



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES  
DEPARTAMENTO DE ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL

TRABAJO DE FIN DE GRADO

## ASIGNACIÓN DE SLOTS FERROVIARIOS MEDIANTE SUBASTAS

Dirigido por *D. Javier Pajares Gutiérrez*

Realizado por *D. Víctor García Pardo*

Ingeniería de Organización Industrial

Universidad de Valladolid

Valladolid, Julio de 2018

---



---

**Universidad de Valladolid**



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

**TÍTULO:** Asignación de Slots ferroviarios mediante subastas

**AUTOR:** D. Víctor García Pardo

**DIRECTOR:** D. Javier Pajares Gutiérrez

**TITULACIÓN:** Ingeniería de Organización Industrial

**RESUMEN:** Debido a las nuevas políticas de liberalización del sector ferroviario, en este estudio se tratará de investigar y desarrollar una metodología para la asignación de espacios y franjas horarias a las diferentes compañías de servicios. Para implementar esta política donde las compañías competirán entre ellas, debe desarrollarse un proceso de toma de decisiones de forma eficiente para asignar las vías a las compañías. Nuestro estudio presenta un mecanismo basado en subastas iterativas, particularmente de asignación mediante subastas y modelado basado en agentes, que proporcione resultados experimentales en un limitado entorno de trabajo.

Otros estudios lo han mencionado anteriormente, pero sin adentrarse en profundidad en la problemática y sin resolver la subasta, optimizando únicamente el modelo de determinación del ganador, no el mecanismo en sí.

**PALABRAS CLAVE:** Modelado basado en agentes, subastas, gestión de transporte ferroviario, asignación de Slots.

**KEY WORDS:** agent based modelling, auctions, railway transport management, railway slot allocation.

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID



---

**Universidad de Valladolid**



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, por darme un modelo a seguir, que me han enseñado con su ejemplo diario, a esforzarme para alcanzar mis metas, por aguantarme, en las buenas y en las malas, por apoyarme, ayudarme y hacer todo lo posible para que yo haya llegado hasta aquí, sin ellos, nada de esto sería posible.

A mi familia, que siempre ha soportado mis quejas y me ha animado a seguir adelante y se emocionaban conmigo cuando había buenas noticias.

A mis compañeros y amigos, por animarme a seguir y hacer más amenas las horas.

A todos, de verdad, GRACIAS.



---

**Universidad de Valladolid**



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
GLOSARIO.....	11
1.    Inclusiones y Exclusiones .....	11
2.    Siglas.....	11
3.    Definiciones.....	11
I.    INTRODUCCIÓN .....	13
II.   RAILWAY SCHEDULING. CONCEPTOS PREVIOS .....	15
1.    Teoría de Juegos .....	18
2.    Teoría de Subastas .....	18
2.1.  Subastas.....	19
2.2.  Tipos de Subastas .....	20
2.3.  Objetivos.....	24
III.  ESTADO DEL ARTE .....	25
1.    Revisión de los Métodos Actuales .....	25
1.1.  Administrativo .....	25
1.2.  De Valoración .....	25
1.3.  De Mercado.....	26
1.4.  Matemáticos .....	28
2.    Contribuciones de este estudio .....	28
IV.  ANÁLISIS DEL PROBLEMA.....	29
1.    Consideraciones iniciales.....	29
2.    Formulación del problema.....	31
2.1.  Red de trabajo espacio-temporal .....	31
2.2.  Formulación formal del problema .....	37
3.    Formulación del método de subasta.....	43
3.1.  Mecanismo de la subasta .....	43
3.2.  Precios de puja .....	45
3.3.  Estrategia de pujas de las TOCs .....	46
V.    ANÁLISIS DEL ALGORITMO .....	51
1.    Descripción del experimento.....	51



2.	Líneas opcionales a emplear.....	53
VI.	FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA.....	65
1.	Resultados obtenidos.....	75
2.	Futuras mejoras.....	79
VII.	CONCLUSIONES.....	81
VIII.	BIBLIOGRAFÍA.....	83
IX.	ANEXO.....	87
1.	Registro de progresión y resultados iniciales.....	87
2.	Datos de RENFE.....	104



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Terminales unidireccionales .....	31
Figura 2. Terminales bidireccionales .....	31
Figura 3. Nodos de la red .....	32
Figura 4. Trayectoria de un tren .....	32
Figura 5. Nodos ficticios.....	33
Figura 6. Red de trabajo espacio-temporal. ....	34
Figura 7. Mecanismo del algoritmo de Asignación .....	42
Figura 8. Mecanismo de la Subasta.....	44
Figura 9. Actualización de los precios solicitados.....	45
Figura 10. Slots asignados previamente .....	47
Figura 11. Slot asignado en la ronda previa.....	47
Figura 12. Conflictos en la asignación de Slots .....	48
Figura 13. Slot que maximiza el beneficio.....	48
Figura 14. Situación de conflicto en la terminal .....	49
Figura 15. Red que maximiza la Utilidad .....	50
Figura 16. Corredor de Castilla y León.....	53
Figura 17. Corredor de Santiago .....	54
Figura 18. Conexión entre comunidades-Galicia .....	55
Figura 19. Corredor de Sevilla .....	55
Figura 20. Conexión entre comunidades-Andalucía .....	56
Figura 21. Corredor de Barcelona.....	57
Figura 22. Conexión entre comunidades-Cataluña.....	58
Figura 23. Slots a asignar .....	60
Figura 24. Procedimiento de la subasta.....	61
Figura 25. Corredores de Castilla y León.....	62
Figura 26. Líneas futuras.....	80
Figura 27. Áreas territoriales operativas de Adif.....	91
Figura 28. Estaciones de transportes de Viajeros .....	91
Figura 29. Principales Terminales de Transporte de Mercancías.....	92
Figura 30. AVE.....	93
Figura 31. Avant.....	93
Figura 32. Alvia .....	93
Figura 33. Áreas metropolitanas y su relación con la red ferroviaria .....	94
Figura 34. Líneas en España: Larga distancia y alta velocidad .....	95
Figura 35. Densidad de la red ferroviaria por superficie del país.....	98
Figura 36. Densidad de la red ferroviaria por habitante .....	98
Figura 37. Viajes anuales en ferrocarril por habitante .....	99
Figura 38. Recorrido medio del viajero .....	99
Figura 39. Trenes circulados por cada kilómetro de la red.....	100
Figura 40. Número de viajeros en ferrocarril por kilómetro de red .....	100
Figura 41. Toneladas.kilómetro en ferrocarril por kilómetro de red.....	101



**Universidad de Valladolid**



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Figura 42. Kilómetros recorridos por persona al año.....	101
Figura 43. Kilómetros de red ferroviaria por países.....	102



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Notación y definición de las variables .....	38
Tabla 2. Resultados simulación Excel.....	93
Tabla 3. Empresas con licencia y certificado de seguridad .....	107
Tabla 4. Volumen de negocio en transporte ferroviario .....	113
Tabla 5. Volumen de negocio en transporte ferroviario .....	113
Tabla 6. Gastos de viajeros en transporte ferroviario.....	113
Tabla 7. Gastos de viajeros en transporte ferroviario.....	114
Tabla 8. Datos terminales Catalanas-1 .....	119
Tabla 9. Datos terminales Catalanas-2 .....	120
Tabla 10. Datos terminales Madrileñas.....	120
Tabla 11. Datos terminales Gallegas.....	121
Tabla 12. Datos terminales Andaluzas .....	121
Tabla 13. Ingresos de una TOC .....	122
Tabla 14. Coste del viajero .....	122
Tabla 15. Datos básicos de productos convencionales diurnos.....	123
Tabla 16. Datos básicos en productos nocturnos de larga distancia ..	123
Tabla 17. Trenes medios/día y su ocupación .....	124
Tabla 18. Datos básicos de los servicios de media distancia.....	124



---

**Universidad de Valladolid**



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES



## GLOSARIO

### 1. Inclusiones y Exclusiones

Este glosario incluye términos que son propios o prácticamente propios, de la terminología ferroviaria (por ejemplo, Slots, TOC...).

En general, este glosario no incluye:

-Términos específicos de un área de aplicación.

-Términos compuestos cuyo significado se deduce claramente de la combinación de sus componentes.

-Variantes, cuando el significado de la variante se deduce claramente del término básico.

-Términos que se utilizan una única vez y que no son críticos para comprender el propósito de la oración.

### 2. Siglas

CCA: Combinatorial Clock Auction: Subasta de reloj combinatoria.

CA: Combinatorial Auction: Subasta combinatoria de sobre cerrado de varios elementos.

VCG: Vickrey-Clarke-Groves: Tipo de subasta.

TOC: Train Operating Company: Compañías ferroviarias operadoras.

ROI: Return of Investment: Retorno de la inversión.

IM: Infra Manager: Manager de las infraestructuras ferroviarias.

OPTRA: Optimal Track Allocation Problem: El problema óptimo de asignación de seguimiento, también conocido como el problema de enrutamiento de trenes o el problema de horarios de trenes.

### 3. Definiciones

Juegos: Son actividades en la que los participantes, también llamados jugadores realizan una serie de acciones y como consecuencia de ellas obtienen unos resultados que son dependientes no sólo de sus propias acciones, sino también de las acciones de los otros participantes.

Stakeholders: Los interesados, personas o entidades a las que afecta el proyecto.

Slot: Franjas horarias de utilización de las infraestructuras.

Dwell time: Tiempo que un vehículo pasa en una parada programada sin moverse.



**Universidad de Valladolid**



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Larga distancia: “Transporte de viajeros de larga distancia” a todos aquellos tráficos de viajeros regulares realizados en trenes o en grupos de trenes no sujetos a Obligación de Servicio Público, y en los que el recorrido medio del viajero, salvo excepciones, es superior a 300 kilómetros.

Media distancia: “Transporte de viajeros de media distancia” todos aquellos transportes de viajeros realizados en trenes o en grupos de trenes sujetos a Obligación de Servicio Público en los que el recorrido medio del viajero, salvo en algunas excepciones, es superior a 60 kilómetros e inferior a 300 kilómetros.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

## I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo viene derivado de uno de los proyectos competitivos financiados en los que actualmente está trabajando INSISOC, “Ingeniería de los Sistemas Sociales” de la Universidad de Valladolid, un remarcado grupo de investigación de reconocido prestigio.

La utilización de subastas en campos relacionados con la ingeniería, es un tema relativamente novedoso, pero que está comenzando a tener mayor importancia en el mundo debido a que en los últimos años, el número de publicaciones de estudios relacionados con la asignación mediante subastas se ha incrementado respecto de años anteriores.

En Europa ha surgido la necesidad de buscar una manera de asignar el uso de las infraestructuras, debido principalmente a la obligación de liberalizar el sector ferroviario, tanto las infraestructuras como redes ferroviarias al libre comercio. Por tanto, se ha de buscar la manera de asignar dichas infraestructuras a los interesados de manera que el dueño obtenga el mayor beneficio posible de la explotación de sus propios recursos.

El objetivo principal de este trabajo fin de grado, es tratar de replicar los estudios realizados por los investigadores coreanos *Park, B. H., Hong, S. H., & Kim, C. S.*, que a su vez están basados en el estudio de los investigadores alemanes *Borndörfer, R., Grötschel, M., Lukac, S., Mitusch, K., Schlechte, T., Schultz, S., & Tanner, A.* Donde se centran principalmente en la generación de un algoritmo para la asignación de Slots ferroviarios mediante subastas combinatorias, cada uno de una manera diferente. Nos centraremos en estudios relativos a la red ferroviaria coreana debido a que son más recientes y contienen la teoría de utilización de subastas combinatorias, tema que los investigadores alemanes no tratan tan en profundidad.

Este trabajo replica algunos de los resultados obtenidos por ellos, para, más adelante, poder emplearlos como punto de partida para realizar una asignación de Slots mediante subastas combinatorias, que realmente contemplen el aspecto de la combinación de Slots en diferentes estaciones no consecutivas, para que las TOCs obtengan la salida de una estación y la llegada a otra en otra franja temporal diferente.



---

**Universidad de Valladolid**



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES



## II. RAILWAY SCHEDULING. CONCEPTOS PREVIOS

La liberalización del sector ferroviario y el problema de asignación de capacidad a los operadores, es lo que ha dado lugar a que la Unión Europea empiece a considerar cómo resolver el problema.

Dicho proyecto de investigación denominado “Algoritmos Basados en Agentes Artificiales para Optimizar la Capacidad de Redes Ferroviarias”, en adelante Proyecto “ABARNET” (Ministerio de Economía y Competitividad), el cual aborda el diseño y aplicación de algoritmos basados en agentes inteligentes para optimizar el uso de los recursos e infraestructuras ferroviarias, proyecto de investigación en que se encuadra el proyecto DPI2016-78902-P que corresponde directamente con la prioridad temática: “I+D en Tecnologías de la Información y la Comunicación, Energía y Sostenibilidad para la competitividad global regional en base a la transversalidad de tecnologías y conocimiento”.

Estos objetivos son concurrentes con los indicados en diferentes partes del programa H2020 que busca proyectos y aplicaciones multidisciplinares basados en acciones de investigación e innovación que aprovechan las TIC, siendo uno de ellos la liberalización del transporte y las redes ferroviarias, que es del que tratamos.

Para estimular la competitividad del sector ferroviario europeo, la Comisión Europea ha adoptado una estrategia encaminada a “fomentar el desarrollo de una infraestructura ferroviaria eficaz, establecer un mercado ferroviario abierto, suprimir los obstáculos administrativos y técnicos y garantizar condiciones de competencia equitativas frente a los demás modos de transporte”.

Esto se debe a varias razones:

- a) Que el ferrocarril está en condiciones de atender al crecimiento previsto de la demanda del transporte de viajeros en Europa para 2020, por lo que para ello se necesita un marco regulador que permita el acceso no discriminatorio a la utilización de las infraestructuras garantizando su buen funcionamiento y el uso social de las mismas.
- b) Que el ferrocarril es el sistema de transporte más sostenible, representando solo el 0,6% del 25% de emisiones de CO<sub>2</sub> que provienen del transporte.
- c) Que la liberalización será una oportunidad para la transformación de las empresas públicas y también de las privadas, de creación de riqueza y de generación de empleo, que redundará en una mejora de los servicios para los usuarios”.



La Ley 39/2003 de 17 de noviembre del sector ferroviario español, modificada el 14 de octubre de 2014 reconoce el carácter estratégico del ferrocarril en España, y transpone varias Directivas Comunitarias que afectan a la liberalización del sector ferroviario en nuestro país, así como a la creación de un espacio ferroviario europeo. Previo a ésta normativa, la ley separa en dos organizaciones las actividades de administración de la infraestructura -que gestionará ADIF-, de las del transporte -Renfe Operadora-.

Además, en la misma ley se regula el acceso de nuevas compañías al mercado de transporte ferroviario, de forma que a partir del 1 de enero de 2005 se liberaliza el transporte de mercancías, y se aplaza para el año 2010 la liberalización del transporte de viajeros.

No obstante, la liberalización real del sector en España se ha retrasado y todavía se discute en el sector político. El Informe de la Comisión Técnico-Científica para el Estudio de Mejoras en el Sector Ferroviario del 2014, aconseja la introducción de un periodo transitorio que permita una liberalización gradual: “Un proceso de liberalización totalmente abierto podría, dado el estrecho mercado existente, derivar en problemas económicos y de falta de rentabilidad que deteriorarían el servicio y la imagen del ferrocarril”.

Aun así, la compañía que actualmente tiene la mayoría del mercado, RENFE, está dificultando las cosas y no cede ante la liberalización, alega contra compañías privadas, como lo es el AVE Madrid-Francia de Air Nostrum, ya que, al hacer paradas intermedias en Zaragoza o Barcelona, implica una competencia frontal con el corredor de Renfe Madrid-Cataluña, uno de los más rentables y de mayor tráfico de la red comercial estatal.

De cualquier forma, la UE, fija para 2019 la completa liberalización, para operadores europeos, del transporte interno de viajeros, por lo que, dispuesta o no, la liberalización es un hecho.

Más allá de los intereses y renuencias de cada Stakeholder, una causa fundamental del retraso en la liberalización real radica en la dificultad de la gestión de una red con múltiples agentes, y en los procedimientos de asignación de trayectos y slots, así como en la fijación de los precios de uso de los mismos.

El proceso de asignación consiste en que el encargado de gestionar las infraestructuras ferroviarias otorga permisos de circulación de un determinado número de trenes en un determinado tramo de la red ferroviaria, en una franja horaria determinada a un costo determinado, ya que, si algo define al ferrocarril moderno, es la capacidad. En otras palabras, la red en su conjunto se divide en tramos, y en cada tramo, se distinguen distintas franjas horarias de utilización.



**Universidad de Valladolid**



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

El denominado “Slot” se corresponde con los derechos de utilización de un tramo en una franja horaria determinada.

Justamente, la falta de homogeneidad en la demanda de utilización por parte de los viajeros, tanto en tiempo como en destinos, hará que, generalmente, varios operadores deseen operar sobre los mismos tramos y períodos temporales. Por ello, el gestor de infraestructuras debe establecer un procedimiento de asignación de los slots entre los posibles operadores (*Stern and Turvey, 2003. [29]*), de forma que se maximice alguna variable relacionada con la eficiencia del sistema o el servicio aportado a los ciudadanos.

Conceptualmente, la asignación es un proceso complejo debido a la gran variedad de factores que afectan (*Bassanini et al. 2002. [5]*): heterogeneidad en la demanda sobre distintos trayectos, que puede provocar congestiones en distintos tramos de la red; existencia de horas “punta” y de mínima utilización de determinados tramos de la red; se requieren mecanismos de coordinación entre los distintos tramos (no son independientes); y se debe garantizar “servicios mínimos” en áreas que, por su situación geográfica, puedan ser poco atractivas.

A lo anterior se añade que en una misma vía puedan convivir trenes “lentos” -que paran en todas las estaciones- con trenes rápidos que cubren grandes poblaciones. Además, el valor que tiene un determinado tramo para un operador depende del conjunto de tramos y franjas horarias sobre las que posee derechos (*Gibson, 2003. [12]*); por ejemplo, el valor de operar en el tramo Madrid-Zaragoza, depende de que se pueda operar también en el tramo Zaragoza-Barcelona. Y finalmente, un retraso en un tren en un determinado tramo afecta (en cascada) a retrasos en otros tramos de la red (*network effect, Landex y Nielsen, 2012. [23]*).

Por todo ello, aunque conceptualmente la asignación de slots sea un problema de asignación de capacidad, en la práctica, la dificultad y la complejidad es mucho mayor que la que se produce en otros problemas de asignación de capacidad, como en el caso de las frecuencias de radio y telefonía, los slots de aeropuertos, derechos de distribución de gas, etc.

En los últimos años, ha aumentado el número de publicaciones que trataban tanto de subastas combinatorias, como de su aplicación a casos particularizados, por lo que de momento no hay uno aceptado por la comunidad como aplicable a cualquier situación, y mucho menos en la asignación de Slots ferroviarios.



Por tanto, esto será muy relevante, ya que en este TFG se realizará una primera aproximación del método de subastas, adaptando el modelo a un conjunto de tramos y vías ferroviarias dentro del sistema ferroviario español, que posteriormente será extrapolable a cualquier otro sistema.

Mediante simulación, discutiremos la problemática de esta temática, sus ventajas y qué puede aportar a la sociedad.

Después de todo, nuestro mayor objetivo sería ser capaces de asignar los Slots de forma que se maximice el beneficio para las compañías que controlan las infraestructuras, a la vez que se provee del mejor servicio a sus usuarios.

## 1. Teoría de Juegos

Para poder explicar cómo funciona una subasta combinatoria primero es necesario entender qué son las subastas y de dónde vienen, por lo que es necesario explicar qué es la teoría de juegos, ya que las subastas son un tipo de los llamados “Juegos”.

La Teoría de Juegos es una parte de una rama de las matemáticas, las matemáticas aplicadas, que estudian situaciones de conflicto modeladas entre los diferentes participantes para ver las interacciones en estos llamados juegos.

