

OPTIMIZACION DE INVERSIONES EN INFRAESTRUCTURAS DE ALTA VELOCIDAD FERROVIARIA



ENRIQUE CASTILLO
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



JOSE MARIA MENENDEZ
INMACULADA GALLEGO
UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA



**REAL ACADEMIA
DE INGENIERIA**



**FUNDACION
PRO REBUS
ACADEMIAE**

25 Junio 2013

ÍNDICE DE LA CHARLA

- 1 **Infraestructuras y servicios de alta velocidad ferroviaria. La red española en el contexto mundial.**
- 2 **Una herramienta informática y metodológica para optimizar la gestión de líneas de alta velocidad. Estudio de la vía alternada doble-simple.**
- 3 **Aplicación de la metodología al caso Palencia-Santander. Estudio de alternativas.**

Infraestructuras y servicios de alta velocidad ferroviaria



JOSE MARIA MENENDEZ



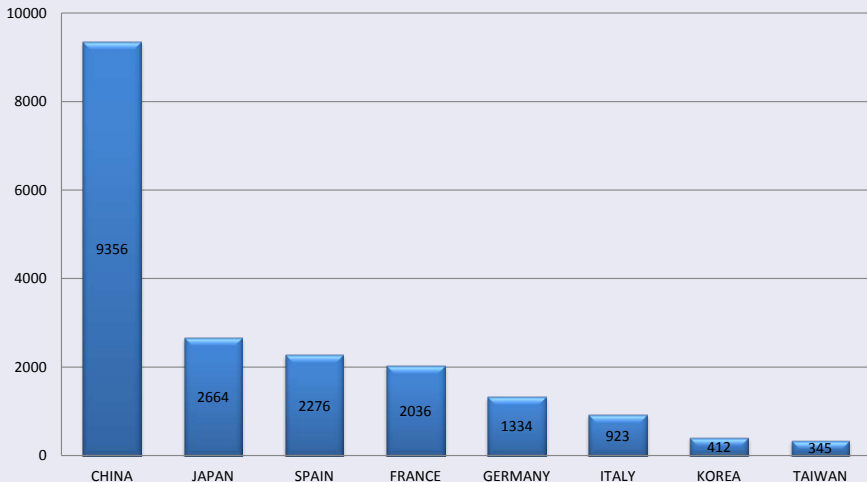
UNIVERSIDAD DE
CASTILLA-LA MANCHA

La red española en el contexto mundial

INDICE

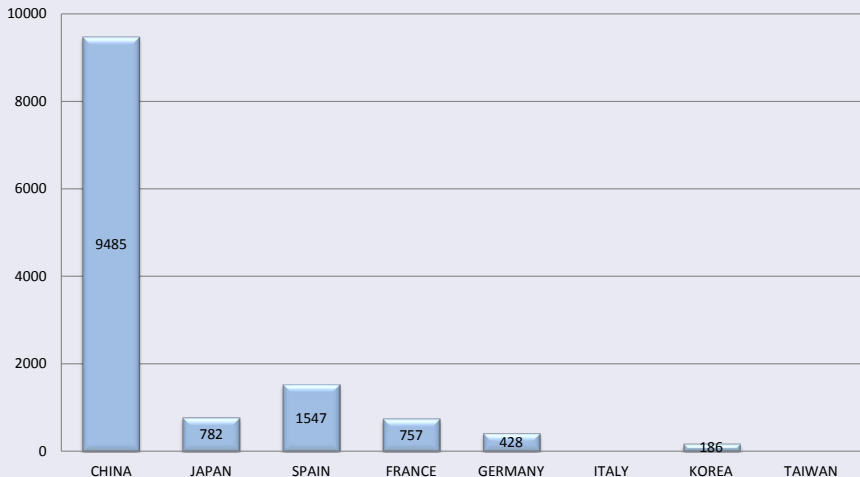
- 1 Extensión y densidad
 - Longitudes
 - Densidades de red
- 2 Producciones de tráfico
 - Viajeros
 - Viajeros-kilómetro
 - Densidades de producción
- 3 Oferta de servicios
 - En grandes corredores
 - Oferta y estructura radial
- 4 Conclusiones

HIGH SPEED RAIL NETWORK IN THE WORLD IN OPERATION (KILOMETERS)



Source: UIC

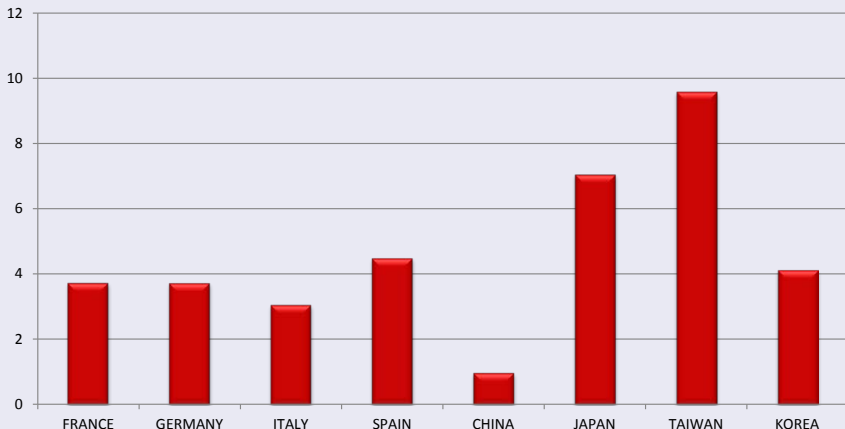
HIGH SPEED RAIL NETWORK IN THE WORLD UNDER CONSTRUCTION (KILOMETERS)



Source: UIC

HIGH SPEED RAIL NETWORK DENSITY PER LAND AREA

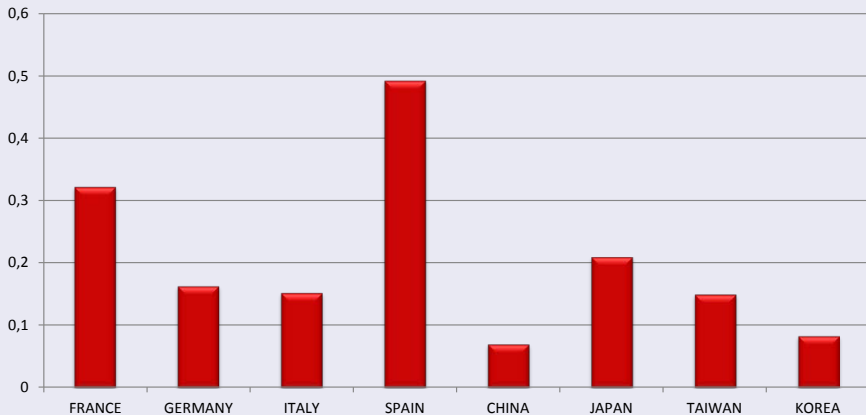
(Km in operation/1000 Km²)



Source: UIC

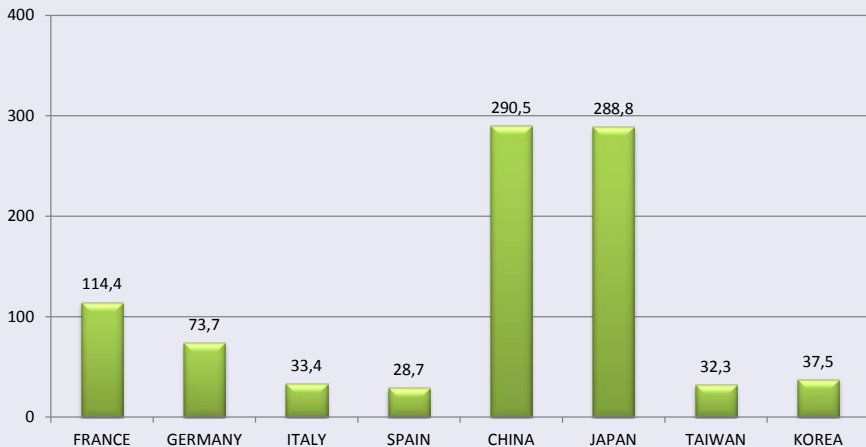
HIGH SPEED RAIL NETWORK DENSITY PER POPULATION

(Km in operation/10000 Inhabitant)



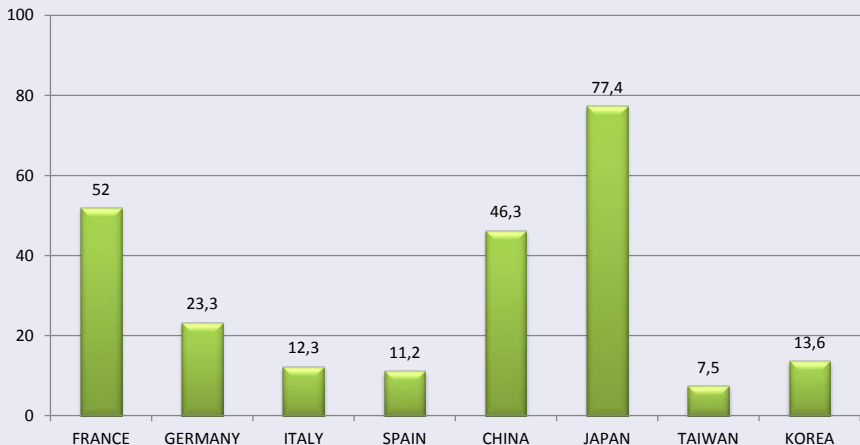
Source: UIC

HIGH SPEED RAIL TRAFFIC (10⁶ PASSENGER)



Source: UIC

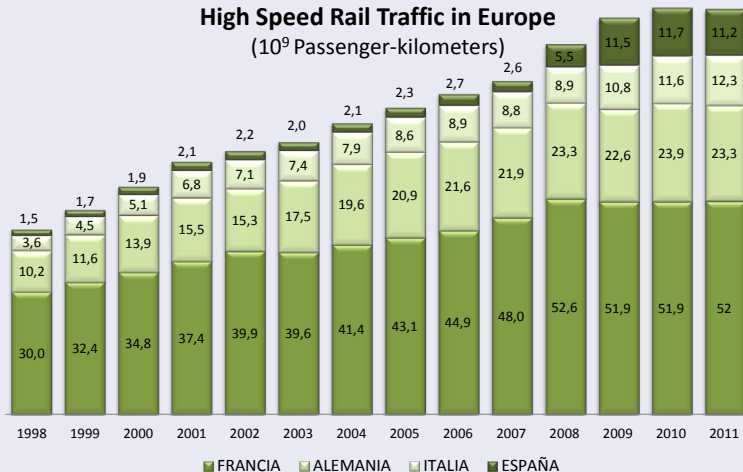
HIGH SPEED RAIL TRAFFIC (10^9 PASSENGER-KILOMETERS)



Source: UIC

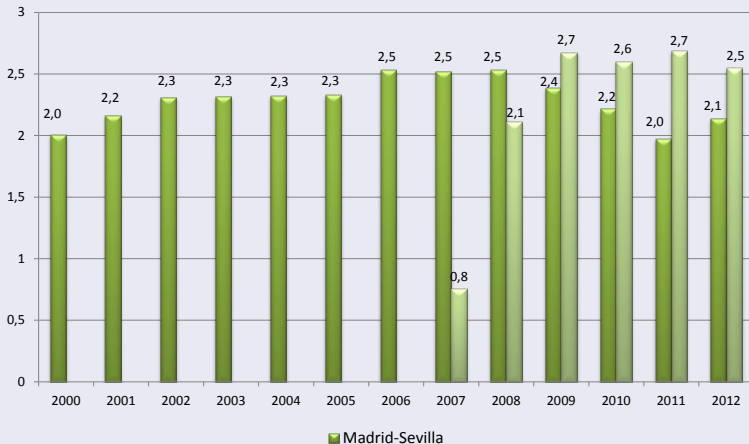
HIGH SPEED RAIL TRAFFIC IN EUROPE

High Speed Rail Traffic in Europe (10⁹ Passenger-kilometers)



