

**Una propuesta metodológica para racionalizar inversiones
en infraestructuras de alta velocidad ferroviaria.
Aplicación a la línea Palencia-Santander**



ec[i]

enrique castillo instituto
INVESTIGACION EN INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA

Prólogo

El Instituto Enrique Castillo de Investigación en Ingeniería Civil y Arquitectura, recientemente creado por la Universidad de Castilla-La Mancha y dirigido por el Profesor José María Ureña, con la participación de sus diferentes componentes ha dedicado un tiempo a la reflexión sobre el papel a desarrollar ante la sociedad española con objeto de orientar sus actividades en la dirección que sea más beneficiosa para la misma.

Como consecuencia de esta reflexión se ha considerado que, además de realizar actividades en los niveles: (a) de difusión y promoción del conocimiento, (b) de generación de conocimiento y (c) colaboración con el mundo empresarial, debe realizar un notable esfuerzo a un mayor nivel en la fijación de estrategias y en la orientación de la sociedad española en temas de ingeniería y arquitectura, así como en temas de formación universitaria e investigación.

Por ello, como segunda actuación del Instituto se propone a la sociedad española el siguiente Plan conducente a racionalizar las inversiones en infraestructuras de alta velocidad ferroviaria en España.

Resumen

El presente documento tiene por objeto dar a conocer una metodología que permite definir nuevas líneas ferroviarias en las que se mantienen los estándares de calidad que hasta ahora han estado vigentes en la red española de alta velocidad pero con unos criterios de diseño más eficientes, ya que incorpora la posibilidad de que algunos de los tramos de la red sean construidos en vía única.

Planteamos esta metodología porque, a partir del trabajo mostrado a continuación, queda probado que algunos de los ejes de nuestra red están sobredimensionados respecto de las necesidades actuales y de las previsibles a medio y a largo plazo.

Este documento se estructura en dos partes. La primera tiene como finalidad diagnosticar la eficiencia de la alta velocidad española, analizando el uso que de ella se hace en relación con la magnitud de la infraestructura de nueva planta que ha sido construida. Para ello se ha realizado un análisis comparado entre las ocho redes que a nivel mundial se consideran, a día de hoy, más desarrolladas en lo que a extensión y a explotación se refiere. Del resultado del análisis se concluye que la red española atiende a una demanda significativamente baja en comparación con cualquiera de los otros sistemas ferroviarios de alta velocidad actualmente en servicio, por más que, en términos absolutos, se trata de la tercera (pronto la segunda) más larga del mundo.

Ello nos conduce a la segunda parte del documento en la que se propone la metodología mencionada que se aplica luego al corredor Palencia-Santander, para el que se plantean distintas combinaciones de vía única y doble, siempre compatibles con las hipótesis de demanda establecidas.

La toma en consideración de esta propuesta metodológica que presentamos permitiría incrementar la eficiencia del sistema en términos económicos, en tanto que hace viable la construcción de nuevas infraestructuras de alta velocidad con inversiones sensiblemente inferiores a las actuales.

1. Diagnóstico de la Red Española de Alta Velocidad

Desde sus inicios en el año 1964 en Japón, las infraestructuras y servicios de alta velocidad se han ido incorporando a un buen número de países. En cada caso se ha optado, bien por construir nuevas vías aptas para la circulación a las velocidades requeridas, o bien por rehabilitar parte de los antiguos trazados para mejorar las prestaciones existentes. Así mismo se han empleado diferentes sistemas de explotación: exclusivo para viajeros o mixto con la posibilidad de introducir las mercancías por alta velocidad. En el caso español los servicios de alta velocidad son incompatibles con la red convencional a causa de su diferente ancho de vía. A cambio y con el fin de incrementar la captación de tráfico algunos trenes convencionales dotados de tecnología apropiada utilizan la infraestructura de alta velocidad. En cualquier caso, el panorama mundial se ha ido colmando de redes que, a pesar de las particularidades propias de cada país, todas tienen como objetivo común disminuir los tiempos de viaje entre los corredores que unen los principales núcleos de población, atender a las demandas crecientes y devolver al ferrocarril parte de la primacía que como modo de transporte tuvo hace años.

Con el objeto de conocer la situación de la red española en términos de eficiencia en su uso hemos realizado un análisis comparado en el que se han estudiado, entre todos los países con alta velocidad, aquellos cuya red guarda unas mínimas similitudes con la nuestra. En concreto, se han considerado los siguientes criterios: gran parte de su infraestructura es de nueva planta, se alcanzan velocidades de circulación de 300 km/h y su longitud es al menos de 300 kilómetros.

En función a estos criterios se han seleccionado ocho redes, incluida la española, que se enuncian a continuación siguiendo el orden cronológico de su incorporación al nuevo sistema ferroviario: Japón, Francia, Italia, Alemania, España, China, Corea del Sur y Taiwan.

El análisis comparado de estas ocho redes se ha efectuado atendiendo a tres aspectos: extensión y densidad de la infraestructura, producción de transporte en términos de viajeros absolutos o viajeros-kilómetro transportados y servicios diarios ofrecidos en los corredores con mayor demanda.

1.1. Análisis comparado en términos de extensión y densidad de la infraestructura

La red española de alta velocidad ocupa, a día de hoy, el tercer lugar a nivel mundial y el primero en el ámbito europeo, en lo que a longitud se refiere. Con 2144 kilómetros en servicio (según la UIC) ha sobrepasado a Francia, Alemania e Italia, a pesar de que España fue la última, dentro de este grupo, en inaugurar su primera línea de alta velocidad. Con la puesta en operación de los últimos tramos, nuestra red ha llegado, como decimos, a superar a la francesa, país que está considerado como el de mayor experiencia y tradición en el desarrollo y explotación de líneas europeas de alta velocidad, y que sirvió de referencia a España en el diseño y extensión de esta infraestructura, al menos en los primeros años.

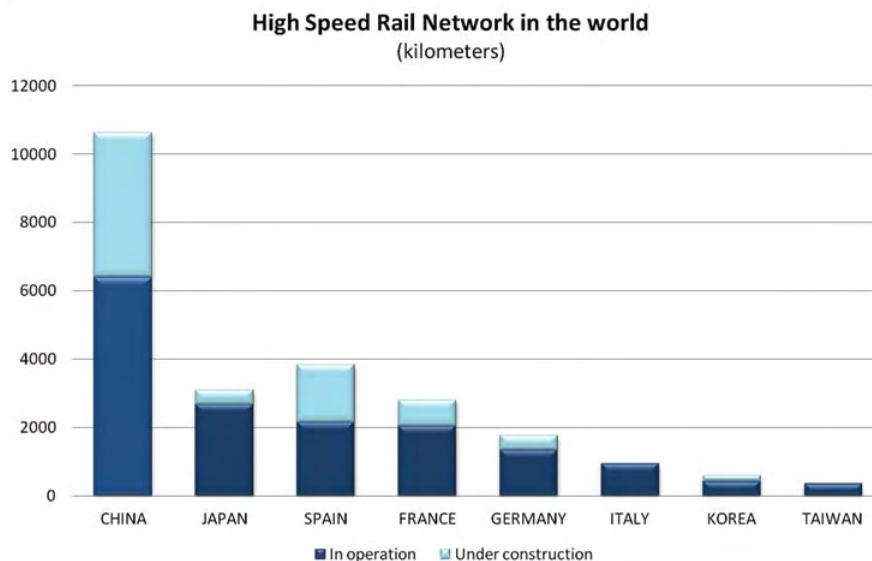


Figura 1: Longitud de las redes de alta velocidad en el mundo

A nivel mundial solo China y Japón se sitúan por delante de España, pero Japón está próximo a cumplir 50 años desde la puesta en operación de los primeros servicios, frente a los 20 de España. Por su parte, es cierto que China apenas cuenta con 10 años de experiencia, pero ha desarrollado su red a un ritmo vertiginoso, llegando a inaugurar una media de 1000 kilómetros por año, pero no debemos olvidar que se trata del país con el mayor índice de crecimiento anual a nivel mundial, lo que explica que supere al resto de países en longitud de red y que la distancia que actualmente mantiene con respecto a los demás, en lo referente a kilómetros, se incremente notablemente en poco tiempo.

La previsión para los próximos años, si se tienen en consideración los tramos que en cada país se encuentran a día de hoy en construcción, es que España adelanta un puesto, a Japón, y se coloque en un horizonte muy cercano (2015-2017) como segunda potencia mundial en longitud de red. En términos porcentuales, el 60% del total de kilómetros de alta velocidad se repartirán entre los países asiáticos y el 40% corresponderá a Europa. De éstos, cerca de la mitad serán aportados exclusivamente por España.

La comparación de kilómetros de alta velocidad en servicio por cada 1.000 kilómetros cuadrados de superficie en cada uno de los ocho países estudiados pone de manifiesto que España cuenta con la red de mayor densidad por superficie dentro del conjunto de los europeos (ver Figura 2)

Si se analiza la densidad de la red por habitante, España supera ampliamente al resto de países. Su ratio es 1,5 veces mayor que el de Francia y triplica los de Alemania e Italia. (ver Figura 3)