Se aplica en todo tipo de áreas y es una herramienta importante para la teoría económica, ya que ha contribuido a comprender más profundamente la conducta frente a la toma de decisiones. Se estudian estrategias óptimas y el comportamiento previsto de los participantes.

Las situaciones de conflicto se describen con modelos matemáticos que ayudan a la toma de decisiones en estos ambientes de incertidumbre y de intereses opuestos.

Según distintos criterios, podemos encontrar diferentes tipos de juegos: cooperativos o no cooperativos, estáticos o dinámicos y con información completa o con información incompleta.

## 2. Teoría de Subastas

La denominada Teoría de las Subastas es una rama de la Teoría de Juegos que busca estudiar las subastas como una forma de interacción estratégica entre sus participantes. Se estudian temas diversos como: los incentivos que pueden tener los participantes, las estrategias óptimas para cada tipo de subasta, los resultados esperados y el nivel de eficiencia que se logra con ellas.

La teoría de subastas es un estudio que permite no sólo comprender el resultado de las subastas, sino también lograr un diseño óptimo según los objetivos que se persiguen.



La Teoría de Subastas se aplica en multitud de campos, como en mercados que se abren a la competencia (mercado de electricidad) o en análisis de potenciales abusos de posición dominante que puede haber en algún mercado.

## **2.1. Subastas**

Vivimos en un mundo globalizado donde diariamente se realizan innumerables transacciones económicas, muchas de las cuales se realizan mediante subastas.

Una Subasta es un proceso de venta organizada de un producto basado en la competencia directa, ya sea un bien o un servicio, en la que los compradores compiten entre sí ofreciendo cantidades denominadas pujas para adquirir dicho producto bajo un conjunto de reglas predeterminadas, mediante las cuales se determina la asignación de recursos y su precio en función de las pujas de los participantes, previamente al proceso de venta.

Estas reglas además son conocidas por todos los agentes que van a participar en la subasta y existe la certeza de que se van a cumplir. No obstante, existen ocasiones en las que hay una cierta incertidumbre por parte de los compradores, ya que el vendedor puede no tener capacidad de autocompromiso.

En las subastas, los participantes ofrecen diversas sumas de dinero de forma iterativa, ya que generalmente se suelen comparar dichas ofertas con las de los demás participantes y se vuelve a pujar para adquirir el producto. Finalmente, el mejor postor, el que ofrece la mayor cantidad de dinero, es el que adquiere dicho producto. Aunque en algunos tipos de subastas el producto se adjudica a la mejor oferta y no hay posibilidades de mejorarla.

Las subastas son también una alternativa a los mercados para determinar un precio de equilibrio para un bien o servicio.

Hasta ahora, en la teoría de subastas, se ha considerado que había dos tipos fundamentales:

- Sobre Cerrado: Primer precio, segundo precio, inversas o de compra.
- Dinámica: Ascendente o inglesa, descendente o holandesa, "todos pagan" o americana.



## 2.2. Tipos de Subastas

### Según el Valor

#### Valor común

El valor del producto a subastar será el mismo para cualquier participante, pero no lo conocen en el momento de la subasta. Por ejemplo el petróleo, el valor del petróleo a extraer es el mismo para todos, pero los participantes deben estimar cuál es ese valor, pero lo hacen con un cierto margen de error, así, el que más sobreestime ese valor será el mejor postor. Esto es lo que se conoce como “maldición del ganador”, ya que muchas veces terminan incurriendo en pérdidas.

#### Valor privado

El valor del producto a subastar será diferente para cada participante, ya que será lo que crea personalmente que vale, por lo que teóricamente, nadie hará una oferta por encima del valor de su propio juicio. Ej: Subasta de arte o de coleccionables.

### Dinámicas

En este tipo de subastas, las ofertas son visibles para todos y se puja compitiendo con los otros participantes hasta que termina. La puja de mayor valor es la que indica el fin de la subasta.

#### *Ascendente*

##### Inglesa

Es la más habitual, en esta, el subastador parte de un precio de reserva y hace pujar a los participantes a viva voz, donde los postores pueden ir aumentando el último precio ofrecido o pueden decidir no pujar más según les interese, hasta que, finalmente, nadie aumenta la última puja, y ahí se adjudica el producto. Ej: Obras de arte.

##### Americana

Es un tipo específico de la ascendente, que contiene la peculiaridad de que todos los participantes deben pagar su puja, y aun así, sólo la más alta es la ganadora. Conlleva mucho riesgo sobre todo para gente inexperta, ya que se puede terminar pagando mucho para finalmente no adquirir el producto.



**Universidad de Valladolid**

*Descendente*

### Holandesa

En este caso, el modelo es justo lo opuesto al anterior, el subastador es el que, partiendo de un precio base elevado, va reduciendo progresivamente el importe del producto, hasta que uno de los participantes acepta el precio, con lo que se detiene la puja y se paga el precio en que ha quedado en el momento en que se ha detenido la baja progresiva.

En este caso, los participantes no conocen las pujas de los demás, por lo que deben decidir si aceptan el precio o no teniendo en cuenta la posibilidad de que otro comprador lo haga antes y se quede con el producto. Suelen ser más rápidas que la inglesa, por lo que se usa, por ejemplo con bienes perecederos, o incluso letras y bonos del estado.

### Española

Se conoce también como holandesa modificada. Combina subasta de precio único y de precios múltiples. Se establece un precio mínimo para los productos que no es conocido por los participantes, los cuales tienen dos tipos de ofertas:

- Competitivas, en las que pujan a un precio concreto.
- No competitivas, donde aceptan precio final sea el que sea.

Se aceptan todas las ofertas competitivas por encima del precio concreto y se establece un precio medio entre ellas que será el que pagarán las ofertas no competitivas y los que queden por encima.

Las pujas entre el precio medio y el mínimo obtendrán los bienes a ese precio. Se utiliza cuando se subastan varios bienes. Ej: Se usa en España para emitir letras del tesoro.

### **De Sobre Cerrado**

En este tipo de subastas, las ofertas se presentan en sólo una ocasión, generalmente en un sobre cerrado, por lo que es privada y no se conocen las pujas del resto de participantes.

#### *Primer Precio*

Cada participante realiza la puja por escrito y de forma anónima mediante un sobre cerrado, por lo que no se conocen las pujas del resto de participantes, por lo que es fácil cometer equivocaciones ya que quieren ofrecer un precio menor al máximo planeado, pero que no los expulse de la subasta. Posteriormente, el subastador, abre los sobres y gana el participante cuya puja haya sido la más alta.



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES



### *Segundo Precio o Vickrey*

Es como la anterior, pero el ganador paga el precio más alto de entre las pujas de perdedores, que es la segunda puja de más valor, a menos que exista un empate en la primera plaza, en cuyo caso el ganador se elige. Aquí los participantes tienen más motivos para revelar cuándo valoran el producto a subastar. *Binmore, K. (2009). [18]*

### *Round Robin*

Es similar a la de primer precio, pero una vez conocida la puja más alta, el subastador comunica a los participantes cuál es la oferta que se está adjudicando en la subasta en esos momentos. Por tanto, después de ello, existe la posibilidad de que otros participantes, al conocerla, puedan pujar de nuevo y así superar la oferta máxima o abandonar la subasta. Ej: Venta de casas.

### *Subastas a la Baja o Inversa (de Presupuestos)*

En este tipo de subasta, es el que antes llamaba participante, el comprador, el que atrae a los diferentes proveedores o vendedores que pujan por ofrecer el precio más bajo posible, pero con el que la parte que compra, acepte su oferta. Ej: Proyectos a realizar, adjudicación de obras...

## **Otros tipos**

### Subasta por céntimos

El proceso es similar al de una subasta ascendente, pero la puja sobre el producto debe tener una diferencia de 1 céntimo respecto de la anterior y al de una subasta a la baja, ya que para realizar cada puja debemos pagar un importe que varía en función del valor del artículo. También hay un tiempo límite para pujar, y se finaliza cuando dicho tiempo se acabe o cuando no haya habido nadie que pujase por el producto durante un determinado período.

### Subasta y Concurso

En el Concurso, la adjudicación recaerá en el licitador que, en su conjunto, haga la proposición más ventajosa, teniendo en cuenta los criterios que se hayan establecido en los pliegos, sin atender exclusivamente al precio de la misma y sin perjuicio del derecho de la Administración a declararlo desierto.

### Subasta Silenciosa

Las pujas se escriben en hojas de papel, y al final, a la puja más alta se adjudica la subasta. La subasta es "silenciosa" porque no hay subastador, y los pujadores escriben sus pujas en una hoja que usualmente se deja en una mesa cercana al producto. También existe la llamada "puja garantizada" que si se paga se obtiene el objeto de forma inmediata. Ej: Eventos de beneficencia.



**Universidad de Valladolid**

### Subasta combinatoria

Este será el tipo de subasta en el que nos centraremos para realizar este estudio, en ella, se subastan múltiples unidades del producto que se quiere “vender”. Es una mezcla de subastas de sobre cerrado y ascendentes, ya que las pujas se realizarán por las TOCs de forma anónima en base a un precio de reserva que viene dado por datos históricos, pero las rondas se repetirán una vez se conozcan todas las pujas, lo que la relaciona con la Round Robin.

También está la diferencia de que en esta subasta, los participantes pujan por lotes de productos, por una combinación o paquete de unidades genéricas, en lugar de por productos individuales, ya que es lo que les interesa. Y si no pueden adquirir todo el lote ya no les interesa el producto, en adelante llamado Slot, subastado.

Este tipo de subasta es un tipo de subasta de Espectro, que derivaba de las subastas holandesa, inglesa y de sobre cerrado, que han evolucionado hasta llegar a las subastas ascendentes y simultáneas de rondas múltiples que dieron lugar a las Combinatorias y a las Combinatorias de reloj.

La principal diferencia entre la CCA y CA, es que en la de reloj se habla de frecuencias (Hz, horas...) y en la combinatoria de lotes de productos.

El mejor ejemplo para diferenciarlas es este: Para nuestro caso, emplearíamos la CCA para el caso en que el dueño de las infraestructuras ofrece los Slot a las TOCs, pero cuando es el operador de la compañía ferroviaria el que vende los billetes a los viajeros, ellos emplearían la CA.

El problema de decidir qué lotes asignar y a quién, de modo que el gestor de la puja maximice su beneficio, es lo que intentamos resolver.

Una de sus ventajas es que los participantes ofrezcan el valor real en torno al Slot, al mismo tiempo que se reducen incentivos para el comportamiento estratégico y se reduce el efecto de la maldición del ganador (pagar de más por el elemento subastado, ya sea porque la oferta supera el valor del producto, o que su valor resulta ser menor del esperado).

El proceso a seguir, sería realizar varias rondas en las que se puje por los Slots de distintos tramos para ir descubriendo sus precios mediante un proceso iterativo. Esto también ocurre en subastas ascendentes, pero una diferencia clave es que se oferta por bloques genéricos de frecuencias, no por segmentos específicos, como es nuestro caso.



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES



### 2.3. Objetivos

Normalmente el objetivo de la subasta difiere según a quién le preguntemos. Para el vendedor, su principal objetivo será maximizar sus beneficios o las utilidades de la venta, induciendo a que los participantes revelen su valoración personal del producto a subastar, para así, incrementar el precio de sus pujas.

Evidentemente, la valoración que tienen los participantes del producto es propia y proviene de una valoración personal derivada de la información privada que han obtenido y que muchas veces no tienen incentivos suficientes para revelar.

Por tanto, pueden no estar dispuestos a revelar datos que consideren críticos, por ejemplo, no querrán revelar cuánto es lo máximo que están dispuestos a pagar por el producto, con el objetivo de pagar lo menos posible, o cuanto esperan ganar con la explotación, ya que con eso obtendríamos una idea aproximada de lo que podrían llegar a pagar.

En nuestro caso en particular, como ya explicaré más adelante, la idea es que las TOCs, las compañías operativas, que serán los participantes, pujen por cualquier espacio posible, y los posibles conflictos se resuelvan usando la maximización de ingresos para el que oferta (el cual se reduce si nos alejamos del tiempo establecido), tratando también de maximizar la utilidad que estas compañías pueden darle a las infraestructuras.



### III. ESTADO DEL ARTE

#### 1. Revisión de los Métodos Actuales

Los métodos más utilizados para resolver los problemas de capacidad de la red ferroviaria se pueden generalizar en 4 grandes grupos: Administrativo, de Valoración, de Mercado y Matemáticos.

##### 1.1. Administrativo

Los mecanismos administrativos emplean un conjunto de reglas, tales como "los trenes interurbanos tienen prioridad" (*Gibson, 2003. [12]*), para asignar tramos de vías ferroviarios a las TOCs.

Dichos mecanismos no dependen del valor de la capacidad de la infraestructura ferroviaria, y se emplean principalmente en redes ferroviarias que son de propiedad única y que están directamente controladas por gobiernos o administradores de las infraestructuras respaldados por el gobierno.

##### 1.2. De Valoración

Los mecanismos basados en la valoración requieren la existencia de un administrador de la infraestructura ferroviaria, que asigne un valor a cada tramo de las vías ferroviarias.

Al recibir los valores, las compañías deciden si tomar las rutas ofrecidas. Estos valores de los tramos de las vías ferroviarias a menudo se determinan en función de la media, o del coste marginal.

Según la valoración de la media, el coste total se distribuye entre los trenes proporcionalmente al uso de la infraestructura ferroviaria. Como ejemplos, *Kennedy (1997. [17])* sugiere asignar el coste total, incluidos los costes debido al mantenimiento de la vía, la renovación y las corrientes eléctricas, a los trenes en función del número de millas, kilómetros en nuestro caso, recorridas o de las millas recorridas por los viajeros. *Kozan y Burdett (2005). [19]* proponen cuatro esquemas de cobro del acceso basados en el corredor, en las secciones, en el tiempo y en el peso.

Según la valoración del coste marginal, los costes de acceso se calculan sobre la base de los efectos de la adición de un tren a la red ferroviaria, así como del efecto de retraso del tren en toda la red (*Gibson, 2003. [12]*) o sobre la base del desgaste gradual de la infraestructura (*Bugarinovic y Boskovic, 2015. [9]*). Para estimar el coste marginal de desgaste de la infraestructura, se han desarrollado varios modelos econométricos (*Gaudry y Quinet, 2009. [11]*; *Johansson y Nilsson, 2004. [16]*; *Wheat y Smith, 2008. [31]*; *Anderson, 2011. [1]*; *Anderson et al., 2012. [2]*).



### 1.3. De Mercado

Los mecanismos basados en el mercado se aplican principalmente a los sistemas que no están integrados verticalmente, es decir, a los sistemas que no realizan actividades que anteriormente habían sido delegadas a otros. En nuestro caso significa que el propietario de las infraestructuras ferroviarias y las TOCs no tengan relación más allá de proveedor-cliente.

Estos mecanismos, buscan obtener precios que las TOCs estén dispuestas a pagar por un tramo de las vías ferroviarias que necesitan, a la vez que se tiene en cuenta el impacto de la sobreasignación o el exceso de capacidad.

Una de las formas más destacadas de los mecanismos basados en el mercado, es la subasta, sobre todo gracias a los esfuerzos realizados por *Brewer y Plott (1996)*. [8] y *Nilsson (1999)*. [24] que consideran respectivamente las subastas de primer y segundo precio. En particular, la subasta de segundo precio incentiva a las TOCs, que son postoras, a informar con sinceridad su valoración de los horarios.

Este enfoque, mediante subastas, debería proporcionar resultados de gran calidad sin la necesidad de que ningún participante divulgue información privada, ya que como los mercados se basan en las leyes de oferta y demanda, que en última instancia se basan en factores económicos, pueden proporcionar información sobre cuán valioso es un Slot en términos económicos. Además, un mercado donde los participantes maximizan su beneficio generalmente se asocia con una maximización del bienestar social.

*Borndörfer et al. (2009)*. [7] presentan un mecanismo general de subastas, el VCG, que proporciona una asignación eficiente y compatible con incentivos de la capacidad de la línea ferroviaria, incluyendo restricciones combinatorias para mantener la viabilidad del tramo. (Un mecanismo se llama "incentivo compatible" si a los participantes les interesa revelar su información privada real, como lo solicita el mecanismo).

*Borndörfer et al. (2006)*. [6] diseñan un mecanismo de subasta combinatoria de múltiples rondas que permite la flexibilidad de los horarios de llegada y salida del tren, la velocidad y las rutas tomadas. La investigación es luego extendida por *Harrod (2013)*. [14] quien emplea un modelo de programación de trenes basado en hipergrafos, argumentando que los gráficos dinámicos de tiempo discreto comúnmente utilizados no modelan por completo las interacciones del tren durante las transiciones bloqueadas.



Más recientemente, *Kuo y Miller-Hooks (2015)*. [20] proponen un esquema de subasta combinatoria con dos técnicas de construcción de conjuntos de ofertas que permiten la expresión de una relación complementaria y sustituible entre los Slots de los trenes.

Además de la subasta, también se han empleado modelos no cooperativos de teoría de juegos para determinar la asignación de los slots.

El modelo más antiguo de este tipo proviene de *Harker y Hong (1994)*. [13], que proponen una estructura de mercado interno dentro de una compañía ferroviaria, que consiste en una autoridad ferroviaria y varias divisiones (por ejemplo, viajeros, etc.) cada una con un valor del tren diferente, tanto para el tiempo de tránsito y como para el cumplimiento del horario. Las divisiones compiten por los tramos; la autoridad ferroviaria minimiza una suma ponderada de las desviaciones de las rutas de trenes de los horarios ideales sujetos a restricciones temporales de recorrido.

Los costes del tramo férreo se determinan en función de los precios de las restricciones temporales de viaje del tren, que representan el valor de usar la vía para cada tren. *Bassanini et al. (2002)*. [5] consideran una estructura similar y desarrollan un modelo de tres etapas:

- En la primera, las compañías solicitan sus horarios preferidos.
- En la segunda etapa, el administrador de la infraestructura determina los costes de acceso y los horarios efectivos al resolver un modelo de calendario, una tabla de tiempos, analítico y probabilístico.
- En la tercera etapa, cada operador de tren establece la tarifa en función de los costes de acceso y los horarios efectivos.

*Lang et al. (2013)*. [21] proponen un modelo de dos niveles para capturar las interacciones entre un administrador de infraestructura, una agencia reguladora y operadores de trenes. En el nivel superior, la agencia reguladora establece un coste de acceso que maximiza el bienestar social sujeto a la restricción de equilibrio para el administrador de la infraestructura.

En el nivel inferior, dado el coste de acceso, las compañías de trenes compiten para maximizar el beneficio obtenido.

Debido al éxito obtenido en la implementación de las subastas de fijación de precios en otros tipos de problemas de asignación de recursos, como la programación de multiproyectos o un calendario de compras de trabajos, se estudiará un mercado basado en subastas de fijación de precios para resolver el problema de la asignación de los Slots en un escenario ferroviario.



## 1.4. Matemáticos

Los mecanismos basados en las matemáticas, son principalmente técnicas de optimización matemática que utilizan algoritmos exactos o heurísticos, para proporcionar la mejor solución (o lo más cercano a ella) que se pueda lograr para un problema definido con un alcance y restricciones preestablecidas.

Normalmente, estos mecanismos suelen comparar los distintos resultados que provienen de una heurística de búsqueda local y un algoritmo basado en un modelo de programación lineal entero.

Una de las desventajas de estos mecanismos, principalmente de los modelos de programación lineal enteros, es que hay una necesidad real de conocer la especificación completa del problema, lo que los hace difíciles de aplicar en el mundo real ya que:

- Las TOCs pueden no estar a favor de divulgar información estratégica, ni sus costes.
- Las TOCs podrían no ser capaces de expresarlo de forma correcta y precisa en términos matemáticos.