Source: UIC

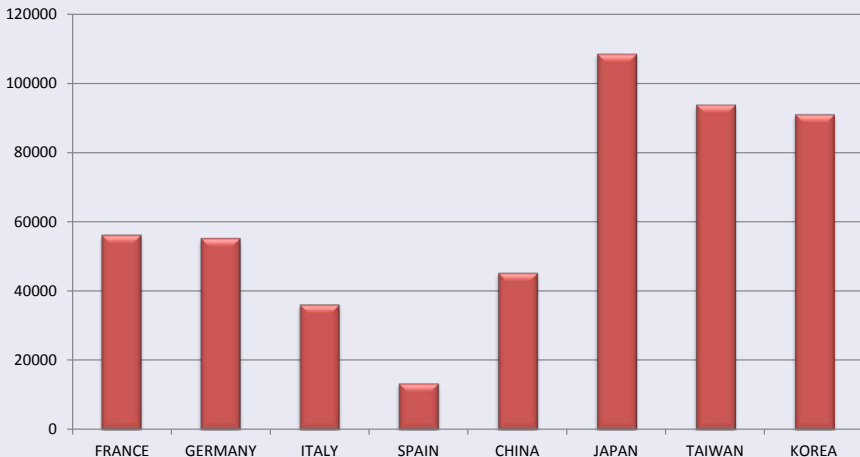
HIGH SPEED TRAFFIC IN SPAIN (10⁶ PASSENGER-KILOMETERS)



Source: FFE

HIGH SPEED RAIL PASSENGER PER HIGH SPEED RAIL KILOMETERS

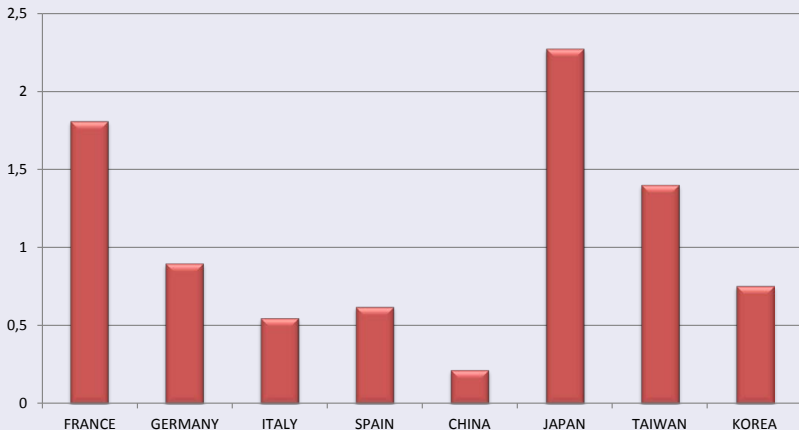
(Passenger/Kilometer in operation)



Source: UIC

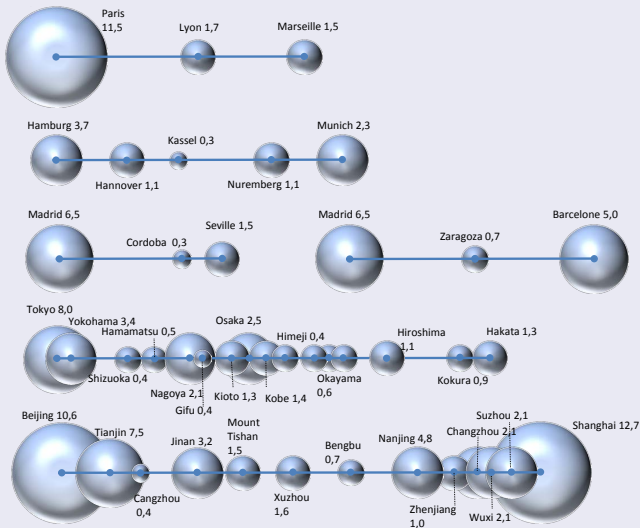
HIGH SPEED RAIL PASSENGERS PER POPULATION

(Passenger/Inhabitant)

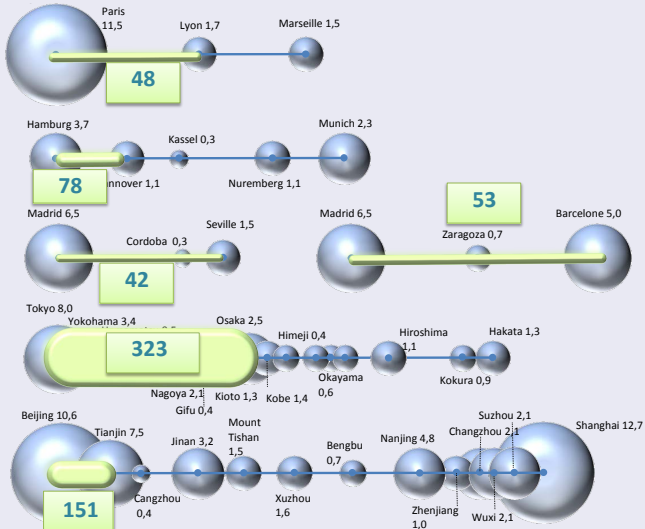


Source: UIC

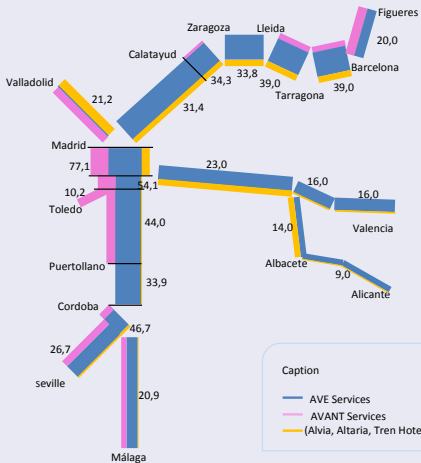
DAILY SERVICES ON INTERNATIONAL CORRIDORS



DAILY SERVICES ON INTERNATIONAL CORRIDORS



DAILY HIGH SPEED SERVICES (IN EACH DIRECTION)



Source: FFE

ANÁLISIS COMPARADO DE LA RED ESPAÑOLA DE ALTA VELOCIDAD

CONCLUSIONES

- 1 La red española de alta velocidad es la tercera (pronto la segunda) en longitud entre las redes mundiales.
- 2 Su densidad por superficie y población es la mayor del mundo.
- 3 La producción de tráfico en viajeros y viajeros-kilómetro es la más baja entre las estudiadas.
- 4 Los principales corredores no registran crecimiento en los últimos años. En particular el eje Madrid-Sevilla parece estar en fase de maduración.
- 5 La oferta de trenes diarios en los grandes corredores de alta velocidad españoles es comparable a la del resto de los países europeos.
- 6 La estructura radial concentra los tráficos en la zona centro y los reduce en la periferia.

Una herramienta informática y metodológica para optimizar la gestión de líneas de alta velocidad



ENRIQUE CASTILLO



UNIVERSIDAD
DE CANTABRIA

Estudio de la vía alternada doble-simple

INTRODUCCIÓN

Tal como reza el programa de la sesión, me propongo **presentar nuestra alternativa a la vía doble**.

En particular, **describiré la solución** a la que hemos llegado y **cómo se ha llegado a la misma**.

Ello nos permitirá conocer en detalle en qué consiste la **vía alternada doble-simple** y sus importantes ventajas.

SITUACIÓN ACTUAL Y FUTURA

Independientemente de lo anterior hay que señalar que, mientras que en los pasados años, la construcción de líneas de alta velocidad en España estaba dirigida a **conectar dos grandes núcleos de población**, en la actualidad y en futuras acciones se están proyectando y construyendo **nuevas líneas en las que sólo uno de los extremos es de gran población**.

Esto requiere un **planteamiento completamente diferente** y ciertas reflexiones:

- 1 La primera reflexión consiste en darse cuenta de que al tratarse de líneas periféricas **el número de usuarios es necesariamente mucho menor**, lo que implica una **demanda mucho más reducida** y una **frecuencia de trenes muy inferior**.
- 2 La segunda reflexión debe ir en torno al **cuestionamiento de la vía doble** y a pensar en una **nueva alternativa**.
- 3 Seguidamente y tras **rechazar la vía única**, por su alta ineficiencia, se requieren **nuevas soluciones**. Es así como surge la **vía alternada doble-simple (ADST)** (alternate double-single track).
- 4 Finalmente, se plantea la necesidad de tomar decisiones con criterios de optimización, de donde resulta que **es imprescindible una herramienta informática** de diseño, pre-proyecto y análisis de soluciones.

LA VÍA ALTERNADA DOBLE-SIMPLE ADST

La vía alternada doble-simple (alternate double-single track) (**ADST**) esencialmente consiste en utilizar **vía simple en los tramos caros** (túneles y viaductos) y **vía doble en los baratos** (zonas a cielo abierto) y **exclusivamente donde haga falta**.

Hay que señalar muy claramente que:

- 1 **No se trata de vía simple.**
- 2 **No se trata tampoco de vía doble.**
- 3 En rendimientos está mucho **más cerca de la vía doble** que de la simple.
- 4 En coste está mucho **más cerca de la vía simple** que de la doble.
- 5 Consigue prácticamente los **mismos rendimientos que la vía doble** para la demanda futura esperada e incluso algo superior a ella.
- 6 **Reduce notablemente el coste de construcción** (hasta un 40 %).
- 7 **Reduce notablemente el coste de mantenimiento.**
- 8 Finalmente, **puede hacer viable ciertas líneas** que no lo son en vía doble.

INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN

La nueva situación nos llevó a analizar a partir de 2007 otras alternativas a la vía doble y que fueran diferentes de la vía simple, que evidentemente no era una solución válida.

Inmediatamente **desarrollamos nuevas ideas y nuevos métodos basados en la optimización y en los análisis de sensibilidad.**

Dada nuestra condición de Profesores de Universidad, la **búsqueda por la excelencia** y la publicación en revistas de calidad fue uno de nuestros objetivos.

De este trabajo surgieron las dos publicaciones en inglés, **una en 2009** y la **otra en 2011**, que siguen:

PUBLICACIÓN EN TOP (2009)

Top (2009) 17: 256–287
DOI 10.1007/s11750-008-0057-0

ORIGINAL PAPER

Timetabling optimization of a single railway track line with sensitivity analysis

Enrique Castillo · Inmaculada Gallego ·
José María Ureña · José María Coronado

Received: 15 October 2007 / Accepted: 4 June 2008 / Published online: 8 July 2008
© Sociedad de Estadística e Investigación Operativa 2008

Abstract The paper deals with the timetabling problem of a single-track railway line. To solve the timetabling problem, we propose a three-stage approach combining several optimization criteria. Initially and mainly, the maximum relative travel time (ratio of travel time to minimum possible travel time) is minimized subject to a set of constraints, including departure time, train speed, minimum and maximum dwell time, and headway at track segments and stations. Since this problem has many solutions, the process is repeated for other trains, keeping the relative travel times of the critical train fixed, until all trains have been assigned their optimal relative travel times. In the second stage, the prompt allocation of trains is a secondary objective, and finally, in the third stage, the one minimizing the sum of the station dwell times of all trains, keeping the relative travel times constant, is selected to reduce fuel consumption, as a tertiary objective. To consider the user preferences in the optimization problems, the user preference departure time is used instead of the actual planned departure times. In order to guarantee that the exact or a very good approximate global optimum is attained, an algorithm based on the bisection rule is used. This method allows the computation time to be reduced in at least one order of magnitude for 42 trains. The problem of sensitivity analysis is also discussed, and closed form formulas for the sensitivities in terms of the dual variables are given. Several examples of applications are presented to illustrate the goodness of the proposed method. The results show that an adequate selection of intermediate stations and of the departure times are crucial in the good performance of the line and that inadequate spacings between consecutive trains can block the line. In addition, it is shown that, in order

E. Castillo (✉)
Department of Applied Mathematics and Computational Sciences, University of Cantabria, 39005
Santander, Spain
e-mail: casto@unican.es

E. Castillo · I. Gallego · J. M. Ureña · J. M. Coronado
Department of Civil Engineering, University of Castilla-La Mancha, 13071 Ciudad Real, Spain

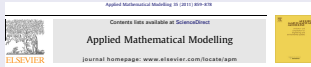
 Springer



E. Castillo, I. Gallego, J. M. Ureña and J. M. Coronado. Timetabling optimization of a single railway track line with sensitivity analysis. **Top**, 17:2, 256–287, 2009

Describe los problemas de la vía simple y cuantifica cómo mejora notablemente su rendimiento con el uso y **localización óptima de PAETS** (puntos de adelantamiento y estacionamiento de trenes) y **libertad en la selección de horas de salida**.