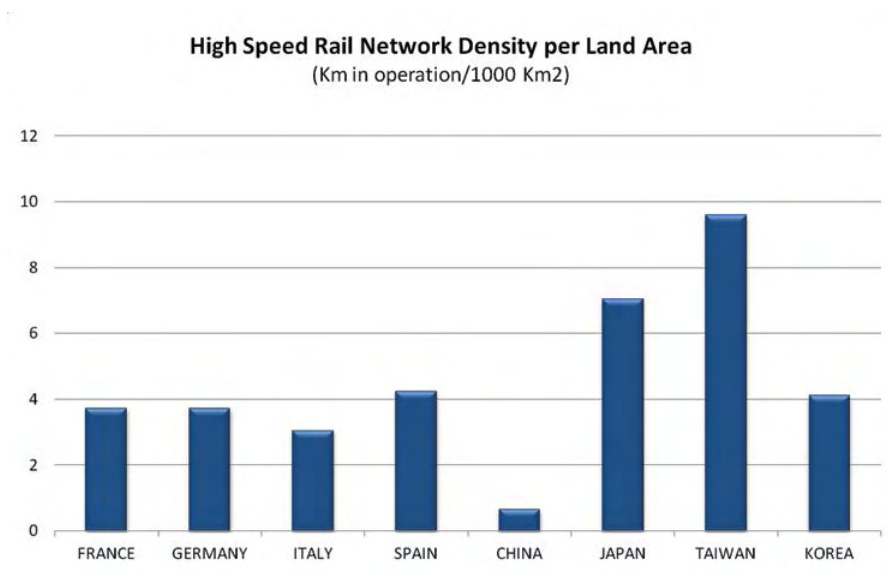


Figura 2: Densidad por superficie de las redes de alta velocidad en el mundo

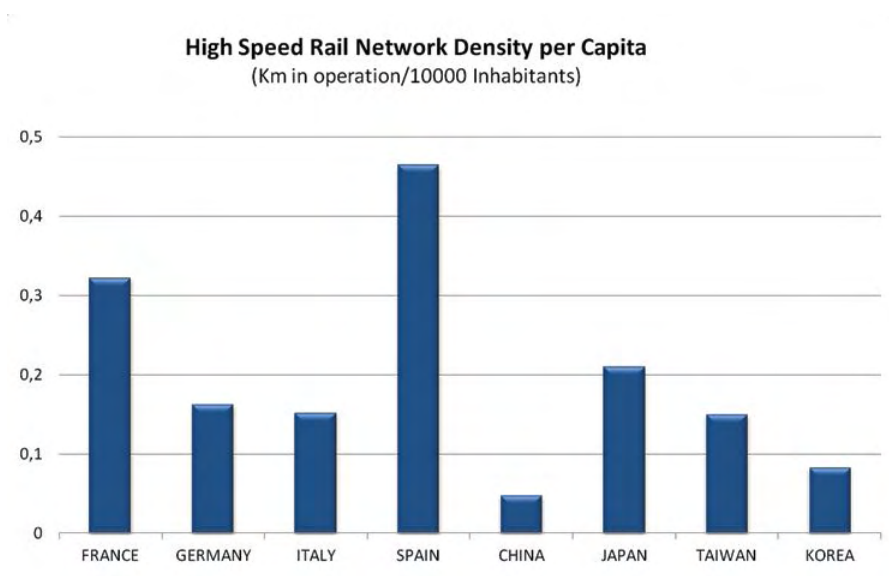


Figura 3: Densidad por habitantes de las redes de alta velocidad en el mundo

1.2. Análisis comparado en términos de producción de transporte

Dado que la red española se encuentra entre las más extensas del mundo (la primera en Europa y la tercera a nivel mundial), cabría esperar que, de manera análoga, ocupase los primeros puestos en demanda atendida. Sin embargo esto no es así, ya que en producción de transporte deja de estar a la cabeza para situarse en el último lugar.

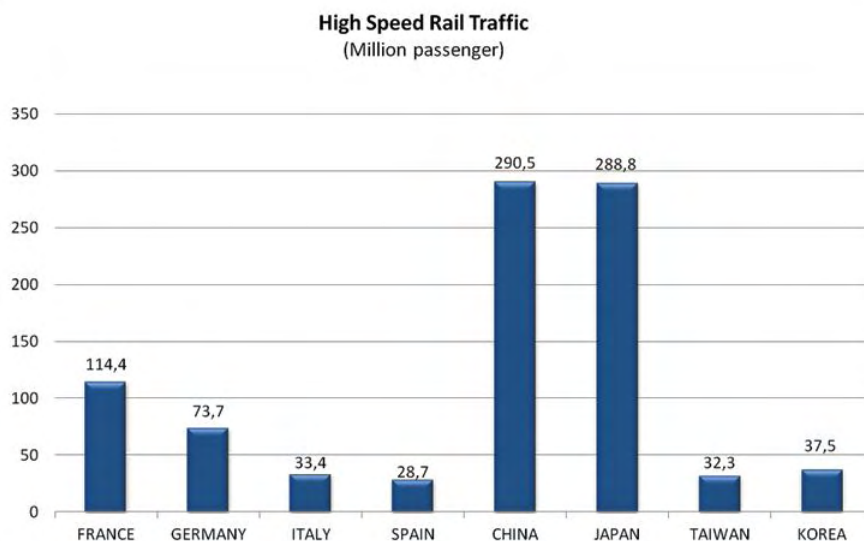


Figura 4: Pasajeros transportados

Las diferencias son notables, pues centrado el análisis en los países europeos, el número de viajeros transportados en el año 2011 en Francia fue cuatro veces superior al de España. Por otro lado la demanda atendida por los trenes de alta velocidad alemanes fue 2,5 veces superior a la española con casi la mitad de longitud.

Si se establece una correlación entre el número de kilómetros de alta velocidad en servicio y la producción de transporte, se observa para el conjunto de casos analizados que a las redes más extensas les corresponde un mayor número de viajeros anuales y que los valores de demanda disminuyen a medida que lo hace la longitud. Sin embargo, a este respecto España constituye una manifiesta excepción, como se muestra en la Figura 5

Por otro lado, la evolución temporal de los tráficos en los corredores españoles dista mucho de parecerse a la experimentada en otros países europeos. En la Figura 6 se aprecia, en primer lugar, cómo hasta 2008 los valores de España eran muy limitados, por debajo de 2.000 millones de viajeros-kilómetro. Es a partir de la inauguración del último tramo de la línea Madrid-Barcelona, cuando estas cifras empiezan a ser significativas. No obstante, en 2010 la demanda atendida en España constituía la cuarta parte de la francesa y la mitad que la alemana.

La observación de la serie temporal de los tráficos de alta velocidad en Europa permite comparar ciertos momentos para las diferentes redes. En particular, si se analizan los datos de España y Francia 18 años después de sus respectivas puestas en servicio del primer tren de alta velocidad, se aprecia que en Francia, en el año 1999, el número de viajeros-kilómetro transportado ascendía a 32.400 millones, mientras que España para el mismo tiempo transcurrido, es decir en 2010, el valor era tres veces inferior, 11.700 millones de viajeros-kilómetro.

A pesar de que el corredor Madrid-Barcelona capta una demanda significativamente superior al Madrid-Sevilla, las cifras, alrededor de 2.500 millones de viajeros-kilómetro, poco tienen que ver con el tráfico generado en otros ejes europeos. Como ejemplo los 32.000 millones de viajeros-kilómetro en la línea París-Lyon. Además, y como se aprecia en la Figura 7 no es previsible que los tráficos en los ejes españoles puedan crecer notablemente, ya que se observa como la línea Madrid-Sevilla hace años que alcanzó la etapa de maduración, mientras que la Madrid-Barcelona, aunque lleva pocos años en servicio, tiende a mantenerse en los 2.500 millones de viajeros-kilómetro.

Los ratios en los que se analiza la producción de transporte, volumen de viajeros por kilómetro de red ponen manifiestamente en evidencia que la demanda atendida por la alta velocidad en España está muy por debajo del resto de los países objeto de este análisis, a pesar de contar con los valores más elevados en lo que a densidad de

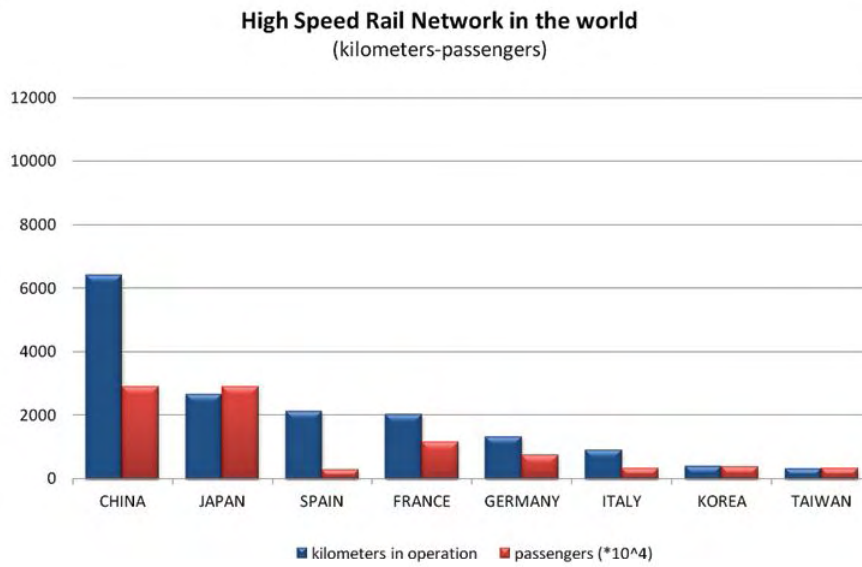


Figura 5: Pasajeros y Kilometros de las redes de alta velocidad objeto de estudio

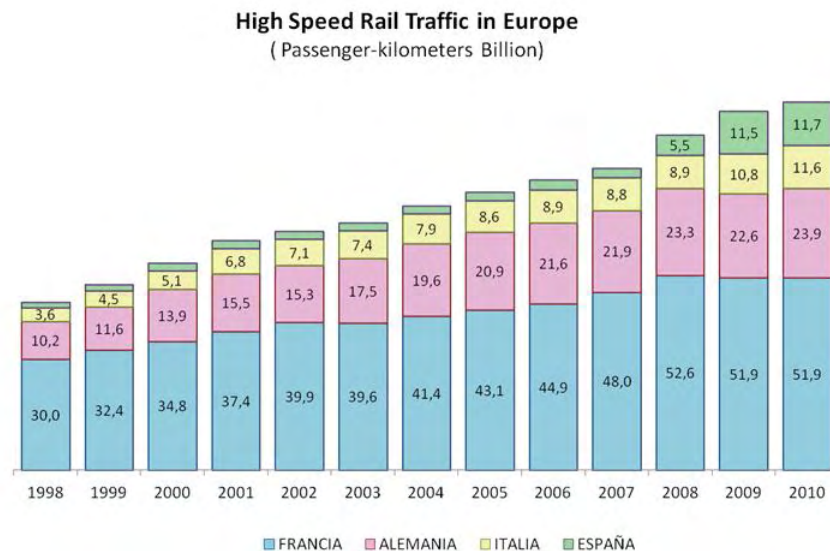


Figura 6: Evolución temporal de los tráficos en Europa

red se refiere.

España cuenta, por tanto, con una red muy densamente constituida pero para niveles de población no demasiado elevados si se compara con otros países. En consecuencia, la sensación que transmite nuestra red es que “le queda grande al país” y por ello no resulta eficiente.

