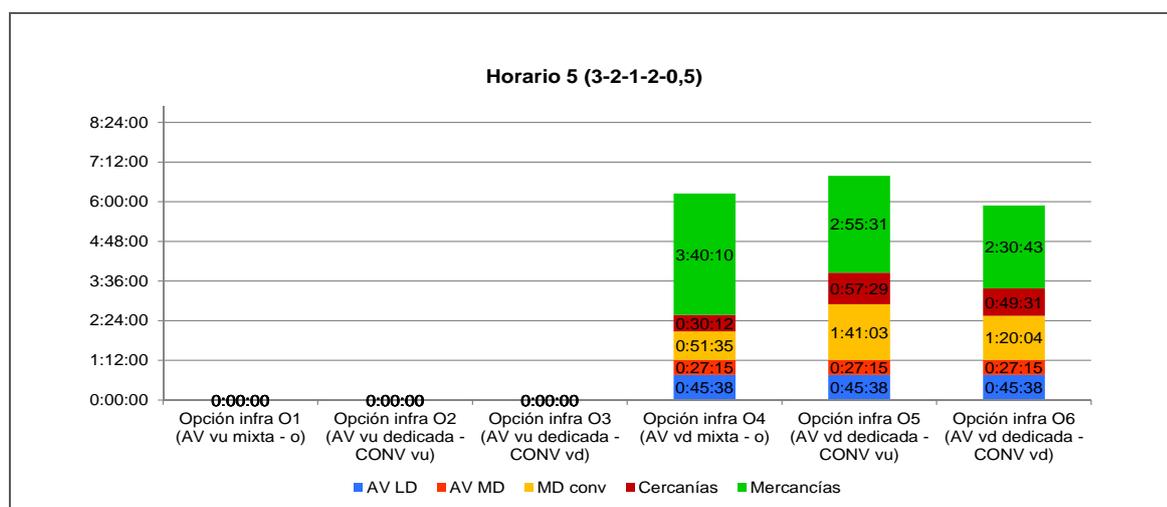


Figura 5.29. Tiempo de viaje por tipos de servicios. Horario 5 (3-2-1-2-0,5) Fuente: Elaboración propia

Se muestran las mallas del horario 5 en la opción de infraestructura 5 (Figura 5.30). Para la vía doble de alta velocidad sólo se muestra un sentido de circulación.

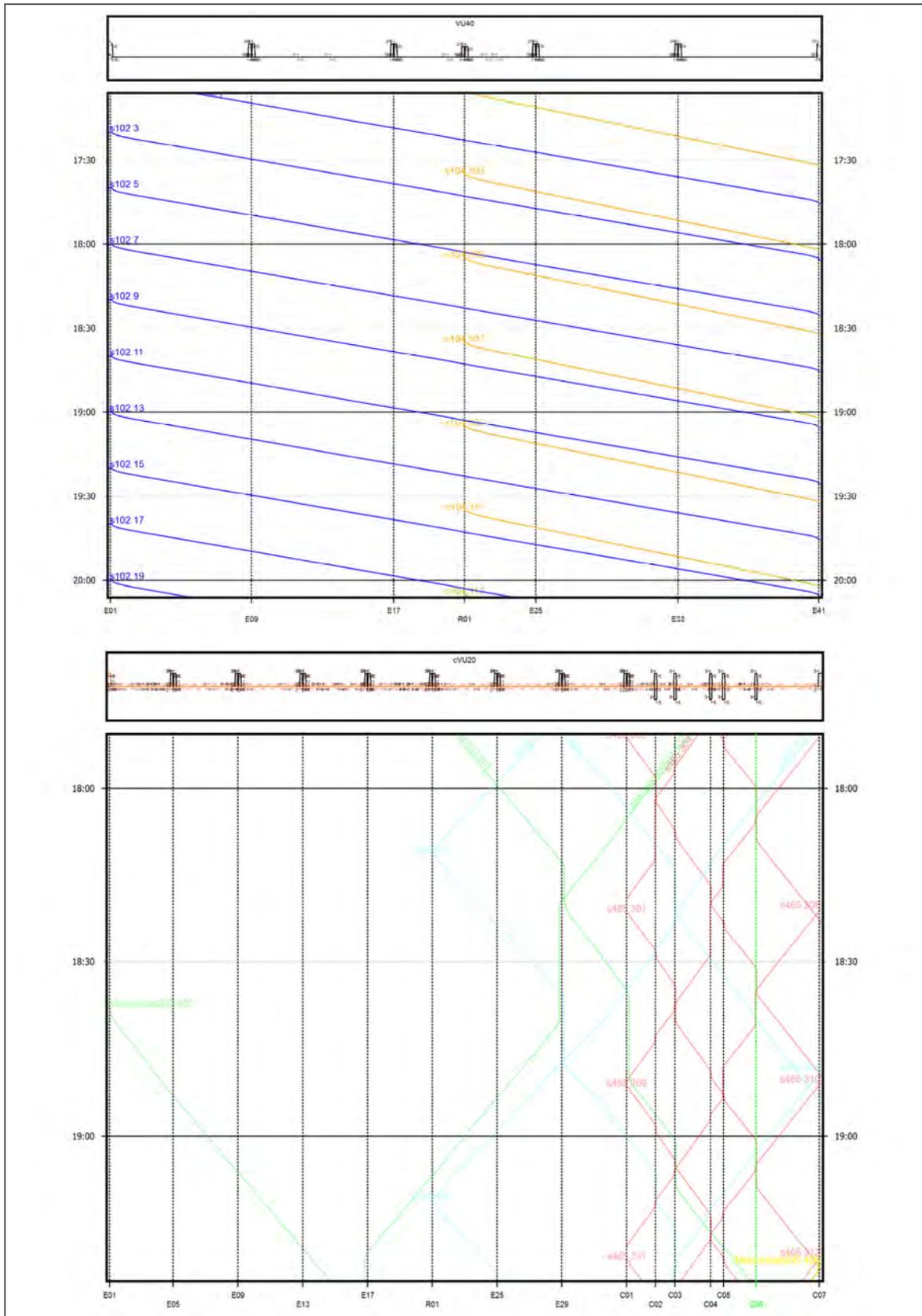


Figura 5.30. Malla del horario 5 (3-2-1-2-0,5) en la opción de infraestructura 5
Fuente: Elaboración propia

Horario 6 (3-1-2-4-1)

En el horario 6 se programan por hora y sentido 3 AV-LD, 1 AV-MD, 2 MD convencional, 4 cercanías y 1 mercancías, es por tanto como el horario 4 pero incrementándose el número de trenes AV-LD. Los tiempos de viaje obtenidos se muestran en la Figura 5.31.

Dados los volúmenes de tráfico tanto de alta velocidad (4 trenes/hora) como convencionales (7 trenes/hora) sólo es admisible la opción de infraestructura 6 en la que se dispone tanto de línea de alta velocidad como convencional, ambas de vía doble. En comparación con los horarios anteriores los tiempos de viaje de todos los servicios son idénticos.

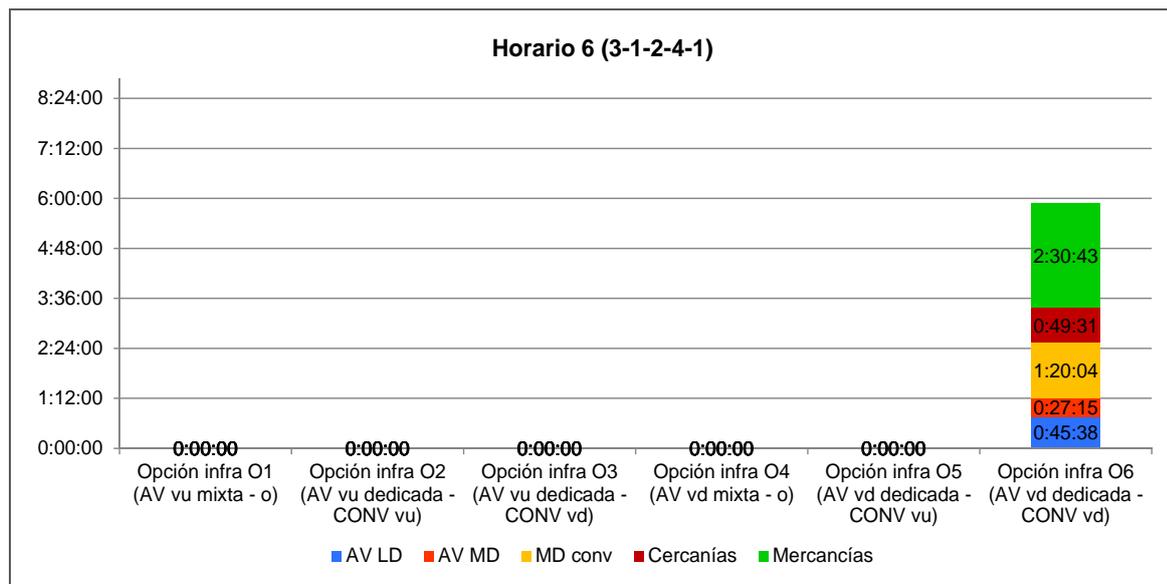


Figura 5.31. Tiempo de viaje por tipos de servicios. Horario 6 (3-1-2-4-1)
Fuente: Elaboración propia

Horario 7 (4-2-1-2-0,5)

En el horario 7 se programan por hora y sentido 4 AV-LD, 2 AV-MD, 1 MD convencional, 2 cercanías y 0,5 mercancías. Con respecto al horario 5 lo único que varía es que se incrementa el número de trenes AV-LD. Los tiempos de viaje obtenidos se muestran en la Figura 5.32.

Las únicas opciones de infraestructura válidas son la 5 y la 6 que disponen de línea dedicada siendo la de alta velocidad obligatoriamente de vía doble y la convencional única o doble.

Si se comparan las opciones de infraestructura 5 y 6 se observa, como en casos anteriores, la reducción del tiempo de viaje para los servicios convencionales al pasar de vía única a doble. El tiempo de viaje de los MD convencional se reduce en 20:59 (-20,8%); el de cercanías en 7:58 (13,9%); y el de mercancías en 1:09:27 (31,5%).

La opción de infraestructura 6 permite obtener los mejores tiempos de viaje.

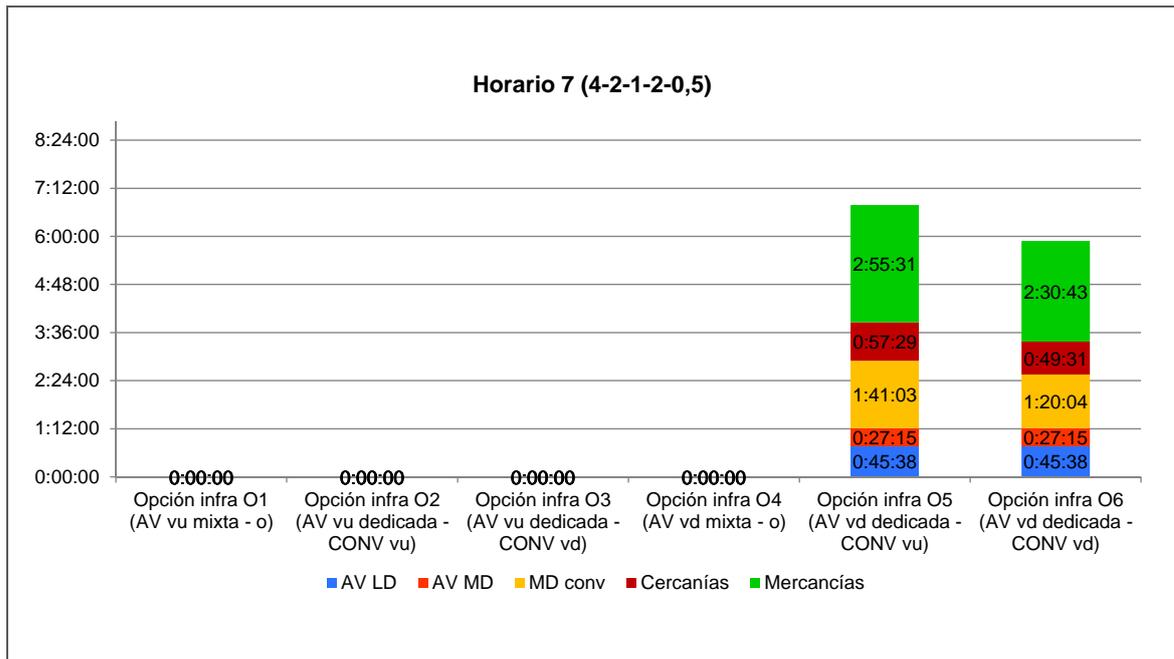


Figura 5.32. Tiempo de viaje por tipos de servicios. Horario 7 (4-2-1-2-0,5)
Fuente: Elaboración propia

Horario 8 (4-1-2-4-1)

En el horario 8 se programan por hora y sentido 4 AV-LD, 1 AV-MD, 2 MD convencional, 4 cercanías y 1 mercancías. Los tiempos de viaje obtenidos se muestran en la Figura 5.33.

Dados los volúmenes de tráfico tanto de alta velocidad (5 trenes/hora) como convencionales (7 trenes/hora) sólo es admisible la opción de infraestructura 6 en la que se dispone tanto de línea de alta velocidad como convencional, ambas de vía doble. En comparación con los horarios anteriores los tiempos de viaje de todos los servicios son idénticos.

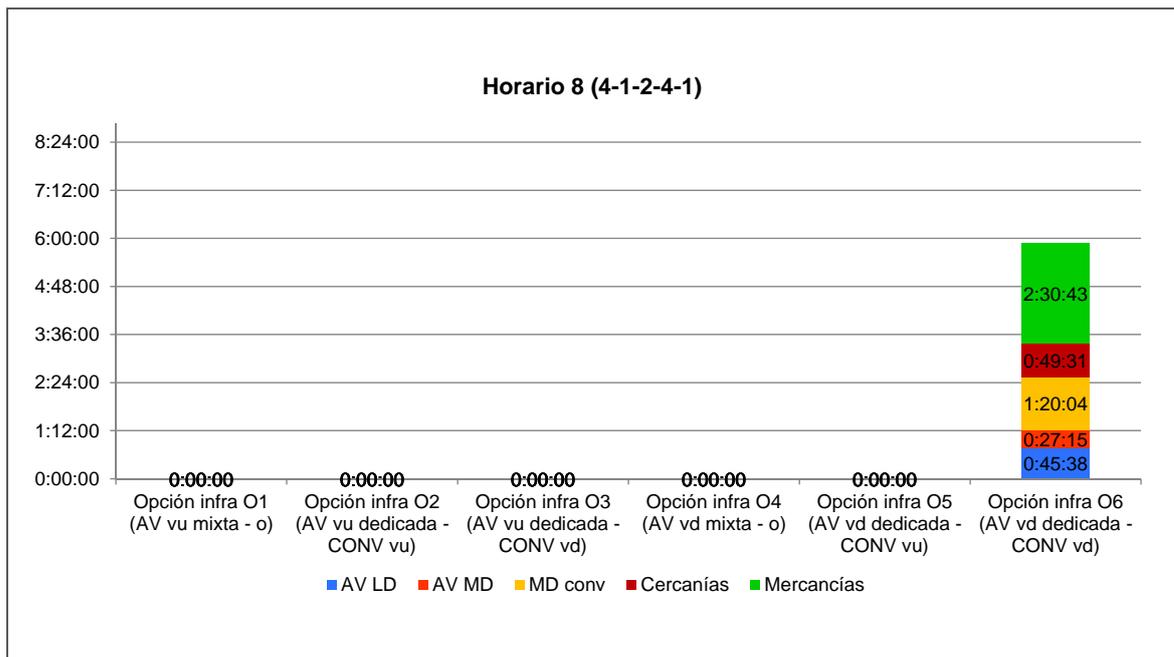


Figura 5.33. Tiempo de viaje por tipos de servicios. Horario 8 (4-1-2-4-1)
Fuente: Elaboración propia

5.3.3 Pautas de diseño en la dimensión espacial

Los resultados obtenidos en el análisis de capacidad y tiempos de viaje en la dimensión espacial, junto con la clasificación de las secciones de las líneas de alta velocidad realizada en el Capítulo 3 permiten extraer algunas pautas generales de diseño en esta dimensión:

- En las secciones con un elevado tráfico de alta velocidad es necesario independizar la alta velocidad de los servicios convencionales, empleando infraestructuras dedicadas (esta casuística se ha visto en los horarios 6, 7 y 8). La situación es característica de los tramos troncales de la red de alta velocidad.
- En las secciones dedicadas con un elevado tráfico de alta velocidad por lo general será necesario disponer de vía doble.
- En las secciones con bajo tráfico de alta velocidad es posible que circulen trenes de alta velocidad y convencionales de manera conjunta en una infraestructura adecuada para tráfico mixto (esta casuística se ha visto en los horarios 1, 2, 3, 4 y 5). La situación es característica de tramos periféricos y también puede darse en tramos troncales al principio del ciclo de vida de la infraestructura.
- En las secciones con bajo tráfico de alta velocidad operar dos vías únicas dedicadas, desde el punto de vista de tiempos de viaje, no resulta la mejor opción. Es preferible optar por vía doble de alta velocidad para tráfico mixto que permite reducir los tiempos de viaje de los servicios convencionales sin que los tiempos de viaje de los servicios de alta velocidad se vean incrementados con respecto a una infraestructura de alta velocidad dedicada.