PUBLICACIÓN EN APPLIED MATHEMATICAL MODELING (2011)



Timetabling optimization of a mixed double- and single-tracked railway network

Enrique Castillo^{A,B}, Inmaculada Gallego^B, José María Ureña^A, José María Coronado^B

^ADepartment of Applied Mathematics and Computational Sciences, University of Cantabria, 39005 Santander, Spain
^BDepartment of Civil Engineering, University of Castilla-La Mancha, 13071 Ciudad Real, Spain

ARTICLE INFO

Article history:
Received 4 April 2009
Received in revised form 11 July 2010
Accepted 16 July 2011
Available online 29 July 2011

Keywords:
Train timetabling
Branch-and-bound
Global optimum
Objective function upper bound

ABSTRACT

The paper deals with the timetabling problem of a mixed multiple- and single-tracked railway network. Out of all the solutions satisfying the minimum relative travel time, the one minimizing the sum of the relative travel times is selected. Linear programming is taken into account in the optimization problem. Here, the limited departure times of travellers are used instead of artificially planned departure times. To find the global optimum of the optimization problem, an algorithm based on the branch-and-bound is used to provide sharp upper bounds of the objective function together with one such that allows us to drastically reduce the number of binary variables to be evaluated by considering only those which really matter. These two strategies together permit the memory requirements and the computation time to be reduced, the latter exponentially with the number of trains (central nodes of magnitude for existing networks), when compared with other methods. Several examples of applications are presented to illustrate the possibilities and usefulness of the proposed method. The model is applied to the case of the existing Madrid-Sevilla high-speed line (double track), together with several extensions to Toledo, Valencia, Alicante, and Málaga, which are contemplated in the future plans of the high-speed train Spanish network. The results show that the computation time is reduced drastically, and that in some corridors single-tracked lines would suffice instead of double-tracked lines.

© 2010 Elsevier Inc. All rights reserved.

1. Introduction and motivation

The optimization of the railway lines capacity is playing an important role in railway management (including timetabling, re-scheduling and traffic control). In this context, researchers tend to increase the capacity of the whole railway network, taking into consideration type of track (single or double), speed, time constraints, station location, safety, etc. Capra et al. [1] discuss railway optimization problems in general and provide a state-of-the-art review, showing how they are related and even suggesting a unified treatment of them. In particular they treat the train schedule problem, which is one of the most interesting problems in transportation planning and operation of railway systems.

Although, at a first glance, railway traffic timetabling and real-time control (and re-scheduling when perturbations occur) could appear to be very similar problems, sharing common mathematical tools and models, there is a significant difference

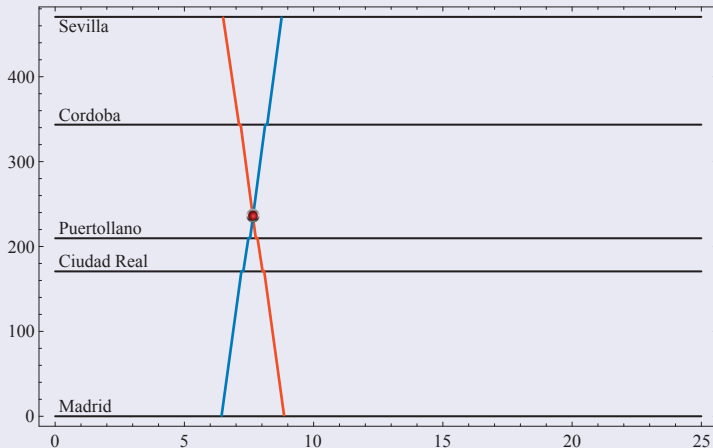
^{*} Corresponding author at: Department of Applied Mathematics and Computational Sciences, University of Cantabria, 39005 Santander, Spain. Tel.: +34 942201522. E-mail: enrique.castillo@unican.es (E. Castillo).



E. Castillo, I. Gallego, J. M. Ureña and J. M. Coronado. Timetabling optimization of a mixed double- and single-tracked railway network. **Applied Mathematical Modelling**, 35, 859–878, 2011.

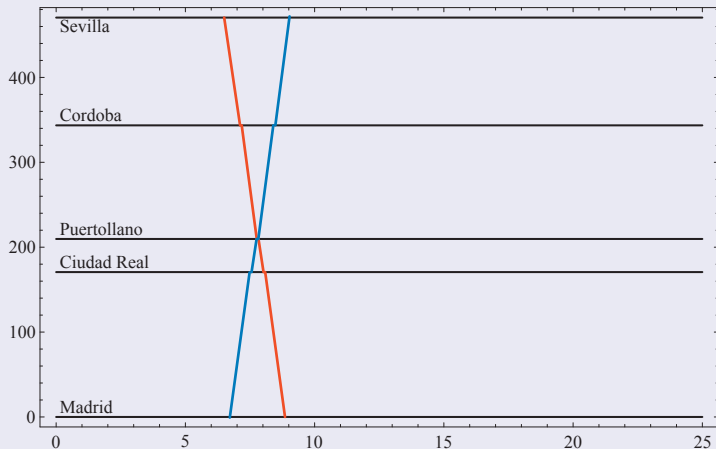
Introduce ya la **alternancia de vía doble y simple**, así como la **optimización de los diagramas de circulación**.

JUSTIFICACIÓN DE LA VÍA ALTERNADA DOBLE-SIMPLE (ADST)



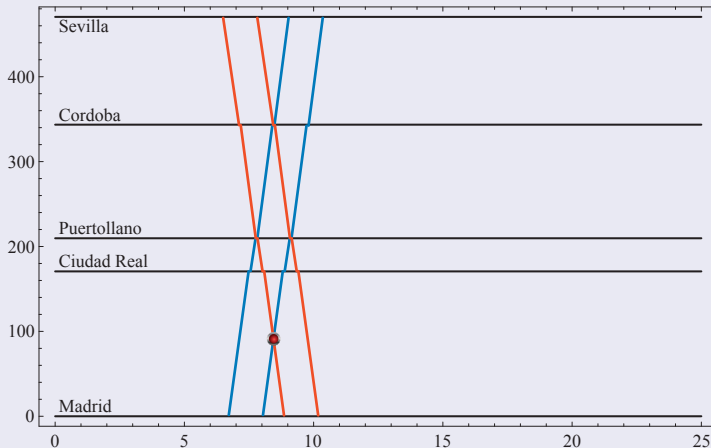
Dos trenes Madrid-Sevilla y Sevilla-Madrid, saliendo a la misma hora se cruzan entre Córdoba y Puertollano, que no es factible con vía única.

JUSTIFICACIÓN DE LA VÍA ALTERNADA DOBLE-SIMPLE (ADST)



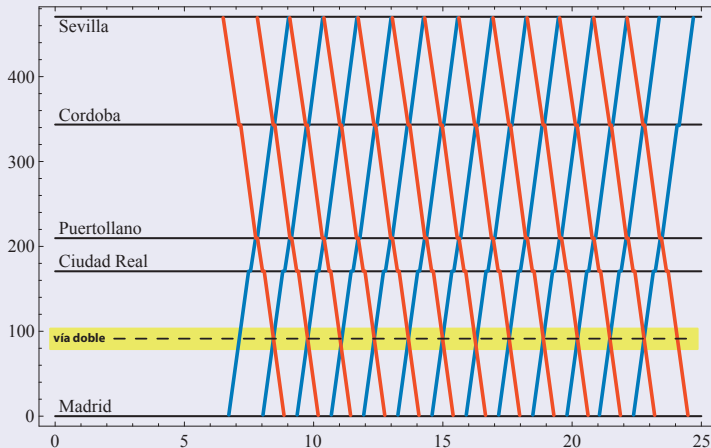
Por ello es conveniente retrasar ligeramente la salida de Madrid para que el cruce tenga lugar en la estación de Puertollano.

JUSTIFICACIÓN DE LA VÍA ALTERNADA DOBLE-SIMPLE (ADST)



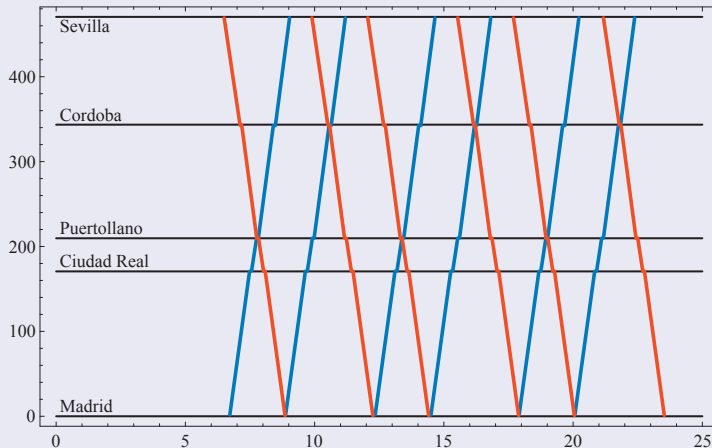
Si se incorporan otros dos trenes una hora más tarde y se fuerza a que se crucen también en Puertollano, aparece otro cruce entre Madrid y Ciudad Real.

JUSTIFICACIÓN DE LA VÍA ALTERNADA DOBLE-SIMPLE (ADST)



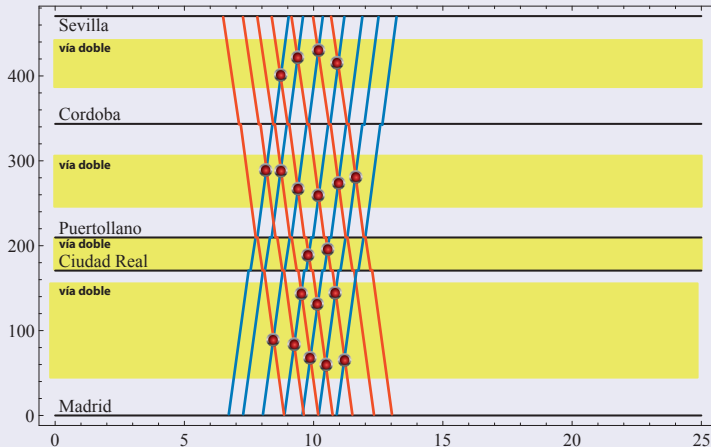
Si se añaden más trenes se siguen cruzando en la misma zona, lo que exige un tramo de vía doble (20 km). De esta forma se logra incluir 26 trenes (13 en cada sentido).

JUSTIFICACIÓN DE LA VÍA ALTERNADA DOBLE-SIMPLE (ADST)



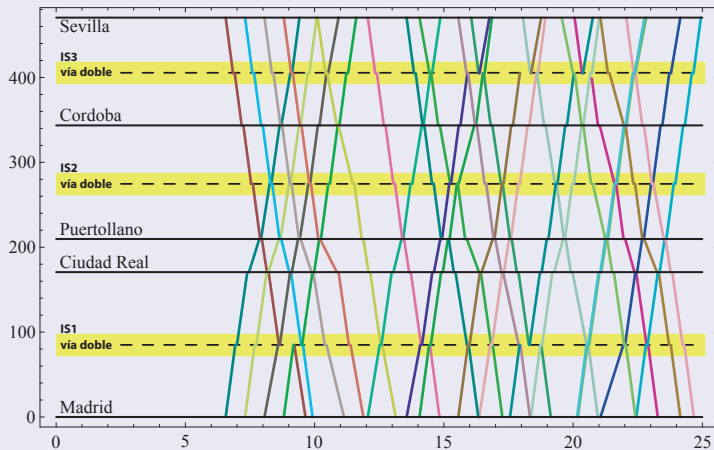
Si se tiene vía única y no se utilizan tramos de vía doble, la capacidad disminuye drásticamente a 12 trenes (6 en cada sentido).

JUSTIFICACIÓN DE LA VÍA ALTERNADA DOBLE-SIMPLE (ADST)



Un incremento mayor del número de trenes lleva a que las zonas de cruce sean muchas más y más amplias, lo que exige varios tramos de vía doble y más largos.

JUSTIFICACIÓN DE LA VÍA ALTERNADA DOBLE-SIMPLE (ADST)



Utilizando programas de optimización, que permiten jugar con las horas de salida y las velocidades en los tramos se consigue una gran mejora con unos tramos muy cortos de vía doble.

PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

Puesto que los tiempos empleados por los diferentes trenes que circulan por una red o una línea pueden ser bastante diferentes y **no es lo mismo un retraso de cinco minutos en un viaje de una hora que en un viaje de tres horas**, utilizamos en nuestro estudio los tiempos relativos de viaje.

Por **tiempo relativo de viaje entendemos** el cociente:

$$\text{Tiempo relativo de viaje} = \frac{\text{Tiempo de viaje}}{\text{Tiempo mínimo requerido}} \quad (1)$$

Por tanto, un tiempo relativo 1 significa que viajamos a la velocidad máxima y unos tiempos relativos 1.10 y 1.20 significa que hemos empleado un **10 % y un 20 % más**, respectivamente.