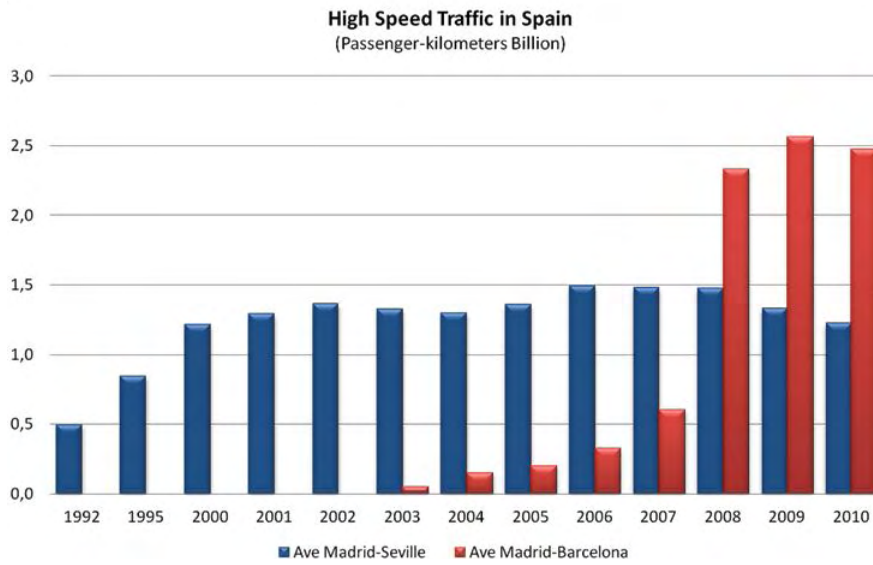


Figura 7: Evolución temporal de los tráficos en España

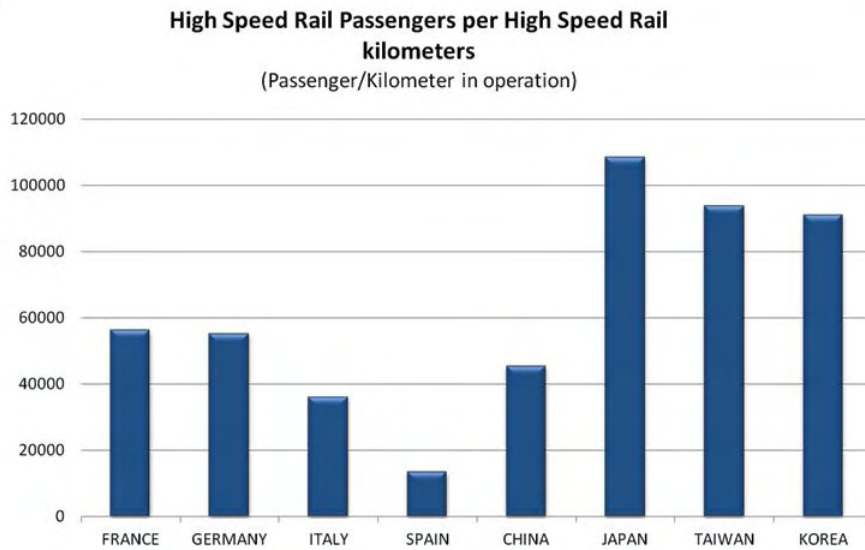


Figura 8: Ratio de pasajero por kilómetro de red

1.3. Análisis comparado en términos de servicios diarios ofrecidos en los corredores con mayor demanda

La comparación del número de trenes diarios ofertados (ambos sentidos reunidos) en los ejes con mayor volumen de pasajeros en Francia, Alemania, España, Japón y China (ver Figura 9), indica que los valores españoles

Daily Services on International Corridors

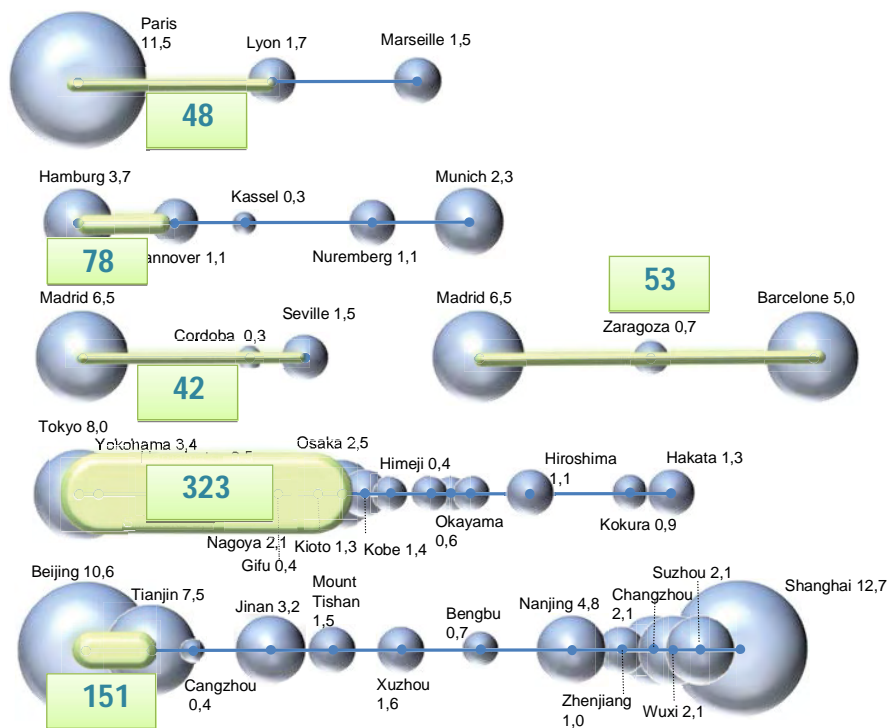


Figura 9: Trenes diarios ofertados

aunque modestos, pueden considerarse en la media de los europeos, pero muy lejos de los servicios ofertados en China y Japón. Además, esta oferta de servicios en nuestro país (ver Figura 10) resulta relevante en las proximidades a Madrid (con una media de 77 trenes diarios), donde confluyen numerosos ejes, pero va disminuyendo notablemente, hasta alcanzar valores realmente bajos al llegar a los extremos de ciertos ejes (16 trenes hasta Valencia, 10 a Toledo o 5 a Albacete).

Esto pone de manifiesto que las necesidades de infraestructura no son las mismas a lo largo de toda la red que constituye la alta velocidad española. Es solo en las inmediaciones de Madrid donde es preciso disponer de mayor capacidad de vía y por tanto solo en esta área está del todo justificado contar con doble vía, pero no así en la periferia donde previsiblemente el trazado de ciertos tramos en vía única incrementaría la eficiencia de la red.

1.4. Síntesis del análisis comparado

Como síntesis del análisis comparado hasta aquí expuesto, con el que pretendíamos diagnosticar la eficiencia de la red española de alta velocidad frente a aquellas otras que a día de hoy se encuentran más desarrolladas, se exponen, a continuación, los aspectos más relevantes del mismo:

- La red española de alta velocidad es la tercera a nivel mundial en lo que a longitud se refiere y según los datos disponibles pasará a ser la segunda en un horizonte de apenas tres años.
- La densidad de la red española por superficie es la mayor de entre los países.

Daily High Speed Services (in each direction)

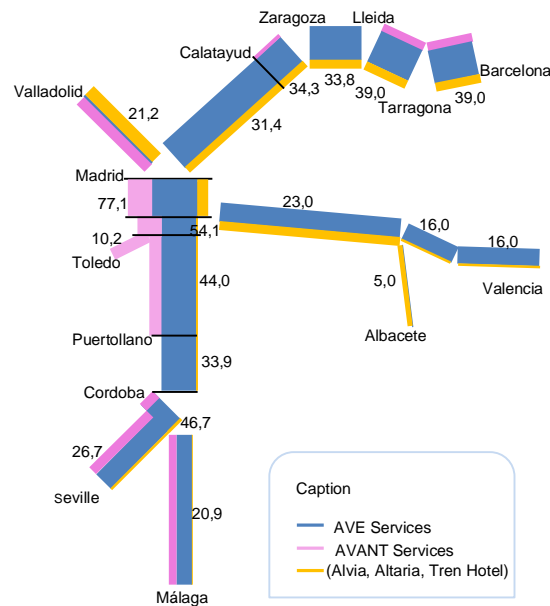


Figura 10: Servicios diarios ofertados en España

- La densidad de la red española por habitante es la mayor de entre todos los países analizados, tanto europeos como asiáticos.
- La producción de transporte en términos de demanda atendida tanto en volumen de viajeros o de viajeros-kilómetro anuales relega a España al último lugar, con valores notablemente inferiores a los del resto de redes analizadas.
- Los principales corredores españoles, Madrid-Sevilla y Madrid-Barcelona no registran crecimientos significativos en los últimos años. En particular el Madrid-Sevilla parece haber alcanzado la fase de maduración.
- La oferta diaria de trenes en los ejes más cargados de la red española de alta velocidad es significativamente parecida a la media de los corredores europeos, aunque muy baja comparada con las de China y Japón.
- Debido a la estructura radial de la red, la concentración de tráficos solo es manifiesta en el entorno de Madrid, mientras que tiende a ser baja o muy baja en la periferia.

En suma, resulta evidente que en el caso español la interacción “infraestructura alta velocidad”-“trenes ofertados”-“demanda atendida” se encuentra a unos niveles llamativamente modestos en comparación con los países que en la actualidad disponen de estos servicios. Las razones que han dado lugar a esta situación podrían estar relacionadas con la falta de masa crítica poblacional, con un inicio precipitado unido a la mala elección del primer corredor o tal vez con un diseño que atiende en exceso de conexiones regionales. Sin embargo ninguna de estas razones nos parecen determinantes aparte del hecho de que no constituyen el objeto del presente documento.

Lo que sí resulta evidente es que 20 años después de la inauguración del Madrid-Sevilla, el binomio “alta velocidad” = “progreso” ha calado tan hondo en la sociedad española que resulta inimaginable que una ciudad que se tenga autoestima no aspire a formar parte de la red en el medio plazo. La prueba irrefutable de lo que

comentamos se manifiesta en cada uno de los Planes de Infraestructuras que han ido desarrollando a lo largo de los años los diferentes gobiernos y cuyo objetivo común es el de alcanzar los 20.000 kilómetros de red en el horizonte del 2025. Es evidente que la crisis económica que estamos padeciendo pospondrá el proceso, pero no parece probable que en ningún caso estas actuaciones lleguen a abandonarse.

En estas condiciones entendemos que la labor que debe corresponder a los académicos es la de dotar a los ingenieros de herramientas de análisis, lo más afinadas posibles, para que desarrollen la tarea de diseñar las infraestructuras que la sociedad está demandando, pero ateniéndose con el máximo de rigor a los tradicionales criterios de eficiencia económica.

Esta es la razón que nos mueve a plantear la metodología que a continuación se expone. Su objeto es la evaluación de alternativas de diseño de nuevas líneas de Alta Velocidad incorporando tramos de vía única. En su desarrollo juega un papel clave el empleo de una herramienta que optimiza las posibilidades de explotación para distintas hipótesis de demanda. Este software está documentado en los artículos *Timetabling optimization of a single railway track line with sensitivity analysis* publicado en *Top* en 2009 y *Timetabling optimization of a mixed double and single tracked railway network* publicado en *Applied Mathematical Modelling* en 2011, elaborados por miembros del grupo.

2. Metodología propuesta y aplicación la línea Palencia-Santander

Con la finalidad de describir la metodología propuesta, hemos seleccionado la línea de alta velocidad entre Palencia y Santander. Esta línea se caracteriza por ser un ramal periférico de la red nacional todavía no construido pero ya incorporado en el Plan de Infraestructuras, Transporte y Vivienda 2012 (PITVI). Por lo tanto aún existe cabida para que el técnico defina diferentes alternativas de infraestructura, construyendo tramos en vía única o en vía doble, con el objeto de optimizar la inversión. En suma, se trata de un interesante caso de análisis.

2.1. Descripción de la metodología

La metodología propuesta se estructura en las tres etapas que se muestran en la Figura 11

Las primera etapa tiene por objetivo definir los datos necesarios para poner en marcha el modelo matemático. En concreto, la fijación de la demanda a cubrir (lo que determinará el número de circulaciones) y la propuesta previa de los horarios de los trenes, para satisfacer dicha demanda. Estos horarios son los que la compañía explotadora pediría, en su caso, al administrador de infraestructura para hacer circular sus trenes por la línea y que este último tratará de hacer compatibles con las restricciones de explotación.