5.4 CONSIDERACIÓN CONJUNTA DE LAS DIMENSIONES TEMPORAL Y ESPACIAL

Para facilitar la exposición se ha optado hasta ahora por presentar la manera independiente los aspectos de las dimensiones temporal y espacial, pero en la realidad es necesario hacerlo de manera conjunta y además integrar estos criterios técnicos con los socioeconómicos. El procedimiento que se propone para diseñar una nueva línea de alta velocidad considerando todos estos aspectos se muestra en la Figura 5.34 y se detalla a continuación.

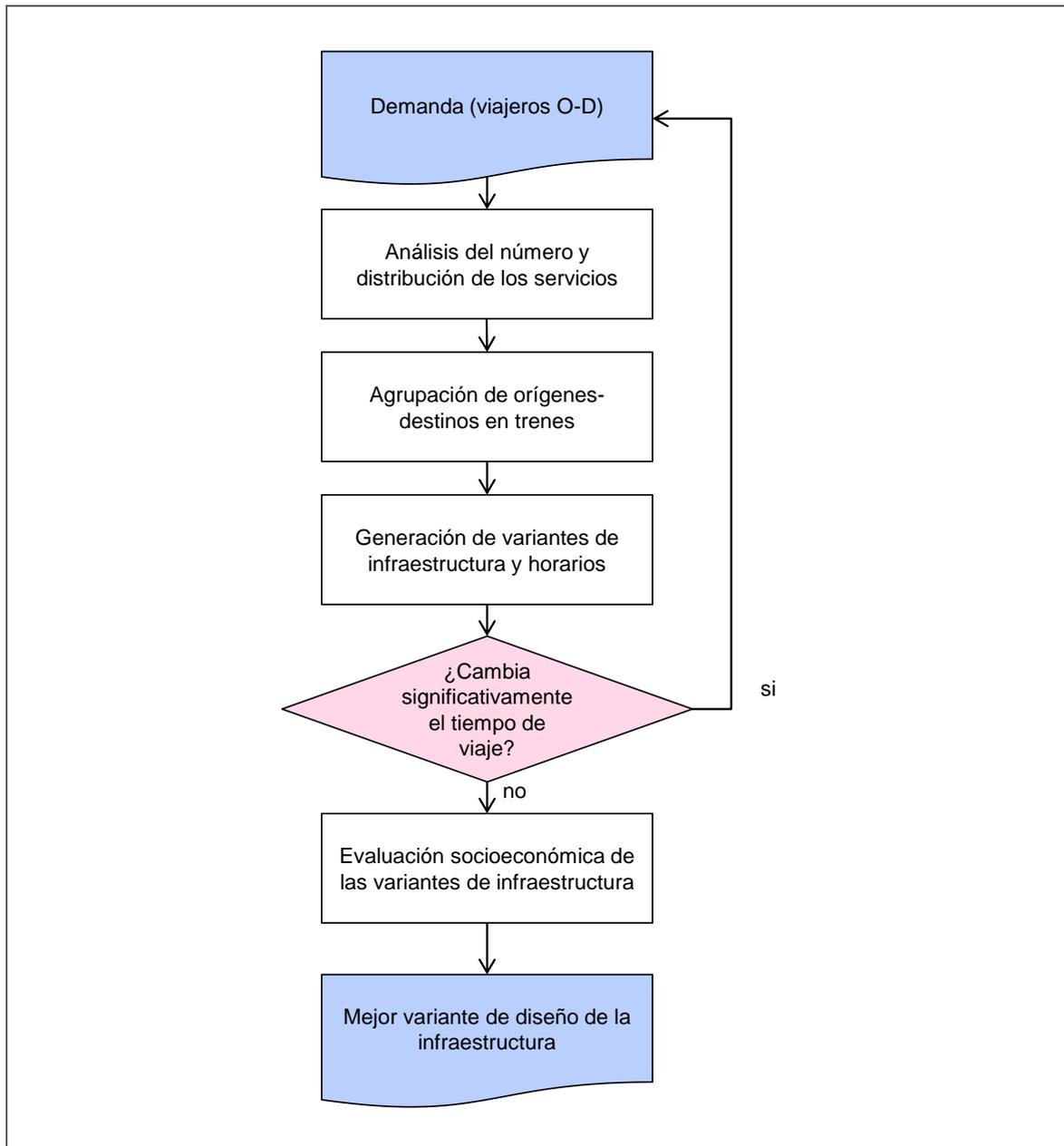


Figura 5.34. Metodología de diseño bidimensional de líneas de alta velocidad
Fuente: Elaboración propia

5.4.1 **Análisis del número y distribución de los servicios**

A partir de la matriz de demanda para cada uno de los periodos temporales se dimensiona la oferta, que queda definida por el tipo, origen, destino y paradas intermedias de cada uno de los servicios, el patrón de horas punta, llano y valle, el número de frecuencias en cada una de dichas franjas horarias y el material asignado.

5.4.1.1 **Tipos de servicios**

Como criterios generales para la determinación de los tipos de servicios se puede considerar inicialmente:

- *Servicios de alta velocidad y larga distancia*: relaciones en las que exista una ruta aérea y en las que el tiempo de viaje del servicio de alta velocidad pueda ser inferior a tres o tres horas y media, ya que en ellas el tren de alta velocidad es una oferta atractiva para competir con el avión.

- *Servicios de alta velocidad y media distancia*: rutas entre capitales de provincia en las que podría alcanzarse un tiempo de viaje inferior a 90 minutos (calculado con trenes cuya velocidad máxima sea 250 km/h), en distancias de hasta 250 km y con velocidades medias de 190 km/h, ya que se puede competir en buenas condiciones con el vehículo privado.
- *Servicios de media distancia convencional*: rutas entre principales localidades, en distancias de hasta 250 km. Con un mayor número de paradas que los servicios de alta velocidad y media distancia y consecuentemente menor velocidad media.
- *Servicios de cercanías*: rutas entre localidades próximas y dentro de grandes ciudades, con distancias medias entre paradas en el rango de 15 a 35 kilómetros y velocidades medias de 50 km/h.

Una vez definidos los servicios es preciso conocer las frecuencias que tendrán cada uno de ellos para poder determinar el número de circulaciones por tramo y elaborar el horario.

Para ello en primer lugar se define, con la experiencia de la explotación de otros servicios de alta velocidad y convencionales en España:

- Los *patrones de frecuencias* a lo largo de la semana, que describen la forma o *perfil* de la distribución de la oferta con independencia de su tamaño.
- Las *pautas de frecuencia* que expresan el valor absoluto de la frecuencia en cada uno de los bloques horarios. Los valores de las frecuencias en los bloques guardan una relación fija, que es la que deriva del patrón de frecuencias.
- La *amplitud del horario*, que se refiere al tiempo que transcurre entre la salida (o llegada) del primer servicio y la salida (o llegada del último). En los servicios que se prestan en horario diurno, típicamente la diferencia entre la primera salida y la última llegada suele ser de hasta 18 horas (primera salida no antes de las 6:00 y última llegada no más tarde las 24:00).

5.4.1.2 Patrones y pautas de frecuencias y distribución de la oferta a lo largo del día

Para la determinación de los horarios es necesario no sólo conocer el número total de los servicios ofertados al día, sino también su distribución a lo largo de la jornada. De la observación del diseño de la oferta de servicios de viajeros existentes en España se pueden derivar cuatro patrones que se corresponden a:

- Servicios de larga distancia con alta frecuencia (más de ocho frecuencias por sentido y día).
- Servicios de larga distancia con baja frecuencia (ocho frecuencias o menos por sentido y día).
- Servicios de media distancia distinguiendo los dos sentidos diferentes de circulación.
- Servicios de cercanías distinguiendo los dos sentidos diferentes de circulación.

En cada uno de los casos, puede analizarse la forma de la distribución del horario a lo largo del día, con independencia del “tamaño” de la oferta. Esta forma, que se puede adaptar homotéticamente a cada uno de los valores absolutos de las frecuencias se denomina *patrón de frecuencias* y está referido a los diversos *días tipo* de la semana (lunes a viernes, sábados y domingos). Las horas que se indican se refieren siempre a la hora de llegada del tren a destino.

Servicios de larga distancia y alta frecuencia

Definición de periodos

En los servicios de largo recorrido y de alta frecuencia (entendiendo como *alta frecuencia* los servicios que tienen más de ocho frecuencias por sentido en día

laborable), se distinguen tres bloques de horarios diferenciados: punta, llano y valle. Dichos periodos se distribuyen dependiendo del día de la semana según se muestra en la Figura 5.35.

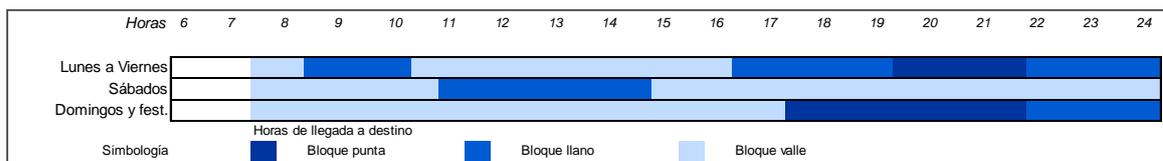


Figura 5.35. Definición de periodos para servicios de larga distancia y alta frecuencia
Fuente: Elaboración propia

Tiempo entre salidas por bloques horarios

La relación de las frecuencias entre los distintos periodos es:

- En Bloque punta, la frecuencia es el doble que en el Bloque llano.
- En el Bloque valle la frecuencia (trenes por sentido y hora) es un 66% de la frecuencia en Bloque llano.

Pautas de frecuencia

Pueden establecerse las siguientes pautas de frecuencia tomando como referencia el periodo entre trenes en el Bloque Llano (que se denomina *Base*):

- *Base 1 hora.*- Hora punta: 2 trenes por hora (un tren cada 30 minutos); Hora llano, 1 tren por hora (un tren cada 60 minutos); Hora valle, 0,66 trenes por hora (un tren cada hora y media).
- *Base 2 horas.*- Hora punta: 1 tren por hora (un tren cada 60 minutos); Hora llano: 0,5 trenes por hora (un tren cada 2 horas); Hora valle: 0,33 trenes por hora (un tren cada 3 horas).
- *Base 30 minutos.*- Hora punta: 4 trenes por hora (un tren cada 15 minutos); Hora llano: 2 trenes por hora (un tren cada 30 minutos); Hora valle: 1,33 trenes por hora (un tren cada 45 minutos).

Servicios de larga distancia y baja frecuencia

Definición de periodos

Los servicios de larga distancia y de baja frecuencia (entendiendo como *baja frecuencia* los servicios que tienen menos de ocho frecuencias por sentido en día laborable o los que teniendo entre ocho y 16 no tienen una gran sensibilidad de la demanda a la frecuencia), tienden a repartirse en días laborables de forma homogénea a lo largo del día durante la amplitud del horario de servicio.

Se considera Bloque llano todo el día en los días laborables, así como la mañana de los sábados y la tarde los domingos. En estos servicios no hay Bloque punta, por lo que se considera Bloque valle la tarde de los sábados y la mañana de los domingos y festivos.

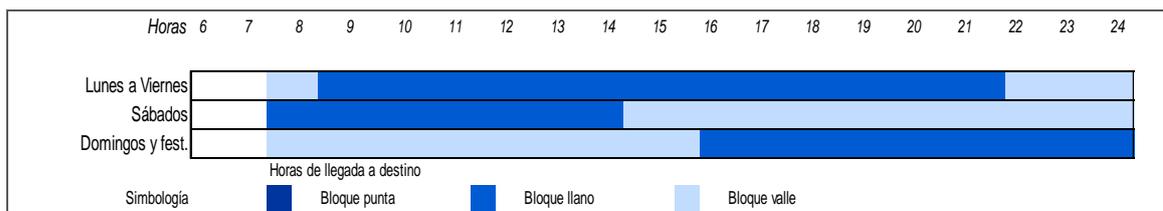


Figura 5.36. Definición de periodos para servicios de larga distancia y baja frecuencia
Fuente: Elaboración propia

Tiempo entre salidas por bloques horarios

La relación de las frecuencias entre los distintos periodos es tal que el periodo entre trenes (tiempo entre salidas) sigue las siguientes reglas:

- En el Bloque valle la frecuencia (trenes por sentido y hora) es un 66% de la frecuencia en periodo llano.
- Como se ha indicado, en este patrón no hay Bloque punta.

Pautas de frecuencia

Puede establecerse la siguiente pauta de frecuencia tomando como referencia el periodo entre trenes en el Bloque llano.

- *Base 2 horas.*- Hora llano: 0,5 trenes por hora (un tren cada 2 horas); Hora valle: 0,5 trenes por hora (un tren cada 2 horas).

Menores frecuencias no tienen base específica regular, se tiende a distribuir uniformemente los trenes a lo largo del día o se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Cuando sólo circula un servicio diario se suele programar por las tardes.
- Si circulan dos servicios diarios uno lo hace por la mañana y otro por la tarde, suprimiéndose los sábados el de la tarde y los domingos el de la mañana.
- Si circulan tres trenes al día lo normal es que se programen por la mañana, a mediodía y por la tarde, suprimiéndose los sábados el de la tarde los domingos el de la mañana.

Servicios de media distancia (alta velocidad y convencional)

Definición de periodos

La distribución de frecuencias en los servicios de media distancia no es simétrica; es decir, la distribución de la frecuencia en un sentido es distinta que en el otro. Por la mañana se concentran especialmente las llegadas a grandes ciudades.

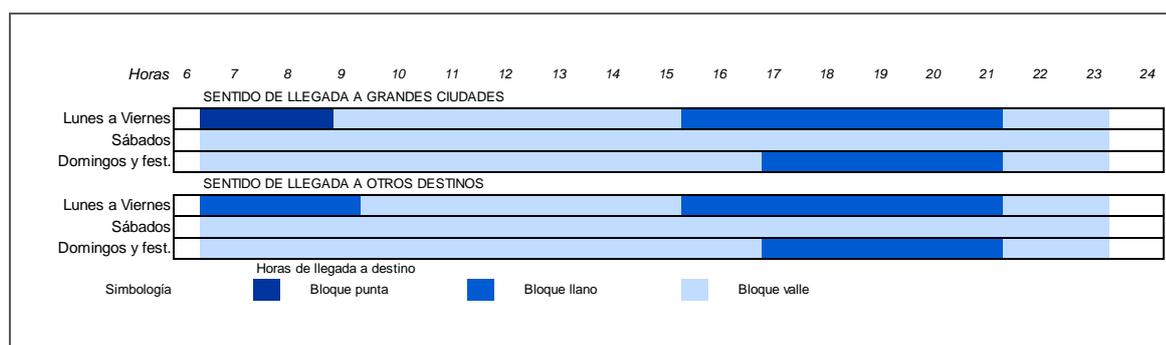


Figura 5.37. Definición de periodos para servicios de media distancia
Fuente: Elaboración propia

Tiempo entre salidas por bloques horarios

La relación de las frecuencias entre los distintos periodos es tal que el periodo entre trenes (tiempo entre salidas) sigue las siguientes reglas:

- En Bloque punta la frecuencia es entre 2,66 y 1,5 veces la del Bloque llano.
- En Bloque valle la frecuencia es el 75% de la frecuencia en el Bloque punta.

Pautas de frecuencia

Pueden establecerse las siguientes pautas de frecuencia tomando como referencia el periodo entre trenes en el Bloque llano.

- **Base 2 horas.-** Hora llano: 0,5 trenes por hora (un tren cada 2 horas); Hora punta: 1 tren por hora; Hora valle: 0,33 trenes por hora (un tren cada 3 horas).
- **Base 1 hora.-** Hora llano: 0,75 tren por hora (un tren cada 45 minutos); Hora punta, 2 trenes por hora (un tren cada 30 minutos); Hora valle: 1 tren por hora.
- Menores frecuencias no tienen base específica regular.

Servicios de cercanías

Definición de periodos

Al igual que ocurre con los servicios de media distancia, la distribución de frecuencias no es simétrica.

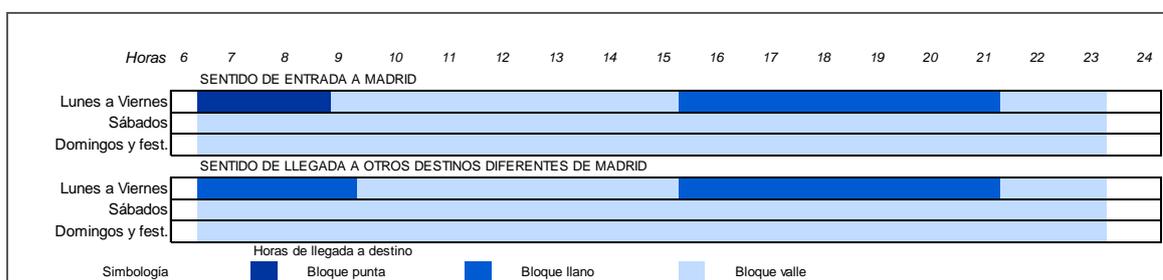


Figura 5.38. Definición de periodos para servicios de cercanías
Fuente: Elaboración propia

Tiempo entre salidas por bloques horarios

La relación de las frecuencias entre los distintos periodos es tal que el periodo entre trenes (tiempo entre salidas) sigue las siguientes reglas:

- En Bloque punta la frecuencia es 1,5 veces la del bloque llano.
- En Bloque valle la frecuencia es el 50% de la frecuencia en el Bloque punta.

Pautas de frecuencia

Pueden establecerse las siguientes pautas de frecuencia tomando como referencia el periodo entre trenes en el Bloque llano.

- **Base 1 hora.-** Hora llano: 1 tren por hora (un tren cada 60 minutos); Hora punta: 2 trenes por hora (un tren cada 30 minutos); Hora valle: 1 tren por hora (un tren cada 60 minutos).
- **Base 20 minutos.-** Hora llano: 3 trenes por hora (un tren cada 20 minutos); Hora punta: 4 trenes por hora (un tren cada 15 minutos); Hora valle: 2 trenes por hora (un tren cada 30 minutos).
- **Base 7,5 minutos.-** Hora llano: 8 trenes por hora (un tren cada 7,5 minutos); Hora punta: 12 trenes por hora (un tren cada 5 minutos); Hora valle: 6 trenes por hora (un tren cada 10 minutos).