Esto tiene la ventaja de poder combinar trenes diferentes **corrigiendo el efecto de la duración del viaje**.

PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

Aunque pueden utilizarse otros muchos, el criterio principal elegido para optimizar los diagramas de circulación es el de **minimizar el máximo tiempo relativo de todos los trenes en circulación**.

Puesto que existen muchas soluciones que minimizan este tiempo relativo con el mismo valor, se puede elegir una de ellas con otros criterios, tales como **minimizar la suma de los tiempos relativos de todos los trenes circulando**.

Aún a pesar de este nuevo criterio, puede haber muchas soluciones con los mismos valores, por lo que podemos introducir un tercer criterio de **ahorro de combustible**, lo que conduce a que las paradas en las estaciones sean las mínimas y se ajusten las velocidades de los trenes a las mínimas necesarias.

Estamos por tanto en un **problema multiobjetivo jerarquizado**.

PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

El problema de optimización puede plantearse como:

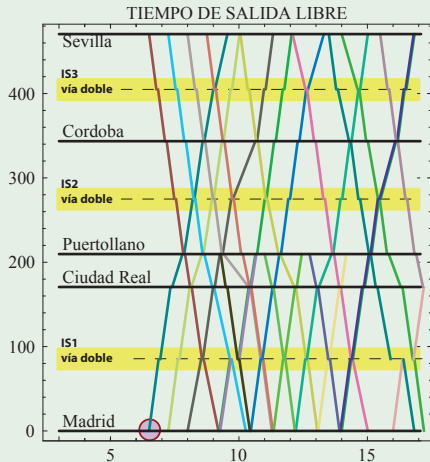
$$\text{Minimizar } Z = \varepsilon + \psi \left[\sum_{i \in I} \frac{1}{t_i^0} (e_{i, \sigma_{im_i}} - s_{i, \sigma_{i1}}) \right] + \eta \left[\sum_{i \in I, k} (s_{i, \sigma_{ik}} - e_{i, \sigma_{ik-1}}) \right]$$

s, e, r, p, x (2)

donde la función objetivo incluye un objetivo principal que es **minimizar el máximo tiempo de viaje relativo** ε con respecto al tiempo de viaje mínimo de referencia t_i^0 y **un segundo objetivo secundario para minimizar la suma total de los tiempos relativos de todos los trenes. Además se puede utilizar un objetivo terciario de ahorro de combustible.**

SOMETIDO A LAS SIGUIENTES RESTRICCIONES:

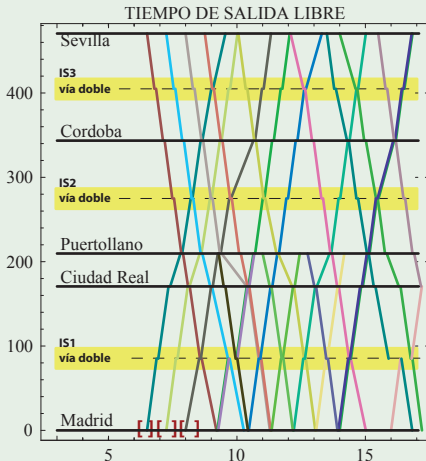
- 1 **Salida:** Hora de salida coincidente con la de entrada en el primer segmento.



$$s_{i,\sigma_{i,1}} = r_i, \quad \forall i \in I$$

SOMETIDO A LAS SIGUIENTES RESTRICCIONES:

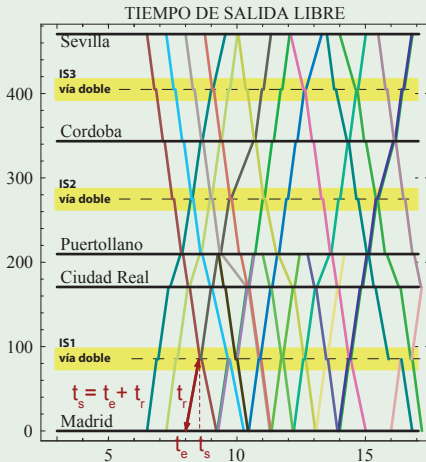
- 1 **Salida:** Hora de salida coincidente con la de entrada en el primer segmento.
- 2 **Cota de salida:** Hora de salida superior a un cierto límite.



$$r_i^l \leq r_i \leq r_i^u, \quad \forall i \in I,$$

SOMETIDO A LAS SIGUIENTES RESTRICCIONES:

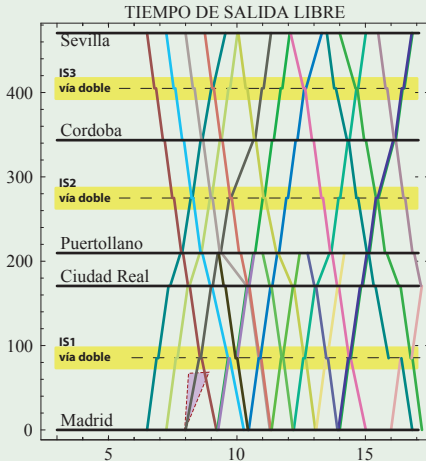
- 1 **Salida:** Hora de salida coincidente con la de entrada en el primer segmento.
- 2 **Cota de salida:** Hora de salida superior a un cierto límite.
- 3 **Tiempo de recorrido:** Tiempo de salida igual a tiempo de entrada más tiempo de recorrido.



$$e_{i,\sigma_{i,k}} = s_{i,\sigma_{i,k}} + p_{i,\sigma_{i,k}}, \quad k \leq m_i, \quad \forall i \in I$$

SOMETIDO A LAS SIGUIENTES RESTRICCIONES:

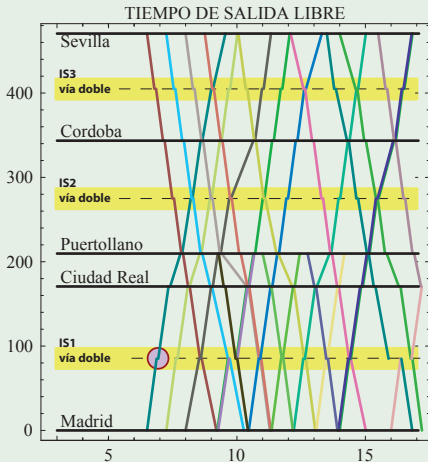
- 1 **Salida:** Hora de salida coincidente con la de entrada en el primer segmento.
- 2 **Cota de salida:** Hora de salida superior a un cierto límite.
- 3 **Tiempo de recorrido:** Tiempo de salida igual a tiempo de entrada más tiempo de recorrido.
- 4 **Velocidad acotada:** Tiempos de viaje de cada tramo acotados.



$$p_{i,\sigma_i,k}^{\ell} \leq p_{i,\sigma_i,k} \leq p_{i,\sigma_i,k}^u, \quad k \leq m_i, \quad \forall i \in I$$

SOMETIDO A LAS SIGUIENTES RESTRICCIONES:

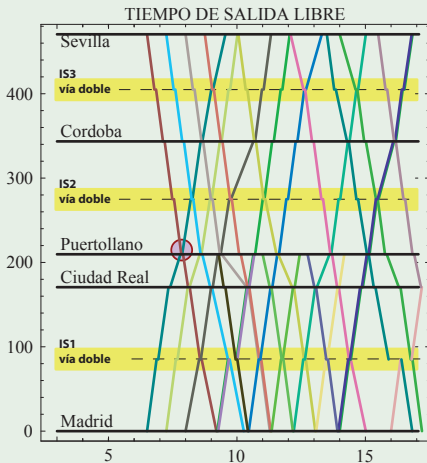
- 1 **Salida:** Hora de salida coincidente con la de entrada en el primer segmento.
- 2 **Cota de salida:** Hora de salida superior a un cierto límite.
- 3 **Tiempo de recorrido:** Tiempo de salida igual a tiempo de entrada más tiempo de recorrido.
- 4 **Velocidad acotada:** Tiempos de viaje de cada tramo acotados.
- 5 **Parada en estaciones:** Tiempo de parada en las estaciones acotado.



$$e_{i,\sigma_{i,k-1}} + d_{i,\beta(i,k)}^u \geq s_{i,\sigma_{i,k}} \geq e_{i,\sigma_{i,k-1}} + d_{i,\beta(i,k)}^l, \quad 1 < k \leq m_i \quad \forall i \in I,$$

SOMETIDO A LAS SIGUIENTES RESTRICCIONES:

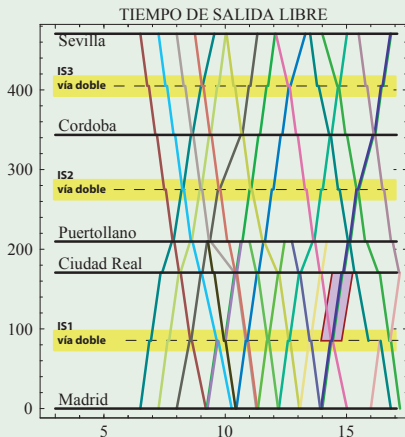
- 1 **Salida:** Hora de salida coincidente con la de entrada en el primer segmento.
- 2 **Cota de salida:** Hora de salida superior a un cierto límite.
- 3 **Tiempo de recorrido:** Tiempo de salida igual a tiempo de entrada más tiempo de recorrido.
- 4 **Velocidad acotada:** Tiempos de viaje de cada tramo acotados.
- 5 **Parada en estaciones:** Tiempo de parada en las estaciones acotado.
- 6 **Seguridad en sentido contrario:** Tiempo de entrada de uno debe exceder en un tiempo de seguridad el de salida del otro.



$$s_{i_2,j} \geq e_{i_1,j} + h_j^0 x_{i_1,i_2,j} - M(1 - x_{i_1,i_2,j})$$

Y A LAS RESTRICCIONES:

- 7 Seguridad en el mismo sentido: Trenes separados a distancia de seguridad.

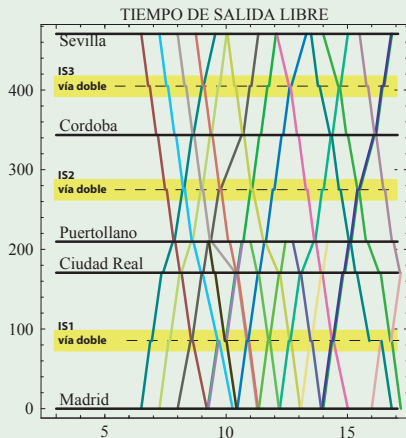


$$s_{i_1,j} \geq e_{i_2,j} + h_j^0 y_{i_1,i_2,j} - M(1 - y_{i_1,i_2,j})$$

$$s_{i_2,j} \geq s_{i_1,j} + h_{i_1,i_2,j} x_{i_1,i_2,j} - M(1 - x_{i_1,i_2,j})$$

Y A LAS RESTRICCIONES:

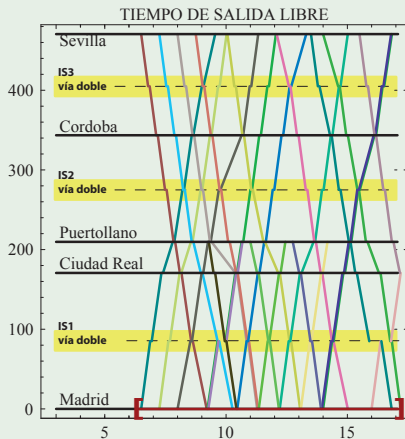
- 7 **Seguridad en el mismo sentido:** Trenes separados a distancia de seguridad.
- 8 **Tiempo óptimo:** Tiempo relativo de un tren menor que el óptimo.



$$(e_{i,m_i} - r_i^l) / t_i^0 \leq \gamma_i \varepsilon, \quad \forall i \in I,$$

Y A LAS RESTRICCIONES:

- 7 **Seguridad en el mismo sentido:** Trenes separados a distancia de seguridad.
- 8 **Tiempo óptimo:** Tiempo relativo de un tren menor que el óptimo.
- 9 **Periodo hábil:** Tiempo de funcionamiento limitado por mantenimiento.