La segunda etapa tiene por finalidad seleccionar el conjunto de opciones de infraestructura que serán objeto de análisis, y evaluar cada una de ellas en función de sus posibilidades de garantizar las exigencias de explotación. Estas opciones se elaboran a partir de diversas combinaciones de tramos en vía única y vía doble. Como parece lógico, el proceso comienza por la opción de vía doble en toda la línea. La etapa se desarrolla en tres fases que se repetirán tantas veces como el analista considere necesario hasta que se disponga del número suficiente de opciones para garantizar la precisión que se desee alcanzar en el análisis. En la primera fase se define la opción de infraestructura. Posteriormente, se aplica el modelo matemático sobre dicha opción. Por último, en la tercera fase se realiza un análisis de los resultados del modelo. Es recomendable que la selección de cada nueva opción de infraestructura se realice a la vista de los resultados de análisis de la anterior. Ello se hará con criterios que serán expuestos sobre el caso de estudio. Esta es la causa por la que en la Figura 11 la etapa 2 lleva un indicador de retroalimentación que pasa de una opción a la siguiente. En todo caso, para terminar esta etapa, es conveniente analizar también la opción que considera toda la longitud de la línea en vía única a la que se supone la más barata y la más ineficiente.

La tercera etapa consistirá en realizar un análisis comparado de las opciones de infraestructura obtenidas en la etapa anterior. Este análisis hace referencia a dos tipos de aspectos: En primer lugar, a los relacionados con la calidad de la explotación, para ello utilizamos un par de indicadores sencillos de calidad que cuantifican las

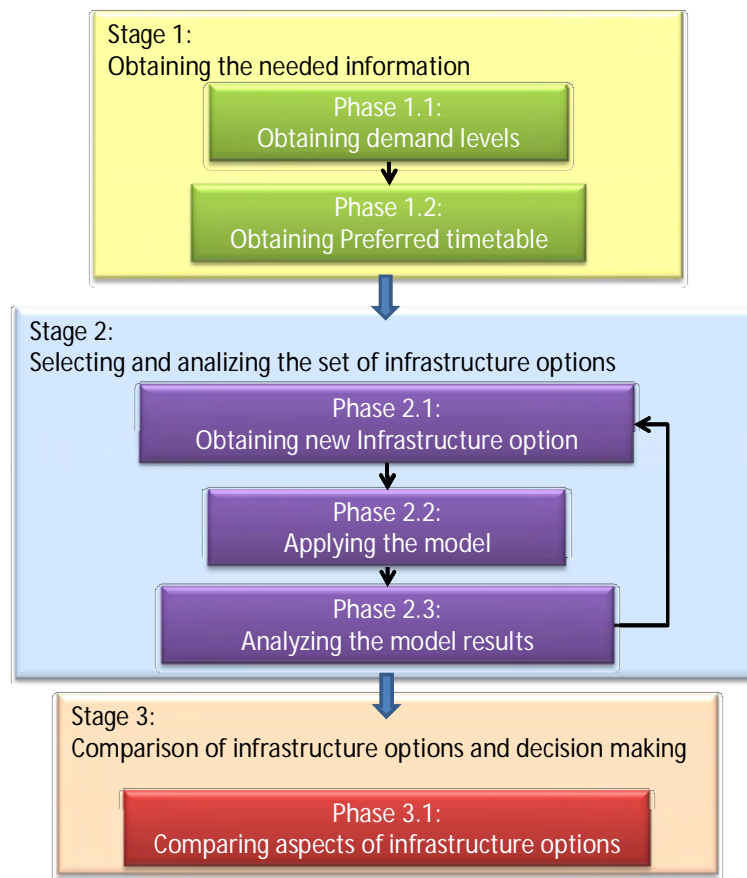


Figura 11: Esquema de la metodología propuesta

opciones desde el punto de vista funcional. En segundo lugar, un grupo de aspectos relacionados con los costes más relevantes que experimentan los agentes que intervienen en el proceso de construcción-explotación y utilización del servicio: el administrador, el operador y el viajero. Con ello y a expensas de la incorporación de otros factores cuya consideración es ajena al contenido de este documento, las opciones de infraestructura quedan caracterizadas a efectos de la toma de decisiones.

2.2. El caso de estudio: Línea Palencia-Santander, descripción geométrica de la línea

Para realizar el estudio de explotación y puesto que esta línea no está aún construida, hemos comenzado por elaborar una propuesta de trazado. A continuación describimos los criterios utilizados para su diseño en planta y alzado, así como el análisis de alternativas para seleccionar el trazado técnica y económicamente más adecuado.

Los valores de los parámetros de trazado han sido adoptados de acuerdo con las Instrucciones y Recomendaciones para la redacción de proyectos de plataforma elaboradas por ADIF.

En lo relativo al trazado en planta se han empleado dos velocidades de diseño, 250 y 300 km/h. Por lo que se refiere al trazado en alzado cabe resaltar que, como consecuencia de la orografía del terreno, ha sido necesario utilizar los valores máximos de las pendientes excepcionalmente permitidas, en concreto el valor del 18 mm/m. Por otro lado, es oportuno reseñar que los criterios adoptados para determinar la inclusión de un túnel y/o viaducto

son de aproximadamente 20 metros de altura de terraplén para viaductos y de 15 metros de altura de desmonte para el caso de túneles.

En la fase previa de estudio de alternativas, necesaria para encajar un trazado adecuado, se han desarrollado tres opciones. El alzado y planta de la alternativa seleccionada, obediendo a criterios técnicos y económicos, tiene una longitud total de 186,602 km. Su representación gráfica se muestra en las Figuras 12 y 13

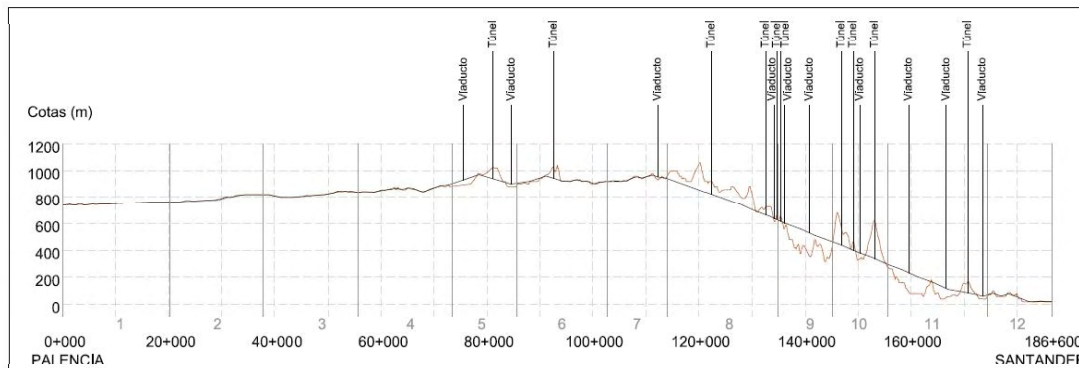


Figura 12: Alzado del trazado propuesto entre Palencia y Santander

La Figura 12 pone de manifiesto de forma muy patente las dos zonas claramente diferenciadas por las que discurre el trazado de la línea. La primera, de aproximadamente 80 km de longitud, se caracteriza por una orografía suave, donde la plataforma discurre por el terreno sin grandes alturas de terraplenes y desmontes. La segunda, a partir de aproximadamente el PK 80+000 y hasta el final de la línea, se caracteriza por una orografía extremadamente abrupta que origina la necesidad frecuente de introducir túneles y viaductos de grandes longitudes.

Por lo que se refiere a la planta, ésta queda recogida en la Figura 13. En ella se muestra la ubicación de las estructuras necesarias, tales como túneles, viaductos y pasos superiores o inferiores. La línea incorpora 10 túneles, entre ellos uno de 16 km y varios de cerca de 4 km, lo que supone un total de 36 km. En lo que respecta a los viaductos, son necesarios un total de otros 10, sumando todos ellos una longitud de 32390 m. Por último, el número de pasos superiores e inferiores necesarios es 51.

Para realizar el estudio de explotación de una línea es necesario, además de conocer su trazado, dividir la longitud total de la línea en tramos. En este caso la tramificación se ha sometido a los siguientes tres criterios:

- Cada tramo se caracteriza por una única velocidad máxima de diseño. La velocidad es un parámetro clave en la explotación ya que determina el tiempo de recorrido de cada tramo.
- Cada infraestructura debe estar en la totalidad de su longitud dentro de un mismo tramo. Esto es importante porque la existencia de una infraestructura influye de manera muy relevante sobre los costes de construcción, siendo éstos muy distintos según se trate de vía única o de vía doble.
- La localización de cada posible PAET se restringe a los extremos de los tramos. Además se ha impuesto que la distancia entre ellos sea como mínimo de 40 kilómetros, evitamos con ello proponer la existencia de puntos de parada demasiado cercanos unos de otros.

Considerando los aspectos restrictivos anteriores se obtienen un total de 12 tramos cuyas características constructivas más relevantes se describen en la Tabla 1