5.4.1.3 Patrón y pautas aplicables en cada servicio

Para analizar el uso de la capacidad es preciso tener en cuenta que no es directamente aplicable el número de trenes al año, puesto que los servicios no se reparten uniformemente, como se ha expuesto.

Para la determinación del patrón y pauta aplicable en cada servicio es preciso seguir el siguiente proceso:

1. Se parte del número de *viajeros.kilómetro* esperable al año, proporcionado por los estudios de demanda.
2. El número de *viajeros.kilómetro* al año se divide por el *aprovechamiento* (*viajeros.km/plazas.km*) y se obtienen las *plazas.kilómetro* necesarias al año. El *aprovechamiento* depende del número de paradas (más paradas suponen menos aprovechamiento); y de la estacionalidad del servicio (más estacionalidad, menos aprovechamiento). Rangos de oscilación característicos de los trenes españoles son:
 - Entre el 60 y 70 % para servicios de alta velocidad y larga distancia (hasta 500 km de recorrido medio del viajero);
 - Entre el 55% y el 65% para servicios de alta velocidad y larga distancia (con más de 500 km de recorrido medio del viajero);
 - Entre el 50% y el 60% en servicios de alta velocidad y media distancia.
 - Entre el 25% y el 35% en servicios de media distancia convencional.
 - Entre el 30% y el 40% en servicios de cercanías
3. Las *plazas.kilómetro* al año se dividen por la capacidad de cada composición (su número de plazas), obteniéndose así el número de *composiciones.kilómetro* al año. A su vez, esta cifra se divide por 1,05 y por 1,15 (que son los coeficientes correspondientes a los límites mínimo y máximos normales de los trenes con dos composiciones) obteniéndose así los límites inferior y superior de una banda que comprende el número de *trenes.kilómetro* al año.
4. Los *trenes.kilómetro* al año (ambos extremos de la banda) se dividen por el recorrido medio (en kilómetros) de cada tren, obteniéndose de esta forma la banda del número de trenes al año, y dividiendo esa cifra por 365, se obtiene la banda del número medio de trenes al día.
5. Para obtener las frecuencias en día laborable se multiplica el número de trenes al día por la inversa de la cifra que se obtiene de ponderación de los factores de frecuencia con el número de horas de cada bloque para el tipo de servicio de que se trata y que como puede comprobarse de los datos presentados resultan ser las siguientes:
 - Servicios de larga distancia, alta velocidad y alta frecuencia: 1,031
 - Servicios de larga distancia, alta velocidad y baja frecuencia: 1,037
 - Servicios de media distancia (alta velocidad y convencional): 1,067
 - Servicios de cercanías: 1,054.

Como hipótesis secundaria, se asume que cuando en una ruta haya diversos servicios la demanda de la ruta se reparte en proporción al número de servicios considerando una ponderación de 0,5 para los servicios no principales.

Con estas operaciones se consigue, para cada servicio tipo, una banda de frecuencias en día laborable medio. Para la determinación del *patrón* y *pauta* aplicables se procede de la forma que se expone seguidamente:

Servicios de larga distancia

Si la banda de frecuencia está por encima de ocho, se aplica el patrón de *alta frecuencia*, y para valores por debajo de ocho se aplica el de *baja frecuencia*. Si el valor de ocho frecuencias está dentro de banda, se aconseja aplicar el patrón de alta frecuencia en los años iniciales (ello supondría inicialmente un coeficiente bajo de refuerzos, pero ofrece una mejor posibilidad de crecimiento por aumento de refuerzos y por cambio de la pauta).

Dentro de este patrón ($F > 8$) pueden aplicarse las siguientes pautas:

- Para valores menores de 12 frecuencias, base 2 horas.
- Para valores entre 12 y 23 frecuencias, base 1 hora.
- Para valores mayores de 23 frecuencias en día laborable medio, base 30 minutos, considerando que si la sensibilidad a la frecuencia es baja no es necesario alcanzar dicha cifra.

Y dentro del patrón de baja frecuencia ($F < 8$):

- Menos de cinco frecuencias, no hay pauta aplicable
- Entre cinco y ocho frecuencias, se aplica la pauta de base 2 horas.

Servicios de media distancia

Para los servicios de media distancia, se aplica el patrón correspondiente, y dentro de él, las siguientes pautas:

- Si las frecuencias en día laborable medio son menos de ocho, se aplica la pauta de base 2 horas.
- Si las frecuencias en día laborable medio son más de ocho se aplica la pauta de base 1 hora.

Servicios de cercanías

Para los servicios de cercanías, se aplica su patrón con las siguientes pautas:

- Si las frecuencias en día laborable medio son menores de 20, se aplica la pauta de base 1 hora.
- Si las frecuencias están entre 20 y 40, se aplica la pauta de base 30 minutos.
- Para valores mayores de 40, se aplica la pauta de base 7,5 minutos.

5.4.2 Agrupación de orígenes-destinos en trenes

Una ruta origen-destino no suele explotarse de forma aislada con respecto a la demás, sino que en los mismos trenes suelen encaminarse viajeros con diferentes orígenes y destinos, e incluso varios orígenes-destinos pueden fraccionarse para realizar trayectos combinados enlazados entre sí. Por ello el siguiente paso consiste en agrupar las frecuencias determinadas para cada trayecto en trenes. Para cada tren será necesario especificar su origen, destino y paradas intermedias y la posibilidad de realizar servicios sinergiados si procede.

Se entiende por servicio *sinergiado* aquel que se realizan conjuntamente con otros servicios diferentes, empleando el mismo vehículo y destinando a dicho fin un número determinado de plazas. Por ejemplo, Renfe Viajeros ofrece plazas de Avant sinergiadas en la relación Barcelona-Figueras en trenes AVE Madrid-Figueras.

Una vez agrupados los diferentes orígenes-destinos en trenes se realiza una matriz de circulaciones por tramos y bloques horarios (punta, llano y valle) para cada periodo temporal para los que se ha definido la oferta. Con dicha matriz se determina la

capacidad máxima requerida, teniendo en cuenta que las puntas de los diferentes tipos de servicios no tienen por qué coincidir.

5.4.3 *Generación de variantes de infraestructura y horarios*

Conocida la capacidad máxima demandada por tramos es el momento de diseñar variantes o diseños alternativos de la infraestructura, considerando las dimensiones espacial y temporal, es decir, contemplando la escalabilidad en el diseño, la localización del tramo en la red y, si procede, la coexistencia de la red convencional. Cada variante costará de una o varias fases, cada una de las cuales quedará definida por el número de vías en cada uno de los tramos con tráfico homogéneo, localización y planta de vías de apartaderos, estaciones y puestos de banalización y situación en la que queda la línea convencional en caso de existir.

Para evitar desmontajes al pasar de una fase a otra es conveniente realizar un proceso de diseño “de adelante hacia atrás”, es decir, determinar primero el diseño final de la infraestructura y a partir de éste ir obteniendo el diseño de las fases anteriores por supresión de elementos.

Para cada variante de infraestructura y para cada fase de una variante se definen los horarios conforme al siguiente procedimiento:

1. *Determinación de marchas mínimas*: con la ayuda de una herramienta de simulación se calculan las marchas mínimas, es decir, los tiempos de viaje sin considerar paradas técnicas, paradas comerciales y márgenes.
2. *Determinación de los tiempos de parada comercial*: a las marchas mínimas hay que añadir los tiempos de parada comercial que típicamente son de 120 segundos en servicios de larga distancia, 60 segundos en servicios de media distancia y 30 segundos en cercanías. En caso de programarse correspondencias entre servicios los tiempos de parada deben ser mayores para permitir a los viajeros con enlace realizar el trasbordo. Si se desea realizar un cálculo más preciso de los tiempos de parada comercial puede seguirse el procedimiento definido en (García Álvarez et al., 2008). La relevancia de la determinación óptima de los tiempos de parada comercial es analizada en (González Franco y García Álvarez, 2010)
3. *Inclusión de márgenes de regularidad*: conforme a lo establecido por la ficha UIC 451-1 (UIC, 2010).
4. *Posicionamiento de los trenes en el gráfico horario*: manteniendo el cadenciamiento de cada servicio y considerando las restricciones impuestas por la disponibilidad de vías en estaciones y las correspondencias, si las hay. En esta fase también hay que determinar la posición de los cruces en infraestructuras de vía única y adelantamientos en caso de coexistir servicios con diferentes velocidades máximas, considerando la prioridad de cada tipo de servicio y evitando diferencias significativas en los tiempos de viaje de ambos sentidos de circulación.

Si en este proceso se observa un incremento significativo de los tiempos de viaje por paradas comerciales intermedias o retrasos programados, es necesario volver a aplicar el modelo de reparto modal.

Una vez se han definido los horarios es conveniente generar perturbaciones de diferente tipo (extensión del tiempo de parada, extensiones del tiempo de viaje en diferentes secciones de la línea y retraso en la incorporación desde otra línea) e introducirlas en el horario conforme a distribuciones de probabilidad empíricas. Se genera a continuación un número suficiente de réplicas perturbadas de los horarios originales como para obtener resultados fiables y estables y se obtiene el retraso medio por tren por diferencia con los tiempos de viaje originales. Este valor será utilizado en la evaluación socioeconómica en el capítulo de ahorro de tiempos de viaje.

5.4.4 Evaluación socioeconómica de las variantes de infraestructura

Para cada una de las variantes de infraestructura generadas se realiza la evaluación socioeconómica y se calcula el VAN social.

Para incorporar la incertidumbre existente en la predicción de la demanda debe sustituirse el valor determinista de la demanda por su distribución de probabilidad. Cada valor de dicha distribución de demanda conducirá a un VAN social diferente y el conjunto de valores dará lugar a la distribución de probabilidad del VAN social que se empleará para comparar las diferentes variantes de infraestructura y seleccionar la más adecuada.

5.5 SÍNTESIS

En este capítulo se han presentado los aspectos técnicos referidos al diseño de una línea de alta velocidad en las dos dimensiones: temporal y espacial.

En la dimensión temporal se aborda el estudio de la escalabilidad del diseño para permitir adecuar el ritmo de inversión a la demanda y minimizar de este modo el riesgo económico en el que se incurre. Para ello se han presentado y analizado desde el punto de vista de la capacidad y los tiempos de viaje, los diferentes diseños que se pueden adoptar desde una vía única con apartaderos convencionales hasta una vía doble en su totalidad, pasando por soluciones que permiten el cruce dinámico de trenes y otras de alternancia de vía única y doble. Este análisis ha permitido demostrar la escasa utilidad de la vía única convencional en alta velocidad y que la vía única con apartaderos dinámicos es una solución adecuada cuando los niveles de tráfico esperados no son muy elevados.

En la dimensión espacial se considera la localización y función de cada tramo de la línea en la red y qué hacer en el caso de que ya exista una línea convencional. Se ha desarrollado un análisis de capacidad y tiempos de viaje que junto con la clasificación de tramos de líneas de alta velocidad en troncales y periféricos ha permitido concluir que en los tramos troncales con un elevado tráfico de alta velocidad es necesario independizar la alta velocidad de los servicios convencionales; en las secciones con bajo tráfico de alta velocidad ya sea por tratarse de tramos periféricos o al principio del ciclo de vida de la infraestructura es posible que circulen trenes de alta velocidad y convencional juntos siempre y cuando la infraestructura se adapte para tráfico mixto, ello supone una reducción de los tiempos de viaje de los servicios convencionales sin que los de alta velocidad se vean afectados.

Una vez analizadas ambas dimensiones se ha propuesto una metodología que permite abordarlas de manera conjunta con los aspectos socioeconómicos. La metodología consta de cuatro fases:

1. Análisis del número y distribución de los servicios a partir de los datos de demanda estimada.
2. Agrupación de orígenes-destinos en trenes
3. Generación de variantes de infraestructura y horarios
4. Evaluación socioeconómica de las variantes de infraestructura

Para garantizar la idoneidad de la metodología propuesta es conveniente aplicarla a un caso práctico.

6. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO BIDIMENSIONAL A UN CASO EJEMPLO



LAV Ourense-Santiago-Coruña

6 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO BIDIMENSIONAL A UN CASO EJEMPLO

El objetivo del presente capítulo es aplicar la metodología de diseño bidimensional de líneas de alta velocidad a un caso ejemplo tomado de la realidad de la red ferroviaria española.

Es importante reseñar que no se pretende realizar un estudio informativo ni una completa evaluación socioeconómica que requerían de abundante y detallada información, sino una aproximación sencilla para constatar la validez y aplicabilidad de la metodología propuesta.

6.1 PRESENTACIÓN DEL CASO EJEMPLO

Se ha elegido como caso ejemplo la definición de una nueva línea de alta velocidad que enlace las capitales gallegas de Ourense y Lugo pasando por Monforte de Lemos. Las razones que han motivado la selección de este caso ejemplo son:

- Se trata de una línea española, ya que todas las cifras de costes que se han aportado son características de España. Ello no significa que la metodología propuesta, con las necesarias adaptaciones, no sea aplicable a otros países.
- Es una línea que no está ni en operación ni en fase de diseño o construcción, ya que no se pretende enmendar el trabajo de los excelentes profesionales que trabajan en el desarrollo de la red de alta velocidad española.
- La línea tiene una longitud suficiente para analizar diferentes configuraciones de vías sin ser excesivamente larga lo hace que sea un caso manejable.
- Responde a una demanda social ya que de las cuatro capitales gallegas Lugo es la única que no dispone de alta velocidad (elCorreoGallego.es, 2014; eldiario.es, 2015). Además, la localidad de Sarria, ubicada a 30 kilómetros de Lugo, registra un elevado número de peregrinos cada año ya que es el punto de inicio mínimo para recorrer los últimos 100 kilómetros del Camino de Santiago francés y ganar así la Compostelana.
- En la línea actual coexisten trenes de viajeros de media y larga distancia con trenes de mercancías, lo cual enriquece el caso práctico.

6.1.1 Características del trazado actual

La línea convencional Ourense-Monforte-Lugo tiene una longitud total de 116,9 kilómetros. Se pueden diferenciar dos tramos principales:

- *Ourense-Monforte*: de 46 kilómetros de longitud, perteneciente a la línea 810 (Monforte-Vigo). Vía única electrificada a 3 kV cc.
- *Monforte-Lugo*: de 70,9 kilómetros de longitud, perteneciente a la línea 800 (Palencia-La Coruña). Vía única no electrificada.

En Ourense enlaza con la línea de alta velocidad Ourense-Santiago de Compostela-A Coruña, con la línea convencional que se dirige a Vigo y con la convencional hacia Zamora. En Monforte enlaza con la línea convencional hacia León y en Lugo se prolonga hacia Betanzos-Infesta donde se bifurca para llegar a A Coruña y Ferrol.

La velocidad máxima de circulación en la línea es de 160 km/h. A causa de las características geométricas pueden identificarse cuatro secciones críticas:

- La primera a la salida de Ourense y hasta el kilómetro 37. En este tramo no se superan los 85 km/h.
- La segunda entre los kilómetros 60,2 y 78, también con una velocidad máxima de 85 km/h.

- La tercera entre los kilómetros 87,5 y 99,3 con limitaciones de 80 km/h y 95 km/h.
- Finalmente, la última sección a la entrada de Lugo desde el kilómetro 106,3, con limitaciones a 95 y 90 km/h.

En 2015, y después de varios años paradas, el Ministerio de Fomento ha retomado las obras de la Variante de Puebla de San Julián, de 7,20 km de longitud en las inmediaciones del municipio del mismo nombre y cuya estación se localiza en el kilómetro 93,93. La variante está diseñada para doble vía, aunque inicialmente se montará vía única. Esta actuación solucionará la problemática de la tercera sección crítica identificada.

En la Figura 6.1. puede apreciarse lo sinuoso del trazado en las zonas mencionadas.