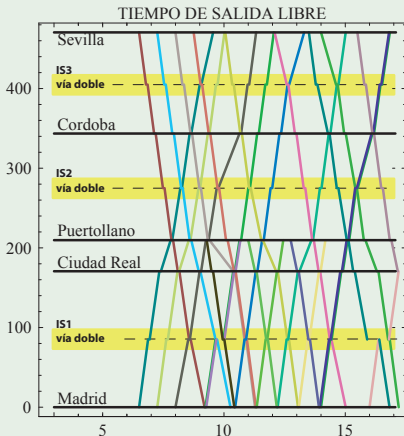


$$s_{i,\sigma_{i,1}} \geq t_{min}, \quad \forall i \in I$$

$$e_{i,\sigma_{i,m_i}} \leq t_{max}, \quad \forall i \in I,$$

Y A LAS RESTRICCIONES:

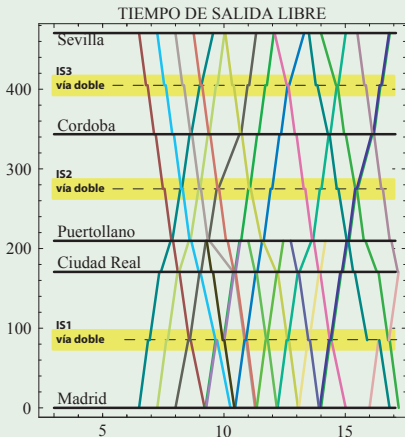
- 7 **Seguridad en el mismo sentido:** Trenes separados a distancia de seguridad.
- 8 **Tiempo óptimo:** Tiempo relativo de un tren menor que el óptimo.
- 9 **Periodo hábil:** Tiempo de funcionamiento limitado por mantenimiento.
- 10 **No usar dos vías por tramo:** Cada tren usa sólo una de las vías disponibles.



$$\sum_t q_{i_1, j, t} = 1, \quad \forall i_1 \in I, \quad j \in S.$$

Y A LAS RESTRICCIONES:

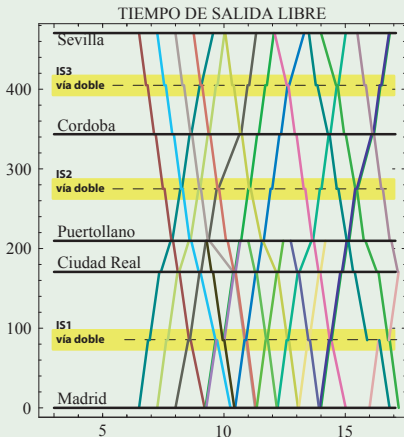
- 7 **Seguridad en el mismo sentido:** Trenes separados a distancia de seguridad.
- 8 **Tiempo óptimo:** Tiempo relativo de un tren menor que el óptimo.
- 9 **Periodo hábil:** Tiempo de funcionamiento limitado por mantenimiento.
- 10 **No usar dos vías por tramo:** Cada tren usa sólo una de las vías disponibles.
- 11 **Orden de paso:** Dos trenes en sentido contrario usan la vía por orden.



$$q_{i_1,j,t} + q_{i_2,j,t} - 1 \leq x_{i_1,i_2,j} + y_{i_1,i_2,j}, \quad \forall i_1 < i_2, \quad i_1, i_2 \in I, \quad \forall j, t,$$

Y A LAS RESTRICCIONES:

- 7 **Seguridad en el mismo sentido:** Trenes separados a distancia de seguridad.
- 8 **Tiempo óptimo:** Tiempo relativo de un tren menor que el óptimo.
- 9 **Periodo hábil:** Tiempo de funcionamiento limitado por mantenimiento.
- 10 **No usar dos vías por tramo:** Cada tren usa sólo una de las vías disponibles.
- 11 **Orden de paso:** Dos trenes en sentido contrario usan la vía por orden.
- 12 **Exclusión:** Trenes en sentido contrario no pueden usar a la vez el mismo segmento.



$$x_{i_1, i_2, j} + y_{i_1, i_2, j} \leq 1; \quad \forall i_1 < i_2 \in I, \quad \forall j.$$

PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

El problema de optimización puede plantearse como:

$$\text{Minimizar } Z = \varepsilon + \psi \left[\sum_{i \in I} \frac{1}{t_i^0} (e_{i, \sigma_{im_i}} - s_{i, \sigma_{i1}}) \right] + \eta \left[\sum_{i \in I, k} (s_{i, \sigma_{ik}} - e_{i, \sigma_{ik-1}}) \right]$$

s, e, r, p, x

(3)

donde la función objetivo incluye un objetivo principal que es minimizar el máximo tiempo de viaje relativo ε con respecto al tiempo de viaje mínimo de referencia t_i^0 y un segundo objetivo secundario para minimizar la suma total de los tiempos relativos de todos los trenes. Además se puede utilizar un objetivo terciario de ahorro de combustible.

SOMETIDO A LAS RESTRICCIONES:

$$s_{i,\sigma_{i,1}} = r_i, \quad \forall i \in I \quad (4)$$

$$r_i^{\ell} \leq r_i \leq r_i^u, \quad \forall i \in I, \quad (5)$$

$$e_{i,\sigma_{i,k}} = s_{i,\sigma_{i,k}} + p_{i,\sigma_{i,k}}, \quad k \leq m_i, \quad \forall i \in I \quad (6)$$

$$p_{i,\sigma_{i,k}}^{\ell} \leq p_{i,\sigma_{i,k}} \leq p_{i,\sigma_{i,k}}^u, \quad k \leq m_i, \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$e_{i,\sigma_{i,k-1}} + d_{i,\beta(i,k)}^u \geq s_{i,\sigma_{i,k}} \geq e_{i,\sigma_{i,k-1}} + d_{i,\beta(i,k)}^{\ell}, \quad 1 < k \leq m_i \quad \forall i \in I, \quad (8)$$

$$s_{i_2,j} \geq e_{i_1,j} + h_j^0 x_{i_1,i_2,j} - M(1 - x_{i_1,i_2,j}) \quad (9)$$

Y A LAS RESTRICCIONES:

$$s_{i_1,j} \geq e_{i_2,j} + h_j^0 y_{i_1,i_2,j} - M(1 - y_{i_1,i_2,j})$$

$$\forall i_1 < i_2 \in I; \quad v_{i_1,j} \times v_{i_2,j} < 0; \quad \rho_{i_1,i_2,j} = 1. \quad (10)$$

$$s_{i_2,j} \geq s_{i_1,j} + h_{i_1,i_2,j} x_{i_1,i_2,j} - M(1 - x_{i_1,i_2,j}) \quad (11)$$

$$s_{i_1,j} \geq s_{i_2,j} + h_{i_1,i_2,j} y_{i_1,i_2,j} - M(1 - y_{i_1,i_2,j}) \quad (12)$$

$$e_{i_2,j} \geq e_{i_1,j} + h_j^0 x_{i_1,i_2,j} - M(1 - x_{i_1,i_2,j}) \quad (13)$$

$$e_{i_1,j} \geq e_{i_2,j} + h_j^0 y_{i_1,i_2,j} - M(1 - y_{i_1,i_2,j})$$

$$\forall i_1 < i_2 \in I; \quad v_{i_1,j} \times v_{i_2,j} > 0; \quad \rho_{i_1,i_2,j} = 1, \quad (14)$$

$$(e_{i,m_i} - r_i^l)/t_i^0 \leq \gamma_i \varepsilon, \quad \forall i \in I, \quad (15)$$

$$s_{i,\sigma_{i,1}} \geq t_{min}, \quad \forall i \in I \quad (16)$$

$$e_{i,\sigma_{i,m_i}} \leq t_{max}, \quad \forall i \in I, \quad (17)$$

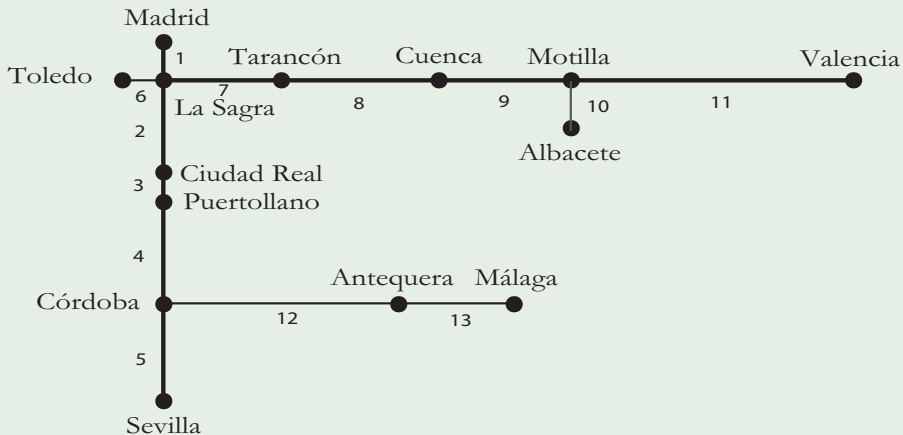
$$\sum_t q_{i_1,j,t} = 1, \quad \forall i_1 \in I, \quad j \in \mathcal{S}. \quad (18)$$

$$q_{i_1,j,t} + q_{i_2,j,t} - 1 \leq x_{i_1,i_2,j} + y_{i_1,i_2,j}, \quad \forall i_1 < i_2, \quad i_1, i_2 \in I, \quad \forall j, t, \quad (19)$$

$$x_{i_1,i_2,j} + y_{i_1,i_2,j} \leq 1; \quad \forall i_1 < i_2 \in I, \quad \forall j. \quad (20)$$

EJEMPLO DE 170 TRENES PUBLICADO EN 2011

RED CONSIDERADA



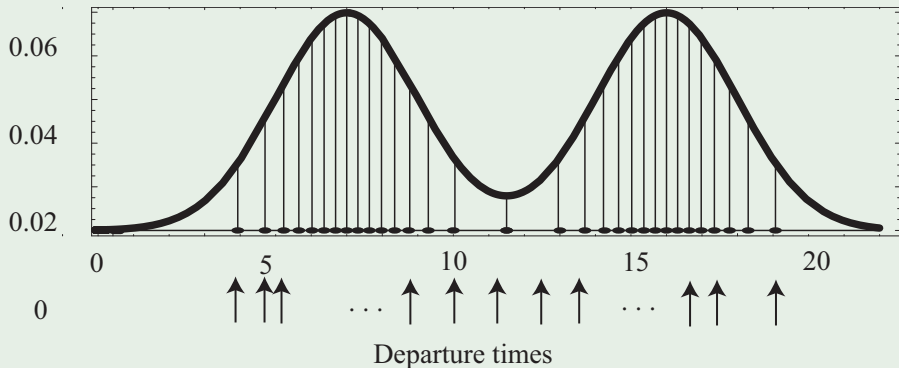
Se considera **vía doble en las líneas Madrid-Sevilla y Madrid Valencia**, pero **vía simple en el resto**.

EJEMPLO DE 170 TRENES

Presentamos como ejemplo ilustrativo un caso hipotético de 170 trenes:

- 36 trenes Madrid-Málaga y viceversa (M-L y L-M).
- 32 trenes Madrid-Valencia y viceversa (M-V y V-M).
- 42 trenes Madrid-Sevilla y viceversa (M-S y S-M).
- 18 trenes Madrid-Toledo y viceversa (M-T y T-M).
- 30 trenes Madrid-Puertollano y viceversa (M-P y P-M).
- 12 trenes Madrid-Albacete y viceversa (M-A y A-M).