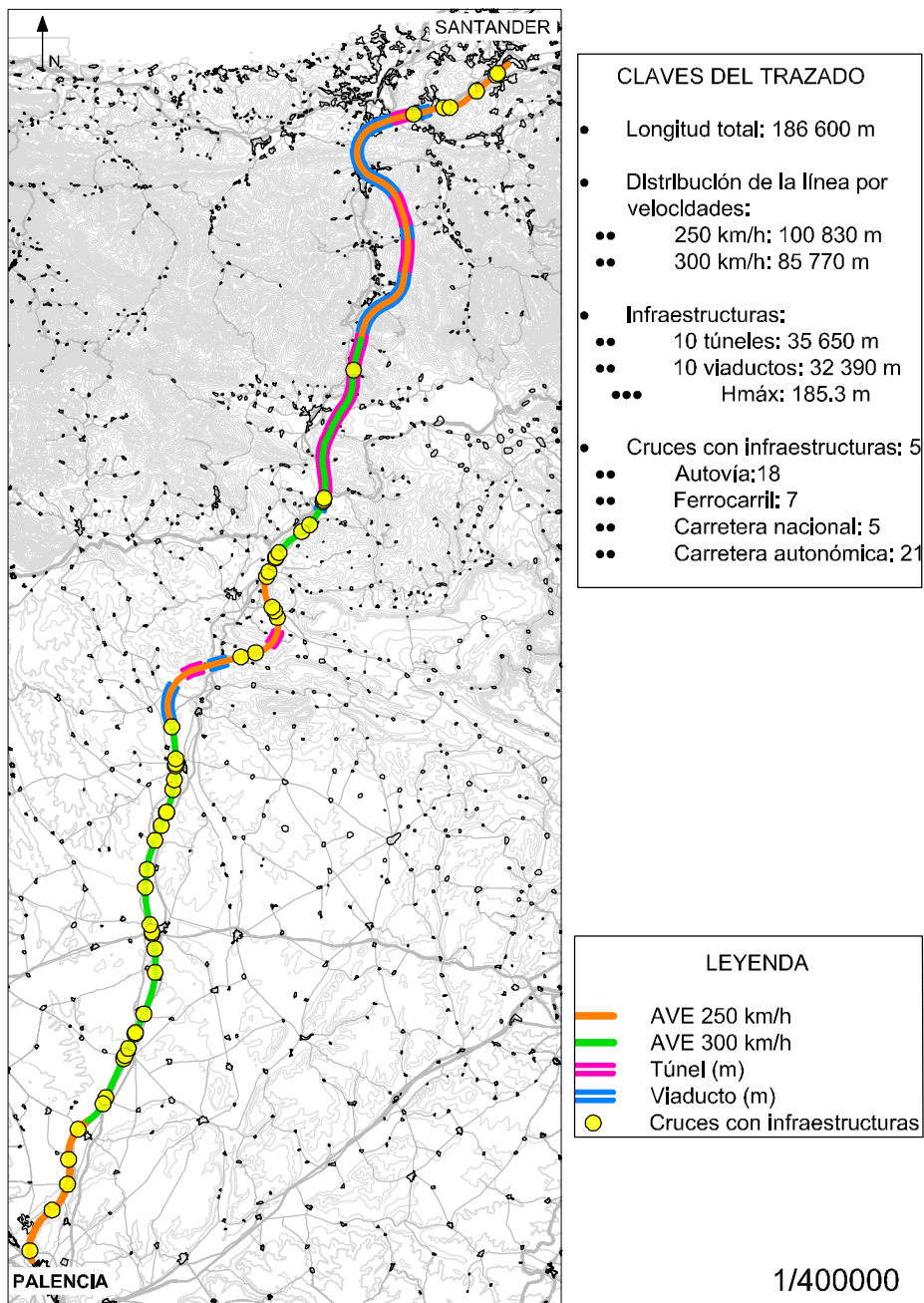


Figura 13: Planta del trazado propuesto entre Palencia y Santander

2.3. Aplicación de la metodología

Una vez que ha sido descrita la línea objeto de estudio se procede a explicar paso a paso cómo se ha aplicado la metodología propuesta con el fin de analizar la explotación de la línea en función de las combinaciones de vía

Tramo	PK inicio-PK final	Longitud [m]	Velocidad [Km/h]	Pasos Sup o inf	Long Viaducto [m]	Long Túnel [m]	Costes VD/VU [mill euros/km]
1	0-20220	20220	250	5 ud (85m)	0	0	4,0/2,8
2	20200- 37900	17700	300	8 ud (605.5 m)	0	0	4,6/3,3
3	37900 -55700	17800	300	7 ud (316,5m)	0	0	4,4/3,1
4	55700-73500	17800	300	10 ud (464m)	0	0	4,5/3,2
5	73500-85600	12100	300	o	6100	3300	20,8/10,9
6	85600-102780	17180	250	7 ud (247m)	0	2250	11,9/6,6
7	102780-114002	11222	300	8 ud (365,5m)	150	0	6,1/4,5
8	114002-134792	20790	300	0	350	19550	50,4/21,2
9	134792-145202	10410	250	0	9270	500	26,3/16,7
10	145202-155552	10350	250	0	1650	7500	43,5/19,4
11	155552-174102	18550	250	1 ud (36m)	14870	2550	26,8/16,0
12	174102-186602	12200	250	5 ud (108,5m)	0	0	6,4/4,9

Cuadro 1: Características de los 12 tramos en los que se ha dividido la línea ferroviaria de Alta Velocidad propuesta entre Palencia y Santander

única-vía doble en los distintos tramos en los que ha sido dividida.

2.3.1. Etapa 1: Obtención de la información necesaria

Con anterioridad a la aplicación del modelo, es necesario estimar la oferta de trenes que el operador ferroviario desearía hacer circular por la línea (Fase 1.1. de la Figura 11). De entre las estimaciones de demanda futura en el corredor hemos considerado la más optimista de todas debida al equipo del profesor Pedro Casares (Universidad de Cantabria 2009) que la cifró en 1.6 millones de viajeros por año, al inicio de la puesta en servicio, lo que supone más de cinco veces el tráfico atendido en situación actual. Suponiendo un modesto grado de ocupación de un 60 % de la capacidad ofertada, ello supondría la puesta en servicio de 15 trenes por día y sentido. A esta estimación, la llamaremos "hipótesis normal". Consideraremos además otros dos niveles de demanda, uno más pesimista cuyos resultados se traducirían en 9 trenes por sentido (tres trenes más que la oferta actual entre Palencia y Santander) y otro más optimista, de 20 trenes por sentido.

En lo que se refiere a los horarios de referencia para los trenes (Fase 1.2. de la Figura 11), el procedimiento que se ha propuesto para confeccionarlos consiste en satisfacer una supuesta curva de demanda diaria de los usuarios de la línea. Supongamos, por ejemplo, que la distribución del horario preferida de los usuarios del servicio es la que se muestra en la Figura 14, tanto para el trayecto Madrid-Santander como para el Santander-Madrid. El área bajo la curva, corresponde al número de viajeros totales diarios. La forma de proceder para obtener los horarios propuestos por la compañía explotadora consiste en dividir el área delimitada por la curva en tantas partes de igual área como el número de trenes de cada hipótesis. De esta forma la hora de salida queda definida por la abscisa de separación entre áreas. Así, la hora preferida de salida de un tren se establece cuando la demanda estimada desde la salida del tren anterior es suficiente para llenar el siguiente tren. Es necesario hacer notar aquí que esta manera de actuar es perfectamente modificable y corresponde sólo a un método para obtener los datos de partida del modelo.

2.3.2. Etapa 2: Selección y análisis de opciones de infraestructura

Una vez determinados el número de trenes y los horarios propuestos para los servicios, la siguiente etapa consiste en obtener el gráfico de explotación para dichos trenes, para los distintos niveles de demanda y para cada una de las opciones de infraestructura que se desean analizar, es decir para las distintas combinaciones de tramos

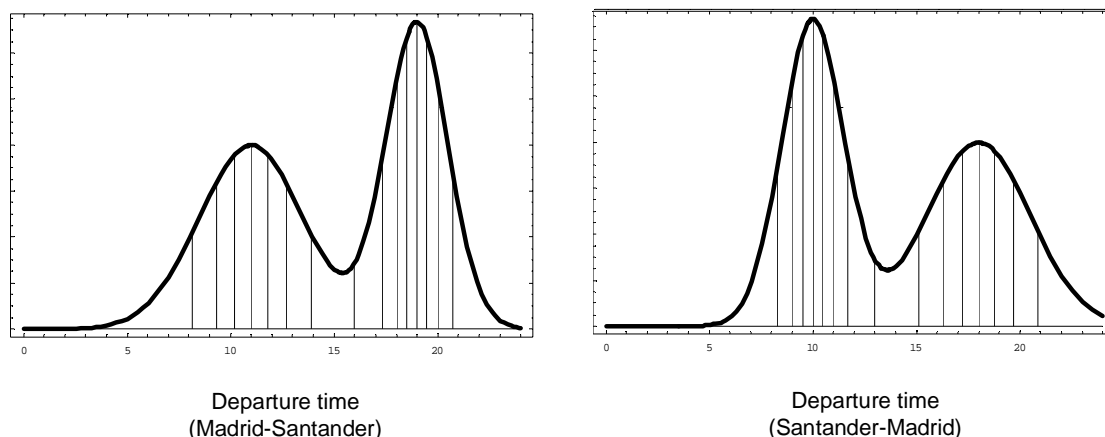


Figura 14: Hipótesis para la obtención de los horarios de salida de los trenes solicitados por las compañías ferroviarias

en vía única y vía doble que se considere oportuno analizar.

Opción I. Como se dijo en el apartado en que se describe la metodología propuesta, la primera opción que introducimos en el modelo en la Fase 2.1 (a la que llamaremos Opción I) es la que corresponde a la construcción de toda la línea en vía doble. Se trata de la opción más costosa y, es de suponer, la de mayor garantías de explotación. El resultado del modelo para las tres hipótesis de servicios (9, 15 y 20 trenes por sentido) se muestra en la Figura 15. En el eje de abscisas se representa las horas del día. En el de ordenadas los puntos kilométricos de la línea objeto de estudio donde el PK 0+000 corresponde a Palencia mientras que Santander está en el PK 186+602. La división de la línea en tramos, descrita en apartados anteriores (ver Tabla 1), se ha representado mediante líneas de puntos horizontales de manera que en la parte izquierda de cada gráfico quedan identificados los 12 tramos. Se ha grafiado cada servicio de un color diferente, utilizando además línea continua para los trenes que circulan por la vía 1 y línea discontinua para los que circulan por la vía 2. La importancia de esta distinción quedará puesta de manifiesto más adelante. El punto que aparece sobre el eje de abscisas al inicio del trayecto de cada tren y con el mismo color indica la hora solicitada por el operador para la salida del servicio conforme fue definida en la Fase 1.2. La figura pone de manifiesto que en el caso de vía doble, esta solicitud ha sido respetada para todos los servicios puesto que no hay conflicto alguno con los trenes que circulan en sentido contrario.

Con la finalidad de poder comparar sucesivas opciones que irán apareciendo en lo que se refiere a sus posibilidades de atender a las diferentes niveles de demanda, se han definido dos indicadores de calidad de la explotación lo que permite compararlas de forma cuantitativa. El primero, el tiempo relativo¹ medio de todos los trenes y, el segundo, el tiempo relativo del tren más lento, es decir el tiempo relativo máximo. Cuanto más se acerque el valor de estos indicadores a 1 mejor será la calidad de la explotación de la opción analizada. En la misma Figura 15, aparecen estos indicadores sobre la distribución de tiempos relativos de viaje de todos los trenes. Como se observa, en la Opción I todos los trenes tienen tiempo relativo igual a 1 para todos los niveles de demanda.

Es decir, como era de esperar, en la hipótesis de doble vía, todos los trenes pueden circular sin ver afectado su tiempo óptimo de viaje.

¹El tiempo relativo de viaje es el tiempo de viaje de cada tren dividido por el tiempo mínimo en el que dicho tren puede realizar el trayecto. De esta forma si un tren tiene un tiempo relativo igual a 1 quiere decir que su tiempo de viaje ha sido el mínimo. Por el contrario si su tiempo relativo es 1.2, significa que ha empleado un 20 % más de tiempo en recorrer la línea de lo que hubiera podido hacerlo.