## 2. Contribuciones de este estudio

Para el caso de España, al no estar todavía liberalizado el transporte de viajeros, pero ya más abierto al mercado el de mercancías, se puede considerar que el sistema ferroviario español no está verticalmente integrado, lo cual indica que podemos aplicar el método basado en el mercado. Lo que permitirá poder aplicar el método de las subastas para este estudio, y más adelante, específicamente la subasta combinatoria, como ya he mencionado anteriormente.

En todo caso, la intención de este estudio es crear un algoritmo generalizado que sirva en cualquier situación en la que haya una capacidad limitada en la infraestructura ferroviaria y no se sepa cómo hacerlo.

Tendremos en cuenta todas las variables posibles para la explicación del modelo, como las de capacidad de congestión de las vías ferroviarias por sobreexplotación de las infraestructuras, o por sobrecarga de trenes en una franja horaria similar. Esto incluye superposiciones de dichas franjas y conflictos de intereses. Para la programación y pruebas posteriores emplearé un modelo macroscópico con el fin de simplificar dicha programación.



## IV. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

En este documento se propone el método de emplear una subasta iterativa de fijación de precios para resolver el problema de la asignación de Slots a las TOCs, incluyendo los espacios de llegada y salida en una única terminal, donde el número disponible de estos Slots está restringido según las limitaciones de capacidad de cada terminal.

Nuestro modelo agrega características más realistas que las propuestas de subastas anteriores en este campo, ya que agregamos restricciones de capacidad para representar las condiciones reales de asignación y, también, consideramos la posibilidad de rechazar viajes si sus utilidades son bajas, o si la demanda excede la capacidad de la terminal.

### 1. Consideraciones iniciales

El problema propuesto será similar al que *Park, B. H. Hong, S. H. y Kim, C. S. [25]* propusieron, pero con una serie de diferencias fundamentales y complementos, como la posibilidad de rechazar viajes cuando los Slots no sean suficientes para programar todos los viajes, o cuando el costo de programar un viaje sea más alto que el beneficio esperado.

Conviene destacar, que uno de los mayores retos será modelar un sistema tan complejo como lo es la red ferroviaria de la manera más conveniente para este estudio, para que finalmente garantice el mayor beneficio en su aplicación real.

Es importante subrayar, que este estudio permitirá, realizar experimentos basados en el modelo, sin obviar ningún tipo de detalle que sea relevante. Por lo tanto, se utilizará un enfoque distinto para lograr los diferentes objetivos del proyecto.

Por consiguiente, para modelar los algoritmos, tanto el problema a maximizar, como el método de subastas, se empleará un enfoque microscópico en la redacción de las explicaciones y consideraciones y en contraposición un enfoque macroscópico que será utilizado para hacer estimaciones más simples que permitan comprobar la veracidad del estudio a la hora de empezar la programación.

Hay estudios, en los que para los casos en que los Slots estén referidos a franjas horarias con acceso a las terminales o con paradas, incluyen en el modelo la capacidad de dichas terminales, referido a la cantidad de trenes que pueden parar al mismo tiempo en una única terminal y a la cantidad de trenes que puede circular por ella. Por último, remarcar que este enfoque no se tomará en consideración en el estudio, ya que implicaría que la simulación fuese mucho más compleja.



Con respecto a los participantes en el modelo de subastas (las compañías ferroviarias operadoras, las hasta ahora llamadas TOC), muchos autores dividen los sectores en los que operan en transporte de viajeros y de mercancías. En la perspectiva aquí adoptada, solo se tendrán en cuenta que son TOC, independientemente de para qué se utilicen. Sin embargo, para solucionar situaciones de conflicto podrían ser utilizadas, aunque nosotros solucionaremos los empates asignando el Slot de manera aleatoria a uno de los participantes.

El procedimiento será encontrar un modelo a optimizar que nos dé como resultado un horario libre de conflictos, ajustando los tiempos de las llegadas y salidas de cada tren que nos hayan comunicado las TOCs, ya que hasta ahora los horarios se confeccionaban manualmente en base a ensayos de prueba y error como consecuencia de la gran cantidad de variables existentes.

Uno de los mayores problemas que consideran las TOCs, es que su propio plan de rutas se pueda ver afectado por el ajuste de estos tiempos de llegadas y salidas, de ahí que traten de convencer al subastador de que se respeten los horarios enviados inicialmente, algo que no siempre logran debido al motivo de querer maximizar el beneficio por parte del dueño de las infraestructuras.

En cada ronda se resolverá el problema de asignación de slots que deberá ser solucionado de forma iterativa hasta que termine la subasta. La solución de este problema será la asignación de los slot a las TOCs.

En resumen, tendremos varios agentes relacionados con el estudio, por un lado las TOCs y por otro el encargado de realizar la subasta, el IM, que será una persona representante del dueño de las infraestructuras que se vayan a utilizar para la subasta. En nuestro estudio sería el representante de Adif, ya que es el principal dueño de las infraestructuras en España. Aunque en otros países puede suceder que haya varios dueños, por tanto, no tiene sentido que haya un representante del conjunto si la subasta no atañe a las partes que a ellos les ocupan.

El subastador pondrá a la venta los slots que se puedan utilizar en cada ocasión, ya que normalmente las concesiones de uso de las infraestructuras, van por periodos de tiempo diferentes, con distintas duraciones, por lo que para cada subasta los slots serán diferentes.

En esta perspectiva, se tratará de maximizar el beneficio obtenido, que dependerá directamente de la desviación de los tiempos requeridos por las TOCs, a la vez que se intenta maximizar el uso de las infraestructuras para mejorar el bienestar social.

Esta desviación se traduce en penalizaciones debidas a los retrasos producidos tanto por otras TOC como por problemas de la infraestructura, derivados del mal mantenimiento...

Con respecto a las penalizaciones, no nos centraremos mucho en ellas ya que simularlas e introducirlas en el modelo conlleva nuevas variables y muchas complicaciones, en resumen, cuesta más de lo que aporta. Aun así, para que quede claro, más adelante voy a explicar cómo hemos considerado que se deberían introducir.

Las secciones posteriores se dividen según sigue:

- La explicación del modelo de trabajo empleado.
- Detalle del modelo de subastas a emplear.
- Los resultados del estudio.

## 2. Formulación del problema

Como ya he mencionado anteriormente, este modelo irá más allá de lo que hasta ahora se ha estudiado, ya que aquí, damos la posibilidad de rechazar viajes si no podemos asignar todos los Slots a cada viaje.

También es posible desestimar la puja si el coste del Slot asignado es mayor que la utilidad que se espera obtener del Slot, que la inversión sea menor que el ROI, es decir, que los beneficios sean inferiores a las expectativas iniciales y que no cubran los gastos.

### 2.1. Red de trabajo espacio-temporal

Para explicar mejor el modelo, me apoyaré en una red de trabajo espacio-temporal tipo, la Figura a continuación, como hacen la mayoría de los estudios relacionados con este tema.

Ésta en particular está compuesta por 4 terminales o estaciones ferroviarias, la A, B, C y la D, los círculos morados de las Figuras 1 y 2. En este estudio suponemos que las estaciones son bidireccionales (permiten el tráfico ferroviario en ambos sentidos), no como en la mayoría de estudios realizados, que consideran dichas estaciones unidireccionales:

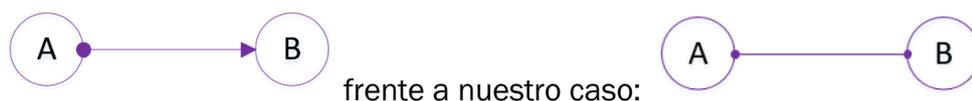


Figura 1. Terminales unidireccionales      Figura 2. Terminales bidireccionales

Lo que implica que los trenes que circulen pueden partir de la estación A y desplazarse a la B, pero no permiten que un tren parta de la estación B y tenga como terminal de destino la A, situación diferente a la que nosotros hemos considerado.

Donde cada nodo, los círculos azules de la Figura 3, indicarán un tiempo discreto, es decir, una hora dentro de la franja horaria que se quiere subastar, por ejemplo si la franja horaria fuese de 9:00 a 10:00 los nodos representarían horas tales como 9:05, 9:10, 9:15,..., 9:55 independientemente de la terminal por la que pudiesen circular (A, B, C, D):



Figura 3. Nodos de la red

Cada nodo situado sobre una línea, representa los periodos de tiempo discretizados correspondientes a una única estación aunque dichos tiempos sean los mismos para todas las estaciones involucradas.

Los llamados arcos, las flechas de diversos colores en este caso, representan las trayectorias que siguen los trenes. Un arco entre dos nodos de diferentes líneas, representa el tiempo que tarda un tren en cubrir dicha trayectoria, como representa la Figura 4, donde podemos comprobar el tiempo que tarda en llegar un tren de una estación a otra basándonos en los nodos:

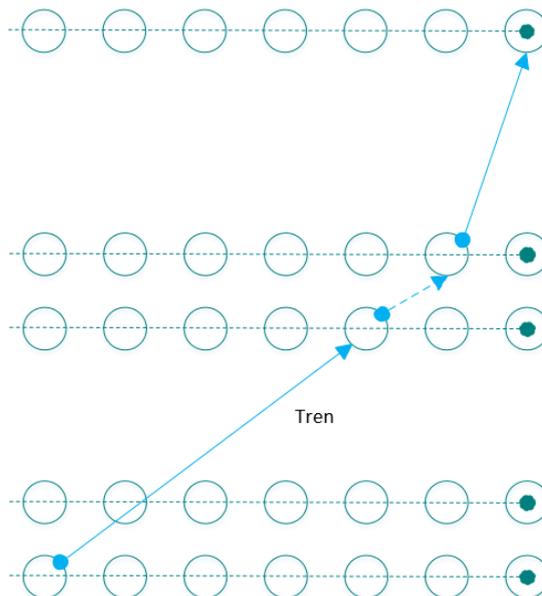


Figura 4. Trayectoria de un tren

Este tipo de aproximación fue utilizada por *Caprara, A. [10]* en anteriores trabajos.

Para expresar las franjas tanto de llegadas como de salidas, se incluye en el modelo dos nodos ficticios, cada uno conectado al nodo asociado principal del que derivará la ruta del tren, pero incluyendo una cierta tolerancia para las

desviaciones de los tiempos de llegadas y salidas, como muestra la Figura 5, donde las flechas roja y verde representan la salida de un tren y las morada y amarillo la llegada de otro diferente.

Hay 2 flechas representando cada tren ya que generalmente al solicitar el Slot en unos tiempos concretos, hay 2 posibilidades:

- Que asignen el previamente solicitado, con lo cual solo sería necesario un arco.
- Que no asignen el previamente solicitado y den una opción diferente que las TOCs pueden decidir si aceptar o rechazar.

No obstante, hay estudios que en vez de considerar los 2 arcos como Slot solicitado y Slot asignado, consideran dichos arcos como el Slot solicitado y la desviación máxima permitida, es decir, cuanto se podría llegar a adelantar o retrasar un tren en aras de maximizar el beneficio cuando se asignen Slots posteriormente.



Figura 5. Nodos ficticios

Una vez explicados los rasgos fundamentales de la red de trabajo tipo, se unifica todo ello para obtener la mejor perspectiva posible del problema, como muestra la Figura 6.

En la ventana I se muestran las terminales A, B, C, D anteriormente mencionadas, las dos ventanas II representan los nodos ficticios de salida, S1-S2, y llegada, LL1-LL2, que no siempre son imprescindibles, ya que como se puede comprobar, los trenes 3 y 4 parten de las terminales intermedias a una hora dada, por lo que no es necesario crear más nodos ficticios.

Si hay un arco entre nodos de una misma estación, significa que esa ruta tiene un cierto tiempo de espera, indica un transbordo o traslado entre diferentes trenes, representado en la ventana III (esto incluiría entre otras cosas, por ejemplo, el trayecto Valladolid-Madrid con destino Atocha, donde se requiere interconexión a través del túnel de siete kilómetros de longitud por estación de Chamartín).

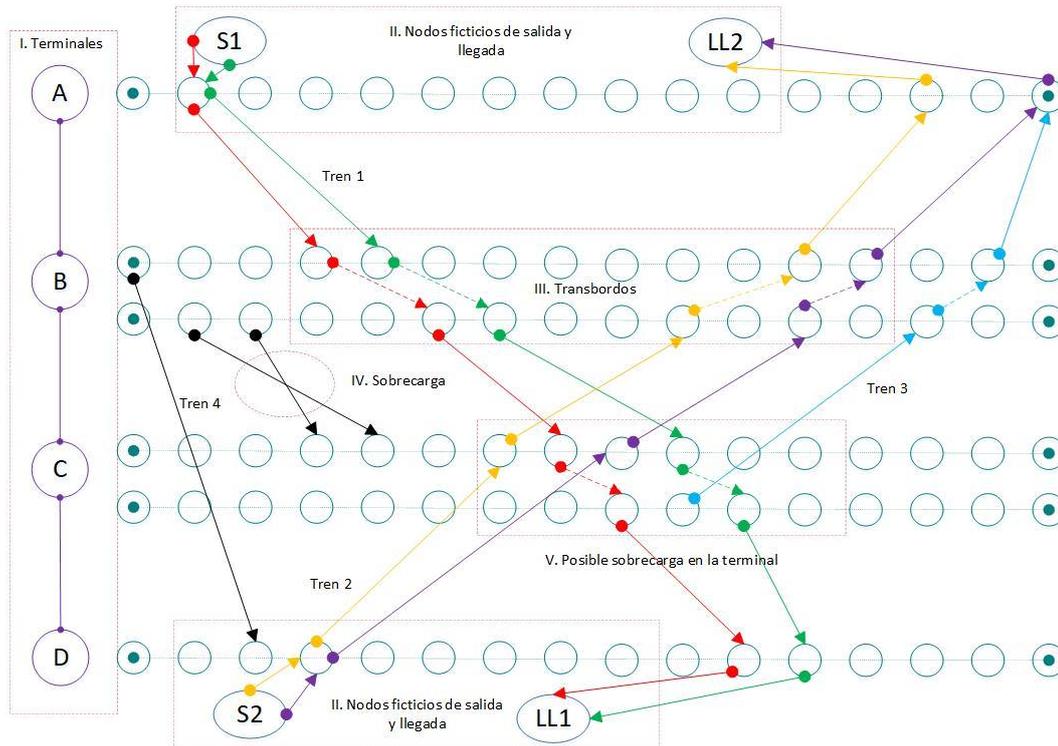


Figura 6. Red de trabajo espacio-temporal.

Fuente de elaboración: Propia, según Park, B. H. et al. [25], [26].

Por tanto, cada tren se puede expresar como una secuencia finita de arcos (entraré en detalles más adelante), que tendrá un beneficio propio y una cierta penalización si no cumple con los horarios establecidos, es decir, si existe una desviación superior a lo permitido en los tiempos, tanto de salida de la primera estación, como en los de transbordo cada vez que para en una estación o los de llegada establecidos.

Las posibles sobrecargas en las infraestructuras pueden ser de 2 tipos diferentes:

- Sobrecarga en las vías del tren, indicado por la ventana IV. Puede darse el caso, como aquí, de que haya superposición de horarios o cruces peligrosos lo que podría incurrir en accidentes, por lo que en ese caso, no podrían asignarse ambos Slots.
- Sobrecarga en las estaciones de tren, como muestra la ventana V, ya que hay 3 trenes en un espacio de tiempo muy reducido y puede suceder que se supere la capacidad de la terminal habiendo más trenes que espacio disponible real, impidiendo así que haya más de 2 trenes en todo momento en ella.

Los trenes se podrán combinar unos con otros mediante un plan de unión de rutas, donde:



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

$G = (V, A)$ : Sea un grafo dirigido ponderado

$T = T1 \cup T2 \cup T3 \cup T4 \cup T5$  donde  $T1, T2, \dots, T5$  es el conjunto de arcos que representa el movimiento de un tren entre estaciones, transbordos, conexiones a otros trenes y los nodos ficticios de inicio y fin.

Cada TOC envía sus horarios demandados, donde los Slots incluyen tiempos de salida, de llegada y de transbordo en cada estación incluyendo las paradas. Los slots van acompañados por el precio de puja, y se ajustan en función de la desviación permitida.

Gráficamente, corresponde a la secuencia de varios arcos en la red de trabajo, este slot puede ser ajustado para evitar conflictos y se pueden incluir tolerancias para que no se incluyan penalizaciones en todos los casos. Este detalle viene representado por los arcos rojo y verde en el “Tren 1” y por los arcos amarillos y morados en el “Tren 2”. Los arcos amarillo y rojo, indican el trayecto que la TOC desea adquirir. Por otro lado, el verde y el morado son los que finalmente se asignan, por lo cual habría que asignarles una cierta penalización debido a los retrasos.

Podemos ver que no siempre es necesario establecer unos nodos ficticios de salida y de llegada. Por ejemplo, el “Tren 3”, representa una salida de una estación intermedia a la hora representada en el grafo. Se observa que en las estaciones B y C es posible realizar transbordos, tanto entre trenes diferentes, como tiempos de espera en la estación. Por ejemplo, un viajero cuyo punto de partida sea la estación C y su destino la A, puede ir con el “Tren 3” o con el “Tren 2”.

Los arcos negros, el “Tren 4”, representa que no es necesario hacer escala en las estaciones, puede haber un tren que permita el paso directo sin necesidad de transbordos o paradas.

Con respecto a las restricciones debidas a que el número de Slots asignados pueda ser menor al de los Slots recibidos (por conflictos con los horarios, o que sencillamente haya mayor demanda que oferta), se pueden tipificar de la siguiente manera:

- Aquellos para garantizar que haya un mínimo de evolución dentro del modelo en llegadas y salidas, es decir, que no haya adelantos o retrasos.
- Aquellos que prevendrán la superposición de trenes en los mismos Slots.
- Aquellos que restringen el número de trenes que circulan o paran en una estación debido a su capacidad, para que no haya sobrecarga.

Las variables que tendremos en cuenta serán:



- El conjunto de trabajo, la red de trabajo espacio-temporal.
- Penalización del beneficio/arco.
- Conjuntos de arcos, que incluyen los transbordos, viajes entre estaciones, tiempos de espera, conexiones... Los arcos provenientes de nodos artificiales tanto fuentes, (llegadas y salidas) como los de las terminales.
- El conjunto de rutas deseadas.
- El conjunto trenes asociados a esa ruta.
- El beneficio obtenido por cada tren asociado a esa ruta.
- Las diferentes opciones, dentro de la ruta deseada.
- El beneficio de una opción de la ruta.
- Conjunto de arcos con conflictos.
- El número máximo permitido de arcos con conflictos.

## PENALIZACIONES Y RETRASOS

El modo de calcular las penalizaciones difiere según el estudio consultado, por ejemplo, para el caso de los artículos coreanos de *Park, B. H. Hong, S. H. y Kim, C. S. [25]*, las penalizaciones se asignan únicamente a los retrasos en las salidas del primer tren correspondiente a una ruta, y a los retrasos correspondientes a los transbordos a las estaciones.

Para el caso de los artículos Alemanes publicados por *Borndörfer et al. [6]*, a cada minuto de retraso o adelanto le asignan un coste de penalización, o cada cierto tiempo un valor determinado. De tal forma que si lo supera, aunque sea en 1 minuto, es obligatorio pagar el retraso por todo el conjunto, y dicha penalización se sustrae del valor de la puja.

Las desviaciones del horario preferido respecto del asignado dan lugar a reducciones en el precio de puja.

En este estudio, proponemos dividir las penalizaciones en 2 partes:

- Las que tendrían las operadoras con sus clientes: Los costes de la indemnización, evidentemente estarán en función del número de viajeros que haya en el tren en ese momento.

Aquí se incluirían las penalizaciones debidas a que el tren pare en vías muertas, que pare más tiempo del que debiera en una estación... Si hay algún problema mientras el tren está circulando y se para, multiplicamos el número de viajeros por la cantidad de tiempo que se ha retrasado y por el valor del coste del retraso.