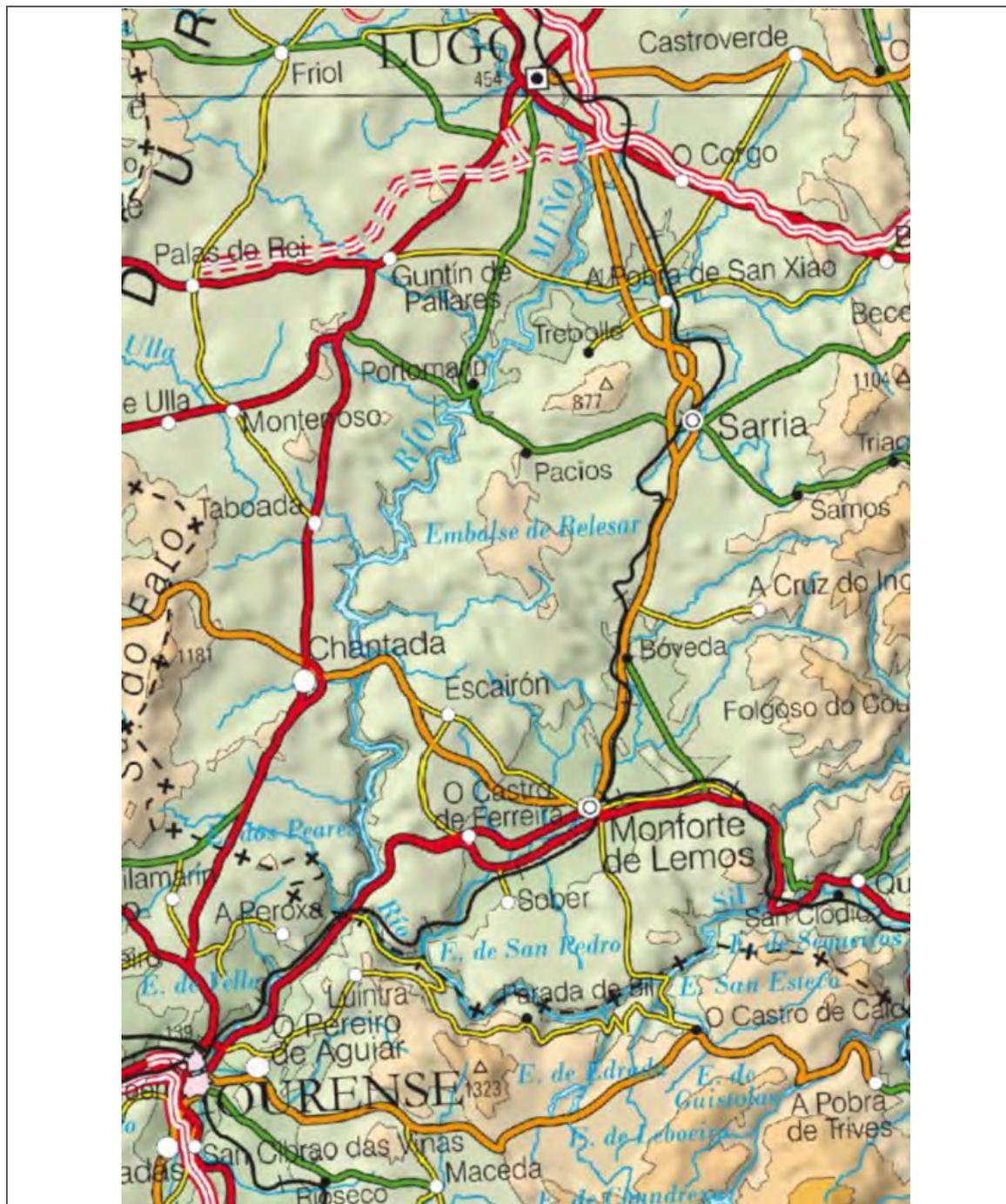


Figura 6.1. Trazado actual de la línea Ourense-Monforte-Lugo (línea negra en el mapa) - Fuente: Cartografía raster del Instituto Geográfico Nacional

En cuanto al trazado en alzado, la rampa máxima entre Ourense y Monforte es de 18 mm/m y entre Monforte y Lugo de 23 mm/m.

En la Figura 6.2. se muestra el cuadro de velocidades máximas y el perfil longitudinal de la línea.

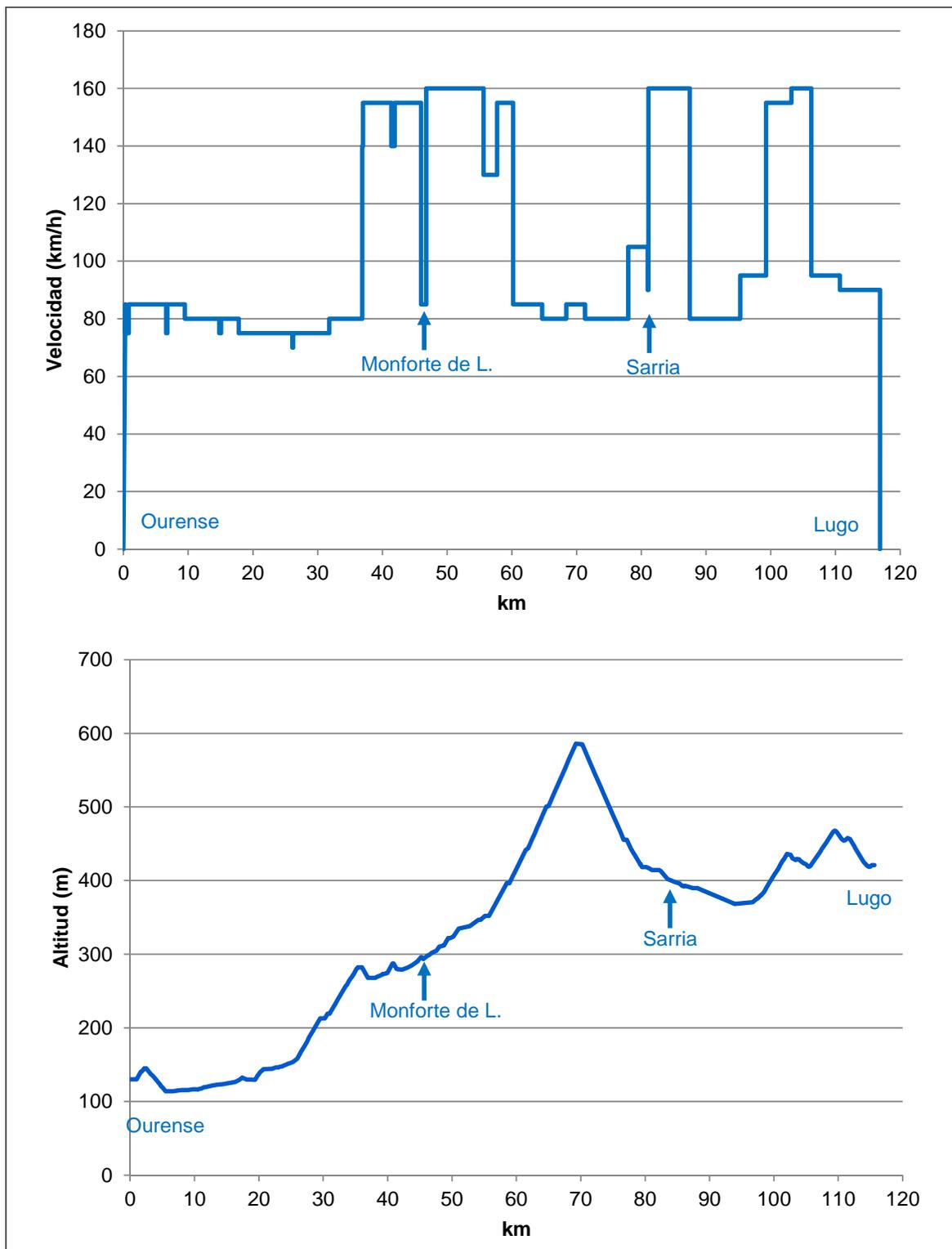


Figura 6.2. Cuadro de velocidades máxima de la línea convencional Ourense-Monforte-Lugo
Fuente: Elaboración propia

El tiempo de viaje actual de los trenes de viajeros, con parada en Monforte y Lugo es de 1 hora y 42 minutos y la velocidad media con paradas es de 68,7 km/h.

6.1.2 Servicios actuales

La línea actual es empleada tanto por trenes de viajeros (larga y media distancia) como de mercancías. En la Figura 6.3, que representa la densidad de tráfico de cada tramo, puede apreciarse como el número de circulaciones semanales es mayor entre Ourense y Monforte que entre Monforte y Lugo.

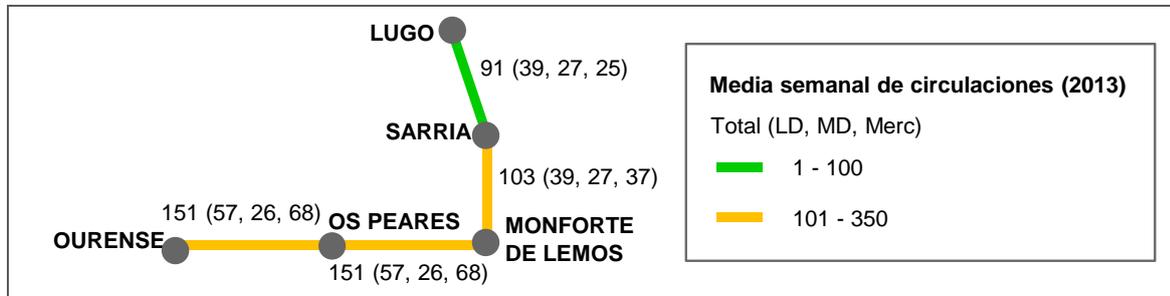


Figura 6.3. Media de circulaciones semanales por tramos en 2013
Fuente: Elaboración propia a partir de (Adif, 2014)

En la Figura 6.4. se muestra el mapa de la comunidad gallega y los servicios de viajeros que en 2015 emplean algún tramo de la línea en estudio.

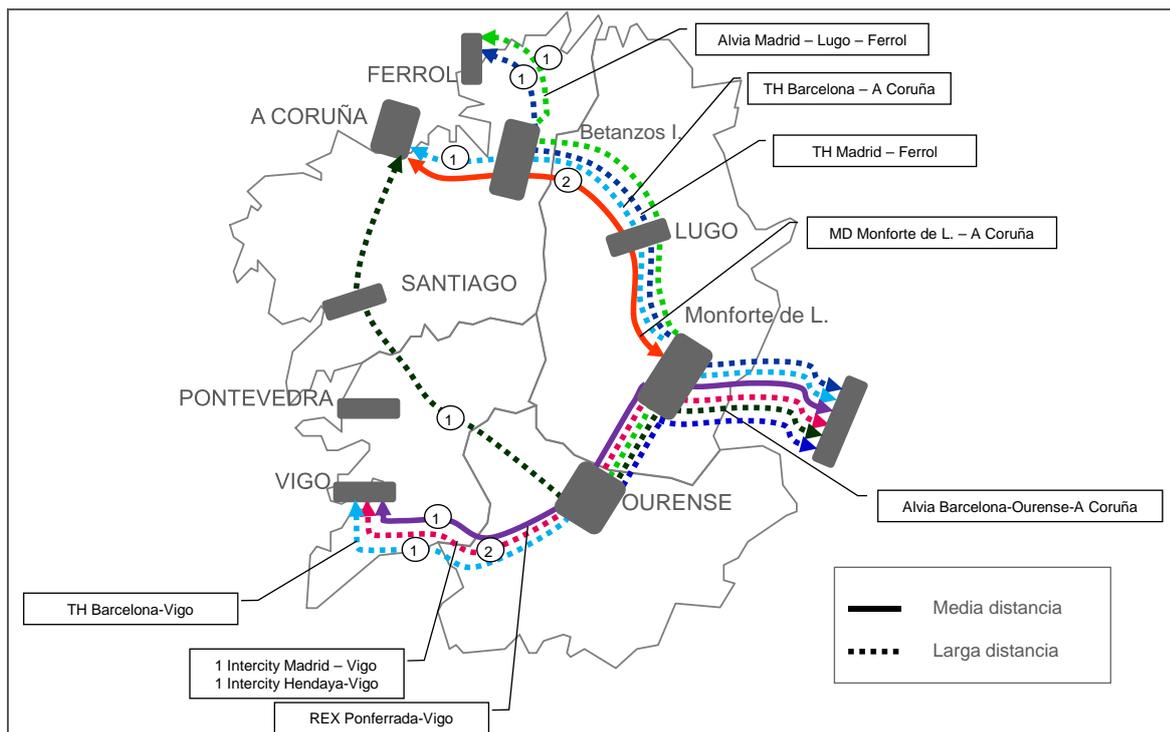


Figura 6.4. Mapa de servicios de viajeros en abril de 2015
Fuente: elaboración propia

Los servicios de larga distancia son:

- Relaciones con Madrid:
 - Alvia Madrid-Lugo-Ferrol (por Zamora): 1 tren/sentido y día
 - Trenhotel Madrid-Lugo-Ferrol (por León): 1 tren/sentido y día
 - Intercity Madrid-Vigo (por León): 1 tren/sentido y día

- Relaciones con Cataluña:
 - Alvia Barcelona-A Coruña (por Santiago): 1 tren/sentido y día
 - Trenhotel Barcelona-Monforte-A Coruña/Vigo: 1 tren/sentido y día
- Relaciones con País Vasco:
 - Intercity Hendaya-Vigo: 1 tren/sentido y día

Los servicios de media distancia son:

- Regional Express Vigo-Ponferrada: 1 tren/sentido y día
- Media Distancia Monforte-A Coruña: 2 trenes/sentido y día

Respecto a los tráficos de mercancías parece razonable clasificar los servicios atendiendo al tramo de la línea en estudio que utilizan ya que como se ha mostrado en la Figura 6.3 existen diferencias significativas en cuanto a número de trenes por semana. En una semana tipo de 2015 los servicios semanales por sentido son:

- Tramo Ourense-Monforte:
 - Zaragoza-Vigo: 3 trenes
 - La Llagosta- As Gandaras: 1 tren
 - Monforte-A Susana: 2 servicio
 - Monforte-As Gandaras: 4 trenes
 - Trasona-Vigo: 2 trenes
 - Valença do Miño-Lugo: 1 tren
- Tramo Monforte-Lugo
 - Monforte-Ferrol: 3 trenes
 - Valença do Miño-Lugo: 1 tren

6.1.3 **Demanda de viajeros actual**

Entre Ourense y Lugo existen nueve dependencias de circulación que permiten la subida y bajada de viajeros. Sin embargo, sólo las estaciones Monforte, Sarria y Lugo tienen un volumen de viajeros significativo (Figura 6.5).

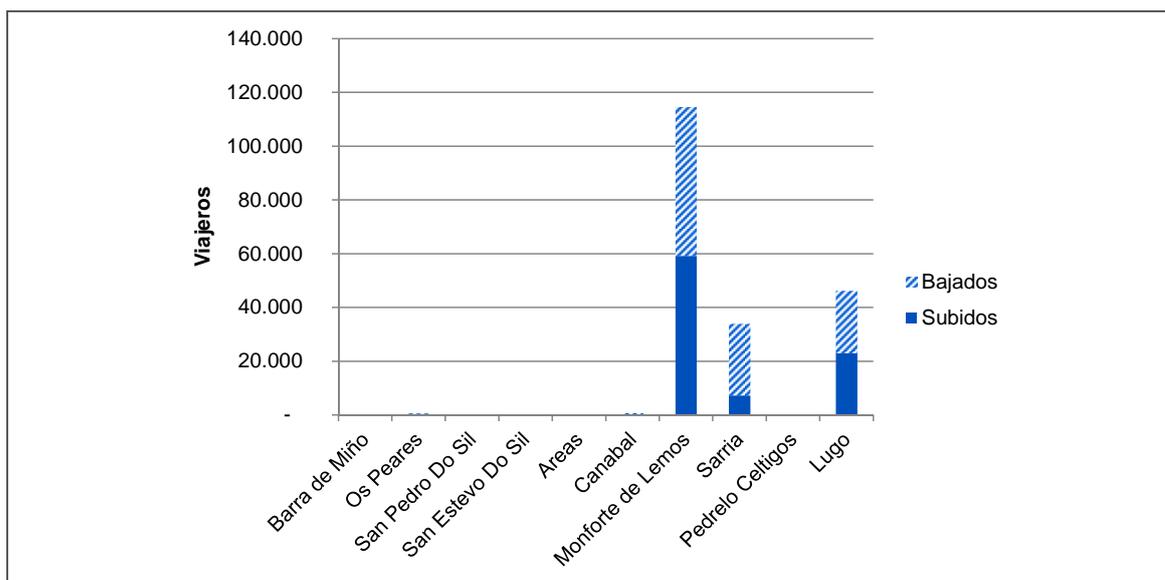


Figura 6.5. Viajeros subidos y bajados en las estaciones entre Ourense y Lugo en 2014 - Fuente: Elaboración propia con datos no oficiales

6.1.3.1 Modelos para la estimación de la demanda global y reparto modal

Los datos de los que se dispone son la demanda de ferrocarril para el año 2014, con suficiente nivel de detalle y la demanda global y reparto modal en la relación interprovincial Madrid-Lugo. Es por ello por lo que se opta por desarrollar un modelo de demanda sencillo que se calibra con los datos disponibles y que posteriormente podrá ser empleado para analizar la influencia de los cambios en la oferta al implantarse la línea de alta velocidad.

Se plantea un modelo de generación y distribución de viajes de tipo gravitacional:

$$v_{ij} = \frac{P_i \cdot P_j}{D_{ij}^\alpha} \quad (6.1)$$

Siendo:

- v_{ij} el número de viajeros entre las zonas i y j .
- P_i la población de la zona de origen.
- P_j la población de la zona de destino.
- D_{ij} la distancia en línea recta entre las zonas i y j .
- α el parámetro de ajuste del modelo.

Para las relaciones de larga distancia se considera la población de las provincias origen y destino, excepto para la relación Madrid-Ferrol que se emplea la población del área metropolitana de Ferrol para independizarla del resto de relaciones de Madrid con localidades de la provincia de A Coruña. En las relaciones de media distancia se considera la población de los municipios.

Para estimar el reparto modal se plantea un modelo logit basado en la formulación del coste generalizado que se presentó en el apartado 4.1.2.

$$P_k = \frac{e^{(-\lambda \cdot CG_k)}}{\sum_k e^{(-\lambda \cdot CG_k)}} \quad (6.2)$$

6.1.3.2 Relaciones de larga distancia

Con los modelos presentados se estima la demanda global y el reparto modal para las principales relaciones de larga distancia afectadas por el tramo Ourense-Lugo en 2014 (Tabla 6.1).