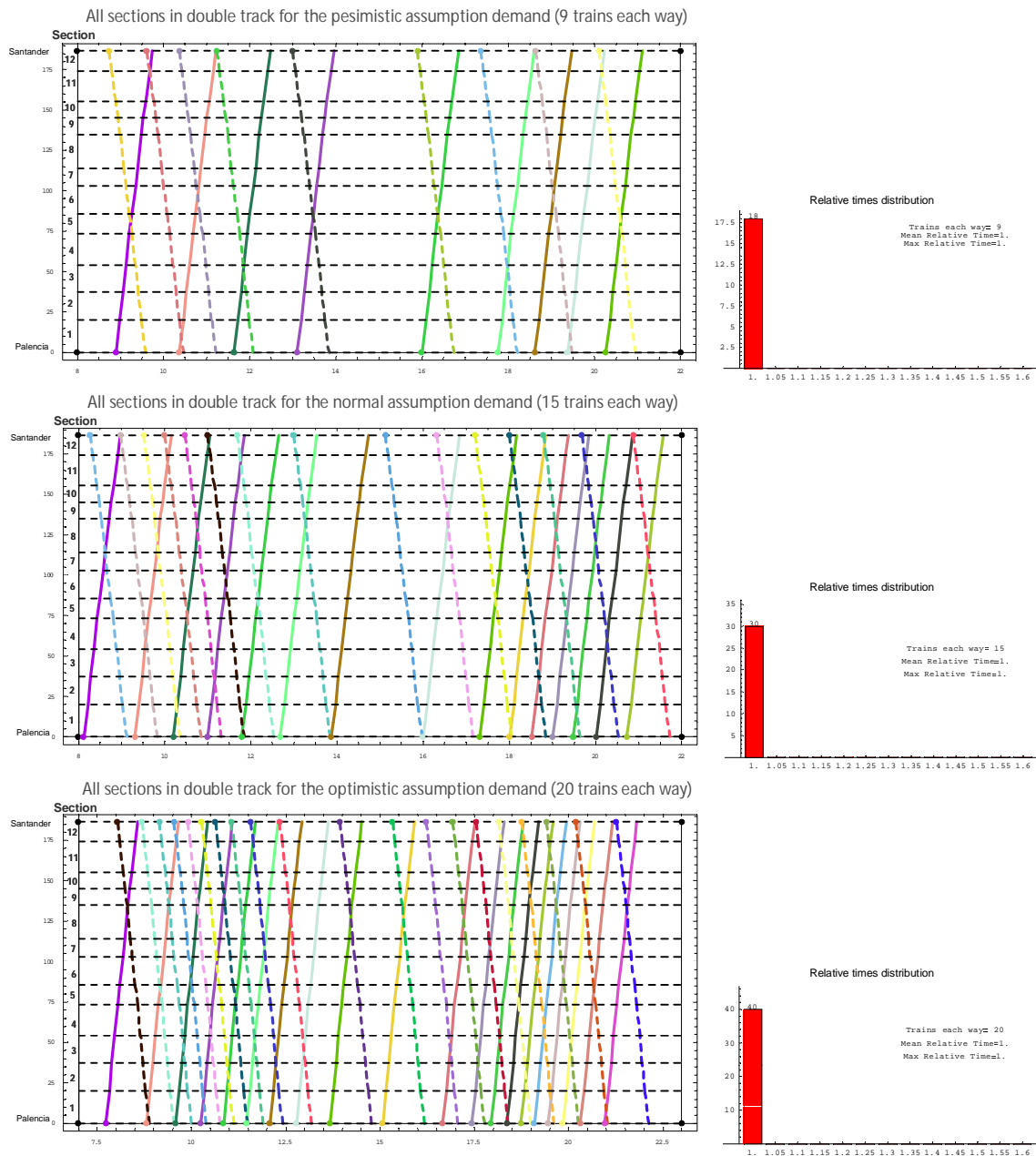


Figura 15: Gráficos de circulación resultantes del modelo y sus respectivas distribuciones de tiempos relativos de viaje.

La selección y evaluación de las siguientes opciones de infraestructura, incorporando tramos de vía simple, podría realizarse con criterios puramente combinatorios y dada la eficiencia con la que el modelo de explotación ajusta los servicios indicando los índices de calidad resultantes, esto sería perfectamente posible. Sin embargo, y como ya apuntábamos en la descripción de la metodología, en el ejemplo que tratamos nos ha parecido más

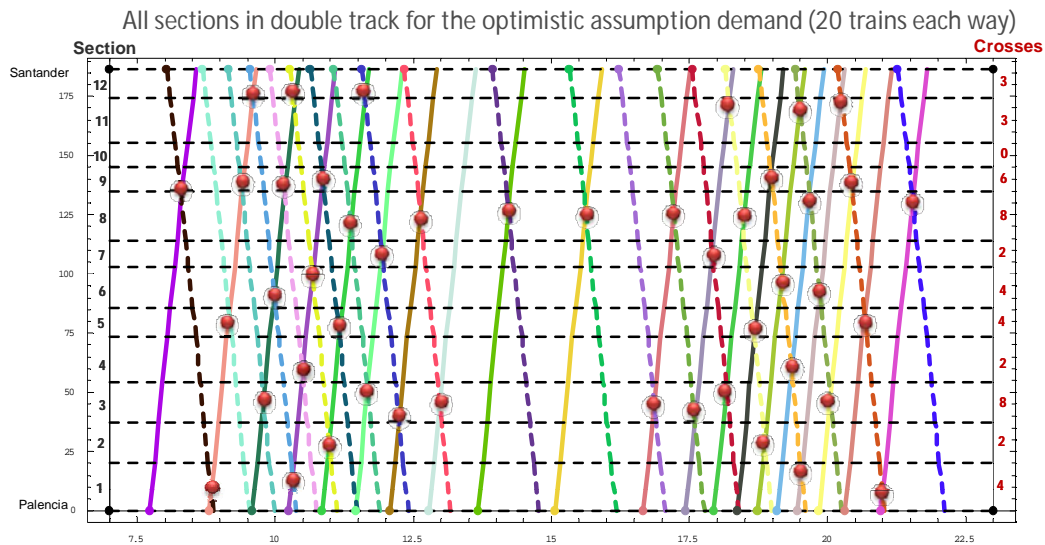


Figura 16: Gráfico de circulación para 20 trenes por sentido y toda la línea en vía doble. Los círculos rojos representan los puntos de cruce de los trenes en dirección contraria.

interesante seleccionar las sucesivas opciones inspirando la selección de cada una en el análisis de los resultados de la anterior y el objetivo de reducir costes de construcción manteniendo los niveles de calidad

Opción II. Para su definición hemos analizado el resultado del modelo para la Opción I con 20 trenes por sentido (ver Figura 16). En este gráfico de explotación se pueden identificar (en rojo) los puntos de cruce de los distintos trenes de tal manera que es posible contabilizar los cruces que se producen en cada uno de los tramos en los que se ha dividido la línea (ver parte derecha de la Figura). Por ejemplo, en los tramo 3 y 8 se producen 8 cruces, en el 9, se cuentan 6, etc. Inspirándonos en esta observación se ha confeccionado una nueva opción (Opción II) para ser analizada. En ella los tramos 2,3,8 y 9 serían construidos en vía doble mientras que el resto lo estaría en vía única.

Los resultados que aporta el modelo de explotación para esta Opción II con los distintos niveles de demanda se muestra en la Figura 17. En ella los tramos en vía doble aparecen en sombreado. Nótese que en estos tramos de vía doble, los trenes que viajan de Santander a Palencia están representados con líneas discontinuas ya que circulan por la vía 2. Sin embargo, cuando circulan por vía única, todos los trenes lo hacen por la vía 1 y por tanto se representan en línea continua.

Del análisis de la Figura 17 se puede concluir que:

- El modelo ha tenido que adaptar el horario de salida de los trenes con el fin de que puedan cruzarse con los del sentido contrario y así minimizar el tiempo relativo de viaje. A este respecto y para que el resultado final respete al máximo los horarios de salida propuestos por la operadora, hemos impuesto como condición que la modificación de dicho horario sea como mucho de 15 minutos.
- Esta pequeña modificación en algunos horarios de salida de los trenes hace que todos los cruces se realicen en los tramos de vía doble. Por tanto, no se hace necesario disponer puntos de parada para trenes con el fin de que se puedan cruzar con los del sentido contrario en vía única.
- En algún caso excepcional el modelo ha tenido que adaptar el horario deseado de algún tren hasta agruparlo con el siguiente, formando un tren en doble composición para así poder atender a la demanda.

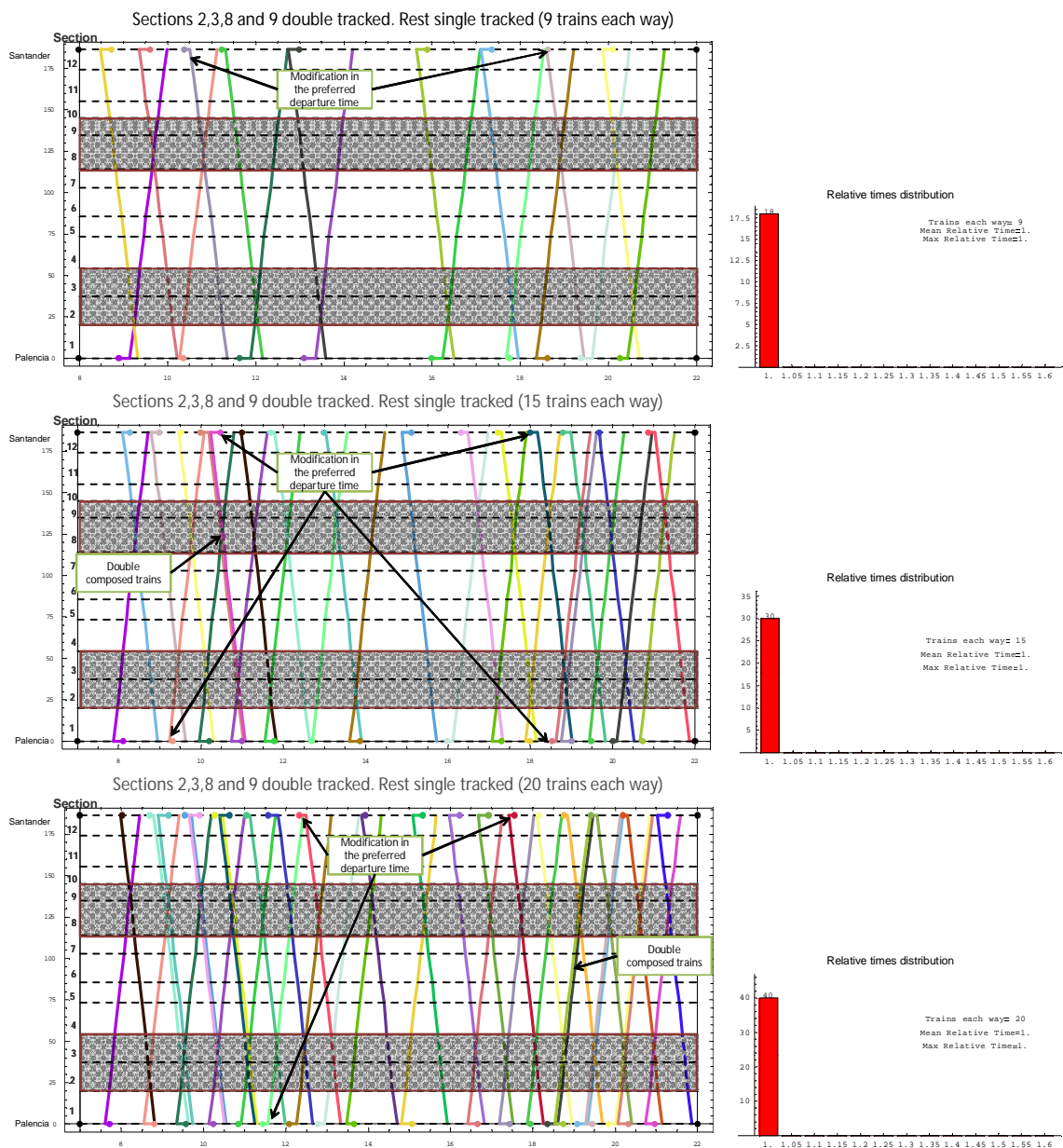


Figura 17: Graficos de circulación resultantes del modelo para la opción en la que los tramos 2,3, 8 y 9 se han dispuesto en vía doble. Se incluyen a la derecha sus respectivas distribuciones de tiempos relativos de viaje.