En resumen, los costes de las TOCs podemos decir que son:

- a) Costes Fijos: Serán propios de cada TOC, ya que cada una dispondrá de un estudio individualizado que incluirá: previsión de demanda según sus propios intereses, total de viajeros, una estimación del precio de los billetes, así como del nivel de rentabilidad exigido. Así pues, cada una de ellas tendrá sus propias expectativas de ingresos y sus políticas de rentabilidad



(pueden aceptar menos ingresos si el ROI es mayor, o viceversa, e incluso otros criterios).

- b) Costes variables: Debidos a estas penalizaciones, cada TOC tendrá una manera de calcularlo, pero para lo que nos incumbe, estos costes pueden ser considerados como una constante:  $CV=cte$ .

De ahí que, los costes totales:  $CT=CF+CV=CF+cte$

- o Las que tiene el dueño de las infraestructuras y las TOCs: El número de pujas por Slot estará en función de los recursos que tenga cada TOC, no obstante, el coste de operación por puja realizada será el mismo para cada TOC.

El cálculo de la penalización será inherente al número de viajeros y en base a cómo afecte a los trenes que le sucedan. En todo caso, los propios viajeros tratarán de abordar el tren que tenga menos retrasos previstos o los trenes de las TOCs con menores retrasos, históricamente hablando.

## 2.2. Formulación formal del problema

Como resultado de las consideraciones señaladas anteriormente, nuestro objetivo será maximizar el beneficio que puede obtener el dueño de las infraestructuras a la vez que tratamos de maximizar el beneficio social. Dicho de otro modo, que las infraestructuras sean lo más útiles posibles para la sociedad en ambos sectores, en el transporte de viajeros y de mercancías.

En la Tabla 1 se muestran todas las variables que se han tenido en cuenta para desarrollar la formulación del problema y el desarrollo del algoritmo posterior:

<b>G</b>	Grafo.
<b>T<sub>t</sub></b>	Trenes que operan en la red de trabajo.
<b>K</b>	Conjunto de rutas deseadas, identificadas mediante el subíndice k
<b>T<sub>t</sub><sup>k</sup></b>	Trenes pertenecientes a una ruta k deseada, cuyos elementos se identifican mediante el subíndice t
<b>O<sup>k</sup></b>	Conjunto de las diferentes opciones dentro de la ruta deseada.
<b>b<sub>i</sub><sup>k</sup>(t)</b>	Beneficio del tren t que circula por la opción i de la ruta k
<b>B<sup>k</sup></b>	Conjunto de beneficios obtenidos de toda la ruta k
<b>c<sub>i</sub><sup>k</sup></b>	Arcos con conflictos de la ruta k.
<b>C<sup>k</sup></b>	Conjunto de arcos con conflictos de la ruta k.
<b>Ω</b>	El conjunto de C.
<b>S<sup>k</sup></b>	Conjunto de caminos (senderos) en G que parten de S <sub>i</sub> y llegan a LL <sub>i</sub>
<b>Lc</b>	Número máximo permitido de arcos con conflictos.



$p_a^k$	Penalización del beneficio de cada arco de una ruta en concreto.
$P^k$	Conjunto de las penalizaciones de cada arco correspondiente a una ruta determinada
$E$	Conjunto de estaciones ferroviarias en red de trabajo.
$A$	Conjunto de arcos entre estaciones.
$N$	Conjunto de nodos en la red de trabajo cuyos elementos se identifican mediante el subíndice $i, j$ .
$N^k, A^k$	Conjunto de nodos/arcos en la red de trabajo asociados a la ruta $k$ deseada.
$S^k, LL^k$	Nodos artificiales que representan las salidas/llegadas de la ruta $k$ .
$e(i) \in N$	La terminal (estación) correspondiente al nodo $i \in N^k$ .
$t(i) \in N$	El tiempo discreto correspondiente al nodo $i \in N^k$ .
$\delta$	Variable binaria de asignación de rutas.
$\Phi_a, \Phi_r$	Variable binaria de existencia de desajustes en el horario.
$ta_t^k, tr_t^k$	El desajuste real que se produce debido a un tren $t$ en una ruta $k$ .
$tt_t^k$	Tiempo para hacer transbordo del tren $t$ en la ruta $k$ .
$Ta_t^k, Tr_t^k$	Tiempo máximo permitido de desviaciones en el horario.
$Tt_t^k$	Tiempo máximo permitido de estancia en la estación.
$NTa_t^k, NTr_t^k$	Número máximo de desviaciones permitidas en el horario.
$ca^k, cr^k$	Coste del adelanto/retraso en €/min de cada ruta $k$ .

Tabla 1. Notación y definición de las variables

Fuente de elaboración: Propia, según Park, B. H. et al. [25], [26] y Araúzo, J. A. et al., [4].

Sea  $V$  un conjunto, finito y no vacío, y  $\underline{E} \subset V \times V = \{(v_1, v_2) / v_i \in V\}$

El grafo  $G=(V, \underline{E})$  es un grafo dirigido ponderado, que tiene asociado un número  $c_{ij}$  a cada arista  $ij \in \underline{E}$ . En nuestro caso, el  $c_{ij}$  pueden ser tanto las penalizaciones, como el beneficio por arco.

$T_t$  en la Figura 6 representaría los “Trenes 1, 2, 3, 4” como el conjunto de arcos que forman los trenes.  $T_t^k$  son los trenes correspondientes a la ruta  $k$ , es decir, varios trenes, por ejemplo el 2 y el 3 pueden coincidir en la misma ruta, por lo que pasarían a ser  $T_2^1$  y  $T_3^1$  a efectos prácticos.

Dentro de la misma ruta hay varios caminos disponibles  $O^k$ , que puede coger un tren, por ejemplo, para la trayectoria de Valladolid-Madrid se puede pasar por Segovia, o ir a Oviedo y de ahí a Madrid. Por tanto, generalmente hay varias opciones para cada ruta disponible en la subasta.



Los beneficios de un único tren que circula por un camino de los disponibles de la ruta  $k$  serían  $b_i^k(t)$ , formándose por tanto los beneficios de la ruta  $k$ ,  $B^k$ , como la suma de todos los trenes que pasan por esos caminos en un periodo determinado.

Los arcos que presentan problemas en una ruta  $k$  a la hora de ser asignados vienen denotados como  $c_i^k$  siendo  $C^k$  el conjunto de todos los arcos problemáticos de la ruta  $k$  formando así el conjunto  $\Omega$ , los arcos con conflictos de toda la red de trabajo. Este número estará limitado por  $L_c$ , ya que no se pueden permitir más de un cierto número de arcos con conflictos en la red.

Una vez explicados los beneficios, hay que contabilizar las penalizaciones,  $p_a^k$  que asignamos a cada arco de cada opción de la ruta  $k$  por incumplir los horarios establecidos o por superar las tolerancias acordadas. Formado así la penalización correspondiente a cada ruta  $P^k$ .

Al número total de terminales dentro de la red la llamaremos  $E$ , y al conjunto de arcos que relacionan estas estaciones,  $A$ , para terminar, denominando a todos los nodos de la red de trabajo  $N$ . Separamos los nodos y los arcos por rutas, indicando así  $N^k$ ,  $A^k$ , los nodos y arcos asociados a la ruta deseada  $k$  en la red de trabajo. Representaremos el tiempo discreto correspondiente a los nodos de dichas rutas como  $t(i)$ .

Las estaciones que están contenidas dentro de las diferentes rutas se llamarán  $e(i)$  indicando así su correspondencia al nodo  $i \in N^k$ .

La  $\delta$  aunque sea una variable binaria que toma el valor 1 si se asigna un camino de la ruta y 0 si no lo hace, representa el coste de oportunidad de adquirir el Slot.

Un proceso de razonamiento similar sucede también en el caso de las variables binarias  $\Phi_a$  y de  $\Phi_r$ , que tomarán el valor 1 si hay adelantos o retrasos tanto en la salida como en la llegada, y 0 si no lo hay. De esta forma podemos calcular el valor de las penalizaciones para cada arco de manera individual.

Como he mencionado anteriormente, se pueden producir desviaciones en el horario, representados por  $ta_t^k$ ,  $tr_t^k$ ,  $tt_t^k$ , siendo los tiempos de un tren que se adelanta, retrasa y espera en la estación respectivamente dentro de una ruta  $k$ . Dichos tiempos se contabilizan tras una tolerancia que se establecerá por el IM, no es inmediata su contabilización con el desajuste.

También fijamos unos límites  $Ta_t^k$ ,  $Tr_t^k$ ,  $Tt_t^k$ , que serán el máximo de tiempo que se permitirán desajustes en el horario por cada tren en cada ruta, pudiendo ser los mismos límites para trenes de las mismas rutas, ya que no



podemos permitir que obliguen a parar a otros trenes o provoquen malos funcionamientos de la red. Incluiremos también las limitaciones  $NTa_t^k$ ,  $NTr_t^k$  que serán el número máximo de veces que se pueda desajustar el horario establecido un mismo tren  $t$  para cada ruta  $k$ . Estas limitaciones no se restringen entre sí ya que la idea principal es que para evitar problemas con el horario se establezcan unos rangos tanto de tiempos máximos de retraso, como de veces que se permiten para impedirlo.

Para contabilizar y penalizar estos desajustes, se introducen las variables  $ca^k$  y  $cr^k$  al modelo, indicando así el coste del adelanto o del retraso, medido en euros por minuto que difiere con el horario original en cada ruta, ya que el influencia del retraso no tiene el mismo impacto en unas rutas que en otras, por ejemplo si se retrasa en una ruta  $k$  poco transitada, tendrá menos impacto en el siguiente tren que si la ruta es transitada y circulan muchos trenes ya que implica retrasos en cadena para los demás trenes que vayan detrás.

Una manera de reducir la problemática del algoritmo, sería suponer que las penalizaciones solo se pueden asignar al primer tren de cada ruta, como hacen *Park, B. H. et al. [25], [26]*. En nuestro caso, la penalización será correspondiente con la respectiva puja hecha por las TOCs, se asignará una penalización a cada arco, y como el conjunto de arcos representa un tren, lo asignaremos de esta manera a la ruta.

El objetivo del algoritmo es maximizar el precio de puja, eliminando los retrasos y penalizaciones que puedan darse:

### Master Problem

Función a maximizar:

$$\max \sum_{k \in K} \sum_{b_i^k \in B^k} \delta \cdot (b_i^k(t) - p_a^k) = \max \sum_{k=1}^K \delta \cdot (B^k - P^k)$$

Sujeto a una serie de restricciones:

$$b_i^k(t) - p_a^k > 0$$

$$b_i^k(t) > 0$$

$$p_a^k \geq 0$$

$$\sum_{k \in K} \delta \leq 1 \quad \forall \delta \in [0,1]$$



$$\sum_{k \in K} \delta \leq Lc \quad \forall \delta \in \Omega$$

$$B^k = \sum_{k=1}^T b_i^k(t)$$

$$C^k = \sum_{k=1}^T c_i^k$$

$$\Omega = \sum_{k=1}^T C^k$$

$$\Phi_a = \begin{cases} 1 & \text{si hay adelanto respecto del horario } t = 0,1,\dots,T \\ 0 & \text{si no lo hay} \end{cases}$$

$$\Phi_r = \begin{cases} 1 & \text{si hay retraso respecto del horario } t = 0,1,\dots,T \\ 0 & \text{si no lo hay} \end{cases}$$

$$\sum_{t=1}^{T \in k} \Phi_a \leq NTa_t^k$$

$$\sum_{t=1}^{T \in k} \Phi_r \leq NTr_t^k$$

$$\sum_{t=1}^{T \in k} ta_t^k \leq Ta_t^k$$

$$\sum_{t=1}^{T \in k} tr_t^k \leq Tr_t^k$$

$$\sum_{t=1}^{T \in k} tt_t^k \leq Tt^k$$

$$p_a^k = \sum_{t=1}^{T \in k} \Phi_a \cdot ca^k \cdot ta_t^k + \Phi_r \cdot cr^k \cdot tr_t^k$$

$$P^k = \sum_{k=1}^K p_a^k$$

El modelo maximiza el beneficio total obtenido de las cantidades ofrecidas en las pujas, mediante la asignación de los Slots de cada ruta a las TOCs que hayan pujado por ello en la subasta. Evidentemente el beneficio solo puede ser positivo, sino el Slot no se asignaría ya que el IM incurriría en pérdidas. Este beneficio se reduce exponencialmente en función de la penalización que tenga el Slot asignado respecto del solicitado. Es decir, a mayor penalización, menor beneficio, hasta cierto límite, si la penalización es superior al beneficio que se va a obtener, el IM optará por no asignar el Slot y rechazar la oferta.

Las restricciones implican que los caminos a elegir no pueden ser superiores a los de cada ruta. También obligan al modelo a estar libre de conflictos.

El resto de restricciones han quedado explicadas anteriormente y se puede entender completamente su significado.

Para calcular el coste de las penalizaciones, tenemos en cuenta que los tiempos de los desajustes ocurridos ( $ta_t^k$ ,  $tr_t^k$ ,  $tt_t^k$ ) sean menores que los permitidos ( $Ta_t^k$ ,  $Tr_t^k$ ,  $Tt_t^k$ ) en cada caso y así asignamos  $p_a^k$  a cada arco si ocurre  $\Phi_a, \Phi_r = 1$  ya que como he mencionado anteriormente un tren está compuesto por arcos y de este modo es más sencillo poder calcular las penalizaciones de cada ruta en su conjunto.

En principio el algoritmo recibe las rutas deseadas por las TOCs, comprueba que no hay problemas de sobreasignación, de factibilidad... y que se cumplen los criterios establecidos, por lo que los pasos a seguir serían:



Figura 7. Mecanismo del algoritmo de Asignación

Fuente de elaboración: Propia según Park, B. H. et al. [25], [26]



### 3. Formulación del método de subasta

#### 3.1. Mecanismo de la subasta

El mecanismo de la subasta será similar al presentado por *Park, B. H., & Hong, S. H. (2014). [27]*. Incluyendo ciertas diferencias en el modelo de subasta en sí, ya que consideramos que debe llegar a ser una CCA, no una CC.

En nuestro mecanismo de subastas para la asignación de slots, asumimos que cada TOC envía al IM el conjunto de los recorridos en los que está interesado, junto con sus correspondientes horarios, todo ello en forma de tabla.

En algunos países, como la red ferroviaria lleva más tiempo liberalizada, a la hora de subastar los Slots, no se pueden subastar todos de los que dispone el dueño de las infraestructuras, ya que muchos de ellos siguen en uso por diferentes compañías y no se pueden subastar todos los Slots de la infraestructura al mismo tiempo, que sería lo ideal, ya que el potencial del problema sería mucho mayor.

En nuestro estudio supondremos que los Slots disponibles que se subasten, caducan al mismo tiempo, para poder realizar la subasta de manera periódica y poder utilizar al máximo de su capacidad ésta solución planteada al problema.

Vamos a considerar que el IM es el actual dueño de las infraestructuras sobre las que las TOCs van a pujar, no es necesario que haya representantes de cada propietario si en la subasta no se van a ofrecer tramos relacionados con sus infraestructuras.

Una vez el IM tiene todas las solicitudes correspondientes a todas las TOCs, determina quién gana cada Slot. Lo que corresponde a un problema de determinación del ganador, OPTRA, donde el recorrido puede ser ajustado con una determinada tolerancia como ocurre en la realidad, como resultado de las consideraciones señaladas anteriormente.

Utilizaremos un método de subasta iterativa de varias rondas para las pujas y así resolveremos los problemas de asignación de las combinaciones de los Slots. Nos hemos decidido por este método, ya que otros no eran tan versátiles, por ejemplo, el VCG, que es una versión combinatoria de la subasta de segundo precio, tiene una debilidad computacional con respecto a subastas iterativas. Debe señalarse que, los algoritmos heurísticos tienen la problemática de necesitar los datos reales de las TOCs, que en muchas ocasiones no quieren revelar.

Por no mencionar que generalmente son válidos cuando hay un escaso número de participantes, cuanto mayor es ese número, mayores dificultades tiene para alcanzar una solución óptima, generalmente el límite es de 20 participantes, con más se va alejando la solución del óptimo.

El problema de determinación del ganador debe ser resuelto de una única vez para todas las pujas, ya que en cualquier otro caso no funcionaría la subasta. Por consiguiente, no se podría proceder a la asignación de los Slots. Este tipo de problema forma parte de los problemas programables, que son muy conocidos por ser muy complicados.

Nuestro mecanismo de subastas es iterativo, resuelve el problema para un número pequeño dado de Slots en cada ronda. Al final de cada ronda el IM anuncia la asignación provisional y finalmente las TOCs pueden considerar realizar una nueva puja para nuevos Slots o para un Slot ya subastado. Todo ello en base al precio que haya fijado el IM.

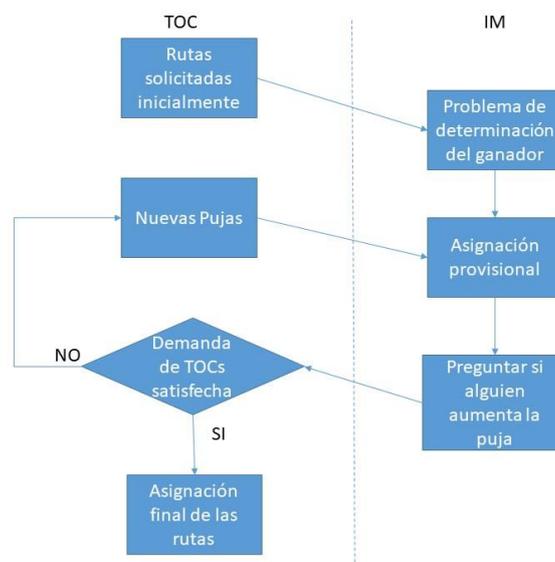


Figura 8. Mecanismo de la Subasta

Fuente de elaboración: Propia según Park, B. H., & Hong, S. H. [27]

La subasta finaliza cuando todos los TOC están satisfechos, por ejemplo, cuando no hay más cambios en sus pujas. Así mismo, consideraremos que los resultados de las rondas anteriores se respetan, es decir, que a priori no se pueden cancelar, pero sí se pueden realizar ligeros ajustes dentro de una tolerancia determinada.

En cada ronda de la subastase se resuelve el OPTRA, mediante la obtención de beneficios, se rechazan pujas que posteriormente podrían impedir la obtención de una mayor cantidad de ingresos.

Para admitir la cancelación de una asignación ya tramitada en rondas previas habría que resolver el problema de asignación de los nuevos slots y de los antiguos simultáneamente, lo cual dificulta alcanzar una solución óptima.

Sin embargo, se puede esperar una mayor eficiencia en la utilización de las infraestructuras debido a los grados de libertad de la asignación.

### 3.2. Precios de puja

Cuando una TOC no está satisfecha con la asignación provisional, puede pujar de nuevo, pero ese precio debe ser superior al precio solicitado por el IM. Este precio solicitado puede entenderse como la tarifa de acceso a la ruta o los ingresos esperados de la asignación de las rutas de tren.

En este precio solicitado, vienen incluidos los costes de realización de la subasta, el mantenimiento de las infraestructuras...

Nuestro mecanismo de subastas mantiene diferentes precios solicitados para cada ronda de la subasta, donde cada TOC debe pujar para cada slot, de modo que se incluyan los tiempos de salida dentro del periodo establecido, ya que normalmente el valor de cada slot depende del tiempo de salida, debido a que el número de viajeros varía respecto de esa hora. Por lo tanto, el IM puede esperar diferentes beneficios correspondientes a cada slot en función de esta hora de salida.