Tabla 6.1. Demanda y estimación del reparto modal para las relaciones de LD en 2014

LD 2014	Demanda	% coche	% bus	% tren	% avión
Madrid-Ferrol	151.156	70%	15%	16%	0%
Madrid-Lugo	568.635	78%	16%	6%	0%
Barcelona-A Coruña	818.455	30%	1%	2%	67%
Barcelona-Lugo	90.208	33%	29%	38%	0%
Barcelona-Ourense	70.624	44%	12%	43%	0%
Barcelona-Pontevedra	418.182	44%	3%	3%	50%
Guipúzcoa-A Coruña	95.834	79%	12%	9%	0%
Guipúzcoa-Lugo	40.742	85%	9%	6%	0%
Guipúzcoa-Ourense	31.142	73%	16%	11%	0%
Guipúzcoa-Pontevedra	68.539	80%	14%	6%	0%

Fuente: Elaboración propia

Entre 2015 y 2016 está prevista la puesta en servicio de varios tramos de alta velocidad que afectan a las relaciones consideradas:

- *Eje Atlántico Santiago de Compostela-Vigo*: permitirá reducir el tiempo de viaje de los servicios de larga distancia que llegarán a Pontevedra por Santiago de Compostela en lugar de Guillarei, la reducción se estima en 1 hora y 27 minutos.
- *Medina del Campo-Ourense*: se calcula que el tiempo de viaje entre Madrid y Ourense se reducirá a 3 horas a 250 km/h.

Por ello, se estima la demanda en 2016 para las relaciones de larga distancia, considerando el crecimiento de la demanda global asociado a la variación interanual del PIB, la disminución del coste generalizado y su efecto en el reparto modal y la demanda inducida. Se supone un incremento del precio del billete del 4,2% para las relaciones en las que se reduce el tiempo de viaje.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.2. La demanda global y la cuota del tren incluyen la inducción.

Tabla 6.2. Demanda y estimación del reparto modal para las relaciones de LD en 2016

LD 2016	Demanda	% coche	% bus	% tren	% avión
Madrid-Ferrol	169.090	61%	13%	26%	0%
Madrid-Lugo	670.193	63%	13%	24%	0%
Barcelona-A Coruña	874.902	30%	1%	2%	67%
Barcelona-Lugo	96.429	33%	29%	38%	0%
Barcelona-Ourense	75.495	44%	12%	43%	0%
Barcelona-Pontevedra	454.228	42%	3%	6%	48%
Guipúzcoa-A Coruña	102.444	79%	12%	9%	0%
Guipúzcoa-Lugo	43.551	85%	9%	6%	0%
Guipúzcoa-Ourense	33.289	73%	16%	11%	0%
Guipúzcoa-Pontevedra	74.869	76%	13%	11%	0%

Fuente: Elaboración propia

6.1.3.3 Relaciones de media distancia

Con los modelos presentados se estima la demanda global y el reparto modal para las relaciones de media distancia afectadas por el tramo Ourense-Lugo en 2014 (Tabla 6.3).

Las relaciones de media distancia consideradas no se verán afectadas por la puesta en servicio de nuevos tramos de alta velocidad previos a la línea de alta velocidad en estudio.

Tabla 6.3. Demanda y estimación del reparto modal para las relaciones de MD en 2014

<i>MD 2014</i>	<i>Demanda</i>	<i>% coche</i>	<i>% bus</i>	<i>% tren</i>	<i>% avión</i>
<i>Ourense-Monforte</i>	41.075	55%	15%	30%	0%
<i>Ourense-Sarria</i>	49.573	95%	3%	3%	0%
<i>Ourense-Lugo</i>	79.321	69%	29%	2%	0%
<i>Ourense-Ferrol</i>	38.333	94%	3%	3%	0%
<i>Monforte-Sarria</i>	25.903	45%	32%	23%	0%
<i>Monforte-Lugo</i>	47.171	44%	34%	21%	0%
<i>Monforte-A Coruña</i>	30.687	53%	2%	46%	0%
<i>Monforte-Ferrol</i>	8.156	78%	1%	20%	0%
<i>Vigo-Monforte</i>	32.477	71%	1%	27%	0%
<i>Vigo-Ponferrada</i>	22.857	76%	3%	22%	0%
<i>Ourense-Ponferrada</i>	25.020	74%	2%	24%	0%

Fuente: Elaboración propia

6.2 DESARROLLO DEL CASO EJEMPLO

El caso ejemplo se desarrolla conforme a la metodología de diseño bidimensional de líneas de alta velocidad presentada en el Capítulo 5.

6.2.1 Hipótesis

Se enumeran a continuación las hipótesis que se tienen en cuenta para el desarrollo del caso ejemplo:

- Se considera que la construcción de la línea se realiza entre 2016 y 2020, siendo el año de inicio de la explotación 2021.
- Se supone un crecimiento interanual del PIB del 2,5%.
- Se supone constante la oferta de los modos competidores.
- Para la determinación del periodo de evaluación se considera que siempre tienen que transcurrir en torno a 30 años desde la puesta en servicio de la última fase de construcción. Por tanto, si alguna de las variantes de infraestructura propuesta se realiza en dos o más fases su periodo de evaluación atendiendo a esta hipótesis es el utilizado para todas las variantes.
- La asignación de inversiones, costes e ingresos de cada servicio es proporcional a la parte utilizada de la línea estudiada.

6.2.2 Definición de la situación de referencia (sin proyecto)

Se define a continuación la oferta de servicios de viajeros y mercancías en la situación de referencia y que no coincide con la oferta actual de Renfe, pues se realizan algunas adaptaciones que se consideran necesarias para mejorar el servicio.

6.2.2.1 Servicios de viajeros

Para la situación sin proyecto se considera la demanda que se ha estimado para 2016 con la apertura de los nuevos tramos de alta velocidad incrementada en función del PIB para obtener la demanda en cada año del ciclo de vida.

Se propone un nuevo esquema de servicios con múltiples enlaces entre los servicios de larga y media distancia para incrementar el número de frecuencias a Lugo y en general mejorar las conexiones ferroviarias en la comunidad gallega.

- Relaciones de larga distancia con Madrid:
 - Alvia Madrid-Lugo-Ferrol
 - Alvia Madrid-A Coruña/Vigo que enlaza en Ourense con MD Ourense-Lugo
 - Intercity Madrid-Vigo (por Guillarei) que enlaza en Ourense con MD Ourense-Lugo
- Relaciones de larga distancia con Cataluña:
 - Alvia Barcelona-A Coruña/Vigo (por Santiago) que enlaza en Monforte con MD Ourense-Lugo
- Relaciones de larga distancia con País Vasco:
 - Alvia Hendaya-A Coruña/Vigo (por Santiago) que enlaza en Monforte con MD Ourense-Lugo
- Relaciones de media distancia convencional:
 - Regional Express Vigo-Ponferrada (por Guillarei)
 - MD Ourense-Lugo

Con respecto a la oferta actual los servicios de Media Distancia Monforte-A Coruña se sustituyen por Media Distancia Ourense-Monforte-Lugo para permitir enlaces en Ourense. Estos servicios conectarán en Lugo con nuevos Media Distancia Lugo-A Coruña.

En cuanto al aprovechamiento que se fija como objetivo para definir las plazas ofertadas y consecuentemente las frecuencias, debe hacerse una reflexión. En los trenes provenientes de Madrid se registra una bajada significativa del aprovechamiento a partir de Ourense, el aprovechamiento medio del tren es del 40% y sin embargo en el tramo Sarria-Lugo se reduce a la mitad (Figura 6.6). El tramo de máxima ocupación es Chamartín-Segovia donde el aprovechamiento alcanza el 70%. Por tanto, el aprovechamiento objetivo en el tramo de estudio se fijará de manera orientativa manteniendo la actual relación entre el aprovechamiento medio entre Madrid y Ourense y el aprovechamiento medio del tramo de estudio.

Las frecuencias de los servicios de media distancia Ourense-Lugo están determinadas por el número de enlaces que deben facilitar con los trenes de larga distancia.

El resto de servicios se dimensionarán atendiendo a los aprovechamientos medios característicos de cada tipo de servicio.

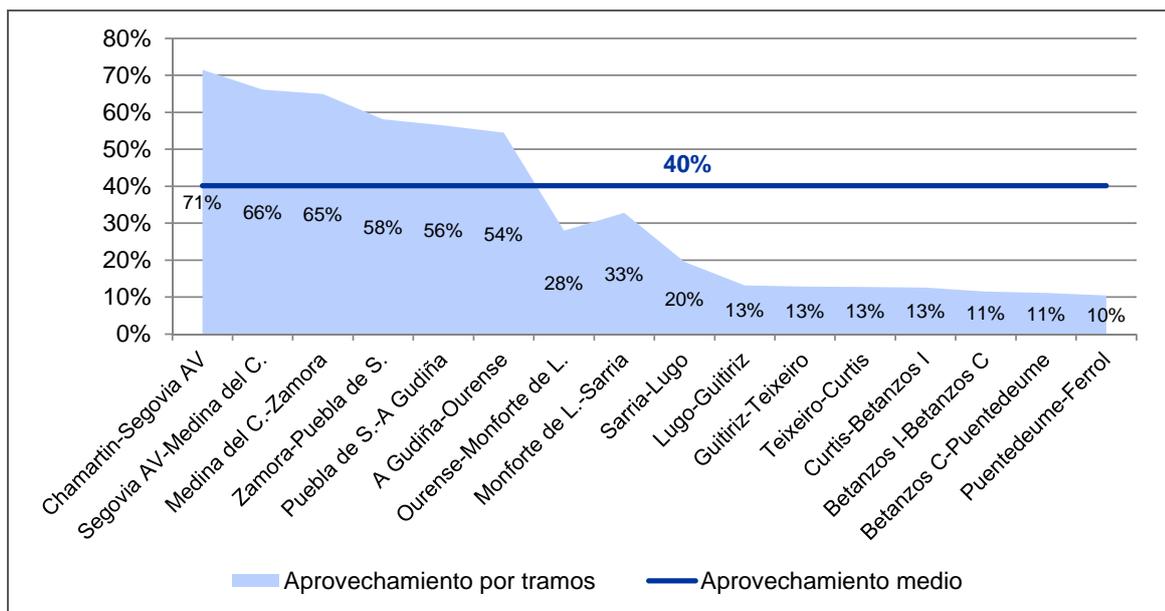


Figura 6.6. Aprovechamiento por tramos y medio del Alvia Madrid-Lugo-Ferrol
Fuente: Elaboración propia

6.2.2.2 Servicios de mercancías

Basada en la oferta actual se define la siguiente oferta diaria:

- Tramo Ourense-Monforte:
 - 4 trenes/sentido y día
- Tramo Monforte-Lugo:
 - 1 tren/sentido y día

Además, un tren por sentido y día recorrerá la línea completa, como el actual València do Miño-Lugo.

No se prevén variaciones de la demanda durante el ciclo de vida de la infraestructura.

6.2.3 Situación con proyecto. Estimación de la demanda

Como se ha indicado en el apartado 6.1.3 los volúmenes de demanda actuales justifican la existencia de estaciones en los municipios de Monforte de Lemos, Sarria y Lugo.

Se realiza una primera estimación de los tiempos de viaje de los trenes de viajeros en vía doble (Tabla 6.4), considerando los tiempos de parada y el margen de regularidad pero sin perturbaciones ni interacciones entre servicios.

Tabla 6.4. Reducción de los tiempos de viaje con la línea de alta velocidad (servicios de viajeros)

	Tiempo actual	Tiempo con LAV	Reducción	% Reducción
Ourense-Monforte	0:39	0:12	0:26	68%
Monforte-Lugo	0:51	0:23	0:27	54%
Ourense-Lugo	1:32	0:37	0:54	59%

Fuente: Elaboración propia

Para cada relación de larga distancia se realiza un análisis de sensibilidad de la demanda al tiempo de viaje, considerando el tiempo en línea de alta velocidad de vía doble e incrementándolo un 5%, 10%, 15% y 20%. Los resultados se comparan con la demanda sin línea de alta velocidad (Figura 6.7). Se observa como la relación más sensible al tiempo de viaje es Madrid-Lugo. El resto de relaciones experimentan en mayor o menor medida un incremento de la demanda con la línea de alta velocidad, pero no presentan una sensibilidad significativa a las variaciones del tiempo de viaje.

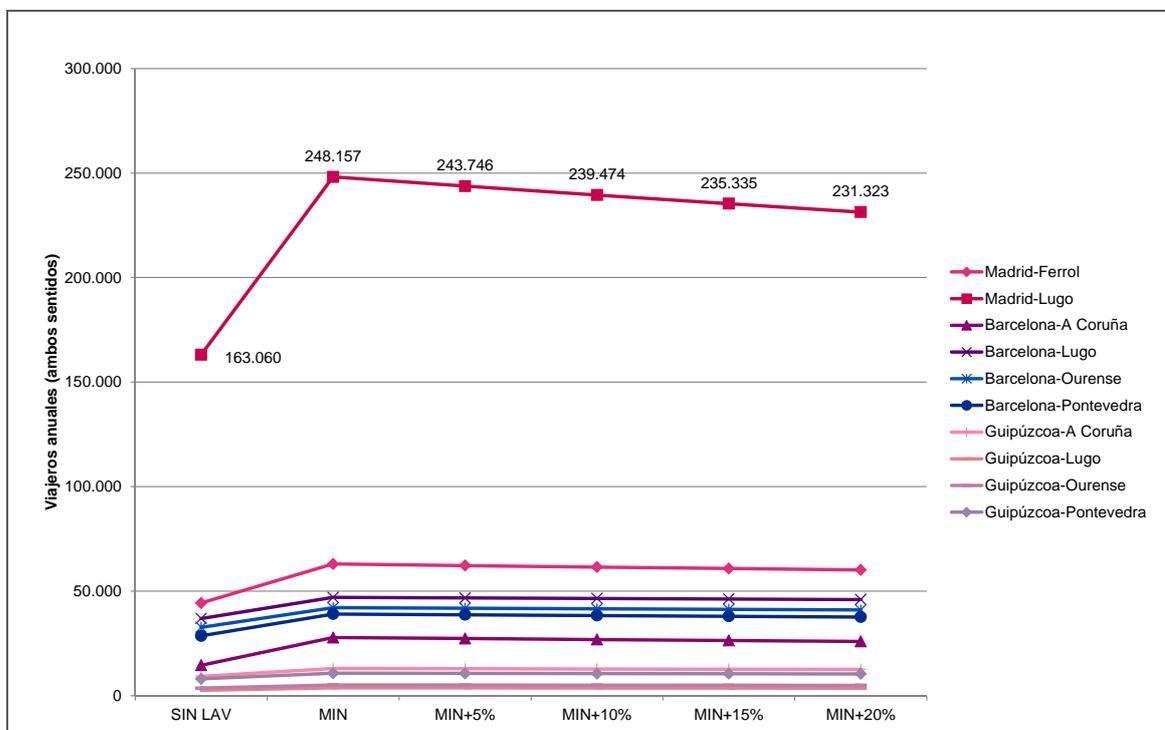


Figura 6.7. Sensibilidad de la demanda al tiempo de viaje en las relaciones de larga distancia - Fuente: Elaboración propia

No se analiza la sensibilidad de la demanda al número de frecuencias puesto que se prevén servicios de larga distancia y baja frecuencia, no superándose en ningún caso cuatro frecuencias diarias. El modelo de estimación de la demanda está diseñado para limitar el tiempo máximo de disponibilidad del servicio a 100 minutos para no penalizar a los modos que oferten menos de cuatro frecuencias diarias.

Para los servicios de mercancías se estiman las reducciones de tiempo de viaje que se muestran en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5. Reducción de los tiempos de viaje con la línea de alta velocidad (servicios de mercancías)

	Tiempo actual	Tiempo con LAV	Reducción	% Reducción
Ourense-Monforte	0:40	0:22	0:18	45%
Monforte-Lugo	1:02	0:39	0:23	37%
Ourense-Lugo	1:42	1:01	0:41	40%

Fuente: Elaboración propia

6.2.4 Situación con proyecto. Definición de la oferta ferroviaria

Se definen a continuación los servicios de viajeros y mercancías para la situación con proyecto.

6.2.4.1 Servicios de viajeros

Para determinar el número de servicios de larga distancia que enlazarán Madrid con Lugo debe tenerse en cuenta que dentro de la red de alta velocidad española la línea Ourense-Lugo tiene una posición periférica. Desde Madrid parte un tronco común hasta Valladolid que da acceso a Galicia, Asturias, Cantabria y País Vasco. A su vez la rama de Galicia se ramifica en dos al llegar a Ourense, una rama se dirige a Santiago de Compostela donde se separan los tramos que dan acceso a Vigo y A Coruña y la otra a Lugo y Ferrol.

El tratarse de un tramo periférico y siendo su tramo troncal compartido por tanto destinos finales condiciona el número de servicios que pueden programarse desde Madrid con destino Lugo y aún en el hipotético caso de que la demanda de Lugo fuera muy elevada el número de frecuencias estaría limitado por los surcos disponibles entre Madrid y Valladolid.

Respecto a los trenes de larga distancia que enlazan Cataluña y el País Vasco con Galicia, el elevado tiempo de viaje, que en el mejor de los casos podría estar en torno a 11 horas y 45 minutos entre Barcelona y Lugo y 7 horas y 50 minutos entre San Sebastián y Lugo, imposibilitan programar más de un servicio diurno al día.

Por lo anteriormente expuesto, tanto en las conexiones con Madrid como con Cataluña y País Vasco se prevén servicios de larga distancia y baja frecuencia.

Se propone mantener la oferta ferroviaria que se ha definido para la situación de referencia, adaptando el número de frecuencias conforme a la evolución de la demanda en el periodo de evaluación y doblando las composiciones cuando sea necesario.