- Por lo que se refiere a la calidad de la explotación asociada a esta Opción II, los datos de la Figura 17 indican que los reajustes que acabamos de mencionar llevan al modelo a una solución cuyos niveles de calidad son los mismos que los de la Opción I, es decir, óptimos.

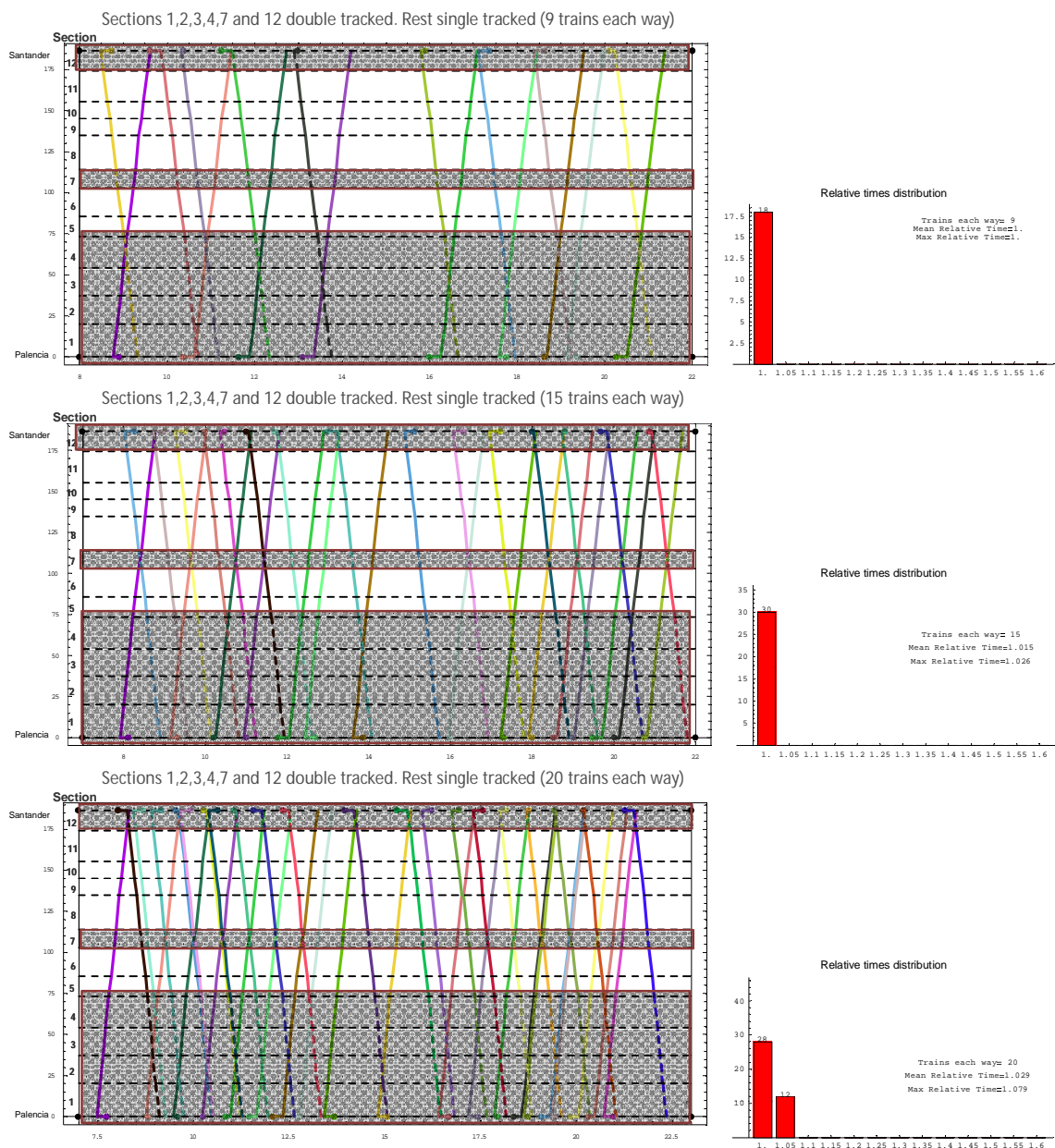


Figura 18: Graficos de circulación resultantes del modelo para la opción en la que los tramos 1,2,3,4,7 y 12 se han dispuesto en vía doble. Se incluyen a la derecha sus respectivas distribuciones de tiempos relativos de viaje.

Opción III. Para la selección de la Opción III apelaremos a criterios evidentes, relacionados con los costes de infraestructura. A este respecto hacemos notar que de entre los 12 tramos en los que hemos dividido la línea el 8 y el 9 son los más caros en los que se refiere a costes de construcción (Ver Tabla 1). El tramo 8 contiene un túnel de 16.5 km que cuesta en vía doble entorno a 1053 millones de euros (50 millones de euros por kilómetro) y un tramo de 8.7 km de una alta concentración de viaductos que cuesta en vía doble cerca de 283 millones de euros

(26 millones de euros por kilómetro). Tras estos dos y en orden descendente de coste figuran los tramos 5,6,10 y 11. Con estos datos en mente definimos la Opción III disponiendo en vía única todos los tramos que acabamos de mencionar y en vía doble los restantes (1,2,3,4,7 y 12). Los gráficos de explotación se muestran en la Figura 18, de la que se pueden extraer las siguientes conclusiones:

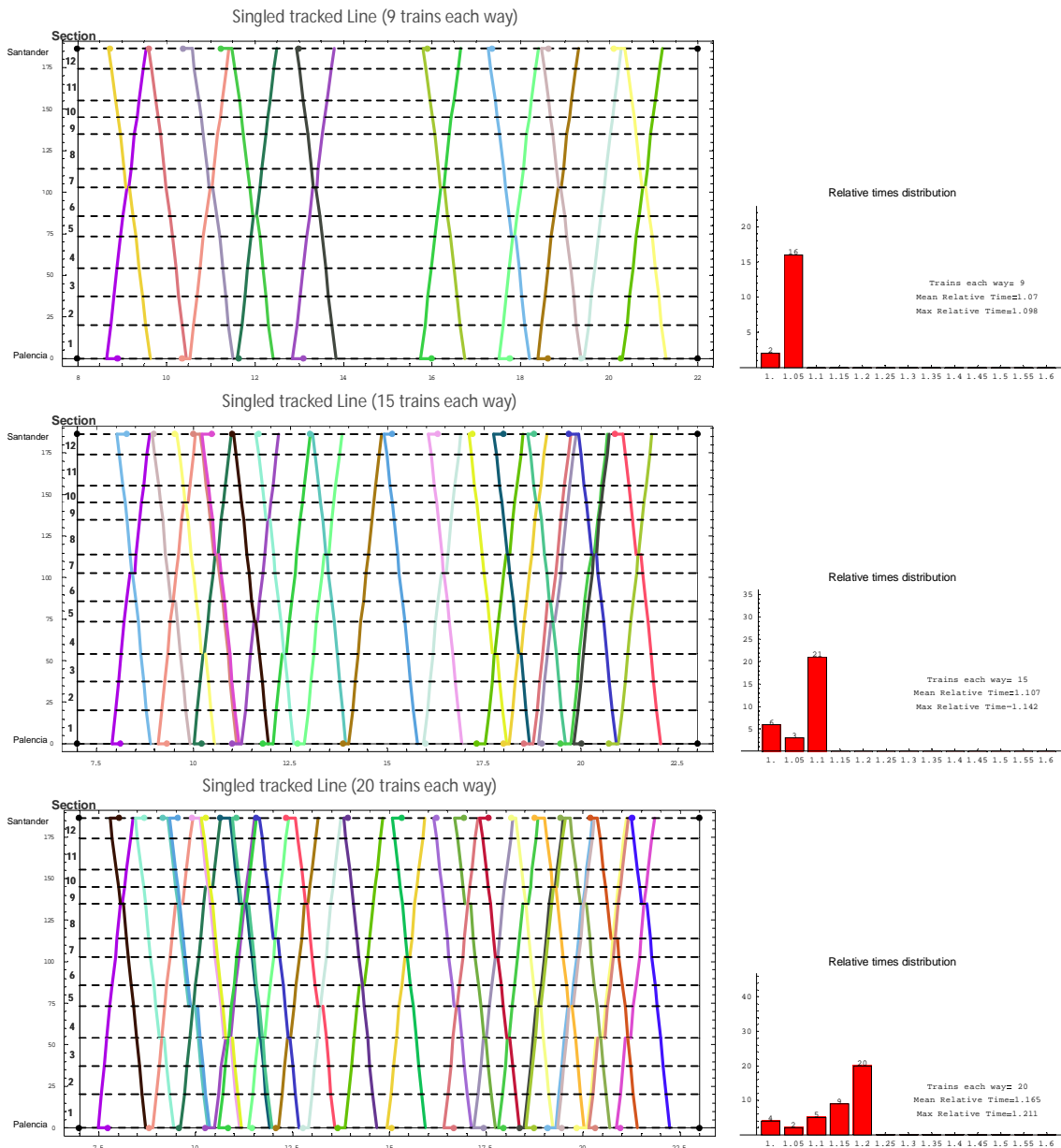


Figura 19: Gráficos de circulación resultantes del modelo para la opción en la que todos los tramos han dispuesto en vía única. Se incluyen a la derecha sus respectivas distribuciones de tiempos relativos de viaje.

- Al igual que en el caso anterior, el modelo ha tenido que adaptar el horario de salida de los trenes, pero sin

relajar la restricción de los 15 minutos de margen.

- Los cruces para los casos de 9 y 15 trenes por sentido han sido resueltos en los tramos de vía doble gracias a la modificación de los horarios de salida y a pequeñas modificaciones en la velocidad de marcha de los trenes. Para el caso de 20 trenes por sentido, el modelo ha tenido que disponer un punto de parada (PAET) al inicio del tramo 9 con el fin de que los trenes 11 y 35 puedan cruzarse en vía única.
- Para el caso de 20 trenes por sentido el modelo ha tenido que adaptar el horario deseado de algún tren para agruparlo con el siguiente.
- Los indicadores de calidad son buenos. En concreto, los tiempos relativos medios son de 1.000, 1.015 y 1.029 y los tiempos relativos máximos son 1.000, 1.026 y 1.079 respectivamente para los casos de 9, 15 y 20 trenes por sentido. Es decir que, por ejemplo, para el caso de 20 trenes por sentido, la diferencia entre el tren que más tarda en realizar el trayecto y el tren más rápido es de un 7.9%. Para el caso de la línea entre Palencia y Santander ello implica que el tiempo de recorrido pasa de 51 a 55 minutos.