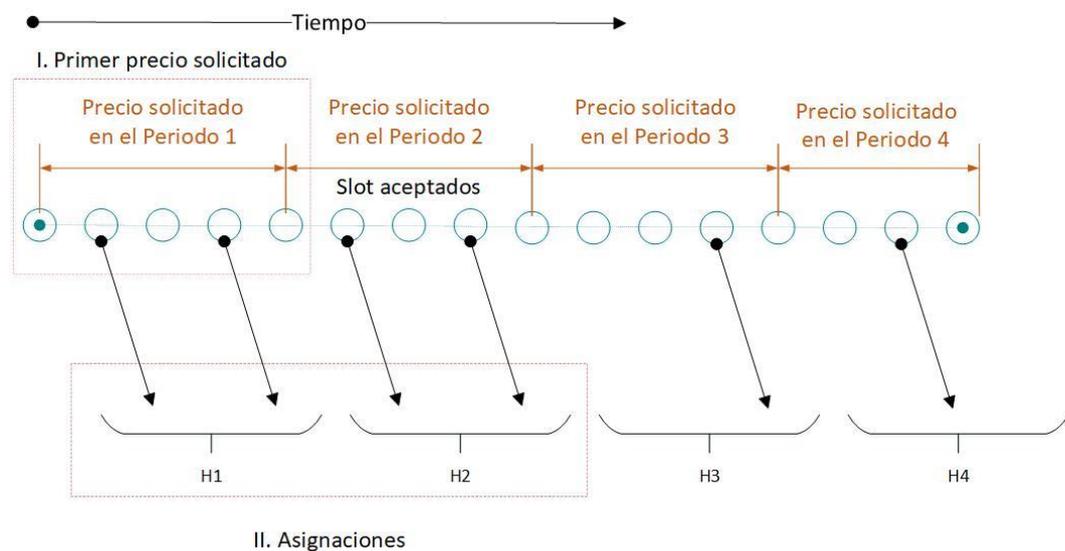


Figura 9. Actualización de los precios solicitados

Fuente de elaboración: Propia según Park, B. H., & Hong, S. H. [27]



Aquí  $H_i$  indica el conjunto de nuevos slots aceptados incluyendo los tiempos de salida correspondientes a un periodo  $p$  en una ronda  $t$  dónde se incluye el incremento mínimo de cada puja, que es además la cantidad mínima que se debe incrementar dicha puja en la siguiente ronda. Esta circunstancia implica que para el precio de puja de un slot, se debe superar el precio ofrecido anteriormente más un incremento correspondiente al periodo aceptado. Por tanto, para cada ronda posterior, cada TOC debe enviar una puja superior a la máxima ofrecida en la ronda inmediata anterior.

### 3.3. Estrategia de pujas de las TOCs

En esta sección, se propone una estrategia simple que puedan utilizar las TOCs en la subasta, en base a la asignación provisional y el precio solicitado por el IM con base en el estudio realizado por *Park, B. H., & Hong, S. H. (2014). [27]*.

Cada TOC tiene su propio valor estimado para cada slot en el que está interesado, en otras palabras, según la estrategia que quieran seguir, ya sea intentar incrementar la utilidad o aumentar el retorno de la inversión del Slot, tratarán de adquirir nuevos Slots si tienen la posibilidad de incrementar la utilidad total que le van a dar al conjunto de los Slots adquiridos. Para hacerlo es necesario encontrar una ruta que maximice la utilidad dentro de la red de trabajo espacio-temporal.

Podríamos resumir a continuación, que esa ruta en la que están interesados puede entrar en conflicto con slots ya asignados, no obstante, según lo anteriormente expuesto, se puede realizar una serie de ajustes dentro de una tolerancia determinada, motivo por el cual puede ser factible modificar las asignaciones anteriores para maximizar el beneficio futuro para el slot elegido en la ronda actual tal y como se muestra en la Figura 10.

El patrón es el mismo que se había explicado anteriormente, hay 4 terminales A, B, C y D con sentidos bidireccionales.



Continuando el criterio anterior, los círculos representan los nodos de tiempos discretos, pero en este caso, los arcos grises discontinuos representan Slots anteriormente asignados en rondas previas de la subasta, como muestra también la Figura 10. No llegan al final de todos los nodos y están cortadas por simplicidad y para que la red no parezca sobrecargada, ya que en el caso supuesto la subasta ya está avanzada y hay varios Slots ya asignados.

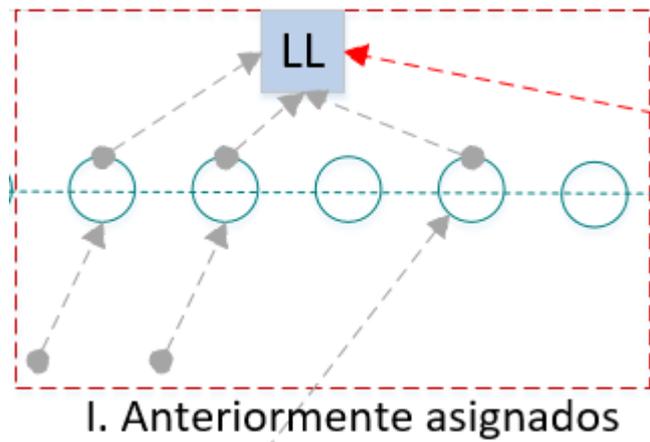


Figura 10. Slots asignados previamente

También se ha decidido representar el Slot asignado en la ronda inmediatamente anterior mediante arcos azules continuos, como muestra la Figura 11, para poder diferenciar las pujas más recientes de las más antiguas.

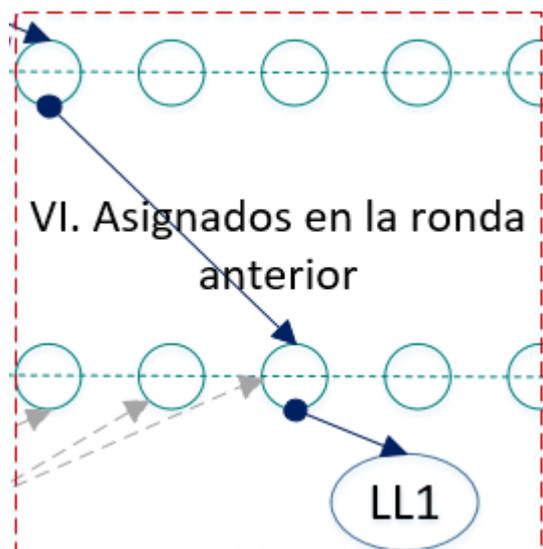


Figura 11. Slot asignado en la ronda previa

Puede darse el caso de que una vez asignados Slots, aparezca una nueva oportunidad, en rondas posteriores de la puja, para que el IM maximice los beneficios asignando un Slot que puede entrar en conflicto con los anteriores, para lo cual sería necesario revisar si el Slot antiguo en conflicto tiene espacio para poder reasignarlo, es decir, que haya una tolerancia que permita desplazar el Slot ligeramente para ajustar los 2 Slots en franjas muy cercanas. Tal situación se muestra en la Figura 12.



En ella observamos que puede haber una cierta situación de conflicto entre el Slot de esta ronda, el de la ronda inmediata anterior y el de rondas previas.

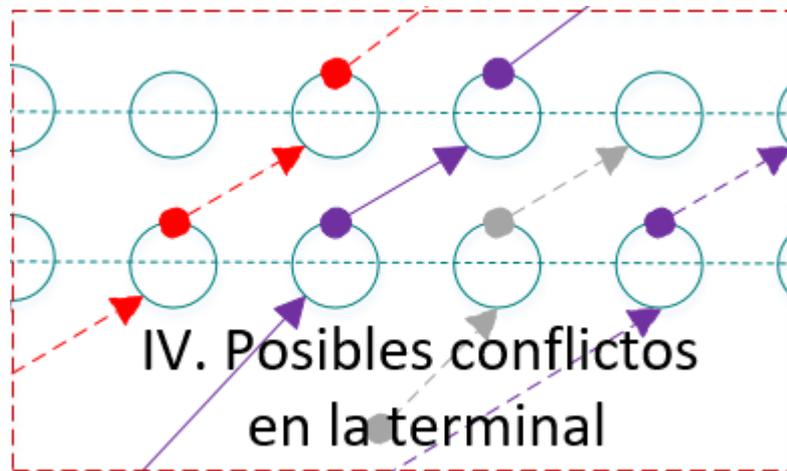


Figura 14. Situación de conflicto en la terminal

Una vez explicados los rasgos fundamentales de la red de trabajo tipo, se procede a la unión de parámetros con el fin de obtener la mejor perspectiva posible del problema, como muestra la Figura 15.

Las ventanas I y VI identifican los Slots asignados en rondas pasadas, mientras que las ventanas II y IV representan la situación actual de la subasta. En consecuencia, es necesario, revisar la asignación de los Slots anteriores para tratar de maximizar los beneficios con la asignación actual, ventana V, pero comprobando que dicha asignación no provoque nuevos conflictos, como muestra la ventana III, donde se cruzan varios trenes, aunque en este caso se establece que no hay conflicto ya que hay varias vías, por lo que los trenes no se cruzarían en la realidad, solo en el diagrama de flujos.

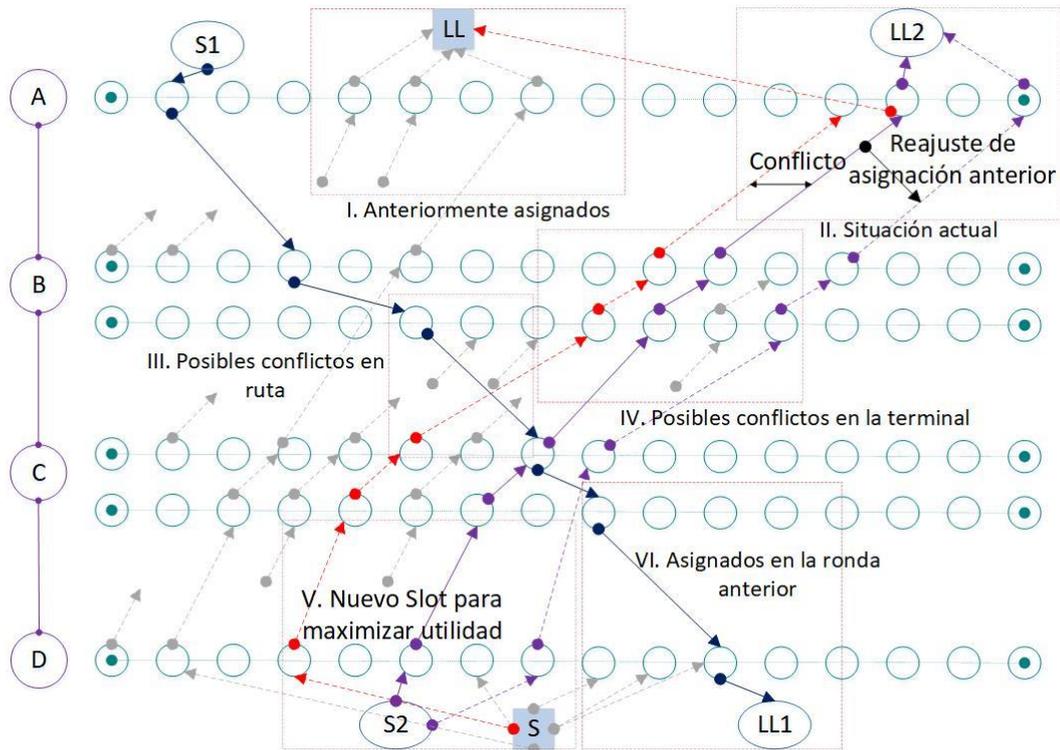


Figura 15. Red que maximiza la Utilidad

Fuente de elaboración: Propia según Park, B. H., & Hong, S. H. (2014). [27].

Cuando el mecanismo es diseñado para poder cancelar los Slots asignados anteriormente, una TOC puede pujar por los lotes ya cancelados, lo que obligaría a realizar nuevos ajustes que en este estudio no se contemplan.

Mencionar que hay estudios en los que cuando existe conflicto debido a que dos TOCs pujan por lo mismo, se da prioridad a las de transporte de viajeros, y no a las de mercancías. No obstante, nosotros asignamos el Slot de manera aleatoria ya que no contemplamos la modalidad de separar las TOCs, como ya se ha mencionado antes, independientemente de con qué modalidad trabajen, ya sea mercancías o viajeros, desde el punto de vista de este estudio son solo TOC.



## V. ANÁLISIS DEL ALGORITMO

### 1. Descripción del experimento

El programa utilizado para realizar la optimización es MATLAB R2015a, empleado en un TOSHIBA, y MATLAB R2016a - versión estudiantil- empleado en diferentes ordenadores de la universidad, algunos con idénticas prestaciones y otro con algún componente superior. Para la primera simulación se ha tenido en cuenta la variable a maximizar, con solo estas restricciones:

$$\max \sum_{k \in K} \sum_{b_i^k \in B^k}^T \delta \cdot (b_i^k(t) - p_a^k)$$

S.a.

$$b_i^k(t) - p_a^k > 0$$

$$b_i^k(t) > 0$$

$$p_a^k \geq 0$$

La primera aproximación es resultado de tratar de optimizar directamente la función a maximizar, sin tener en cuenta para casi nada otros factores, como podrían ser el número de TOCs participantes en la puja, o el número de Slots solicitados.

Como se puede comprobar a simple vista, esta primera simulación está hecha sencillamente, para adquirir competencias en el manejo y funcionamiento del programa, ya que debido a la escasez de datos no es contrastable. Además, se descubre a posteriori que proceder a la simulación con un índice tan limitado de restricciones, ofrece un resultado con datos irrelevantes puesto que los parámetros introducidos inicialmente son muy escasos y similares entre sí.

En MATLAB, la función a optimizar se introduce por variables, de tal forma que  $x_1 = b_i^k(t)$  y  $x_2 = p_a^k$  para simplificar el cálculo, por lo que la función a maximizar y las restricciones resultarían:

$$\max x_1 - x_2$$

$$s.a. x_1 - x_2 > 0; x_1 > 0; x_2 \geq 0$$

f=[1,-1]; %sería lo mismo poner f=[1 -1]

A=[-1,1];% [-1 1]

b=[0];



Aeq=[];%Queda vacío ya que no hay restricciones con igualdades, son desigualdades debido al carácter del algoritmo definido.

```
beq=[];
```

```
lb=[1,0]; %
```

```
ub=[1000000,500000]; %[1000000 500000];
```

Para realizar una primera prueba inicial, se introduce la función a maximizar, con ligero ajuste, ya que la función de MATLAB no permite maximizar funciones, solo minimizarlas. Esto se resuelve poniendo un signo – (negativo) delante de la función para transformar la operación de minimización en una de maximización.

Se incorporan las restricciones que obligaban a que ambas variables fuesen mayores que cero y cuyo resultado debía ser positivo al unirlos, no se introdujeron límites superiores ya que se consideró que no tenía sentido fijar límites a los beneficios que el IM desea obtener. Tampoco las penalizaciones ya que sin más datos que los supuestos, no se conocía su posible valor límite. Los resultados obtenidos de este intento quedan reflejados en Sim1.

Una vez vistos estos resultados, comprobamos que no son suficientes para poder sacar conclusiones en el estudio, por lo que se hace necesaria la experimentación mediante supuestos que incluyan en una red de trabajo, los tiempos de recorrido, el número de viajeros implicados y temas económicos, tales como los ingresos que obtiene Renfe por un lado y el coste del billete para el pasajero por otro.

Por ende, se hace necesario establecer un nuevo supuesto de trabajo, reflejado en las Figuras 16, 17, 19, 21, que son extractos de la red ferroviaria española. Para ello, se seleccionan algunas de las comunidades autónomas con mayor tráfico ferroviario del país, principalmente aquellas de las que se han obtenido datos suficientes para poder realizar la simulación. Dichas Figuras muestran versiones simplificadas de ciertas rutas y las estaciones más utilizadas.

Los tiempos que se muestran son los resultados de realizar tanto viajes de larga distancia, como de media distancia. Se descartan trenes de alta velocidad ya que estos circulan por vías no convencionales, es decir, específicas de alta velocidad, por lo que no nos sirven. Esto se debe a que, en algunas rutas, se han dejado de usar trenes convencionales y solo circulan los de alta velocidad. Hay incluso recorridos en los que no hay referencia de tiempos de trenes calificados como larga distancia, por este motivo, los tiempos especificados corresponden a trenes de media distancia que, aunque los tiempos difieren, el tren sigue ocupando las mismas vías.

Todo ello enfocado a que la simulación fuese lo más realista posible. Los valores situados cerca de las estaciones indican el número de viajeros que circulan en el año 2016 entre esas estaciones. Todo ello está indicado y explicado en el Anexo [Datos de RENFE](#).

## 2. Líneas opcionales a emplear

En lugar de tratar de realizar la programación lineal, que es una alternativa válida para el modelo estudiado más adelante realizada, se ha decidido optar por escoger de la red ferroviaria actual, diferentes estaciones que contemplen los corredores más utilizados del país, como lo son el de Castilla y León, Andalucía, Cataluña...

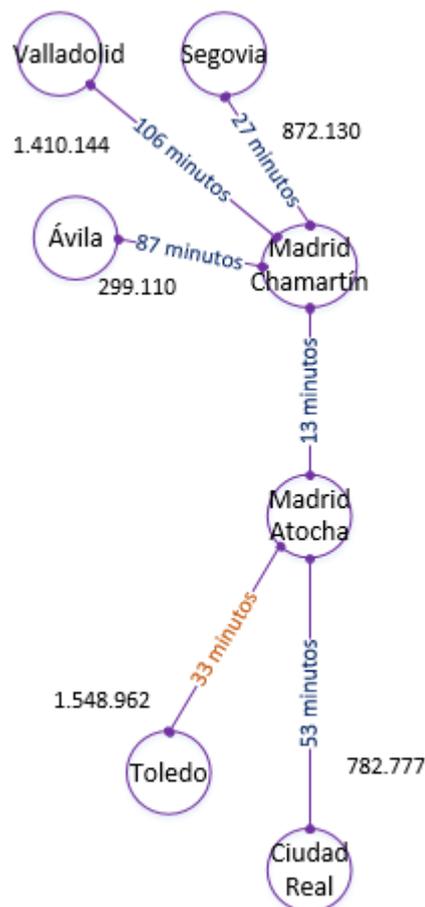


Figura 16. Corredor de Castilla y León

Este mapa real de la red ferroviaria podría ser una posibilidad de las varias opciones disponibles para realizar las simulaciones posteriores, debido a la cantidad de datos contrastables y uso de esta parte de la red.

Para las siguientes Figuras se separarán los arcos como continuos y discontinuos con objeto de diferenciar las terminales que pertenecen a la

misma comunidad. No ocurre lo mismo en la situación anterior, ya que se han considerado las terminales de Madrid como “eje central” de la red ferroviaria española

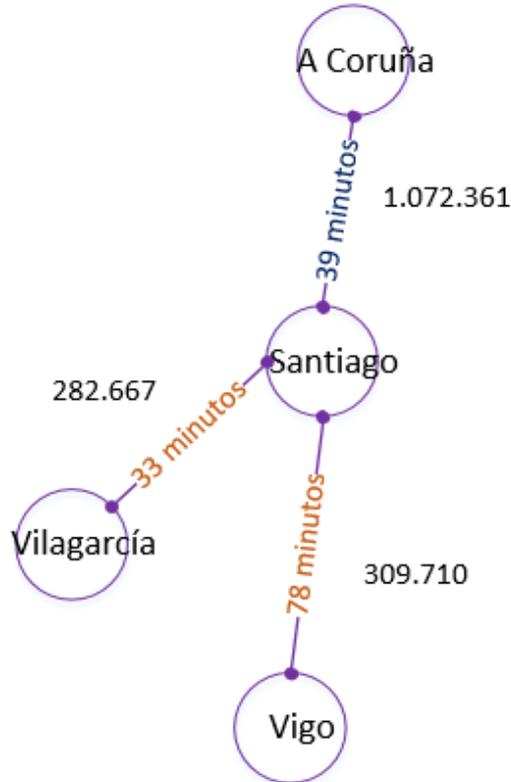


Figura 17. Corredor de Santiago

Para un estudio en mayor profundidad, se pueden añadir más estaciones, por ejemplo a la comunidad autónoma de Galicia. En la Figura 18, el arco punteado indica que la estación de Madrid Chamartín no pertenece a la comunidad, no obstante, se establece así única y exclusivamente para diferenciarlo mejor visualmente. Se indica así mismo, que en realidad, las estaciones no están tan cerca unas de otras.