EJEMPLO DE 170 TRENES



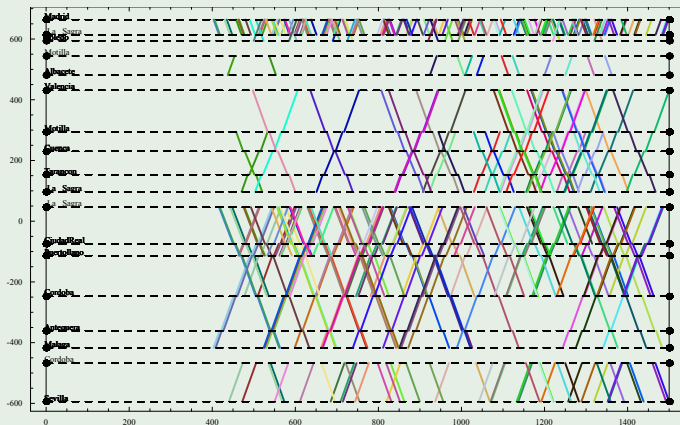
EJEMPLO DE 170 TRENES

i	r_i^l	r_i	O-D	RT	i	r_i^l	r_i	O-D	RT	i	r_i^l	r_i	O-D	RT
1	7.15	7.15	M-S	1.000	58	17.45	17.52	S-M	1.051	115	8.00	8.00	M-A	1.000
2	7.15	7.52	S-M	1.270	59	12.55	13.36	M-A	1.272	116	8.00	8.44	A-M	1.285
3	21.50	22.09	M-A	1.128	60	12.55	13.31	A-M	1.250	117	20.15	20.18	M-T	1.190
4	21.50	22.21	A-M	1.201	61	19.20	19.22	M-V	1.175	118	20.15	20.20	T-M	1.286
5	14.45	14.54	M-V	1.079	62	19.20	19.28	V-M	1.069	119	17.30	17.57	M-V	1.235
6	14.45	14.51	V-M	1.052	63	16.20	16.32	M-P	1.192	120	17.30	17.58	V-M	1.239
7	7.30	7.44	M-P	1.231	64	16.20	16.23	P-M	1.042	121	12.20	12.33	M-S	1.154
8	7.30	7.45	P-M	1.238	65	11.45	11.55	M-S	1.138	122	12.20	12.24	S-M	1.028
9	21.40	21.40	M-S	1.000	66	11.45	11.49	S-M	1.088	123	8.35	8.49	M-P	1.229
10	21.40	21.59	S-M	1.138	67	17.00	17.23	M-A	1.243	124	8.35	8.53	P-M	1.286
11	20.00	20.08	M-A	1.146	68	17.00	17.17	A-M	1.240	125	10.45	11.21	M-A	1.285
12	20.00	20.44	A-M	1.285	69	10.20	10.20	M-A	1.000	126	10.45	11.06	A-M	1.162
13	7.10	7.37	M-A	1.286	70	10.20	11.02	A-M	1.286	127	12.00	12.00	M-T	1.000
14	7.10	7.17	A-M	1.076	71	18.00	18.01	M-V	1.010	128	12.00	12.05	T-M	1.286
15	22.00	22.00	M-T	1.000	72	18.00	18.11	V-M	1.096	129	19.45	20.20	M-S	1.256
16	22.00	22.00	T-M	1.000	73	13.25	13.34	M-S	1.093	130	19.45	19.52	S-M	1.050
17	7.00	7.10	M-S	1.071	74	13.25	13.40	S-M	1.107	131	13.20	13.32	M-P	1.286
18	7.00	7.20	S-M	1.146	75	19.10	19.10	M-P	1.000	132	13.20	13.38	P-M	1.286
19	21.30	21.38	M-P	1.128	76	19.10	19.10	P-M	1.001	133	14.10	14.21	M-A	1.144
20	21.30	21.30	P-M	1.000	77	8.20	8.25	M-T	1.286	134	14.10	14.15	A-M	1.030
21	14.05	14.23	M-A	1.163	78	8.20	8.20	T-M	1.000	135	20.40	21.06	M-A	1.270
22	14.05	14.32	A-M	1.174	79	11.00	11.31	M-A	1.200	136	20.40	20.50	A-M	1.103
23	7.45	8.10	M-V	1.218	80	11.00	11.04	A-M	1.052	137	9.10	9.11	M-S	1.055
24	7.45	8.18	V-M	1.284	81	21.00	21.08	M-S	1.241	138	9.10	9.10	S-M	1.000
25	22.15	22.42	M-S	1.192	82	21.00	21.29	S-M	1.236	139	22.45	23.05	M-V	1.170
26	22.15	22.34	S-M	1.182	83	18.45	19.03	M-V	1.204	140	22.45	22.45	V-M	1.000
27	7.25	7.42	M-P	1.279	84	18.45	19.18	V-M	1.286	141	9.20	9.35	M-P	1.243
28	7.25	7.43	P-M	1.286	85	19.05	19.12	M-P	1.112	142	9.20	9.24	P-M	1.064

i	r_i^l	r_i	O-D	RT	i	r_i^l	r_i	O-D	RT	i	r_i^l	r_i	O-D	RT
29	21.20	21.38	M-V	1.156	86	19.05	19.06	P-M	1.017	143	13.45	14.28	M-A	1.280
30	21.20	21.40	V-M	1.170	87	6.30	6.43	M-A	1.127	144	13.45	14.11	A-M	1.167
31	8.50	9.05	M-A	1.101	88	6.30	6.43	A-M	1.085	145	11.20	11.53	M-S	1.241
32	8.50	8.50	A-M	1.000	89	11.10	11.23	M-S	1.164	146	11.20	11.54	S-M	1.283
33	20.20	20.43	M-S	1.238	90	11.10	11.25	S-M	1.124	147	9.45	9.45	M-T	1.000
34	20.20	20.57	S-M	1.267	91	16.30	16.30	M-T	1.000	148	9.45	9.45	T-M	1.000
35	15.55	16.00	M-T	1.286	92	16.30	16.32	T-M	1.115	149	13.30	13.46	M-V	1.170
36	15.55	16.00	T-M	1.286	93	20.10	20.34	M-V	1.209	150	13.30	13.45	V-M	1.129
37	9.22	9.24	M-P	1.030	94	20.10	20.42	V-M	1.279	151	16.00	16.24	M-A	1.158
38	9.22	9.22	P-M	1.000	95	6.45	6.45	M-A	1.017	152	16.00	16.29	A-M	1.187
39	20.55	21.31	M-A	1.237	96	6.45	6.48	A-M	1.021	153	17.50	17.57	M-S	1.080
40	20.55	21.15	A-M	1.133	97	22.30	22.34	M-S	1.032	154	17.50	17.50	S-M	1.043
41	15.30	15.30	M-S	1.000	98	22.30	22.32	S-M	1.059	155	10.25	10.25	M-P	1.000
42	15.30	15.37	S-M	1.048	99	9.00	9.09	M-P	1.137	156	10.25	10.43	P-M	1.286
43	10.05	10.38	M-V	1.286	100	9.00	9.13	P-M	1.203	157	16.45	16.57	M-A	1.124
44	10.05	10.36	V-M	1.269	101	19.30	19.36	M-V	1.106	158	16.45	16.49	A-M	1.044
45	20.00	20.16	M-A	1.245	102	19.30	19.30	V-M	1.000	159	18.35	19.06	M-V	1.273
46	20.00	20.00	A-M	1.000	103	8.25	9.03	M-A	1.250	160	18.35	18.41	V-M	1.053
47	9.35	10.18	M-A	1.280	104	8.25	8.46	A-M	1.135	161	11.35	11.35	M-A	1.000
48	9.35	9.58	A-M	1.161	105	10.00	10.16	M-S	1.116	162	11.35	12.18	A-M	1.283
49	18.25	19.04	M-S	1.285	106	10.00	10.11	S-M	1.079	163	17.15	17.27	M-S	1.106
50	18.25	18.57	S-M	1.230	107	15.10	15.10	M-A	1.002	164	17.15	17.22	S-M	1.117
51	9.25	9.33	M-P	1.195	108	15.10	15.24	A-M	1.147	165	12.10	12.28	M-P	1.286
52	9.25	9.26	P-M	1.016	109	21.10	21.27	M-P	1.278	166	12.10	12.28	P-M	1.286
53	20.30	20.36	M-V	1.053	110	21.10	21.10	P-M	1.000	167	15.20	15.25	M-T	1.286
54	20.30	20.44	V-M	1.123	111	13.15	13.48	M-V	1.283	168	15.20	15.20	T-M	1.000
55	11.25	11.29	M-T	1.206	112	13.15	13.27	V-M	1.103	169	18.05	18.15	M-V	1.083
56	11.25	11.30	T-M	1.286	113	18.15	18.46	M-S	1.222	170	18.05	18.09	V-M	1.035
57	17.45	17.59	M-S	1.131	114	18.15	18.53	S-M	1.273					

EJEMPLO DE 170 TRENES

La figura muestra los gráficos de circulación de los trenes en los diferentes segmentos.



EJEMPLO DE 170 TRENES

Hay que señalar que el problema de optimización **se complica exponencialmente con el número de trenes**.

De hecho, en los modelos descritos en la literatura existente se señala que un número de trenes elevado puede llevar a **bloquear el ordenador** debido al número de variables binarias resultantes del dilema de prioridades de los trenes que compiten por una mismo tramo de vía.

Por ello, en nuestro trabajo de 2011 dedicamos un gran esfuerzo a resolver este problema mediante:

- 1 Uso de una **cota del tiempo relativo óptimo**. Información muy útil para excluir muchas de las posibles combinaciones.
- 2 Un **método de bisección inteligente** que juega con la diferencia muy notable de tiempos de cálculo requerida para resolver el problema y para determinar que no es factible.
- 3 Una **reducción drástica de variables binarias innecesarias**.

Todo ello **hizo posible resolver problemas de gran tamaño** como el de los 170 trenes que mostramos aquí.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trenes	Cpu time (segundos)			Max Bin	Bin	Cont	RT Max	RT medio	RT_1 medio
	Sin cota	$\epsilon_{up} = 1.4$	Biseción						
10	0.03	0.04	0.03	256	90	97	1.000	1.000	1.000
14	0.08	0.06	0.05	494	174	141	1.055	1.000	1.016
18	0.16	0.12	0.11	756	266	169	1.055	1.000	1.020
22	0.32	0.18	0.15	1206	356	205	1.055	1.000	1.024
26	1.05	0.32	0.25	1666	518	245	1.055	1.000	1.022
30	2.08	0.37	0.32	2130	658	277	1.055	1.000	1.015
34	4.59	0.55	0.42	2936	880	321	1.055	1.000	1.022
38	5.65	0.67	0.53	3426	984	341	1.055	1.001	1.020
42	22.85	1.78	0.69	4448	1238	385	1.055	1.001	1.017
46	34.78	1.25	0.88	5060	1344	425	1.055	1.001	1.018
50	54.08	1.52	0.88	6266	1530	469	1.055	1.001	1.019
54	74.10	2.85	1.11	7138	1788	501	1.055	1.002	1.019
58	169.33	2.12	1.36	8056	1902	529	1.055	1.001	1.024
62	75.53	2.55	1.44	9270	2112	573	1.098	1.001	1.042
66	236.01	3.50	1.55	10630	2266	605	1.098	1.000	1.051
70	418.38	7.64	2.93	11988	2496	649	1.185	1.002	1.076
74	431.88	8.60	4.04	13416	2768	689	1.185	1.003	1.079
78	1946.06	8.51	3.55	14434	2962	709	1.185	1.000	1.072
82	1877.38	29.87	4.27	16408	3436	753	1.195	1.006	1.089
86	> 3000	29.10	4.75	17816	3796	785	1.195	1.006	1.090

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trenes	Cpu time (seconds)			Max Bin	Bin	Cont	RT Max	RT medio	RT_1 medio
	Sin cota	$\epsilon_{up} = 1.4$	Bisección						
90	2820.7	61.09	13.76	20006	4166	829	1.195	1.004	1.081
94	> 3000	75.12	22.76	21108	4478	857	1.195	1.002	1.087
98	> 3000	136.11	15.57	23482	4914	901	1.195	1.011	1.095
102	> 3000	215.21	30.92	25162	5448	933	1.195	1.004	1.087
106	> 3000	1595.0	37.75	27752	6106	977	1.212	1.009	1.102
110	> 3000	1884.7	16.41	29520	6468	1009	1.212	1.012	1.092
114	> 3000	> 3000	61.51	31740	6842	1049	1.212	1.006	1.088
118	> 3000	> 3000	99.06	33716	7392	1081	1.286	1.012	1.128
122	> 3000	> 3000	27.61	36088	7866	1121	1.286	1.012	1.135
126	> 3000	> 3000	210.54	38794	8544	1157	1.286	1.016	1.133
130	> 3000	> 3000	216.27	40896	9044	1185	1.286	1.009	1.138
134	> 3000	> 3000	202.04	43794	9478	1221	1.286	1.013	1.140
138	> 3000	> 3000	203.30	46406	10212	1261	1.286	1.014	1.132
142	> 3000	> 3000	196.55	48758	10702	1293	1.286	1.009	1.125
146	> 3000	> 3000	856.88	52332	11410	1337	1.286	1.012	1.138
150	> 3000	> 3000	2575.84	54114	11756	1365	1.286	1.013	1.137
154	> 3000	> 3000	2529.98	57872	12326	1409	1.286	1.011	1.135
158	> 3000	> 3000	2784.05	60424	12930	1441	1.286	1.013	1.138
162	> 3000	> 3000	2552.60	63694	13784	1485	1.286	1.012	1.140
166	> 3000	> 3000	2747.95	67158	14470	1517	1.286	1.020	1.142
170	> 3000	> 3000	2658.53	69196	15006	1545	1.286	1.008	1.138

PRINCIPALES CONCLUSIONES DE ESTA PARTE

- 1 La **vía alternada doble-simple (ADST)** es una alternativa a la vía doble desde el punto de vista de **eficiencia de la circulación de los trenes**, incluyendo bastante altos niveles de tráfico.
- 2 El ajuste óptimo de diagramas de circulación de los trenes en el caso de la ADST es complejo y **requiere herramientas especialmente diseñadas** para ello.
- 3 La multiplicidad de soluciones a analizar **crece exponencialmente con el número de trenes**, es decir, el número de variables binarias es muy alto, por lo que **son necesarias técnicas adecuadas para reducir drásticamente éstas**.
- 4 La herramienta propuesta **aporta información muy valiosa para el análisis de alternativas** a nivel de pre-proyecto.
- 5 Incluso puede añadirse **información de análisis de sensibilidad** a los diferentes parámetros utilizados en las hipótesis.