Opción IV. Los datos de la Figura 18 ponen de manifiesto que la mayor parte de los cruces en los primeros tramos de vía doble se producen, para todos los casos, en el tramo 2. Ello sugiere definir la Opción IV a partir de la Opción III, pasando a vía única los tramos 1 y 4 con lo que los únicos que se mantienen en vía doble son los tramos 2,7 y 12. Como se verá en el punto siguiente ello supone un ahorro de más 100 millones de euros. De esta solución, no incluimos el grafiado de trenes, pero sí sus indicadores de calidad, muy parecidos a los de la Opción III y que aparecen recogidos en la Tabla 2.

Opción V. Consideraremos por último la opción de vía única en todos los tramos (Opción V) que como reverso de la Opción I será la de menor coste y, a cambio, la de más bajas garantías de explotación. Los resultados se muestran en la Figura 19. Los indicadores de calidad son, en efecto, peores que en los casos analizados anteriormente: el tiempo relativo máximo para el caso de 15 trenes por sentido (que por otra parte parece el más razonable según los estudios de demanda analizados) es de 1.142. Para el caso de 20 trenes esta valor asciende hasta 1.21 lo que querría decir que el tiempo de recorrido del tren más lento superaría en un 21% el tiempo del tren más rápido.

2.3.3. Etapa 3: Comparación de resultados

La metodología que proponemos acaba en un análisis y comparación de resultados una vez que el técnico entiende que se dispone de opciones de infraestructura suficientes. Sin pretender realizar un completo estudio coste-beneficio (lo que constituye la fase final en el proceso de toma de decisiones), sí hemos querido dejar constancia de algunas de las partidas contables de los intervinientes en el proceso de construcción, explotación y mantenimiento de esta línea: ADIF, los operadores ferroviarios y, como se verá, también implícitamente, los usuarios y la sociedad en general. Todo ello queda recogido en la Tabla 2.

La columna primera recoge las opciones de infraestructura analizadas, desde la I (todo en vía doble), hasta la V (todo en vía única) para cada una de las tres opciones de explotación (9, 15 o 20 trenes diarios por sentido).

En la segunda se miden los niveles de calidad en términos de valores medio y pésimo de los tiempos relativos. El simple hecho de que el peor valor obtenido para los tiempos relativos máximos apenas supere el 21% de incremento respecto del tiempo óptimo da una prueba muy evidente a efectos de apreciar las posibilidades de optimización de la explotación que el modelo ofrece.

La columna tercera indica el coste de construcción y el coste de mantenimiento anual en millones de euros. La observación de estas partidas permite identificar la diferencia de coste entre construir la totalidad de la línea en vía única y construirla en vía doble (1620 millones de euros). Además, el mantenimiento de la infraestructura también será manifiestamente menor para el caso de vía única. Es evidente que si consideramos la calidad de la explotación, cuando la intensidad de tráfico es alta una línea construida en su totalidad en vía única resulta menos eficiente. Sin embargo el análisis de explotación que se ha llevado a cabo pone de manifiesto que la Opción IV,

Case			Op. Quality		ADIF		Rail operator								Incomes
Option	Tracks	Trains	Mean RT	Max RT	Costs		Costs						costs	Fares	
					Construction	Maintenance	Maintenance	Amortization	Track Usage	Energy	Staff	Client services			
Option I	Double Track	20	1.000	1.000	3337.08	8.17	8.06	11.25	22.14	2.60	1.84	10.30	56.19	76.63	
		15	1.000	1.000		6.13	6.05	8.25	16.65	1.95	1.38	7.72	42.00	57.47	
		9	1.000	1.000		3.68	3.63	5.25	10.21	1.17	0.83	4.63	25.72	34.48	
Option II	Double Track T_2, T_3, T_8, T_9	20	1.000	1.000	2505.69	6.04	8.06	11.25	21.50	2.60	1.84	10.30	55.55	76.63	
		15	1.000	1.000		4.53	6.05	8.25	16.17	1.95	1.38	7.72	41.52	57.47	
		9	1.000	1.000		2.72	3.63	5.25	9.73	1.17	0.83	4.63	25.24	34.48	
Option III	Double Track T_1, T_2, T_3, T_4 T_7, T_{12}	20	1.029	1.079	1913.18	6.60	8.06	11.25	21.29	2.52	1.84	10.30	55.26	76.63	
		15	1.015	1.026		4.95	6.05	8.25	16.30	1.92	1.38	7.72	41.62	57.47	
		9	1.000	1.000		2.97	3.63	5.25	9.61	1.17	0.83	4.63	25.12	34.48	
Option IV	Double Track T_2, T_7, T_{12}	20	1.073	1.117	1804.82	5.61	8.06	11.25	21.18	2.41	1.84	10.30	55.04	76.63	
		15	1.032	1.055		4.21	6.05	8.25	15.88	1.89	1.38	7.72	41.17	57.47	
		9	1.017	1.026		2.53	3.63	5.25	9.67	1.15	0.83	4.63	25.16	34.48	
Option V	Single Track	20	1.165	1.211	1717.00	4.90	8.06	11.25	20.97	2.23	1.84	10.30	54.65	76.63	
		15	1.107	1.142		3.68	6.05	8.25	15.72	1.76	1.38	7.72	40.88	57.47	
		9	1.070	1.098		2.21	3.63	5.25	9.38	1.09	0.83	4.63	24.81	34.48	

Cuadro 2: Partidas contables de algunos de los intervinientes en el proceso construcción-explotación de la línea de Alta Velocidad entre Palencia y Santander (en millones de euros al año)

con un incremento de coste de apenas 100 millones de euros en comparación con la construcción de la línea en vía única da como resultado un incremento considerable de la calidad de la explotación, permitiendo ahorrar a la sociedad más de 1500 millones de euros en comparación con los 3337 millones de euros que costaría la línea en vía doble (Opción I).

La partida de costes e ingresos del operador ferroviario se recoge en la columna cuarta. Este apartado incluye los epígrafes de mantenimiento y amortización de material rodante, los costes por uso de infraestructura y energía, así como las partidas destinadas a personal y servicio al cliente. Además se han estimado los ingresos por venta de billetes suponiendo una ocupación media de los trenes del 60%.

Parece evidente que lo que le interesa al operador es prestar un servicio de calidad y obtener el máximo rendimiento a sus recursos. Lo que expresa esta parte de la tabla es que tanto los costes como los ingresos son similares para todas las opciones de infraestructura, si bien, existe un pequeño ahorro anual a medida que aumenta el porcentaje de vía única construida. Por ejemplo si comparamos los costes del explotador para la opción de la línea en vía doble frente a la opción de los tramos 2,7 y 12 para 15 trenes por sentido, el ahorro anual es de casi 800000 euros al año. Este hecho se debe fundamentalmente a la partida de tasas por uso de la infraestructura que según las tarifas de ADIF es significativamente inferior en vía única.

Dado que los costes de mantenimiento de los tramos en vía única son menores, la diferencia entre los ingresos por uso de vía y los costes por mantenimiento es mayor a medida que aumenta el porcentaje de vía única. Así por ejemplo la diferencia para vía doble es de unos 10.5 millones de euros mientras que para la opción antes mencionada es de 11.6. Este hecho tiene su correlato para las partidas contables del administrador de infraestructura.

En suma, mientras que las cuentas del operador ferroviario son más o menos las mismas para las distintas opciones de infraestructura, los ahorros en los costes de construcción y mantenimiento son notables a medida que aumenta el porcentaje de construcción de vía única. Por otro lado los indicadores de servicio de la explotación muestran que el deterioro de la calidad a medida que se aumenta el porcentaje de vía única sólo resulta relevantes cuando estos porcentajes son muy considerables y aún en ese caso no pasan de valores moderados. Téngase en cuenta además que los niveles de tráfico analizados, son en algunos casos manifiestamente superiores a los necesarios para satisfacer la demanda esperada.

3. Conclusiones

La red española de alta velocidad es la tercera a nivel mundial en lo que a longitud se refiere y según los datos disponibles pasará a ser la segunda en un horizonte de apenas tres años. Las densidades de la red española por superficie y por habitante son las mayores entre todos los países analizados, tanto europeos como asiáticos.

La producción de transporte en términos de demanda atendida tanto en volumen de viajeros o de viajeros-kilómetro anuales relega a España al último lugar, con valores notablemente inferiores a los del resto de redes analizadas.

Los principales corredores españoles, Madrid-Sevilla y Madrid-Barcelona no registran crecimientos significativos en los últimos años. En particular el Madrid-Sevilla parece haber alcanzado la fase de maduración.

Todo ello hace necesaria una reflexión sobre la conveniencia o no, de abrir nuevas líneas a causa de sus elevados costes de construcción y mantenimiento.

En todo caso, en el supuesto de optar por la construcción, la combinación de vía única en los tramos más caros (en zonas de topografía complicada con túneles y viaductos) alternada con la doble (en zonas de topografía plana), hace posible reducir considerablemente estos costes.

En el caso de estudio que se analiza, la hipótesis de vía simple en los seis tramos más caros se traduciría en unos costes de construcción de prácticamente la mitad de los correspondientes a los de vía doble en toda la línea y todo ello sin pérdida significativa de la calidad en el servicio: podrían circular fácilmente 15 trenes en cada sentido, lo cual es más de lo previsible, incluso considerando un horizonte lejano. El coste de mantenimiento también quedaría notablemente reducido.

La consideración de las reflexiones anteriores nos lleva a la conclusión final de que la vía doble es difícil de aceptar como solución más adecuada en los tramos periféricos de la red española de alta velocidad, como hasta ahora se viene haciendo. Por el contrario, la combinación vía simple-vía doble podría ser la más razonable en la mayoría de los casos. Ello supondría un notable ahorro sin pérdida de prestaciones para el usuario. En suma, nos parece conveniente reconsiderar el diseño de la alta velocidad española teniendo en cuenta este planteamiento.

AUTORES DEL DOCUMENTO:

Por la Universidad de Castilla la Mancha:

José María Menéndez, Doctor Ingeniero de Caminos, Catedrático de Transportes.

Inmaculada Gallego Giner, Doctora Ingeniera de Caminos, Profesora del área de Construcción.

Ana Rivas Álvarez, Doctora Ingeniera de Caminos, Profesora del área de Transportes.

Santos Sánchez-Cambronero, Doctor Ingeniero de Caminos, Profesor del área de Transportes.

Por la Universidad de Cantabria:

Enrique Castillo Ron, Doctor Ingeniero de Caminos, Catedrático de Matemática Aplicada.