Podemos añadir para futuras simulaciones, conexiones de la red entre comunidades autónomas, no solo de una única comunidad ya que eso limitaría la utilidad de la resolución del problema.

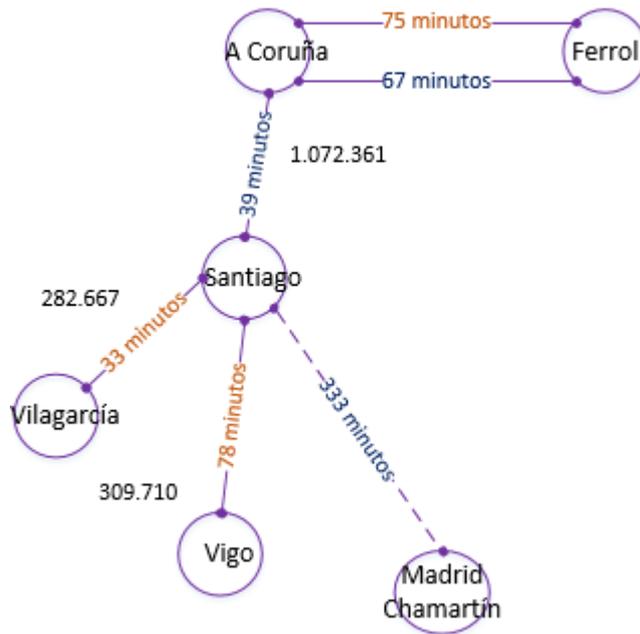


Figura 18. Conexión entre comunidades-Galicia

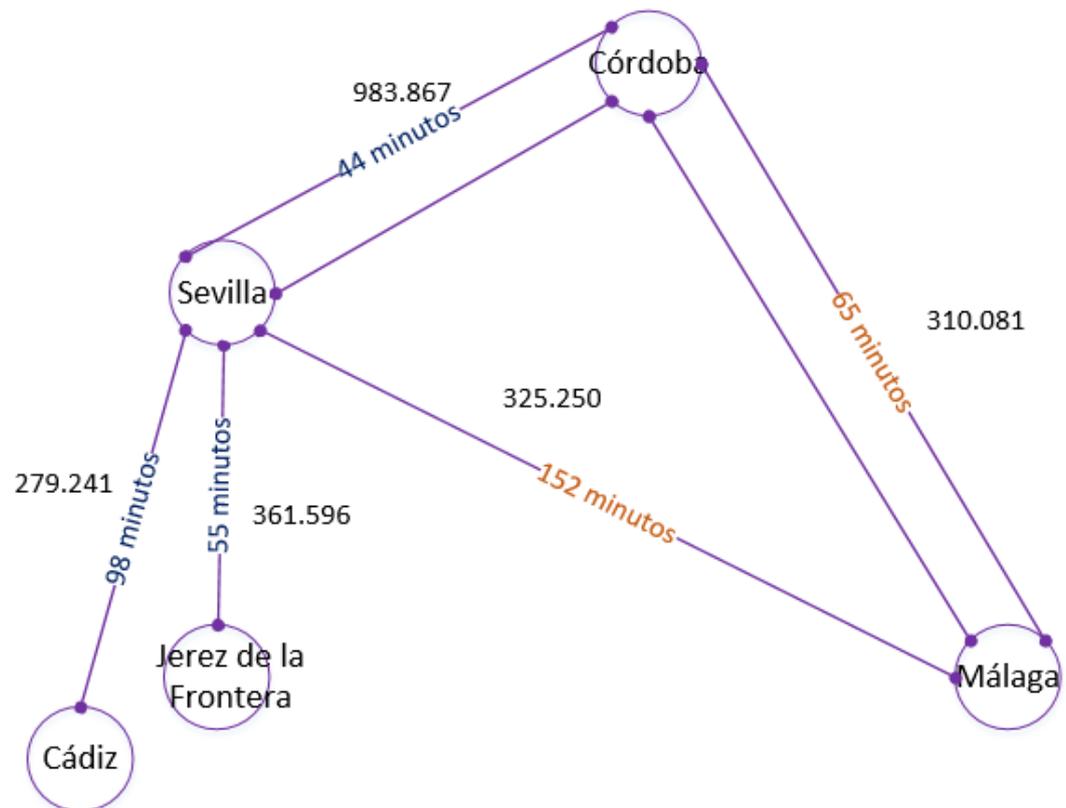


Figura 19. Corredor de Sevilla

De las evidencias anteriores, en el supuesto de la comunidad de Andalucía se podría aplicar el mismo patrón.

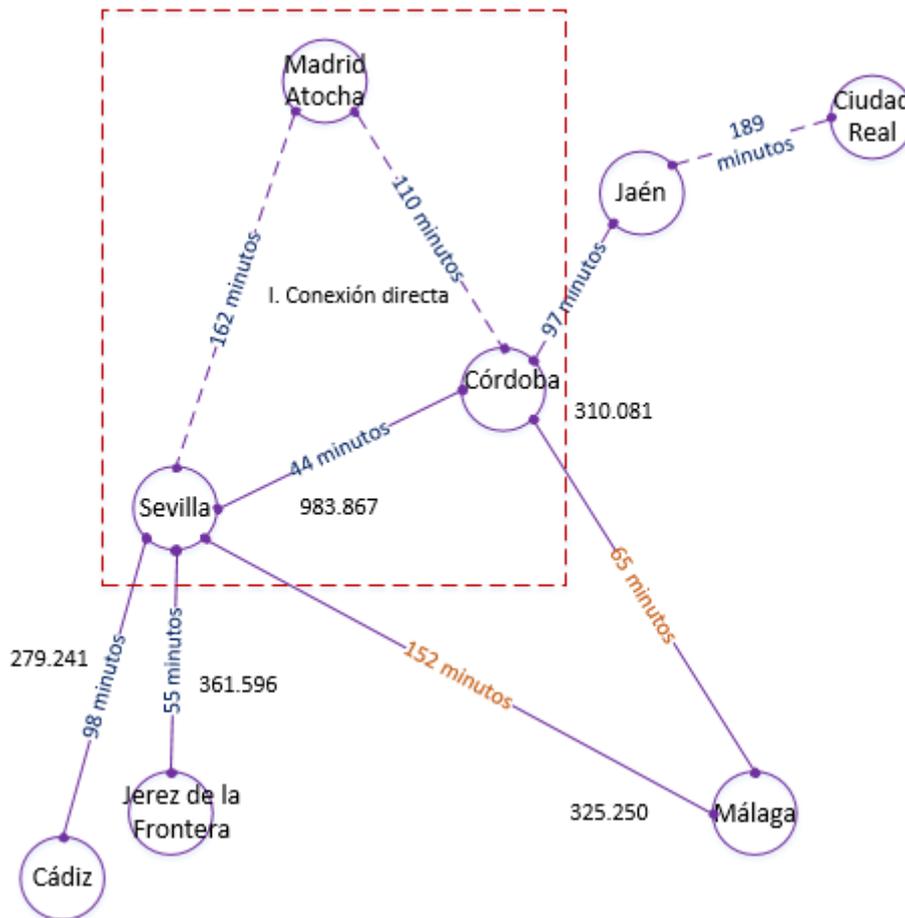


Figura 20. Conexión entre comunidades-Andalucía

En este caso se pretende mostrar que las combinaciones son posibles, no solo de forma directa entre comunidades (ventana I), sino de manera más indirecta uniendo terminales de diferentes provincias. A modo de ejemplo establecer un recorrido Madrid Atocha-Ciudad Real-Jaén-Córdoba-Sevilla-Jerez de la Frontera.

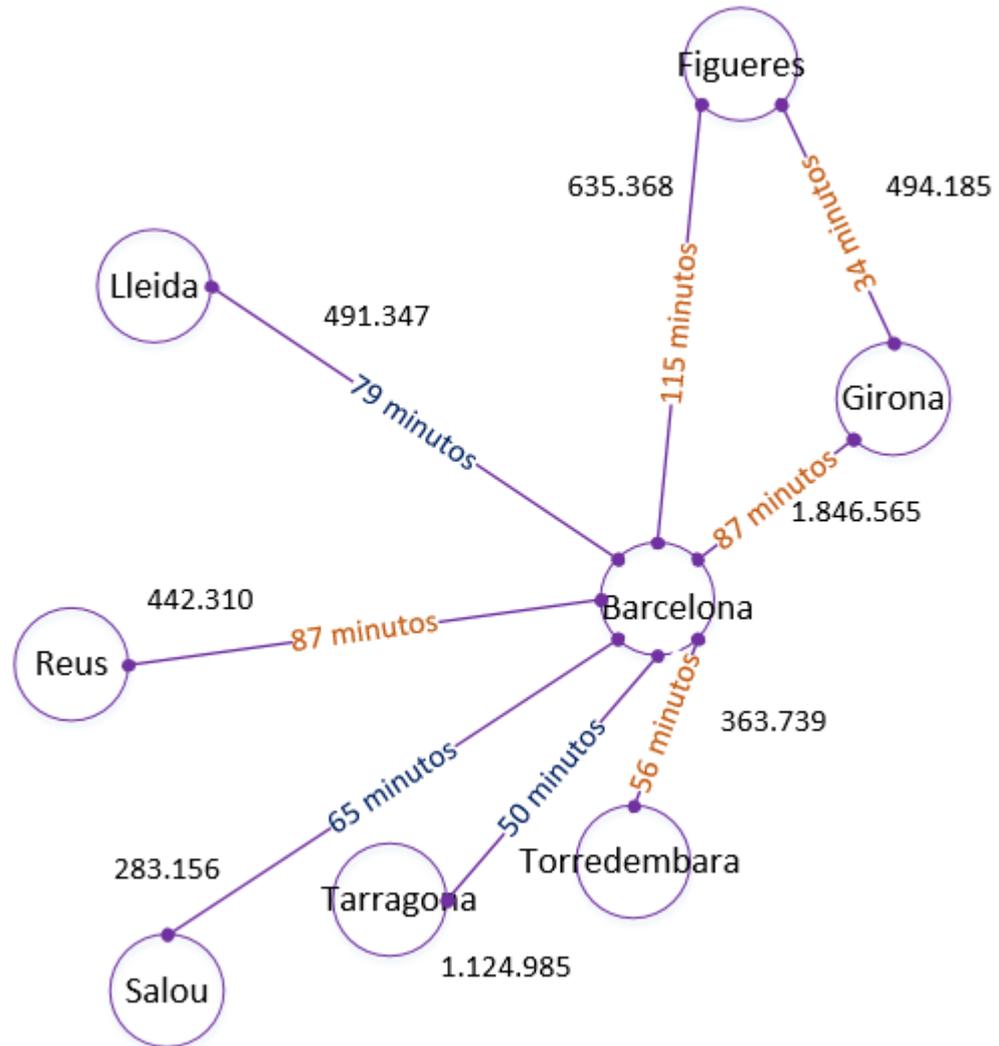


Figura 21. Corredor de Barcelona

Del mismo modo, en la Comunidad Catalana, se pueden realizar conexiones con comunidades diferentes. Cabe señalar que solo se ha incluido Madrid y Aragón, aunque se podría incluir Valencia, Santander, etc.

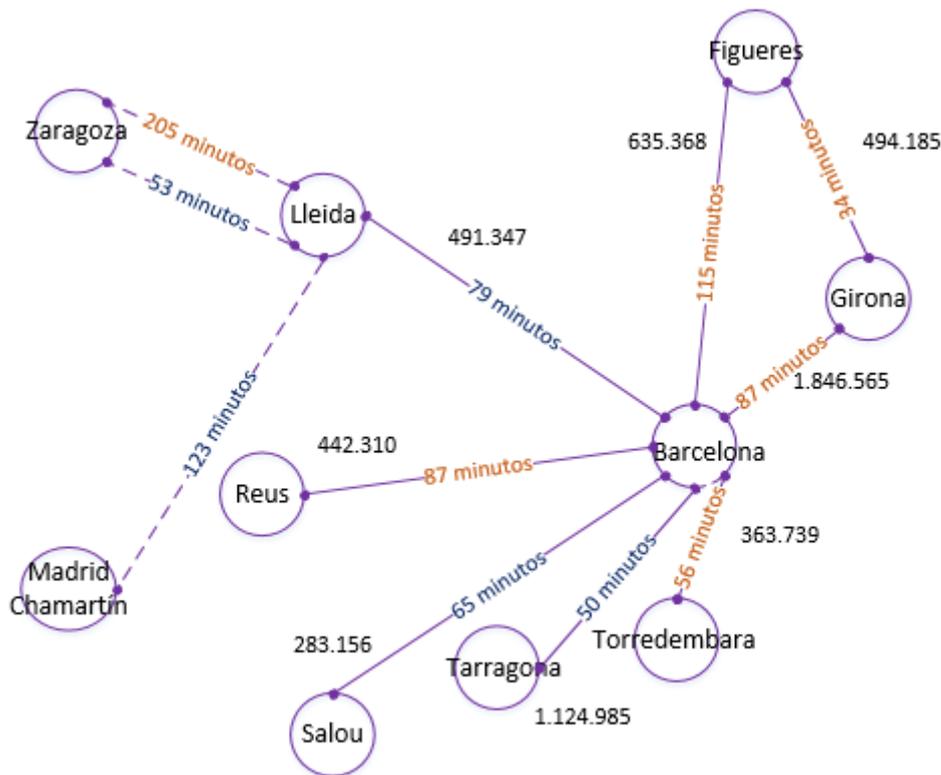


Figura 22. Conexión entre comunidades-Cataluña

Los tiempos que aparecen en las Figuras de diferentes colores están codificados como los propios de Renfe: Azul para larga distancia y Marrón para media distancia. Indicándose junto a ellos el número de viajeros que en 2016 realizaron ese trayecto. En consecuencia, año utilizado en simulaciones sucesivas. Se ha decidido utilizar los datos de larga y media distancia, y no los de alta velocidad, ya que estos últimos circulan por vías diferentes y cubren diferentes rutas, con algunas estaciones de origen-destino iguales y otras que no.

Conviene destacar que, según Renfe hay circulando por las vías una media de aproximadamente 316 trenes, lo que hace que sean unos 158 por sentido y día.

Con respecto a los horarios de dichos trenes, no se tendrán en cuenta horarios actuales ni nuevos calendarios de las TOCs, ya que lo que realmente nos interesa son las situaciones en que pueda haber conflicto. En todo caso, lo que sí se mantiene es el tiempo de recorrido entre estaciones, medido en minutos, que es la media aritmética de varios trenes con horarios en días consecutivos.



**Universidad de Valladolid**



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Para nuestro experimento se establece la premisa de que todos los trenes utilizan el mismo tipo de vagón locomotor, por lo que los tiempos y velocidades operativas son los mismos en todos los casos. También asumimos, como muestran las Figuras, que el tiempo de recorrido entre dos estaciones es fijo y es el que aparece reflejado en ellas, y, por lo tanto, finalmente no habrá necesidad de incluir ni arcos con conflictos, ni los conjuntos de estos arcos debido a que los tiempos están fijados.

Estableceremos una serie de tolerancias dentro de una ventana temporal para los tiempos de espera (Dwell time), tipo transbordos o paradas en estaciones intermedias, de 0 a 10 minutos. Y respecto a las tolerancias en los horarios de salida desde las estaciones origen, se podría establecer, como hacen *Park, B. H. Hong, S. H. y Kim, C. S. [25]*, estableciendo un intervalo de 0 a A ( $A \in [0, 10]$ ). Nosotros creemos que no tiene mucho sentido no tratar de ajustar el horario para tratar de maximizar el beneficio que se lleva el IM, que es nuestro objetivo.

Y finalmente, con respecto a las penalizaciones debidas a desviaciones en el horario previamente establecido, se asignarán a los tiempos de cada arco pertenecientes a las últimas estaciones.

Visto que las simulaciones realizadas hasta el momento, [Registro de progresión y resultados iniciales](#), no contemplan los rasgos necesarios, finalmente se ha decidido hacer una simulación que sí lo haga, con 2 TOC pujando exclusivamente por Slots que comprenden vías donde se reúnen otras vías, como en el caso de, por ejemplo, Valladolid-Madrid y Ávila-Madrid, donde solo habría coincidencia entre Atocha y Chamartín, por lo que no tendría sentido realizar una subasta para esos tramos ya que en un principio, solo habría una TOC operando en cada tramo.

El horario considerado será de 8:00 a 16:00, dando un total de 8 horas, donde circulan 53 trenes por sentido.

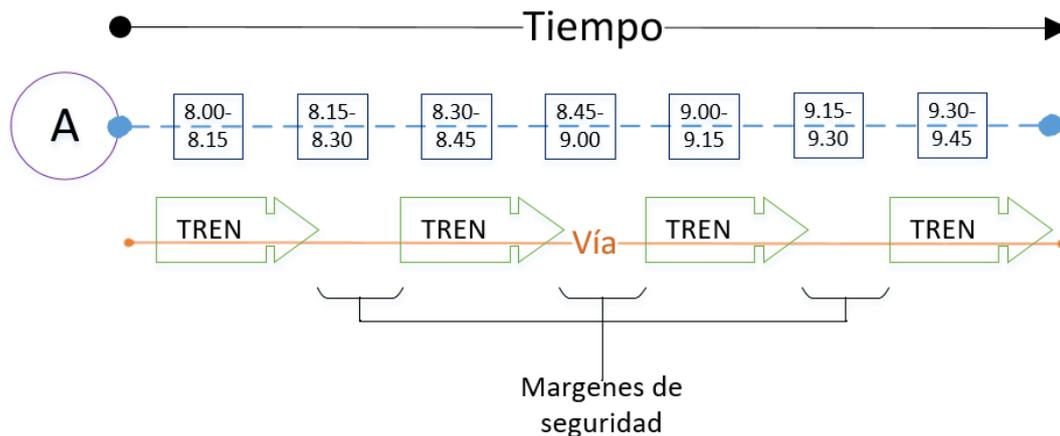


Figura 23. Slots a asignar

En esta figura se muestran algunos de los Slots a subastar. Remarcar que los trenes deben tener entre ellos y unos respecto de otros, un cierto margen de seguridad para evitar accidentes. Por ello se han incluido dentro de los propios Slots a subastar. La asignación de los Slots implica que desde las 8.00 hasta las 8.15 el tramo de vía que se corresponde con el Slot subastado, pertenece a la TOC ganadora de la subasta, y puede hacer circular por la vía lo que considere, ya sean mercancías o viajeros. Por tanto, el último tren, sería el que ha salido de la estación A entre las 8.00-8.15 (puede ser un tren o varios), el penúltimo el de las 8.15-8.30 y así sucesivamente.

El número de viajeros será utilizado para calcular los ingresos potenciales de las TOCs y así calcular los costes que tienen y lo que estarán dispuestas a pujar por los Slots, ya que sus beneficios serán de la forma:  $B = \text{Ingresos} - \text{Costes totales}$

$$B = \text{Ingresos} - \text{Costes totales}$$

$$B = \text{Ingresos} - C_{\text{fijos}} - C_{\text{variables}} - \text{Precio de la puja}$$

De estas evidencias, las TOCs estarán dispuestas a pujar, como máximo, por los Slots un precio que en el peor de los casos haga que sus beneficios sean 0 (aunque nunca lleguen a ese extremo):

$$\text{Ingresos} - C_{\text{fijos}} - C_{\text{variables}} - \text{Precio de la puja} = 0$$

$$\text{Precio de la puja} = \text{Ingresos} - C_{\text{fijos}} - C_{\text{variables}}$$

Donde los Ingresos se calculan en función del número de viajeros y los costes se calculan por kilómetro. Así podemos estimar de manera aproximada el máximo que estarán dispuestos a pagar las TOCs por ganar la subasta de Slots.