Aplicación de la metodología al caso Palencia-Santander



INMACULADA GALLEGO



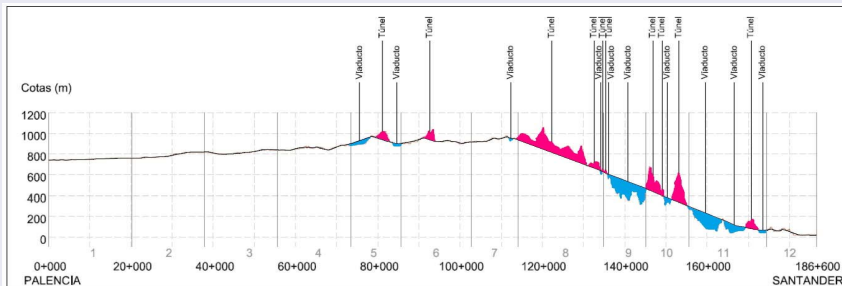
UNIVERSIDAD DE
CASTILLA-LA MANCHA

Estudio de opciones de infraestructura

APLICACIÓN AL CASO PALENCIA-SANTANDER

- 1 Descripción geométrica de la línea
- 2 Aplicación del modelo de ajuste de circulaciones
- 3 Análisis comparado de opciones de infraestructura
- 4 Conclusiones

DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DE LA LÍNEA PALENCIA-SANTANDER



PARÁMETROS DE DISEÑO (IGP):

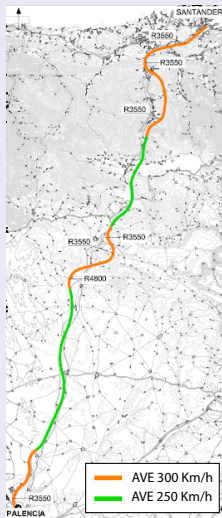
Pendientes:

- Máxima=15 mm/m; excepcional = 18mm/m
- En túnel: mínimo = 5 mm/m; excepcional = 2 mm/m
- L max en máxima pendiente= 3000 m.

Acuerdos verticales:

- Para V=300 km/h, mínima Kv=32000 m.
- Para V=250 km/h, mínima Kv=22000 m.

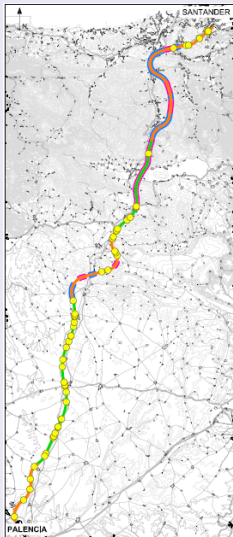
DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DE LA LÍNEA PALENCIA-SANTANDER



Velocidades máximas de diseño:

- V=300 km/h para curvas: $R \geq 5350$ m.
- V=250 km/h para curvas: $R \geq 3550$ m.

DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DE LA LÍNEA PALENCIA-SANTANDER



VELOCIDADES MÁXIMAS DE DISEÑO:

- V =300 km/h
Curvas: $R \geq 5350$ m
- V=250 km/h
Curvas: $R \geq 3550$ m

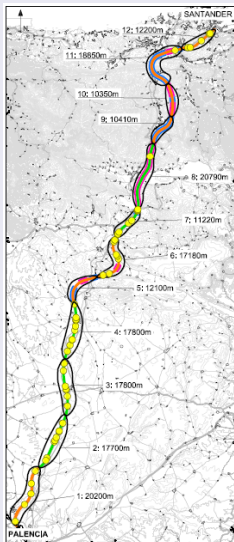
LEYENDA

- AVE 250 km/h
- AVE 300 km/h
- Túnel (m)
- Viaducto (m)
- Cruces con infraestructuras

CLAVES DEL TRAZADO

- Longitud total: 186 600 m
- Distribución de la línea por velocidades:
 - 250 km/h: 100 830 m
 - 300 km/h: 85 770 m
- Infraestructuras:
 - 10 túneles: 35 650 m
 - 10 viaductos: 32 390 m
- Cruces con infraestructuras: 5
 - Autovía: 18
 - Ferrocarril: 7
 - Carretera nacional: 5
 - Carretera autonómica: 21

DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DE LA LÍNEA PALENCIA-SANTANDER



VELOCIDADES MÁXIMAS DE DISEÑO:

- V = 300 km/h
Curvas: $R \geq 5350$ m
- V = 250 km/h
Curvas: $R \geq 3550$ m

LEYENDA

- AVE 250 km/h
- AVE 300 km/h
- Túnel (m)
- Viaducto (m)
- Cruces con infraestructuras

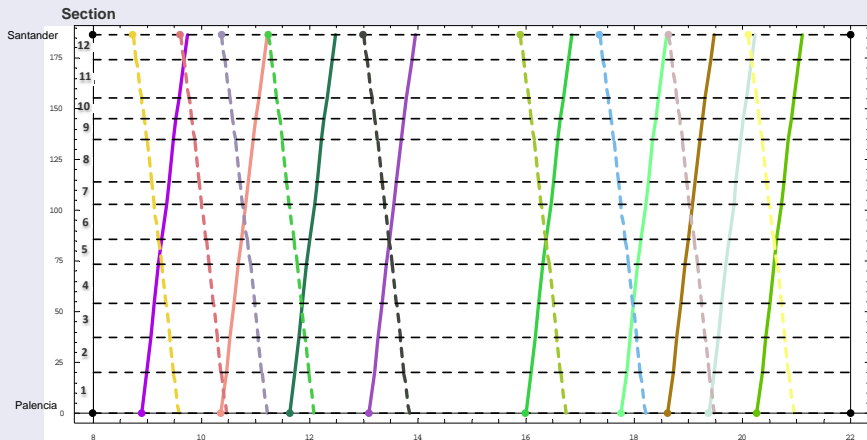
CLAVES DEL TRAZADO

- Longitud total: 186 600 m
- Distribución de la línea por velocidades:
 - 250 km/h: 100 830 m
 - 300 km/h: 85 770 m
- Infraestructuras:
 - 10 túneles: 35 650 m
 - 10 viaductos: 32 390 m
- Cruces con infraestructuras: 5
 - Autovía: 18
 - Ferrocarril: 7
 - Carretera nacional: 5
 - Carretera autonómica: 21

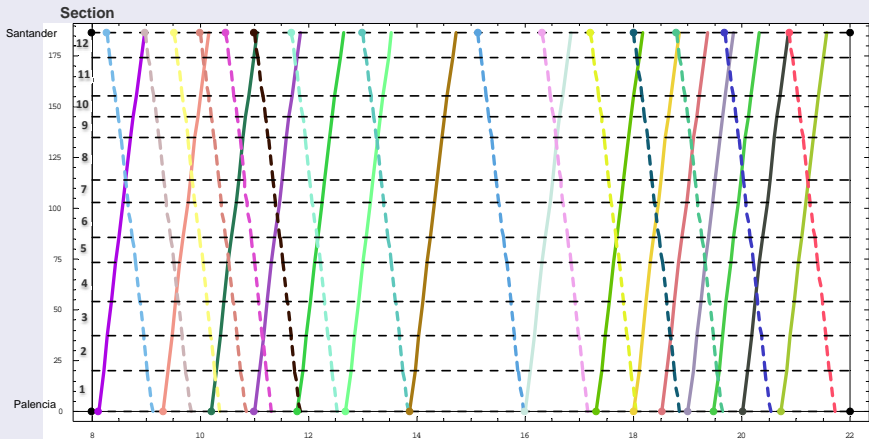
DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DE LA LÍNEA PALENCIA-SANTANDER

Tramo	PK inicio-PK final	Longitud [m]	Velocidad [Km/h]	Pasos Sup o inf	Long Viaducto [m]	Long Túnel [m]	Costes [mill euros/km]	
							VS	VD
1	0-20220	20220	250	5 ud (85m)	0	0	2,80	4,68
2	20200- 37900	17700	300	8 ud (605.5 m)	0	0	3,46	5,39
3	37900 -55700	17800	300	7 ud (316,5m)	0	0	3,24	5,10
4	55700-73500	17800	300	10 ud (464m)	0	0	3,34	5,43
5	73500-85600	12100	300	o	6100	3300	13,70	21,50
6	85600-102780	17180	250	7 ud (247m)	0	2250	7,99	12,76
7	102780-114002	11222	300	8 ud (365,5m)	150	0	4,71	7,04
8	114002-134792	20790	300	0	350	19550	30,52	50,67
9	134792-145202	10410	250	0	9270	500	17,37	27,17
10	145202-155552	10350	250	0	1650	7500	26,72	44,48
11	155552-174102	18550	250	1 ud (36m)	14870	2550	17,44	27,32
12	174102-186602	12200	250	5 ud (108,5m)	0	0	5,09	7,34

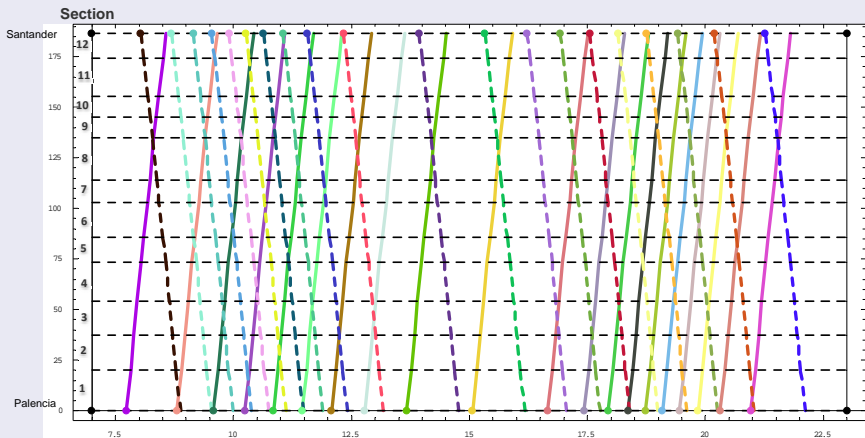
OPCION I. TODOS LOS TRAMOS EN VÍA DOBLE (9 TRENES POR SENTIDO)



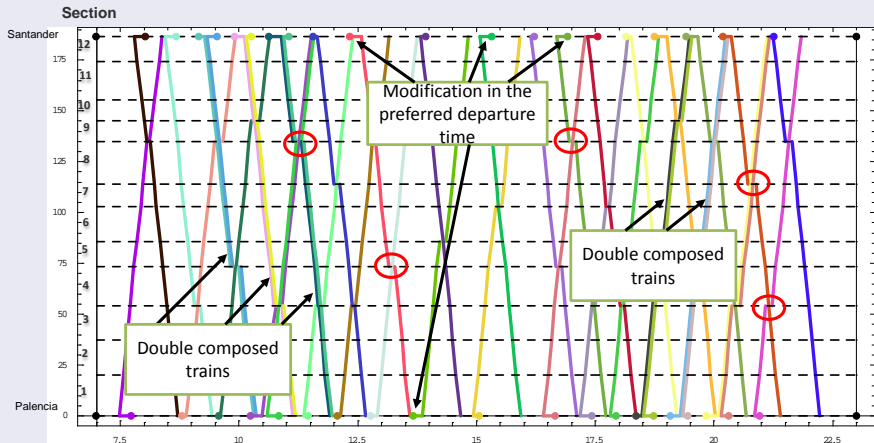
OPCION I. TODOS LOS TRAMOS EN VÍA DOBLE (15 TRENES POR SENTIDO)