Los servicios de viajeros y sus frecuencias son:

- Relaciones de larga distancia con Madrid:
 - Alvia Madrid-Lugo-Ferrol: 1 tren/sentido y día, pasando a 2 trenes/sentido y día en 2038 y 3 trenes/sentido y día en 2045
 - Alvia Madrid-A Coruña/Vigo que enlaza en Ourense con MD Ourense-Lugo: 2 trenes/sentido y día
 - Intercity Madrid-Vigo (por Guillarei) que enlaza en Ourense con MD Ourense-Lugo: 1 tren/sentido y día
- Relaciones de larga distancia con Cataluña:
 - Alvia Barcelona-A Coruña/Vigo (por Santiago) que enlaza en Monforte con MD Ourense-Lugo: 1 tren/sentido y día
- Relaciones de larga distancia con País Vasco:
 - Alvia Hendaya-A Coruña/Vigo (por Santiago) que enlaza en Monforte con MD Ourense-Lugo: 1 tren/sentido y día
- Relaciones de media distancia convencional:
 - Regional Express Vigo-Ponferrada (por Guillarei): 1 tren/sentido y día, pasando a 2 trenes/sentido y día en 2038.
 - MD Ourense-Lugo: 4 trenes/sentido y día.

No se incrementa la oferta de Alvia Madrid-A Coruña/Vigo que enlaza en Ourense con MD Ourense-Lugo para que dichos trenes puedan atender el incremento de demanda de Ourense, Santiago, A Coruña, Pontevedra y Vigo.

En cuanto al material rodante, se supone autopropulsado híbrido serie Renfe 730 para el Alvia Madrid-Lugo-Ferrol, serie Renfe 130 para el resto de servicios Alvia y serie Renfe 121 para los servicios Intercity, Regional Express y Media Distancia. El material rodante seleccionado permite circular a 250 km/h en la línea objeto de estudio.

6.2.4.2 Servicios de mercancías

Se considera la misma oferta diaria que se ha definido para la situación sin proyecto:

- Tramo Ourense-Monforte:
 - 4 trenes/sentido y día
- Tramo Monforte-Lugo:
 - 1 tren/sentido y día

Además 1 tren por sentido y día recorrerá la línea completa, como el actual Valençia do Miño-Lugo.

6.2.5 Situación con proyecto. Definición de variantes de infraestructura

Para la definición de variantes de infraestructura se realiza primero una caracterización del nuevo trazado. También se tiene en cuenta que el volumen de tráfico esperado en el tramo Ourense-Monforte es superior al del tramo Monforte-Lugo.

6.2.5.1 Características del nuevo trazado

Para la definición del nuevo trazado se parte de la declaración de impacto ambiental del proyecto de Nueva línea de alta velocidad Orense-Monforte-Lugo, publicada en el Boletín Oficial del Estado en 2009 (RSECC/MARM, de 22 de diciembre de 2008). Aunque la solución planteada en dicho estudio permite circular a velocidad máxima de 220 km/h, para realizar una primera aproximación con un nivel de detalle suficiente como para estimar los costes de construcción es adecuada.

La línea se divide en 9 tramos y en función del porcentaje de túneles y viaductos estimado en cada uno de ellos se determina la tipología del terreno, diferenciando llano, ondulado y montañoso (Tabla 6.6). Los tramos 4 y 5, de entrada y salida a Monforte de Lemos que se prevé que discurran en el ámbito urbano se han calificado como falso ondulado, aunque por relieve sean llanos para considerar el sobrecoste de la integración urbana.

El tramo 8. Variante Puebla de S.J. no se incluye ya que en 2015 las obras están en ejecución.

La longitud estimada de túneles es de 17,265 kilómetros de los cuales, con una longitud superior a cinco kilómetros se identifican dos: en el tramo 2 de 8,750 kilómetros de longitud y en el tramo 6 de 5,325 kilómetros. La longitud estimada de viaductos es de 0,775 kilómetros.

Tabla 6.6. Identificación de tramos y tipos de terrenos en la línea de alta velocidad Ourense-Lugo

Tramo	km ini	km fin	Long.	Tipo de terreno
1. Ourense - Os Peares	0,0	18,1	18,1	Llano
2. Os Peares - Inicio Var. Canabal	18,1	28,3	10,2	Montañoso
3. Variante de Canabal	28,3	30,3	2,0	Llano
4. Final Var. Canabal - Monforte de Lemos	30,3	39,7	9,4	Falso ondulado
5. Monforte de L. - Inicio Var. Rubián	39,7	53,5	13,8	Falso ondulado
6. Variante de Rubián	53,5	66,2	12,7	Ondulado
7. Final Var. Rubián - Inicio Var. Puebla de S. J.	66,2	78,6	12,4	Llano
8. Variante Puebla de S. J.	78,6	85,8	7,2	No incluido
9. Final Var. Puebla de S.J. - Lugo	85,8	104,5	18,7	Llano
TOTAL			104,5	

Fuente: Elaboración propia

6.2.5.2 Variantes de infraestructura

Conocidos los volúmenes de tráfico y las características del trazado se definen tres variantes de infraestructura:

- *Variante 1:* línea de alta velocidad en vía doble en la totalidad del recorrido dedicada para el tráfico de viajeros, manteniéndose la línea convencional para los tráficos de mercancías.
- *Variante 2:* línea de alta velocidad apta para tráfico mixto, de vía doble entre Ourense y Monforte y vía única entre Monforte y Lugo. La línea convencional se cierra.
- *Variante 3:* línea de alta velocidad apta para tráfico mixto, en una primera fase se pone en servicio vía única en la totalidad del recorrido y cuando la demanda lo justifique se procede a la duplicación del tramo Ourense-Monforte. La línea convencional se cierra desde el principio.

La Variante 1 sería la que se realizaría siguiendo los criterios de diseño que se han empleado en el desarrollo de la red de alta velocidad española.

Las variantes 2 y 3 son conformes a las reflexiones aportadas en esta tesis doctoral sobre las dimensiones espacial y temporal. Dado que se trata de una sección periférica con un tráfico de viajeros de larga distancia limitado por los tramos troncales de la red y un tráfico de media distancia que no es muy elevado se opta por diseñarlo para tráfico mixto y cerrar la línea convencional. La Variante 2 se ejecuta en una única fase sin embargo en la Variante 3 se opta por un diseño escalable para minimizar el riesgo, siendo el diseño final en ambos casos el mismo.

Se estima que la duplicación de vía del tramo Ourense-Monforte en la alternativa 3 debe entrar en servicio en el año 2038, que es cuando aumenta el número de frecuencias de algunos de los servicios de viajeros.

Para permitir la circulación de trenes de mercancías en las infraestructuras en las que se contempla el tráfico mixto se dota una de las vías de tercer carril.

El resumen de las variantes de infraestructura propuestas se muestra en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7. Resumen de variantes de infraestructura propuestas para la línea de alta velocidad Ourense-Lugo

<i>Variante de infraestructura 1</i>		Fase 1	
Tramo Ourense-Monforte	LAV	VD dedicada	
	Convencional	en servicio	
Tramo Monforte-Lugo	LAV	VD dedicada	
	Convencional	en servicio	
<i>Variante de infraestructura 2</i>		Fase 1	
Tramo Ourense-Monforte	LAV	VD mixta	
	Convencional	cerrada	
Tramo Monforte-Lugo	LAV	VU mixta	
	Convencional	cerrada	
<i>Variante de infraestructura 3</i>		Fase 1	Fase 2
Tramo Ourense-Monforte	LAV	VU mixta	VD mixta
	Convencional	cerrada	cerrada
Tramo Monforte-Lugo	LAV	VU mixta	VU mixta
	Convencional	cerrada	cerrada

Fuente: Elaboración propia

En las infraestructuras de tráfico mixto a fin de no incrementar los costes de construcción se plantea inicialmente mantener la rampa máxima empleada en líneas de alta velocidad dedicadas y que los trenes de mercancías empleen doble tracción para que su velocidad en rampa no se reduzca excesivamente y minimizar la afección a los trenes de viajeros.

Sin embargo, se realiza la simulación de marchas con una locomotora y se observa que la reducción de velocidad más significativa se produce en las inmediaciones de Sarria donde llega a bajar a 63 km/h (Figura 6.8) y dado que el tramo Monforte-Lugo tiene una densidad de tráfico baja no se detectan afecciones a los trenes de viajeros. Por ello finalmente se opta por tracción simple.

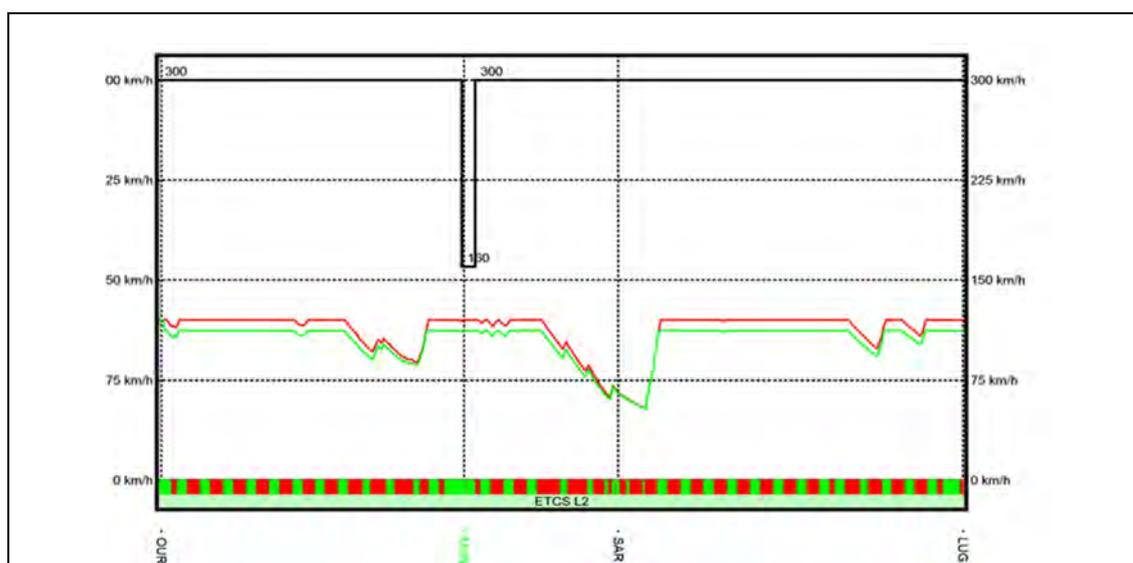


Figura 6.9 Simulación de marcha de tren de mercancías con tracción simple

Fuente: Elaboración propia

Se muestra a continuación (Figura 6.10) la malla final de servicios planteada, en la que se incluyen todos los trenes, considerando los incrementos de la oferta del Alvia Madrid-Lugo-Ferrol y del Regional Express Vigo-Ponferrada que se han mencionado.

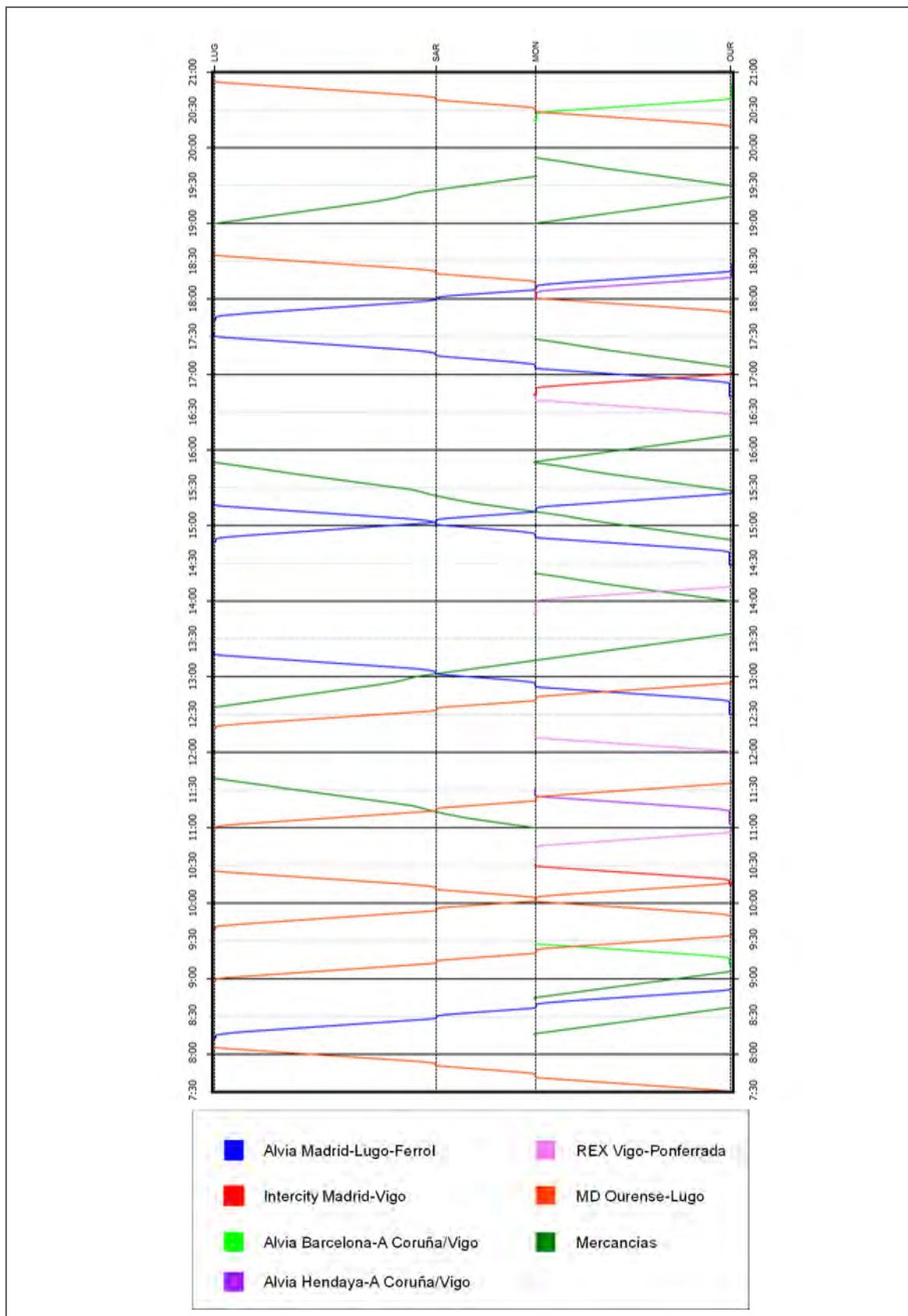


Figura 6.10. Malla de la línea de alta velocidad de vía doble, situación final
Fuente: Elaboración propia

6.2.6 Evaluación socioeconómica

Una vez estimada la demanda y conocida su sensibilidad al tiempo de viaje y definidos el horario y las tres variantes de infraestructura se procede a la evaluación socioeconómica de las mismas. Por discreción se opta por mantener los resultados numéricos confidenciales.

Los tiempos de viaje considerados en vía única se corresponden al tiempo mínimo incrementado un 15% para los servicios de viajeros y un 25% para los de mercancías para contemplar un margen de regularidad mayor y los retrasos que se pueden producir. Los tiempos de viaje en vía doble son los tiempos mínimos incrementados en un 5% para considerar los retrasos que se pueden producir.

El periodo de evaluación queda determinado por la alternativa 3. Las obras se ejecutan en dos fases, la primera en el periodo 2016-2020 y la segunda en el periodo 2033-2037, la evaluación se extiende hasta 2045, transcurriendo 32 años desde la puesta en servicio de la segunda fase.

Ninguna de las alternativas analizadas proporciona resultados socioeconómicos positivos, lo cual parece lógico por el limitado impacto comercial que tendrían las referidas actuaciones y la población potencialmente afectada. Ello no significa que no deba hacerse nada para mejorar la oferta ferroviaria de la relación Ourense-Monforte-Lugo. La orientación más conveniente podría ser la realización de algunas variantes locales (posiblemente en vía única), para superar las limitaciones del trazado clásico en algunas secciones, tal como se menciona en la Figura 6.2. dado que cualquier otra actuación parecería desproporcionada.

La inversión en infraestructura en la Variante 1 es superior por tratarse de vía doble. La inversión en infraestructura en la alternativa 3 es superior a la de la alternativa 2 por ser un diseño escalable, sin embargo, al posponerse una parte de la inversión el valor actualizado es inferior.

La Variante 1 es la que tiene mayores costes de mantenimiento de infraestructura pues debe mantenerse la vía doble de alta velocidad y la vía única convencional. En las variantes 2 y 3 la menor proporción de vía doble en alta velocidad, así como el cierre de la línea convencional suponen una reducción significativa de los costes de mantenimiento.

Los costes del operador ferroviario de viajeros son muy similares en las tres variantes pues las diferencias en los tiempos de viaje no son significativas.

Los costes del operador de mercancías se han estimado con la herramienta *PlanCargoRail* (Martín Cañizares et al., 2010). Se aprecia una diferencia importante entre la Variante 1 y las variantes 2 y 3, ello es debido principalmente a la considerable reducción de los tiempos de viaje, así como a la sustitución de las locomotoras diésel en el tramo Monforte-Lugo por locomotoras eléctricas.

Los ingresos procedentes del tráfico de viajeros engloban los ahorros de tiempo, accidentes, costes de operación de otros modos y costes ambientales, así como los ingresos tarifarios exclusivamente del tráfico inducido. Dichos ingresos son similares en las tres variantes pues como se ha mostrado en la Figura 6.7, la demanda no es muy sensible a pequeñas variaciones del tiempo de viaje.

Los ingresos procedentes del tráfico de mercancías comprenden solamente los ahorros de tiempo, costes de operación y costes ambientales, ya que no se contemplan variaciones del reparto modal ni incrementos de tráfico. En este concepto es en el que se registran mayores diferencias entre la Variante 1 y las variantes 2 y 3. El pasar los tráficos de mercancías de la línea convencional a la de alta velocidad supone unos ahorros importantes en costes de operación y tiempos de viaje, así mismo los costes ambientales se reducen pues en el tramo Monforte-Lugo las locomotoras diésel son sustituidas por eléctricas.

6.3 SÍNTESIS

En este capítulo se ha aplicado la metodología de diseño bidimensional a un caso ejemplo tomado de la realidad de la red ferroviaria española, la línea Ourense-Monforte-Lugo.

Queda demostrada la aplicabilidad de la metodología propuesta, así como de las pautas de diseño que se propusieron en el Capítulo 5.

Para no complicar en exceso el caso ejemplo no se ha incorporado en la evaluación la incertidumbre asociada a la predicción de la demanda, pero aun así los resultados son suficientemente ilustrativos.

Dado que la línea estudiada ocupa una posición periférica en la red y que el volumen de tráfico de viajeros no es muy elevado es viable tanto técnica como económicamente la transferencia de los tráficos de mercancías de la línea convencional a la de alta velocidad. Ello supone una mejora significativa de los ingresos, así como la eliminación de los costes de mantenimiento de la línea convencional. El diseño de una vía única entre Monforte y Lugo, sección en la que el tráfico es menor, supone la reducción de los costes de construcción y mantenimiento de infraestructura, sin que la demanda de viajeros sufra importantes cambios ya que no muestra gran sensibilidad a pequeñas variaciones del tiempo de viaje.

7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN



Estación de Figueres Vilafant (LAV Madrid-Barcelona-F. francesa)

7 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

7.1 CONCLUSIONES

Las conclusiones de esta tesis pueden resumirse en cinco puntos claves en el diseño eficiente de la configuración en planta de líneas de alta velocidad:

1. Dos dimensiones a considerar en el diseño
2. Coste de la flexibilidad
3. Idoneidad de la vía única en alta velocidad
4. Tráfico convencional en líneas de alta velocidad
5. Interrelación entre los costes y óptimo global

Dos dimensiones a considerar en el diseño.- En general las líneas de alta velocidad se planifican desde un principio para atender elevados volúmenes de tráfico incurriendo en el riesgo de que la demanda prevista no se alcance hasta muy avanzado el ciclo de vida de la infraestructura o que por razones estructurales o por las incertidumbres propias de la demanda no llegue a alcanzarse. Dicho sobredimensionamiento, aunque sea temporal, supone un sobrecoste y asignación ineficiente de los recursos económicos.

Por ello en esta tesis se han identificado y analizado en detalle las dos dimensiones que deben considerarse al diseñar una nueva línea de alta velocidad:

- *Dimensional temporal:* los requerimientos de capacidad de una línea de alta velocidad no son constantes a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura, por lo general la tendencia es creciente, pero existen múltiples incertidumbres. Por ello la dimensión temporal comprende el estudio de la escalabilidad del diseño, de manera que la capacidad ofertada sea acorde a la demanda y evolucione con ésta, evitándose así sobrecostes.
- *Dimensión espacial:* no todas las líneas e incluso no todas las secciones de una línea tienen la misma funcionalidad en una red ferroviaria. Los patrones de tráfico, volúmenes de demanda y los requisitos de velocidad, difieren de unas secciones a otras y por tanto también el equipamiento debe ser diferente y adaptado a las condiciones particulares. Por otra parte, en ocasiones las nuevas líneas de alta velocidad se plantean para enlazar poblaciones que hasta la fecha disponían de línea convencional, con el objetivo de reducir los tiempos de viaje y en estos casos es necesario decidir qué hacer con la línea preexistente. Ambas cuestiones se engloban en la dimensión espacial.

Coste de la flexibilidad.- La flexibilidad supone un sobrecoste inicial que a la larga puede llevar a mejoras importantes en los resultados económicos del proyecto. Supóngase por ejemplo una línea de alta velocidad con plataforma para vía doble (a excepción de los túneles) sobre la que en principio sólo se monta una vía pensando en la posibilidad de montar la segunda vía en el futuro si las cifras de demanda son favorables. Esta solución minimiza el riesgo en caso de que la demanda prevista inicialmente no se alcance, permite adelantar la puesta en servicio y retrasar la imputación de costes financieros y amortizaciones al momento en que los ingresos por tráfico sean mayores y por tanto el balance sea más favorable.

El análisis de costes de construcción realizado ha permitido estimar el coste de la flexibilidad. La ratio que relaciona el coste de vía doble con el coste de vía única que posteriormente se amplía a doble ($VD/VU+VU$) es para la infraestructura sin viaductos ni túneles en terreno montañoso de 0,55, para los túneles dependiendo de la calidad del terreno oscila entre 0,79 y 0,83, para el montaje de vía de 1 para balasto y 0,4 para

placa, para la línea aérea de contacto de 0,88 y para los sistemas de seguridad y comunicaciones de 0,7.

Idoneidad de la vía única en alta velocidad.- A lo largo del desarrollo de esta tesis la idoneidad de la vía única en alta velocidad ha sido un debate abierto en círculos profesionales que incluso ha alcanzado a la opinión pública. Frente a los que la consideran la panacea para llevar la alta velocidad hasta el último rincón de España están los que la califican como “AVE de segunda división”.

Si algo ha puesto de manifiesto esta tesis es que pretender aplicar soluciones y criterios generales al diseño de una línea de alta velocidad no es adecuado y que cada línea concreta requiere un estudio pormenorizado de sus condicionantes. En todo caso, la pregunta no debería ser “¿Es la alta velocidad factible en vía única?” sino “Alta velocidad en vía única: ¿cómo, cuándo y dónde?”.

Las numerosas simulaciones que se han llevado a cabo en esta tesis para evaluar diferentes casuísticas, combinando diversas configuraciones de vías, tipologías de tráfico y niveles de capacidad demandados han permitido extraer algunas conclusiones de interés

- Cuando el tráfico es homogéneo:
 - Las configuraciones en vía única con apartaderos convencionales sólo son factibles con niveles de tráfico muy bajos (un tren por hora y sentido) pues en el resto de los casos o no es posible encontrar horarios o los incrementos de tiempo de viaje experimentados no son asumibles en servicios de alta velocidad.
 - Los tiempos de viaje en vía única con apartaderos convencionales cuando sólo circula un tren por hora y sentido mejoran al reducirse la distancia entre apartaderos de 40 kilómetros a 20 kilómetros, pero no se observan mejoras al ubicarlos cada 10 kilómetros. Sin embargo, es de suponer que una reducción de la distancia entre apartaderos siempre suponga una mejora de la respuesta ante incidencias y retrasos.
 - Las configuraciones en vía única con apartaderos dinámicos reducen notablemente los incrementos de tiempo de viaje con respecto a la vía única convencional. Los incrementos de tiempo son reducidos y asumibles en servicios de alta velocidad. Estas configuraciones permiten programar uno o dos trenes por hora y sentido.
 - El comportamiento de una configuración en la que se alterne vía única y doble es igual que el de la vía única con apartaderos dinámicos cuando el tráfico es de uno o dos trenes por hora y sentido y tiene la ventaja de permitir tres trenes por hora y sentido en algunos casos.
 - En las configuraciones de vía única es posible programar tres trenes por hora y sentido cuando la distancia entre apartaderos es de 10 kilómetros, pero el incremento del tiempo de viaje obtenido no es adecuado para alta velocidad. No es posible programar más de dos trenes por hora y sentido en el resto de las variantes de vía única y en la alternancia de vía única y doble.
- Cuando el tráfico es heterogéneo:
 - La vía única no es una solución adecuada porque en general no es posible encontrar horarios y, cuando lo es, el incremento de tiempo es elevado.
 - Las configuraciones de vía única con apartaderos dinámicos y alternancia de vía única y doble permiten programar un tren de 300 km/h y uno de 250 km/h por hora y sentido con un incremento muy reducido del tiempo de viaje, pero siempre en batería.

- No es posible programar más de dos trenes por hora y sentido en cualquiera de las variantes de vía única y en la alternancia de vía única y doble.

Tráfico convencional en líneas de alta velocidad.- En la actualidad las líneas de alta velocidad en España están dedicadas a tráfico de viajeros que alcanzan velocidades máximas entre 200 km/h y 310 km/h, a excepción del tramo Barcelona-Figueras en el que circulan también tráfico de mercancías. La circulación de trenes de mercancías en líneas de alta velocidad es desde los orígenes una cuestión controvertida dadas las múltiples implicaciones técnicas y económicas, que en cualquier caso exceden el alcance de esta tesis. Sí se ha analizado este tema desde el punto de vista de la capacidad al igual que la circulación de servicios convencionales de viajeros como pudieran ser cercanías y regionales.

El análisis realizado es relevante dado que suele ser habitual que una nueva línea de alta velocidad enlace poblaciones que con anterioridad disponían de línea convencional y por tanto se plantea la cuestión de qué hacer con dicha línea preexistente y con los tráfico que por ella circulaban.

Tras analizar múltiples casuísticas empleando para ello técnicas de simulación, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- En las secciones con un elevado tráfico de alta velocidad es necesario independizar la alta velocidad de los servicios convencionales, empleando infraestructuras dedicadas. Esta situación es característica de los tramos troncales.
- En las secciones dedicadas con un elevado tráfico de alta velocidad por lo general será necesario disponer de vía doble.
- En las secciones con bajo tráfico de alta velocidad es posible que circulen trenes de alta velocidad y convencionales de manera conjunta en una infraestructura adecuada para tráfico mixto. Esta situación es característica de tramos periféricos y también puede darse en tramos troncales al principio del ciclo de vida de la infraestructura.
- En las secciones con bajo tráfico de alta velocidad operar dos vías únicas dedicadas, desde el punto de vista de tiempos de viaje, no resulta la mejor opción. Es preferible optar por vía doble de alta velocidad para tráfico mixto que permite reducir los tiempos de viaje de los servicios convencionales sin que los tiempos de viaje de los servicios de alta velocidad se vean incrementados con respecto a una infraestructura de alta velocidad dedicada.

Interrelación entre los costes y óptimo global.- La vía doble puede suponer una reducción de los tiempos de viaje respecto a la vía única y por tanto un incremento de la demanda y consecuentemente de los ingresos, así como una reducción de los costes del operador por tren y de los costes externos. También puede darse el caso de que la reducción del tiempo de viaje no tenga un efecto significativo en la demanda si esta es muy inelástica. Cada caso concreto requiere un análisis detallado que permita determinar si esa ganancia de tiempo compensa el incremento de la inversión en infraestructuras. Se trata por tanto de encontrar el óptimo que maximice el beneficio global.

En algunos casos una línea de alta velocidad convenientemente adaptada puede permitir, cuando existe previamente una línea convencional, transferir los tráfico de la misma a la nueva línea y consecuentemente cerrar la antigua. En esta situación es necesario valorar si económicamente el sobrecoste en el que se incurre en la construcción de la línea de alta velocidad se ve compensado por los ahorros de costes de mantenimiento y operación de la convencional.

Todo ello apunta a la necesidad de disponer de modelos de demanda convenientemente calibrados, así como de realizar los análisis coste-beneficio (ACB) considerando las incertidumbres para diferentes alternativas de diseño de la infraestructura tal y como se ha enunciado en esta tesis.

7.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El diseño escalable de líneas de alta velocidad ha sido abordado en esta tesis desde la perspectiva de los costes de construcción y los tiempos de viaje. Sería conveniente estudiar e incluir en los análisis de rentabilidad la incidencia en la operación de la ejecución de obras de ampliación de la capacidad (limitaciones temporales de velocidad, cortes totales o parciales del servicio, transbordos por carretera...). También en relación con el diseño escalable sería interesante determinar qué elementos deben dimensionarse desde un principio para minimizar las afecciones posteriores o reducir el incremento de costes asociado a la escalabilidad (enclavamientos, cableado...).

Tanto en la dimensión temporal como en la espacial se han realizado numerosas simulaciones suponiendo condiciones normales de operación. Los análisis podrían enriquecerse estudiando el comportamiento en condiciones degradadas, considerando diferentes incidencias (avería de un desvío, detención de un tren en la línea, incremento del tiempo de parada...) y su probabilidad de ocurrencia. Este análisis sería de gran utilidad para determinar la posición de puestos de banalización en vía doble y apartaderos tanto en vía única como doble con el objeto de aumentar la fiabilidad.

En las simulaciones realizadas se han fijado como hipótesis los márgenes para la recuperación de retrasos, pero sería interesante realizar un análisis en profundidad para determinar el margen óptimo en líneas de vía única. La metodología a emplear podría basarse en la definida por (Lindfeldt, 2012) para vía doble.

No en pocas ocasiones los *cuellos de botella* son las plantas de vías de las estaciones, piénsese por ejemplo en Madrid-Puerta de Atocha, pese a la adaptación de todas sus vías al ancho internacional, o Barcelona-Sants. No es un campo inexplorado pues son numerosos los trabajos particularmente de investigadores italianos (Corazza y Musso, 1987; De Vita, Giovine y Ricci, 2002; Florio y Mussone, 1996; Franceschini y Malavasi, 2003; Losa, 2000) pero sería conveniente particularizar el análisis a estaciones de alta velocidad y ponerlo en relación con la capacidad del resto de la línea.

La circulación de mercancías en alta velocidad supone en mayor o menor medida una reducción de los tiempos de viaje y consecuentemente de los costes del operador. Al igual que se ha hecho para el tráfico de viajeros debería analizarse la repercusión de dichas mejoras en la cuota modal del ferrocarril.

8. BIBLIOGRAFÍA



Trenes s102 estacionados en Málaga-María Zambrano (LAV Córdoba-Málaga)

8 BIBLIOGRAFÍA

- ABC. (2009). *Adif licita el mantenimiento del AVE por más de 16 millones para cuatro años*. Disponible en: http://www.abc.es/hemeroteca/historico-03-02-2009/abc/Nacional/adif-licita-el-mantenimiento-del-ave-por-mas-de-16-millones-para-cuatro-a%C3%B1os_912872235976.html
- Adif. (2008a). *IGP 10.5. Criterios sobre el límite de expropiación*. Instrucciones y recomendaciones para la redacción de proyectos de plataforma. España: Adif.
- Adif. (2008b). *IGP 3.2. Trazados tipo*. Instrucciones y recomendaciones para la redacción de proyectos de plataforma. España: Adif.
- Adif. (2011). *Manual para la evaluación de inversiones en ferrocarril*. España: Adif.
- Adif. (2013a). *Pliego de condiciones técnicas para el mantenimiento de infraestructura, vía y aparatos de vía. Línea de alta velocidad Madrid-Figueras. Ámbito: Bases de Brihuega y Calatayud. Años 2014-2017*. España: Adif.
- Adif. (2013b). *Pliego de condiciones técnicas para el mantenimiento de infraestructura, vía y aparatos de vía. Línea de alta velocidad Madrid-Sevilla y Córdoba-Málaga. Ámbito: Bases de Hornachuelos y Antequera. Años 2014-2017*. España: Adif.
- Adif. (2013c). *Pliego de condiciones técnicas para el mantenimiento de infraestructura, vía y aparatos de vía. Línea de alta velocidad Madrid-Sevilla. Ámbito: Bases de Mora y Calatrava. Años 2014-2017*. España: Adif.
- Adif. (2014). *CIRTRA 2013 - Tomo II. Circulaciones y km.tren por tramos*. Madrid: Subdirección de control de gestión de red convencional. Adif.
- Allouko, A. y Lindborg, E. (2010). *Capacity study: Hässleholm-Kristianstad*. Linköping, Suecia: Vaegverket.
- Banverket. (2005). *Beräkningshandledning. Hjälpmedel för samhällsekonomiska bedömningar inom järnvägssektorn*. Borlänge: Banverket.
- Baumgartner, J. P. (2001). *Prices and costs in the railway sector*. Laussane, Suiza: École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Bickel, P., et al. (2006). *Deliverable 5: Proposal for harmonised guidelines*. EU-project developing harmonised European approaches for transport costing and project assessment (HEATCO). Stuttgart, Alemania: Institut für Energiewissenschaft und Rationelle Energieanwendung.
- Booz Allen Hamilton Ltd. (2005). *Review of variable usage and electrification asset usage charges: final report*. Londres, Inglaterra: Office of Rail Regulation.
- Burstow, M. (2012). *Updating the VUC - Horizontal rail forces methodology*. Londres, Inglaterra: Network Rail.
- Castillo Ron, E., et al. (2013). *Una propuesta metodológica para racionalizar inversiones en infraestructuras de alta velocidad ferroviaria. Aplicación a la línea Palencia-Santander*. Ciudad Real, España: UCLM.
- CE Delft, Infrac y Fraunhofer ISI. (2011). *External costs of transport in Europe: Update study 2008*. Delft, Alemania: CE Delft.
- Cillero Hernández, A., Martinelli, G. y Bouzada Outeda, P. (2009). *Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por autobús y autocar*. Monografías EnerTrans. Con la subvención del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) Ministerio de Fomento. Madrid, España: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

Civity. (2013). *Further development of the European high speed rail network. System economic evaluation of development options. Summary Report*. Paris, Francia / Hamburg, Alemania: Civity.

Unión Europea. Reglamento (UE) no 1299/2014 de la Comisión, de 18 de noviembre de 2014, relativo a las especificaciones técnicas de interoperabilidad del subsistema "infraestructura" en el sistema ferroviario de la Unión Europea. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 12 de diciembre de 2014, núm. 356, p. 1-109.

Unión Europea. Reglamento (UE) no 1302/2014 de la Comisión, de 18 de noviembre de 2014, sobre la especificación técnica de interoperabilidad del subsistema de material rodante "locomotoras y material rodante de viajeros" del sistema ferroviario en la Unión Europea. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 12 de diciembre de 2014, núm. 356, p. 228-393.

Comisión Europea. (2008). *Guide to cost-benefit analysis of investment projects. Structural funds, cohesion funds and instrument for pre-accession*. Bruselas, Bélgica: Comisión Europea.

Corazza, G. R. y Musso, A. (1987). Station Track Plans and Their Topological Analysis. *Ingegneria Ferroviaria*, 42(11), 643-652.

de Neufville, R., Scholtes, S. y Wang, T. (2006). Real Options by Spreadsheet: Parking Garage Case Example. *Journal of Infrastructure Systems*, 12(2), 107-111.

de Rus, G. y Nash, C. (2007). *In what circumstances is investment in HSR worthwhile?*, Working paper 590. Leeds, Inglaterra: Institute for Transport Studies, University of Leeds.

de Rus, G. (2012). *Economic evaluation of the High Speed Rail*. Suecia: Expert Group on Environmental Studies. Ministry of Finance.

de Rus, G., et al. (2010). *Manual para la evaluación económica de proyectos de transporte*. Entregable del proyecto Evaluación socioeconómica y financiera de proyectos de transporte. Con la subvención del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) Ministerio de Fomento

De Vita, M. G., Giovine, V. y Ricci, S. (2002). Performance analysis of a railway station: Tarvisio Boscoverde. *Ingegneria Ferroviaria*, 57(8), 619-627.

Derrible, S. y Kennedy, C. (2010). The complexity and robustness of metro networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(17), 3678-3691.

Derrible, S. y Kennedy, C. (2011). Applications of Graph Theory and Network Science to Transit Network Design. *Transport Reviews*, 31(4), 495-519.

Dingler, M. H., Lai, Y. y Barkan, C. P. L. (2009). Impact of Train Type Heterogeneity on Single-Track Railway Capacity. *Transportation Research Record*, (2117), 41-49.

elCorreoGallego.es. (2014). *El AVE de Lugo, ni en el mapa*. Disponible en: <http://www.elcorreogallego.es/galicia/ecg/el-ave-de-lugo-ni-en-el-mapa/idEdicion-2014-03-25/idNoticia-859827/>

eldiario.es. (2015). *Viaje por Galicia del tren lento*. Disponible en: http://www.eldiario.es/galicia/Viaje-Galicia-tren-lento_0_372713058.html

Erath, A., Loechl, M. y Axhausen, K. W. (2009). Graph-Theoretical Analysis of the Swiss Road and Railway Networks Over Time. *Networks & Spatial Economics*, 9(3), 379-400.

Europa Press. (2012). *Adif licita el mantenimiento del control de tráfico del AVE a Sevilla y a Málaga por 43,2 millones*. Disponible en: <http://www.europapress.es/economia/noticia-economia-ave-adif-licita-mantenimiento-control-trafico-ave-sevilla-malaga-432-millones-20121029115829.html>

Fernández Jánez, J. (2015). Una visión actualizada de la competencia entre el tren de alta velocidad y el avión. 360. *Revista de alta velocidad*, 3, 17-29.

- Florio, L. y Mussone, L. (1996). Railway station planning using artificial intelligence techniques. Ponencia presentada en *Computers in Railways V*, Prague.
- Franceschini, L. y Malvasi, G. (2003). Dimensioning of station track plans by means of combinatory research techniques. *Ingegneria Ferroviaria*, 58(2), 105-118.
- Fundación de los Ferrocarriles Españoles. (2011). *Metodología de evaluación de la eficiencia energética del material móvil ferroviario*. Madrid, España: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- Fundación de los Ferrocarriles Españoles. (2013). *Anuario del ferrocarril en España 2012*. Madrid, España: Vía Libre - Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- García Álvarez, A. (2010a). *Diseño funcional y técnico de estaciones ferroviarias para viajeros*. Ed. 10. Documentos de explotación técnica y económica del transporte. Madrid, España: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- García Álvarez, A. (2010b). *Relationship between rail service operating direct costs and speed*. Paris, Francia: Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC).
- García Álvarez, A. (2011a). *Costes operativos de los servicios de transporte de viajeros por ferrocarril*. Documentos de explotación técnica y económica del transporte. Madrid, España: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- García Álvarez, A. (2011b). Efecto en el diseño y en la explotación del carácter troncal de la red de alta velocidad. 360. *Revista de alta velocidad*, 1, 9-12.
- García Álvarez, A. (2012). Contribución al estudio del efecto de la alta velocidad en el consumo de energía y en los costes de explotación del ferrocarril. (Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya - UPC). Barcelona, España
- García Álvarez, A., et al. (2009). *Alta velocidad en España, líneas y trenes*. Madrid, España: Vía Libre - Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- García Álvarez, A., et al. (2008). *Metodología para la evaluación de las prestaciones y eficiencia de los trenes de viajeros (VIII Premio Talgo a la Innovación Tecnológica)*. Madrid, España: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- García Álvarez, A., González Franco, I. y Rubio García, A. (2015). El efecto perverso de la determinación de las tarifas en el análisis coste beneficio de las nuevas infraestructuras de alta velocidad. 360. *Revista de alta velocidad*, 3, 3-16.
- González Franco, I. y García Álvarez, A. (2010). Influencia de la accesibilidad en el consumo de energía, en los tiempos de parada y en el confort de los viajeros. Ponencia presentada en *IX Congreso de ingeniería del transporte (CIT 2010)*, Madrid, España.
- Guo, L. y Cai, X. (2008). Degree and weighted properties of the directed China railway network. *International Journal of Modern Physics C*, 19(12), 1909-1918.
- Hassan, R., de Neufville, R. y McKinnon, D. (2005). Value-at-risk analysis for real options in complex engineered systems. *International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vol 1-4, Proceedings*, , 3697-3704.
- Higgins, A., Kozan, E. y Ferreira, L. (1997). Modelling the number and location of sidings on a single line railway. *Computers & Operations Research*, 24(3), 209-220.
- INFRAS y IWW, U. K. (2004). *External costs of transport*. Zurich, Suiza/Karsruhe, Alemania: INFRAS.
- Jaro Arias, L. (2011). *Planificación y evaluación de la rentabilidad económico-social de líneas ferroviarias*. Documentos de explotación técnica y económica del transporte. Madrid, España: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- Johansson, P. y Nilsson, J. E. (2002). *Deliverable 10: Infrastructure cost case studies, Annex A3: An economic analysis of track maintenance costs*. Unite (UNification of accounts and marginal costs for Transport Efficiency). Funded by EU 5th Framework RTD Programme. Leeds, Inglaterra: ITS, University of Leeds.

- Katsuta, K., Koseki, T. y Sone, S. (2000). Rail service on triple-track lines: proposal and benefits. *Computers in railways VII*. p. 415-424. Southampton, Inglaterra: WIT Press.
- Knörr, W. (2008). *EcoPassenger. Environmental methodology and data. Final report*. Heidelberg, Alemania:
- Latora, V. y Marchiori, M. (2002). Is the Boston subway a small-world network? *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 314(1-4), 109-113.
- Leboeuf, M. (2014). *Grande vitesse ferroviaire*. París, Francia: Cherche midi.
- Li, W. y Cai, X. (2007). Empirical analysis of a scale-free railway network in China. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 382(2), 693-703.
- Lindblom, S. (2010). *Klart spår: boken om Botniabanan*. Örnsköldsvik, Suecia: Botniabanan AB/Trafikverket.
- Lindfeldt, A. (2012). Congested railways. (Tesina de máster, Royal Institute of Technology - KTH). Estocolmo, Suecia
- Lindfeldt, O. (2006). Influences of station length and inter-station distance on delays and delay propagation on single-track lines with regional rail traffic. *Computers in Railways X*. p. 511-527. Southampton, Inglaterra: WIT Press.
- Lindfeldt, O. (2007a). *Effekter av partiella dubbelspår och fler mötesstationer på enkelspår*. Estocolmo, Suecia: Royal Institute of Technology - KTH.
- Lindfeldt, O. (2007b). SAMFOST - a timetable-free way of analysing single-track railway lines. Ponencia presentada en *Proceedings of 2nd International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*, Hannover, Alemania.
- Lindfeldt, O. (2007c). Crossing times on single track railway lines - dependencies of different infrastructure and traffic factors. Ponencia presentada en *Railway Engineering 9th International Conference and Exhibition*, Londres, Inglaterra.
- Lindfeldt, O. (2010). Impacts of infrastructure timetable and perturbations in operation of double-track railway lines with mixed traffic. Ponencia presentada en *12th World Conference on Transportation Research*, Lisboa, Portugal.
- Lindfeldt, O. (2011a). An analysis of double-track railway line capacity. *Transportation Planning and Technology*, 34(4), 301-322.
- Lindfeldt, O. (2011b). *The Norwegian high speed rail assessment project, phase 2. Rail specific planning and development analysis. Final report. Appendix 2. Design of crossing loops*. Estocolmo, Suecia: WSP Civils.
- López Pita, A. (2000). Compatibilidad entre trenes de viajeros en alta velocidad y trenes tradicionales de mercancías. *Revista de Obras Públicas*, 147(3.403), 57-70.
- López Pita, A. (2010). *Alta velocidad en el ferrocarril*. Barcelona, España: Ediciones UPC.
- López Pita, A. (2014). *Líneas de ferrocarril de alta velocidad. Planificación, construcción y explotación*. Madrid: Ibergarceta Publicaciones.
- López Pita, A. y Fonseca Teixeira, P. (2012). *Infracharges: UIC study on railway infrastructure charges in Europe*. París, Francia: Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC).
- Losa, M. (2000). Gli impianti di stazione: le ipotesi di progetto e la verifica di circolazione. *Ingegneria Ferroviaria*, 1-2, 15-23.
- Martín Cañizares, M. P. (2011). ¿Es posible la alta velocidad en vía única? Ponencia presentada en *Semana de la Ciencia 2011*, Madrid.
- Martín Cañizares, M. P. y García Álvarez, A. (2012). Equipamiento y definición de servicios en líneas ferroviarias de alta velocidad según la tipología de los tramos. Ponencia presentada en *X Congreso de ingeniería del transporte (CIT 2012)*, Granada.

Martín Cañizares, M. P., et al. (2010). Herramienta para el dimensionamiento de la red para el tráfico de mercancías. Ponencia presentada en *IX Congreso de ingeniería del transporte (CIT 2010)*, Madrid, España.

MCRIT. (2012). *Aproximación a la cuantificación del volumen de mercado de transporte en las rutas nacionales de media y larga distancia y estimación de la posible participación del ferrocarril en función del tiempo de viaje, la frecuencia y el precio*. Proyecto Optired. Financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid, España: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

Meana Martínez, I. y Encinas Nuevo, J. J. (2012). Eficiencia en el desarrollo de la red ferroviaria de alta velocidad en España durante los últimos 15 años. Ponencia presentada en *VI Jornadas internacionales de ingeniería para alta velocidad. "Infraestructuras eficientes" de la planificación y el diseño a la construcción y la explotación*, Córdoba, España.

España. Instrucción sobre seguridad en túneles ferroviarios - ISTF (Borrador). *Ministerio de Fomento*, núm. -, p. 1-101.

España. Orden de 19 de noviembre de 1998 por la que se aprueba la instrucción para el proyecto, construcción y explotación de obras subterráneas para el transporte terrestre (IOS-98). *Boletín Oficial del Estado*, 1 de diciembre de 1998, núm. 287, p. 39342-39354.

España. Orden FOM/3317/2010, de 17 de diciembre, por la que se aprueba la Instrucción sobre las medidas específicas para la mejora de la eficiencia en la ejecución de las obras públicas de infraestructuras ferroviarias, carreteras y aeropuertos del Ministerio de Fomento. *Boletín Oficial del Estado*, 23 de diciembre de 2010, núm. 311, p. 106244-106256.

España. Real Decreto 2387/2004, de 30 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento del Sector Ferroviario. *Boletín Oficial del Estado*, 31 de diciembre de 2004, núm. 315, p. 42719-42763.

España. Resolución de 22 de diciembre de 2008, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático, por la que se formula declaración de impacto ambiental del proyecto Nueva línea de alta velocidad Orense-Monforte-Lugo. *Boletín Oficial del Estado*, 26 de enero de 2009, núm. 22, p. 9156-9170.

España. Real Decreto 1627/1997, de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción. *Boletín Oficial del Estado*, 25 de octubre de 1997, núm. 256, p. 30857-30886.

Nelldal, B. L. (2012). How dedicated HS-lines will affect capacity on the conventional network. Ponencia presentada en *8th World congress on high speed rail*, Philadelphia, EEUU.

Network Rail. (2012). *Periodic review 2013: Network Rail consultation on traction electricity & electrification asset usage charges in CP5*. Londres, Inglaterra: Network Rail.

Network Rail. (2013). *Periodic review 2013: Conclusions on the allocation of the variable usage charge*. Londres, Inglaterra: Network Rail;.

Okada, H. (1994). Features and economic and social effects of the Shinkansen. *Japan Railway & Transport Review*, 3, 9-16.

Ortuzar, J. D. y Willumsen, L. G. (2008). *Modelos de transporte*. Santander, España: Universidad de Cantabria.

Petersen, E. R. y Taylor, A. J. (1987). Design of single-track rail line for high-speed trains. *Transportation Research Part A: General*, 21(1), 47-57.

Pigem Cameselle, R. (2008). 50 años de alta velocidad en Japón. (Proyecto fin de carrera, Universitat Politècnica de Catalunya - UPC). Estocolmo, Suecia

- Pilo de la Fuente, E., et al. (2009). *Flujos de la energía de la electricidad para el transporte*. Monografías EnerTrans. Con la subvención del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) Ministerio de Fomento. Madrid, España: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- Réseau Ferré de France. (2009). *Ligne a grande vitesse Poitiers-Limoges. Dossier de fin d'etape 1. Pièce Technique A9 - Conception et exploitation de la voie unique*. Francia: Réseau Ferré de France.
- Roanes-Lozano, E., et al. (2009). Evolution of railway network flexibility: The Spanish broad gauge case. *Mathematics and Computers in Simulation*, 79(8), 2317-2332.
- Rodríguez Bugarín, M., Novales Ordax, M. y Orro Arcay, A. (2005). Alta velocidad y territorio. Algunas experiencias internacionales. *Ingeniería y territorio*, 70, 4-11.
- Ru, W., et al. (2008). Geographic coarse graining analysis of the railway network of China. *Physica A-Statistical Mechanics and its Applications*, 387(22), 5639-5646.
- Sala de Prensa Adif. (2009). *Línea de alta velocidad Córdoba-Málaga. Adif adjudica contratos de mantenimiento de telecomunicaciones, seguridad, vigilancia señalización y sistemas de energía*. Disponible en: <http://prensa.adif.es/ade/u08/gap/prensa.nsf/Vo000A/2635A91D2653FE29C1257551003DE12B?Opendocument>
- Sala de Prensa Adif. (2013). *Línea de alta velocidad Madrid-Barcelona-Frontera francesa. Adif invierte 32,5 M€ en el mantenimiento de las instalaciones de control de tráfico del tramo Madrid-Puigverd de Lleida*. Disponible en: <http://prensa.adif.es/ade/u08/GAP/Prensa.nsf/Vo000A/BB02C5138C484703C1257B09003B3743?Opendocument>
- Sala de Prensa Adif. (2014). *Por un periodo de diez años. Adif invertirá 204 millones de euros en el mantenimiento de las instalaciones de energía de las líneas de alta velocidad*. Disponible en: <http://prensa.adif.es/ade/u08/GAP/Prensa.nsf/Vo000A/9A948987063EE53EC1257CEB0034B617?Opendocument>
- Seaton, K. A. y Hackett, L. M. (2004). Stations, trains and small-world networks. *Physica A-Statistical Mechanics and its Applications*, 339(3-4), 635-644.
- Sen, P., et al. (2003). Small-world properties of the Indian railway network RID C-1928-2009 RID A-9607-2009. *Physical Review E*, 67(3), 036106.
- sendeco2. (2014). *Sistema electrónico de negociación de emisiones de dióxido de carbono*. Disponible en: <http://www.sendeco2.com>
- Serco commercial. (2013). *VTISM analysis to inform the allocation of variable usage costs to individual vehicles*. Warrington, Inglaterra: Serco commercial.
- SNCF. (2015). *La grande vitesse française en quelques chiffres*. Disponible en: <http://www.sncf.com/fr/presse/fil-info/modele-TGV-rapport-985321>
- Sogin, S. L., et al. (2013). Analyzing the progression from single to double track networks. Ponencia presentada en *2013 Joint Rail Conference*, Knoxville, EEUU.
- Soulié, C. y Tricoire, J. (2002). *Le grand livre du TGV*. Francia: La Vie du Rail.
- The high-speed rail in Japan committee. (2009). *Shinkansen: el tren de la alta velocidad en Japón. Tecnología y efecto social*. Madrid, España: Vía Libre - Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- UIC. (2010). *UIC leaflet 451-1. Timetable recovery margins to guarantee timekeeping - Recovery margins*. Francia: Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC).
- Vromans, M. J. C. M., Dekker, R. y Kroon, L. G. (2006). Reliability and heterogeneity of railway services. *European Journal of Operational Research*, 172(2)

Watts, D. y Strogatz, S. (1998). Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 393(6684), 440-442.

Xie, F. y Levinson, D. (2007). Measuring the Structure of Road Networks. *Geographical Analysis*, 39(3), 336-356.

Yokota, H. (1979). Performance analyses of passing track and planning principles of its layout on double-track lines. *Quarterly Reports*, 20(1), 9-14.

Yokota, H. (1980). Performance analyses of passing track and planning principles for its layout on single-track lines. *Quarterly Reports*, 21(3), 105-114.



FUNDACIÓN DE LOS
FERROCARRILES
ESPAÑOLES