Una vez establecidos los límites, se puede comenzar la subasta, el IM establece la ruta cuyos Slots se van a subastar. Una vez calculado el tiempo entre estaciones, con el parámetro  $\lambda$  se obtiene el número de Slots que se subastarán, de los cuales las TOCs realizarán una puja superior al mínimo establecido por el IM por los Slots en que estén interesados.

Concluida la fase inicial, se comparan una a una las pujas de las TOCs para obtener el precio mínimo de la siguiente ronda para cada Slot, a modo de ejemplo, si ambas TOC están interesadas en el mismo Slot, el precio de dicho elemento de la subasta de la siguiente ronda será aquel de mayor valor. También se puede obligar a realizar un incremento mínimo del valor de las pujas en cada ronda para incrementar los beneficios.

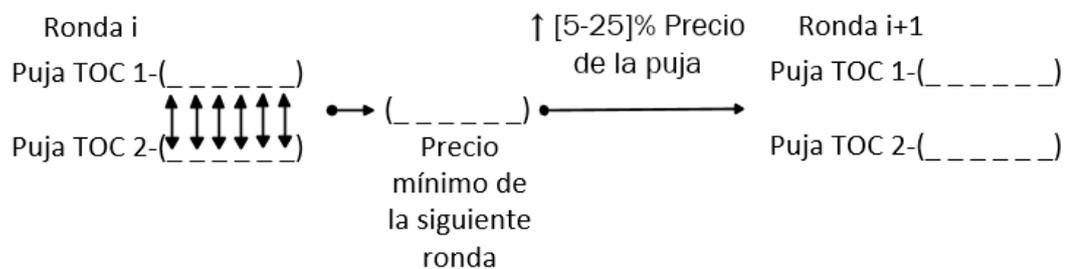


Figura 24. Procedimiento de la subasta

Una vez las TOCs lleguen a sus respectivos límites, dejarán de aumentar el valor de sus pujas. Por otra parte, si una TOC determinada no ha alcanzado el suyo, seguirá pujando, ya que desconoce si la otra TOC ha llegado a su límite establecido. Llegados a este punto, el IM comprobará los beneficios que obtendría de cada TOC. Ya que, al no aumentar la puja uno de los participantes, sabe que ya ha llegado a su límite aunque la TOC no se lo comunique

Si el beneficio obtenido por el conjunto de Slots en que la TOC 1 está interesada es superior al beneficio que se obtendría de la asignación de los Slots de la TOC 2, se asignan a la TOC 1 los Slots por los que haya pujado, y a la TOC 2 no se le asigna nada, ya que está interesada en el conjunto de varios, y no en un único elemento.

Una vez asignado, se comprueba que Slots se han dejado de asignar y se repite el proceso hasta que todos los Slots se hayan asignado a una de las TOCs participantes. Todo en vista a maximizar el beneficio del IM, ya que al asignar todos los Slots, obtendrá mayores beneficios. Esto puede diferir de la realidad, ya que aunque el IM subaste los Slots que faltan, las TOCs pueden no estar interesadas en ellos.

Finalmente se ha decidido emplear para la simulación el conjunto de corredores que circulan por Castilla y León:

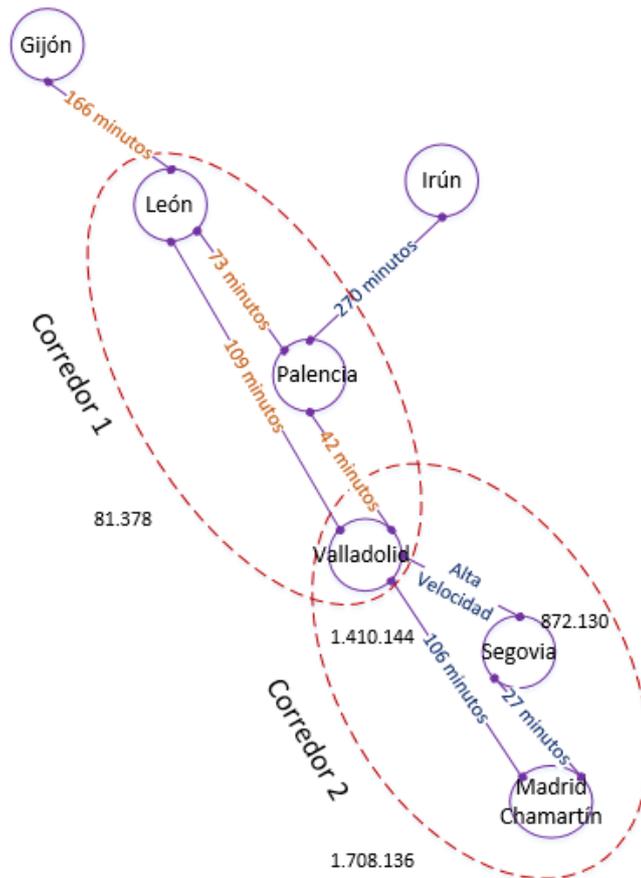


Figura 25. Corredores de Castilla y León

Los valores usados para calcular el valor límite de la puja en la simulación serán:

- Numero de TOCs participantes: 2
- Landa: 31
- Precio mínimo: 5
- Ingresos/viajero: 42.63
- Nº viajeros: 1.491.522
- Precio billete/viajero: 46.9
- Tiempo de recorrido: 221
- Rango de incremento puja: [5-25] %
- Tiempo entre estaciones: 221
- Límite de pujas: 15.75%

Se ha establecido un parámetro landa tan grande para que el número de Slots a subastar fuese de 7, no obstante, se han hecho simulaciones con valores más pequeños que resultaban en una mayor cantidad de Slots a subastar.

El número de viajeros que consideramos es la suma del corredor 1 más los que van de Valladolid a Madrid.

El tiempo es lo que tardaría un tren en ir de León a Madrid, pasando por las estaciones de Palencia y Valladolid.



**Universidad de Valladolid**



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Se ha establecido que las TOC deben realizar incrementos en sus pujas de al menos un 5% del valor ofrecido en la ronda anterior y como por parte del programa se solicita un máximo para generar dichos incrementos se ha supuesto que las TOC en ningún caso ofrecerán más de un 25% del valor de la puja anterior.

El límite de pujas, es un porcentaje utilizado para establecer el valor límite de las pujas, ya que con los datos introducidos puedo calcular el coste total de una TOC, la dificultad radica en que no hay forma de saber, del total de ese valor, cuanto corresponde a costos fijos, cuanto a variables y cuanto se podría destinar a pujar por los Slots, por lo que se ha supuesto que del total de costes un 15.75% sea reservado para realizar las pujas.

El código que realiza la subasta está reflejado en el apartado [FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA](#).



---

**Universidad de Valladolid**



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES



## VI. FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA

El código de la función *Subasta* que se ha programado para simular lo requerido se muestra a continuación. Para empezar, se piden los datos con los cuales se realizarán los cálculos, en este caso se han usado los mencionados anteriormente, que también están en forma de comentario para un fácil acceso y libre modificación:

```
function
[x, fval, exitflag, output]=Subasta1(n, landa, pmin, I, viajeros
os, P, tiempo, porcentaje_limite)
    %n=2;landa=31;pmin=50;I=42.63;viajeros=1491522;P=46
.9;tiempo=221;porcentaje_limite=0.1575;

    %n=numero de TOCs
    %landa=parámetro de cálculo de Slots
    %s=numero de Slots=7
    %pmin=puja minima/Slot
    %I=Ingresos/viajero
    %Itotal=Ingresos de la TOC
    %viajeros=nº de viajeros en total que circulan por
el corredor
    %P=precio billete/pasajero
    %Pbillete=Lo que obtiene la TOC de los billetes
    %tiempo=tiempo entre estaciones para calcular el nº
Slots
    %porcentaje_limite=Porcentaje con que calcula el
limite de las pujas

    %Itotal=I*viajeros, Costes=P*viajeros, Ctotal=Pbillete
e-Itotal, limite_puja=Punto_limite*0.9
    Nviajeros=(viajeros/365)*(8/24)
    Itotal=I*Nviajeros
    Pbillete=P*Nviajeros
    Ctotal=Pbillete-Itotal
    Punto_limite=Ctotal*porcentaje_limite
    %Hay que dejar un margen de seguridad, ya que al ser
incrementos aleatorios
    %se pasan del limite en su conjunto
    limite_puja=Punto_limite*0.9;
    s=round(tiempo/landa)
```

Se han calculado los ingresos que se esperan obtener de los viajeros que circulan por el corredor en el periodo de tiempo considerado, así como sus costes para obtener los límites de la puja. Es por ello que se divide el número de viajeros inicialmente introducido por 365, para obtener los viajeros al día y en el periodo de 8 horas considerado.. También se calcula el número de Slots a subastar en función del tiempo de circulación de los trenes por las vías.



Respecto del límite de las pujas, como los incrementos son aleatorios, puede suceder que en una ronda no superen el límite y que en la siguiente lo superen por mucho, por lo que se ha decidido establecer un margen de seguridad del 10% del valor límite para que no superen el máximo establecido en ningún caso.

A continuación se generan los vectores que contienen las pujas de las TOCs, se generan de forma aleatoria ya que a priori no se puede saber sobre que Slots de los disponibles están interesados en pujar. La puja generada ya es superior al precio mínimo fijado por el IM.

```
for j=1:n
    AUX=[];
    %TOC_j=[];
    for i=1:s
        bin=round(rand);
        v=(randi([5,25])/100)*pmin;%Uniforme para
que suba aleatoriamente
        AUX(i)=(pmin+v)*bin;%Para que no estén todos
los Slots con puja.
        %v=valor aleatorio
    end
    if j==1
        TOC1=AUX

    elseif j==2
        TOC2=AUX
    else
        TOC=AUX;
    end
end
end
```

Una vez realizadas las pujas de la primera ronda de la subasta, se fabrica el vector que contiene los precios mínimos que se deben superar en la siguiente ronda de la subasta. También se calcula el beneficio que aportaría cada TOC al IM en caso de ganar la ronda.

```
for i=1:s
    if TOC1(i)>=TOC2(i)
        Pronda(i)=TOC1(i);
    else
        Pronda(i)=TOC2(i);
    end
end

Pronda%precios para la siguiente ronda
Beneficio1=sum(TOC1)
Beneficio2=sum(TOC2)
```



Se realizan las siguientes rondas mientras que los beneficios obtenidos por el IM, los precios de pujas de las TOCs, sean menores que los ingresos que obtendrían de la explotación de dichos Slots o se superen el número de iteraciones permitido, en este caso de 50 para facilitar la simulación (puede alcanzarse el límite o no hacerlo, ya que al ser los incrementos aleatorios no se sabe cuánto aumentarán). Es necesario añadir que las pujas solo incrementan las pujas ofrecidas en rondas anteriores, no comienzan a pujar por nuevos Slots.

```
iter=1;
%Puede que la suma de los Slot sean > que limite_puja,
por lo que se deja un
%margin de seguridad para no sobrepasar el limite y
no obtener beneficios
while (Beneficio1<=limite_puja      &&
Beneficio2<=limite_puja)&& iter<300 %para cuando uno de
los 2 llega a limite_puja
    % para ajustar cada vector de puja de cada TOC:
    if ((Pronda(i)>TOC1(i)) && (TOC1(i)~=0))
        TOC1(i)=Pronda(i);
    elseif (Pronda(i)>TOC2(i) && TOC2(i)~=0)
        TOC2(i)=Pronda(i);
    end

    %Aumentar las pujas
    for i=1:s

        v=(randi([5,25])/100);%Uniforme para que
suba aleatoriamente
        TOC1(i)=TOC1(i)*(1+v);%Para que no estén
todos los Slots con puja.
        %Podria poner*bin para que no siempre suban
la puja, pero no en este
        %caso
        Beneficio1=sum(TOC1);
        v=(randi([5,25])/100);%Uniforme para que
suba aleatoriamente
        TOC2(i)=TOC2(i)*(1+v);%Para que no estén
todos los Slots con puja.
        Beneficio2=sum(TOC2);
        %i=i+1;

    end
    for i=1:s
        if TOC1(i)>=TOC2(i)
            Pronda(i)=TOC1(i);
```



```
        %i=i+1;
    else
        Pronda(i)=TOC2(i);
        %i=i+1;
    end
end
Pronda;%precios para la siguiente ronda
Beneficio1=sum(TOC1);
Beneficio2=sum(TOC2);
iter=iter+1;
end
```

```
iter %Muestra cuantas rondas se han realizado
```

Una vez finalizadas las iteraciones, significa que una TOC ha llegado a su límite, pero el resto de TOC no lo saben, por lo que se realizará una ronda a mayores para comprobar si el beneficio conjunto de los Slots correspondientes a la TOC que se retira es superior al beneficio que se obtendría de la TOC que sigue pujando. El precio mínimo de la siguiente ronda se ha calculado en el bucle anterior.

```
%Una TOC al límite, en la siguiente ronda no participa
```

```
    TOC1
    TOC2
    Pronda;%precios para la siguiente ronda
    Beneficio1=sum(TOC1)
    Beneficio2=sum(TOC2)
```

```
%METER SIGUIENTE RONDA
```

```
if Pronda(i)>TOC1(i)    &&    TOC1(i)~=0    &&
Beneficio1<limite_puja
    TOC1(i)=Pronda(i);
elseif Pronda(i)>TOC2(i)    &&    TOC2(i)~=0    &&
Beneficio2<limite_puja
    TOC2(i)=Pronda(i);
end
```

```
%Aumentar las pujas
```

```
for i=1:s
    if Beneficio1>limite_puja

        v=(randi([5,25])/100);%Uniforme para que
suba aleatoriamente
        %TOC2 no sabe que TOC1 no sube la puja
        TOC2(i)=TOC2(i)*(1+v);

        Beneficio1=sum(TOC1);
        Beneficio2=sum(TOC2);
        if i==s
```



```
disp('TOC1 no puede pujar más, se
retira')
end
elseif Beneficio2>limite_puja
    v=(randi([5,25])/100);%Uniforme para que
suba aleatoriamente
    %TOC1 no sabe que TOC2 no sube la puja
    TOC1(i)=TOC1(i)*(1+v);
    Beneficio1=sum(TOC1);
    Beneficio2=sum(TOC2);
    if i==s
        disp('TOC2 no puede pujar más, se
retira')
    end
end
end
end
```

Una vez se conozca con que oferta el IM obtiene un mayor beneficio, finalizará esta parte de la subasta. En este punto, al decidir que Slots se van a asignar finalmente, se generan de forma aleatoria las penalizaciones, que pueden suceder debido a adelantos y retrasos, o puede incluso no haberlas.

```
if Beneficio1>Beneficio2
    Asignado=TOC1;
    g=sprintf('%d ', TOC1);
    fprintf('TOC1 ganadora de estos Slots
subastados: %s\n', g)
elseif Beneficio1<Beneficio2
    Asignado=TOC2;
    g=sprintf('%d ', TOC2);
    fprintf('TOC2 ganadora de estos Slots
subastados: %s\n', g)
end

Asignado

%Forzar a que penalización no exista si no hay puja
penalizacion1=[];
for i=1:s

    if Asignado(i)~=0

penalizacion1(i)=round(rand)*randi([0,5])*1000;
    end
end
```



```
penalizacion1  
Beneficio_r1=Asignado-penalizacion1
```

Ahora, puede suceder que los Slots asignados no cubran el total de Slots subastados, por lo que se realizará otra subasta para cubrir los Slots que faltan. Se genera el vector de Slots que faltan por subastar para que las TOCs pujen por ellos.

```
%Repetir para los Slots no asignados  
  
for i=1:s  
    if Asignado(i)==0  
        NAsignado(i)=pmin;  
        %i=i+1;  
    else  
        NAsignado(i)=0;  
        %i=i+1;  
    end  
end  
NAsignado
```

Esta parte del código, es para forzar que las pujas sean de los Slots que faltan por asignar, más adelante se podría realizar todo ello de forma aleatoria y mediante un bucle repetir las “subastas” hasta que se asignen todos los Slots. Una vez hecho esto, la operación sería igual que la anterior.

```
for i=1:s  
    if NAsignado(i)~=0  
        v=(randi([5,25])/100);  
        TOC1(i)=NAsignado(i)*(1+v);  
        TOC2(i)=NAsignado(i)*(1+v);  
    else  
        TOC1(i)=0;  
        TOC2(i)=0;  
    end  
end  
  
for i=1:s  
    if TOC1(i)>=TOC2(i)  
        Pronda2(i)=TOC1(i);  
    else  
        Pronda2(i)=TOC2(i);  
    end  
end
```



```
Pronda2%precios para la siguiente ronda
Beneficio1_2=sum(TOC1)
Beneficio2_2=sum(TOC2)

iter2=1;
while (Beneficio1_2<=limite_puja &&
Beneficio2_2<=limite_puja) && iter2<300%para cuando uno
de los 2 llega a limite_puja
    % para ajustar cada vector de puja de cada TOC:

        if ((Pronda2(i)>TOC1(i)) && (TOC1(i)~=0))
            TOC1(i)=Pronda2(i);
        elseif (Pronda2(i)>TOC2(i) && TOC2(i)~=0)
            TOC2(i)=Pronda2(i);
        end

        %Aumentar las pujas
        for i=1:s
            %mejorar cuando se pueda hacer TOCi
            v=(randi([5,25])/100);%Uniforme para que
suba aleatoriamente
            TOC1(i)=TOC1(i)*(1+v);%Para que no estén
todos los Slots con puja.
            %Podria poner*bin para que no siempre suban
la puja, pero no en este
            %caso
            Beneficio1_2=sum(TOC1);
            v=(randi([5,25])/100);%Uniforme para que
suba aleatoriamente
            TOC2(i)=TOC2(i)*(1+v);%Para que no estén
todos los Slots con puja.
            Beneficio2_2=sum(TOC2);
            %i=i+1;
        end
        for i=1:s
            if TOC1(i)>=TOC2(i)
                Pronda2(i)=TOC1(i);
                %i=i+1;
            else
                Pronda2(i)=TOC2(i);
                %i=i+1;
            end
        end
        end
Pronda2;%precios para la siguiente ronda
Beneficio1_2=sum(TOC1);
Beneficio2_2=sum(TOC2);
iter2=iter2+1;
```



```
end
iter2
% Una TOC al limite, en la siguiente ronda no
participa

for i=1:s
    if Beneficio1_2>limite_puja

        v=(randi([5,25])/100);%Uniforme para que
suba aleatoriamente
        %TOC2 no sabe que TOC1 no sube la puja
        TOC2(i)=TOC2(i)*(1+v);

        Beneficio1_2=sum(TOC1);
        Beneficio2_2=sum(TOC2);
        if i==s
            disp('TOC1 no puede pujar más, se
retira')
        end
    elseif Beneficio2_2>limite_puja

        v=(randi([5,25])/100);%Uniforme para que
suba aleatoriamente
        %TOC1 no sabe que TOC2 no sube la puja
        TOC1(i)=TOC1(i)*(1+v);

        Beneficio1_2=sum(TOC1);
        Beneficio2_2=sum(TOC2);
        if i==s
            disp('TOC2 no puede pujar más, se
retira')
        end
    end
end

end

%METER SIGUIENTE RONDA
if Pronda(i)>TOC1(i) && TOC1(i)~=0 &&
Beneficio1_2<limite_puja
    TOC1(i)=Pronda(i);
elseif Pronda(i)>TOC2(i) && TOC2(i)~=0 &&
Beneficio2_2<limite_puja
    TOC2(i)=Pronda(i);
end

%Aumentar las pujas
for i=1:s
```



```
    if Beneficio1<=limite_puja
        %print('TOC1 no puja más')
        %mejorar cuando se pueda hacer TOCi
        v=(randi([5,25])/100);%Uniforme para que
suba aleatoriamente
        %TOC2 no sabe que TOC1 no sube la puja
        TOC2(i)=TOC2(i)*(1+v);

        Beneficio1=sum(TOC1);
        Beneficio2=sum(TOC2);
    elseif Beneficio2<=limite_puja
        %print('TOC2 no puja más')
        %mejorar cuando se pueda hacer TOCi
        v=(randi([5,25])/100);%Uniforme para que
suba aleatoriamente
        %TOC1 no sabe que TOC2 no sube la puja
        TOC1(i)=TOC1(i)*(1+v);

        Beneficio1_2=sum(TOC1);
        Beneficio2_2=sum(TOC2);
    end

end

    if Beneficio1_2>Beneficio2_2
        Asignado_fin=TOC1;
        g=sprintf('%d ', TOC1);
        fprintf('TOC1 ganadora de estos Slots
subastados: %s\n', g)
    else
        Asignado_fin=TOC2;
        g=sprintf('%d ', TOC2);
        fprintf('TOC2 ganadora de estos Slots
subastados: %s\n', g)
    end

    TOC1
    TOC2
    Asignado_fin

    %Penalización
    penalizacion_2=[];
    for i=1:s

        if Asignado_fin(i)~=0

penalizacion_2(i)=(round(rand)*randi([0,5]))*10;
end
```



```
penalizacion_2
Beneficio_r2=Asignado_fin-penalizacion_2

Beneficio_tot=sum(Beneficio_r1+Beneficio_r2)

%Alternativa al método de la subasta es la
programación lineal
f=-[1 -1];
A=[Beneficio_r1',-penalizacion1'];%Beneficio_r2',-
penalizacion_2'];%' para trasponer
b=zeros(size(penalizacion1));
Aeq=[];%Queda vacío ya que no hay restricciones con
igualdades, son desigualdades debido al carácter del
algoritmo definido.
Beq=[];
lb=[1,0];
ub=[inf,inf];
%[x,fval,exitflag,output]=linprog(f,A,b,[],[],lb,ub
)
[x,fval,exitflag,output]=linprog(f,A,b,Aeq,Beq,lb,u
b)

A=[Beneficio_r2',-penalizacion_2'];%Beneficio_r2',-
penalizacion_2'];%' para trasponer
b=zeros(size(penalizacion_2));
Aeq=[];%Queda vacío ya que no hay restricciones con
igualdades, son desigualdades debido al carácter del
algoritmo definido.
Beq=[];
lb=[1,0];
ub=[inf,inf];
%[x,fval,exitflag,output]=linprog(f,A,b,[],[],lb,ub
)
[x,fval,exitflag,output]=linprog(f,A,b,Aeq,Beq,lb,u
b)

return
```