OPCION I. TODOS LOS TRAMOS EN VÍA DOBLE (20 TRENES POR SENTIDO)



OPCION V. TODOS LOS TRAMOS EN VÍA SIMPLE (20 TRENES POR SENTIDO)



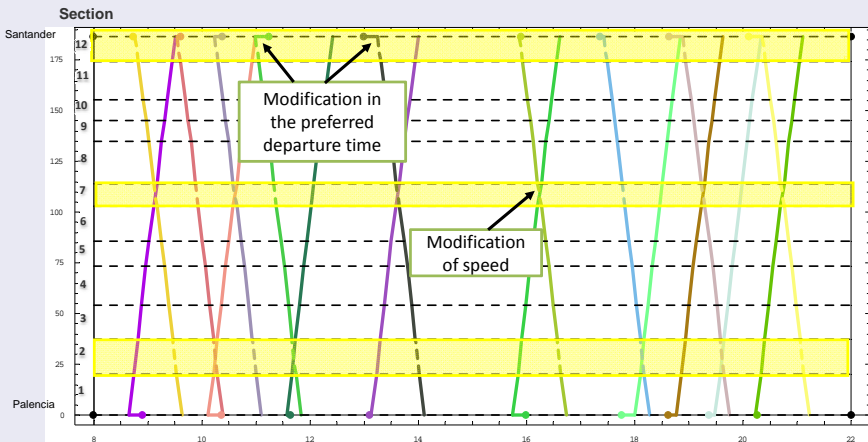
ANÁLISIS COMPARADO DE OPCIONES DE INFRAESTRUCTURA

Tracks	Trains	Mean RT	Max RT	Construction
Double Track	20	1.000	1.000	3337.08
	15	1.000	1.000	
	9	1.000	1.000	
Single Track	20	1.165	1.211	2073.50 (62.1 % DT)
	15	1.107	1.142	
	9	1.070	1.098	

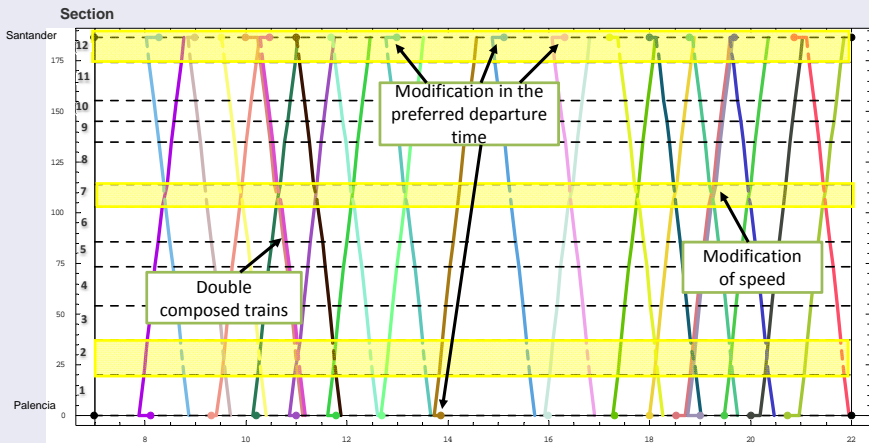
ANÁLISIS COMPARADO DE OPCIONES DE INFRAESTRUCTURA

Case			Op. Quality		ADIF	
Option	Tracks	Trains	Mean RT	Max RT	Costs	
					Construction	Maintenance
Option I	Double Track	20	1.000	1.000	3337.08	8.17
		15	1.000	1.000		6.13
		9	1.000	1.000		3.68
Option II	Double Track T_2, T_3, T_8, T_9	20	1.000	1.000	2661.69 (79.7 % DT)	6.04
		15	1.000	1.000		4.53
		9	1.000	1.000		2.72
Option III	Double Track T_1, T_2, T_3, T_4 T_7, T_{12}	20	1.029	1.079	2269.68 (68.0 % DT)	6.60
		15	1.015	1.026		4.95
		9	1.000	1.000		2.97
Option IV	Double Track T_2, T_7, T_{12}	20	1.073	1.117	2161.32 (64.7 % DT)	5.61
		15	1.032	1.055		4.21
		9	1.017	1.026		2.53
Option V	Single Track	20	1.165	1.211	2073.50 (62.1 % DT)	4.90
		15	1.107	1.142		3.68
		9	1.070	1.098		2.21

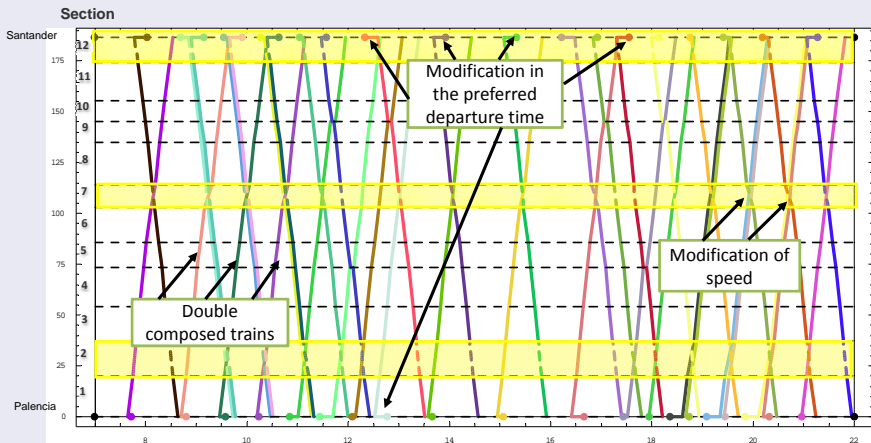
OPCION IV. LOS TRAMOS 2, 7 Y 12 EN VÍA DOBLE (9 TRENES POR SENTIDO)



OPCION IV. LOS TRAMOS 2, 7 Y 12 EN VÍA DOBLE (15 TRENES POR SENTIDO)



OPCION IV. LOS TRAMOS 2, 7 Y 12 EN VÍA DOBLE (20 TRENES POR SENTIDO)



Case			Op. Quality		ADIF		Rail operator							Incomes
Option	Tracks	Trains	Mean RT	Max RT	Costs		Costs						Σ costs	
					Construction	Maintenance	Maintenance	Amortization	Track Usage	Energy	Staff	Client services		Fares
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	2661.69	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	2269.68	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	2161.32	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	2073.50	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

Case			Op. Quality		ADIF		Rail operator						
Option	Tracks	Trains	Mean RT	Max RT	Costs		Costs				Σ costs	Incomes	
					Construction	Maintenance	Maintenance	Amortization	Track Usage	Energy			Staff
Option I	Double Track	20	1.000	1.000	3337.08	8.17	2.60	1.84	10.30	56.19	76.63		
		15	1.000	1.000			1.95	1.38	7.72	42.00	57.47		
		9	1.000	1.000			1.17	0.83	4.63	25.24	34.48		
		20	1.000	1.000			2.60	1.84	10.30	55.55	76.63		
		15	1.000	1.000			1.95	1.38	7.72	41.52	57.47		
		9	1.000	1.000			1.17	0.83	4.63	25.24	34.48		
		20	1.000	1.000			2.52	1.84	10.30	55.26	76.63		
		15	1.000	1.000			1.92	1.38	7.72	41.62	57.47		
		9	1.000	1.000			1.17	0.83	4.63	25.12	34.48		
Option II	Double Track T_2, T_3, T_8, T_9	20	1.000	1.000	2661.69	6.04	2.41	1.84	10.30	55.04	76.63		
		15	1.000	1.000			1.89	1.38	7.72	41.17	57.47		
		9	1.000	1.000			1.15	0.83	4.63	25.16	34.48		
		20	1.029	1.079			2.23	1.84	10.30	54.65	76.63		
		15	1.015	1.026			1.76	1.38	7.72	40.88	57.47		
		9	1.000	1.000			1.09	0.83	4.63	24.81	34.48		
Option III	Double Track T_1, T_2, T_3, T_4 T_7, T_{12}	20	1.073	1.117	2269.68	4.95	2.41	1.84	10.30	55.04	76.63		
		15	1.032	1.055			1.89	1.38	7.72	41.17	57.47		
		9	1.017	1.026			1.15	0.83	4.63	25.16	34.48		
		20	1.073	1.117			2.23	1.84	10.30	54.65	76.63		
		15	1.032	1.055			1.76	1.38	7.72	40.88	57.47		
		9	1.017	1.026			1.09	0.83	4.63	24.81	34.48		
Option IV	Double Track T_2, T_7, T_{12}	20	1.165	1.211	2161.32	5.61	2.41	1.84	10.30	55.04	76.63		
		15	1.107	1.142			1.89	1.38	7.72	41.17	57.47		
		9	1.070	1.098			1.15	0.83	4.63	25.16	34.48		
Option V	Single Track	20	1.165	1.211	2073.50	4.90	2.41	1.84	10.30	55.04	76.63		
		15	1.107	1.142			1.89	1.38	7.72	41.17	57.47		
		9	1.070	1.098			1.15	0.83	4.63	25.16	34.48		

Case			Op. Quality		ADIF		Rail operator							Incomes
Option	Tracks	Trains	Mean RT	Max RT	Costs		Costs						Σ costs	
					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	2661.69	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	2269.68	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	2161.32	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	2073.50	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

Case			Op. Quality		ADIF		Rail operator						
Option	Tracks	Trains	Mean RT	Max RT	Costs		Costs						Incomes
					Construction	Maintenance	Maintenance	Amortization	Track Usage	Energy	Staff	Client services	
Option I	Double Track	20	1.000	Rail operator									
		15	1.000	Costs							Incomes		
		9	1.000										
Option II	Double Track T_2, T_3, T_8, T_9	20	1.000	Maintenance	Amortization	Track Usage	Energy	Staff	Client services	Σ cost	Fares		
		15	1.000										
		9	1.000	8.06	11.25	22.14	2.60	1.84	10.30	56.19	76.63		
Option III	Double Track T_1, T_2, T_3, T_4 T_7, T_{12}	20	1.029	6.05	8.25	16.65	1.95	1.38	7.72	42.00	57.47		
		15	1.015										
		9	1.000	3.63	5.25	10.21	1.17	0.83	4.63	25.72	34.48		
Option IV	Double Track T_2, T_7, T_{12}	20	1.073	8.06	11.25	21.50	2.60	1.84	10.30	55.55	76.63		
		15	1.032										
		9	1.017	6.05	8.25	16.17	1.95	1.38	7.72	41.52	57.47		
Option V	Single Track	20	1.165	3.63	5.25	9.73	1.17	0.83	4.63	25.24	34.48		
		15	1.107										
		9	1.070	8.06	11.25	21.29	2.52	1.84	10.30	55.26	76.63		
				6.05	8.25	16.30	1.92	1.38	7.72	41.62	57.47		
				3.63	5.25	9.61	1.17	0.83	4.63	25.12	34.48		
				8.06	11.25	21.18	2.41	1.84	10.30	55.04	76.63		
				6.05	8.25	15.88	1.89	1.38	7.72	41.17	57.47		
				3.63	5.25	9.67	1.15	0.83	4.63	25.16	34.48		
				8.06	11.25	20.97	2.23	1.84	10.30	54.65	76.63		
				6.05	8.25	15.72	1.76	1.38	7.72	40.88	57.47		
				3.63	5.25	9.38	1.09	0.83	4.63	24.81	34.48		

CONCLUSIONES:

- 1 La combinación de vía única en los tramos caros alternada con la doble permite reducir considerablemente los costes de construcción.
- 2 Existen combinaciones de vía doble-vía única que, además de reducir el coste de construcción, no producen una pérdida significativa de la calidad del servicio.
- 3 En el caso de Palencia-Santander, existen combinaciones de vía doble-vía simple que reducirían el coste aproximadamente a un 64 % (ahorro de 1200 M), pudiendo circular 15 trenes por sentido (2,5 veces más de lo existente en la actualidad) con una alta calidad de servicio.

EN SUMA:

- LA VÍA ALTERNADA DOBLE-SIMPLE CONSTITUYE UNA SOLUCIÓN ACERTADA, ESPECIAL PARA TRAMOS PERIFÉRICOS DE LA RED.
- DEBERÍA CONSIDERARSE ESTE PLANTEAMIENTO A LA HORA DE DISEÑAR LAS LÍNEAS FERROVIARIAS DE ALTA VELOCIDAD.