## 1. Resultados obtenidos

Los resultados de la simulación del programa “Subasta”, son los que se detallan a continuación:

```
>> n=2;s=4;pmin=50;l=10;P=12;
>> Subasta1(n,landa,pmin,l,viajeros,P,tiempo,porcentaje_limite)
Nviajeros =
    1.3621e+03
ltotal =
    5.8067e+04
Pbilleto =
    6.3883e+04
Ctotal =
    5.8163e+03
Punto_limite =
    916.0601
s =
    7
```

El vector originado por las pujas de las TOCs a los Slots ofrecidos por el IM se genera.

```
TOC1 =
    55.5000  57.0000    0    0    0  53.5000  52.5000
TOC2 =
    0  56.0000    0    0  59.5000  61.5000    0
```

Se realiza la comparación elemento a elemento para formar el vector de pujas de la siguiente ronda.

```
Pronda =
    55.5000  57.0000    0    0  59.5000  61.5000  52.5000
```

Beneficio obtenido por el IM si se asignasen los Slots en el primer intento.

```
Beneficio1 =
```



Universidad de Valladolid

218.5000

Beneficio2 =

177

Número de rondas que se realizan hasta que una TOC llega a su limite.

iter =

12

Vector de pujas que contiene los valores ofrecidos en el momento en que una de las TOCs tiene que retirarse.

TOC1 =

197.6816 233.8610 0 0 0 206.9530 243.8080

TOC2 =

0 248.9913 0 0 337.4727 258.8672 0

Se realiza la siguiente ronda ya que una de las TOCs no tiene conocimiento de que la TOC competidora ha alcanzado su límite.

Pronda =

197.6816 248.9913 0 0 337.4727 258.8672 243.8080

Beneficio1 =

882.3036

Beneficio2 =

845.3312

TOC1 no puede pujar más, se retira

TOC2 ganadora de estos Slots subastados: 0 3.112391e+02 0 0 3.644705e+02 2.718105e+02 0

Beneficio obtenido de la asignación de los Slots, retirando las penalizaciones.

penalizacion1 =

0 30 0 0 10 0 0



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Beneficio\_r1 =

0 308.2391 0 0 363.4705 271.8105 0

Vector de Slots que no se han asignado anteriormente con el precio mínimo de comienzo de la subasta.

NAsignado =

50 0 50 50 0 0 50

Nuevo precio mínimo de la siguiente ronda.

Pronda2 =

53.0000 0 58.5000 55.5000 0 0 60.5000

Beneficio1\_2 =

227.5000

Beneficio2\_2 =

227.5000

iter2 =

10

TOC1 no puede pujar más, se retira

TOC2 ganadora de estos Slots subastados: 2.253860e+02 0 3.210915e+02 2.080141e+02 0 0 3.609547e+02

TOC1 =

191.3033 0 169.7878 167.9859 0 0 308.5083

TOC2 =

225.3860 0 321.0915 208.0141 0 0 360.9547

Asignado\_fin =

225.3860 0 321.0915 208.0141 0 0 360.9547

penalizacion\_2 =

40 0 0 20 0 0 10

Beneficio\_r2 =

185.3860 0 321.0915 188.0141 0 0 350.9547



Universidad de Valladolid

Beneficio\_tot =

1.9890e+03

A partir de aquí se muestra la parte de programación lineal realizada con los datos obtenidos hasta el momento para maximizar el algoritmo propuesto. Esta sería la alternativa a realizar la saubasta.

Los primeros resultados corresponden a los conseguidos con los datos de la primera asignación de Slots.

Exiting: One or more of the residuals, duality gap, or total relative error

has grown 100000 times greater than its minimum value so far:

the primal appears to be infeasible and the dual unbounded since

the dual objective > 1e+10

and the primal objective > -1e+6.

x =

1.0000

31.4124

fval =

30.4124

exitflag =

-2

output =

iterations: 14

algorithm: 'interior-point-legacy'

cgiterations: 0

message: 'Exiting: One or more of the residuals, duality gap, or total relative error...'

constrviolation: 332.0586

firstorderopt: 1.5807e+31

Optimization terminated.



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES



**Universidad de Valladolid**



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Estos resultados se obtienen con los datos de la segunda asignación, y finaliza porque la función ha convergido en una solución  $x$ .

$x =$

1.0000

74.4229

$fval =$

73.4229

$exitflag =$

-2

$output =$

iterations: 15

algorithm: 'interior-point-legacy'

cgiterations: 0

message: 'Exiting: One or more of the residuals, duality gap, or total relative error...'

constrviolation: 321.0915

firstorderopt: 8.6371e+41

$ans =$

1.0000

74.4229

## 2. Futuras mejoras

Para la realización de esta simulación se ha tenido en cuenta que solo había 2 TOC, el siguiente paso será programar que puedan participar todas las TOCs que se estime oportuno o que estén interesadas en la subasta.

Una vez realizado, se tratará de asignar los Slots sin forzar a que se asignen todos ellos, dando la opción de que se retiren las TOCs si llegado un punto no están interesadas en los Slots que se subastarán.

El siguiente paso sería tratar de repetir el experimento, con mayor nivel de detalle, lo que implicaría emplear subastas combinatorias para asignar las subastas, ya que hasta ahora, al ser cuatro estaciones consecutivas, la parte combinatoria solo se ha tenido en cuenta para agrupar los Slots, es decir, si no se le permitía pujar por el conjunto, la TOC en cuestión se retiraba.

Desde ahora, se tratará de tener en cuenta que las TOCs estarán interesadas en pujar por Slots de diferentes estaciones a diferentes horas:

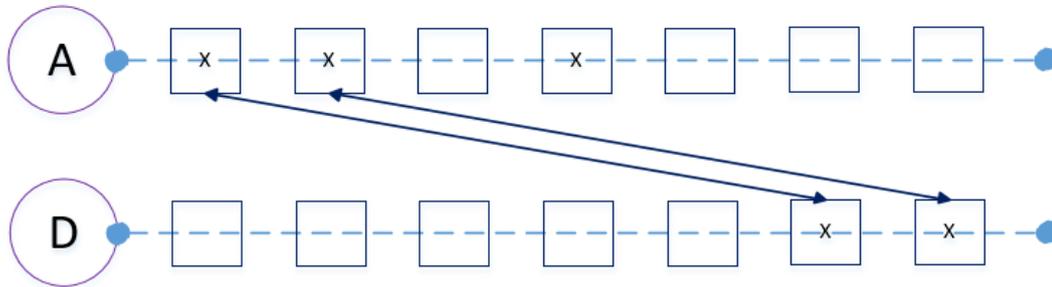


Figura 26. Líneas futuras

Ya que les interesará la salida de una estación A, y en función del tiempo que se tarde en llegar a la estación D, los Slots que cubran su entrada a la estación de destino. Además se incorporarán las penalizaciones en función de la asignación, si se ha cumplido estrictamente la asignación que quería la TOC, no habrá, pero si se adelanta o retrasa en exceso se penalizará.

Esto puede resultar en que el IM tenga que tomar decisiones a la hora de asignar los Slots ya que deberá comprobar si obtiene mayor beneficio asignando a una TOC un Slot con retraso respecto de lo que había solicitado y así poder asignar otro Slot a otra TOC o solo asignar el primer Slot sin diferencias para evitar penalizaciones.

Sobre la base de las ideas expuestas, más adelante se estudiará la posibilidad de introducir ajustes a Slots asignados en rondas anteriores, como se había mencionado en el apartado [Estrategia de pujas de las TOCs](#), para permitir la asignación de un mayor número de Slots en total, para así maximizar el beneficio obtenido por el IM.



## VII. CONCLUSIONES

Para terminar este informe se tratara de resumir los puntos más remarcables que este documento recoge incluyendo ideas y conocimientos.

En este caso particular, el objetivo de la realización del trabajo de fin de grado aparte de demostrar los conocimientos aprendidos y su puesta en práctica en aplicaciones del campo de la ingeniería, es demostrar la relevancia de la temática de este tipo de subastas ya que es un tema de actualidad y su utilidad será muy amplia en un futuro en diferentes organizaciones.

La presente investigación se caracteriza, resaltando sobre todo lo demás, por la utilización del método de subastas basadas en combinaciones de Slots para un problema de este tipo, ya que muchos autores lo mencionan pero no lo llevan a cabo. La mayoría de ellos realiza una programación lineal del problema, pese a que muchos aceptan la utilidad de este método en problemas similares. Sin embargo no abordan un enfoque tan complejo como el presente estudio, hecho diferenciador que lo distingue del resto en la actualidad, aunque solo sea la base de estudios posteriores.

Se ha presentado una nueva formulación del problema basada en las subastas combinatorias, verificando con éxito el buen funcionamiento y la utilidad de este tipo de subastas para casos objeto de este estudio.

La subasta será dirigida por un responsable que tendrá total potestad para tomar decisiones, donde los precios aumentarán o se reducirán en consecuencia, en función de las leyes de oferta y demanda de las diferentes TOC y de los recursos de que dispongan. Para el caso en que, por ejemplo, uno de los Slots a subastar tenga una demanda superior a otros, se aumentará su precio, mientras que si sobran recursos disminuirá.

Con esta premisa, se logra que las TOCs pujen por una combinación de varios recursos, de ahí el término combinatoria, y que sus actividades avancen en un horizonte temporal según su propio criterio, hasta alcanzar, tras varias iteraciones un equilibrio que derivará en una solución óptima para la asignación de esos slot y la maximización del beneficio del IM.

Esta nueva formulación de un mecanismo más eficiente de asignación, incluye unos resultados que muestran que el mecanismo genera una excelente asignación de Slots para redes de trabajo de tamaño medio, con una solución óptima. No obstante, la aplicación desarrollada tiene un punto de mejora desde un punto de vista visual pese a resultar bastante acertada en términos de simulación y generación de datos. Recordemos que el programa en cuestión, es fundamentalmente de optimización.



**Universidad de Valladolid**



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

En cualquier caso, al haber aplicado este mecanismo a una parte comparativamente pequeña, respecto de toda la red ferroviaria, se necesitarán simulaciones adicionales para determinar la eficiencia total de este mecanismo y su radio de convergencia.

Al igual que este proyecto parte de otros estudios dónde se trataba de demostrar la utilidad de esta metodología aquí se ha realizado una simulación con datos verídicos de la red ferroviaria española. Por ello, pretende ser al menos una buena referencia para futuros estudios relacionados con la temática.



## VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. Andersson, M., 2011. Marginal cost of railway infrastructure wear and tear for freight and passenger trains in Sweden. *Eur. Transp.* 40, 3–23.
2. Andersson, M., Smith, A., Wikberg, Åsa, & Wheat, P. (2012). Estimating the marginal cost of railway track renewals using corner solution models. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(6), 954–964. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.02.016>
3. Araúzo, J. A., Del Olmo, R., & Laviós, J. J. (2013). Subasta combinatoria para la programación dinámica en sistemas de fabricación distribuidos. *Dirección y Organización*, 51(January 2015), 55–64.
4. Araúzo, J. A., Villafañez, F. A., García, D. P., Pajares, J., & Pavón, J. (n.d.). Agent Based Modelling and Simulation of an Auction Market for Airport Slots Allocation, 1–12.
5. Bassanini A., La Bella A., Nastasi A. (2002) Allocation of Railroad Capacity Under Competition: A Game Theoretic Approach to Track time Pricing. In: Gendreau M., Marcotte P. (eds) *Transportation and Network Analysis: Current Trends. Applied Optimization*, vol 63. Springer, Boston, MA
6. Borndörfer, R., Grötschel, M., Lukac, S., Mitusch, K., Schlechte, T., Schultz, S., & Tanner, A. (2006). An auctioning approach to railway slot allocation. *Competition and Regulation in Network Industries*, 1(2), 163–197. Retrieved from [http://www.crninet.com/pdf\\_file/ITS/CRNI\\_07\\_02\\_0163.pdf](http://www.crninet.com/pdf_file/ITS/CRNI_07_02_0163.pdf)
7. Borndörfer R., Mura A., Schlechte T. (2009) Vickrey Auctions for Railway Tracks. In: Fleischmann B., Borgwardt KH., Klein R., Tuma A. (eds) *Operations Research Proceedings 2008*. Springer, Berlin, Heidelberg
8. Brewer, P. J., & Plott, C. R. (1996). A binary conflict ascending price (BICAP) mechanism for the decentralized allocation of the right to use railroad tracks. *International Journal of Industrial Organization*, 14(6), 857–886. [https://doi.org/10.1016/0167-7187\(96\)01014-4](https://doi.org/10.1016/0167-7187(96)01014-4)
9. Bugarinovic, M., & Boskovic, B. (2014). A systems approach to access charges in unbundling railways. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 848–860. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.036>
10. Caprara, A., Fischetti, M. and Toth, P., Modeling and solving the train timetabling problem. *Operations Research*, 50(5), 2001. <https://doi.org/10.1287/opre.50.5.851.362>
11. Gaudry, M., Quinet, E. , 2009. Track Wear-and-Tear Cost by Traffic Class: Functional Form, Zero Output Levels and Marginal Cost Pricing Recovery On the French Rail Network. Paris-Jourdan Sciences Économiques, France Working Paper No. 2009-32.
12. Gibson, S. (2003). Allocation of capacity in the rail industry. *Utilities Policy*, 11(1), 39–42. [https://doi.org/10.1016/S0957-1787\(02\)00055-3](https://doi.org/10.1016/S0957-1787(02)00055-3)



13. Harker, P. T., & Hong, S. (1994). Pricing of track time in railroad operations: An internal market approach. *Transportation Research Part B*, 28(3), 197–212. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(94\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0191-2615(94)90007-8)
14. Harrod, S. (2013). Auction pricing of network access for North American railways. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 49(1), 176–189. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2012.08.003>
15. Hwan, B., & Kim, P. J. (2017). Finding Train Frequencies and Halting Patterns Using Optimization Models : a Focus on the Line Plan for High-Speed Trains. *Journal of the Korean Society for Railway*, 20(4), 529–538. <https://doi.org/10.7782/JKSR.2017.20.4.529>
16. Johansson, P., & Nilsson, J. E. (2004). An economic analysis of track maintenance costs. *Transport Policy*, 11(3), 277–286. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2003.12.002>
17. Kennedy, D. (1997). Regulating access to the railway network. *Utilities Policy*, 6(1), 57–65. [https://doi.org/10.1016/S0957-1787\(96\)00008-2](https://doi.org/10.1016/S0957-1787(96)00008-2)
18. Ken binmore, (2011). *La teoría de juegos: una breve introducción*
19. Kozan, E. , Burdett, R. , 2005. A railway capacity determination model and rail access charging methodologies. *Transp. Plan. Technol.* 28 (1), 27–45.
20. Kuo, A., & Miller-Hooks, E. (2015). Combinatorial auctions of railway track capacity in vertically separated freight transport markets. *Journal of Rail Transport Planning and Management*, 5(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2014.12.001>
21. Lang, M., Laperrouza, M. , Finger, M. , 2013. Competition effects in a liberalized railway market. *J. Ind. Compet. Trade* 13 (3), 375–398. <https://doi.org/10.1007/s10842-011-0117-2>
22. Landete, M., Escudero, L., & Mar, A. (2007). on Y Corte Para El Problema De Subastas Combinatorias.
23. Landex, A. (2012). Network effects in railways. *WIT Transactions on the Built Environment*, 127, 391–402. <https://doi.org/10.2495/CR120331>
24. Nilsson, J.-E. (1999). Allocation of track capacity: Experimental evidence on the use of priority auctioning in the railway industry. *International Journal of Industrial Organization*, 17(8), 1139–1162. [https://doi.org/10.1016/S0167-7187\(99\)00016-8](https://doi.org/10.1016/S0167-7187(99)00016-8)
25. Park, B. H., Hong, S. H., & Kim, C. S. (2014). A new optimization model for railway slot allocation. *WIT Transactions on the Built Environment*, 135, 613–620. <https://doi.org/10.2495/CR140511>
26. Park, B. H. (2017). An Optimization Approach to Railway Track Allocation Considering the Train-set Routings, 1(3), 452–459. <https://doi.org/10.2495/TDI-V1-N3-452-459>
27. Park, B. H., & Hong, S. H. (2014). An efficient iterative auction method for train-path allocation. *ICIC Express Letters, Part B: Applications*, 5(1), 15–21.
28. Sanz Calvo, D. (2015). Teoría de Juegos y Subastas en Economía y Empresa. Retrieved from <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/15833>



**Universidad de Valladolid**



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

29. Stern, Jon and Turvey, Ralph, Auctions of Capacity in Network Industries (October 2002). Regulation Initiative Working Paper No. 53. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=372001> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.372001>
30. Talebian, A., Zou, B., & Peivandi, A. (2018). Capacity allocation in vertically integrated rail systems: A bargaining approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, 107, 167–191. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.12.001>
31. Wheat, P. E., & Smith, A. S. J. (2008). Assessing the marginal infrastructure maintenance wear and tear costs for Britain's railway network. *Journal of Transport Economics and Policy*, 42(2), 189–224.
32. [https://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG\\_CASTELLANO/DIRECCION\\_S\\_GENERALES/TRANSPORTE\\_TERRESTRE/OBSERVATORIOS/Observatorio\\_ferrocarril.htm](https://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCION_S_GENERALES/TRANSPORTE_TERRESTRE/OBSERVATORIOS/Observatorio_ferrocarril.htm)
33. <http://www.fomento.gob.es/be/?nivel=2&orden=07000000>



---

**Universidad de Valladolid**



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES