



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIERÍA (ICAI)

PROYECTO DE FIN DE MÁSTER EN SISTEMAS
FERROVIARIOS

ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE TRANSPORTE
FERROVIARIO DE UNA LÍNEA COMERCIAL DE ALTA
VELOCIDAD CON SISTEMA DE PROTECCIÓN
ERTMS/ETCS NIVEL 2

Autor: Patricia Huarancca Mesicano

Madrid, Julio 2017

Ficha Técnica

Autor: Huarancca Mesicano, Patricia

Directores: Montes Ponce de León, Fernando

Molejón Asenjo, Javier

Entidad Colaboradora: ICAI Universidad Pontificia Comillas

Master Universitario en Sistemas Ferroviario

TÍTULO DEL PROYECTO: ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE TRANSPORTE FERROVIARIO DE UNA LÍNEA COMERCIAL DE ALTA VELOCIDAD CON SISTEMA DE PROTECCIÓN ERTMS/ETCS NIVEL 2

RESUMEN DEL PROYECTO:

ERTMS es un nuevo concepto en gestión de circulación del tráfico ferroviario. En principio este sistema nació para ser aplicado dentro de los países que conformaban la Comunidad Europea, aunque cada vez su uso se va extendiendo ya a todo el mundo. ERTMS introduce una nueva idea dentro de los sistemas de control de tráfico ferroviaria mediante comunicaciones continuas entre tren y vía a través de GSM-R (protocolo específico de comunicaciones ferroviarias basado en el estándar civil de comunicación GSM)

La implantación del sistema ERTMS permite una serie de mejoras en la explotación ferroviaria, como son permitir la interoperabilidad de circulación de diferentes tipos de tren en distintas infraestructuras, mejora de los niveles de seguridad y en especial el impacto en la capacidad de circulación en las líneas ferroviarias.

Este proyecto se centra en analizar la capacidad ferroviaria de una línea de alta velocidad equipada con el sistema ERTMS nivel 2 donde circularán trenes homogéneos para lo cual se considera el impacto que tiene el sistema de señalización ERTMS nivel 2 en la capacidad ferroviaria, la caracterización de la sección de la línea y las características del material rodante.

Dentro de las funcionalidades ETCS que generan un mayor impacto en la capacidad de tráfico en la línea se consideran tres funcionalidades en este documento; Autoridad de movimiento, Limitaciones de velocidad y gradientes y la curva de frenado.

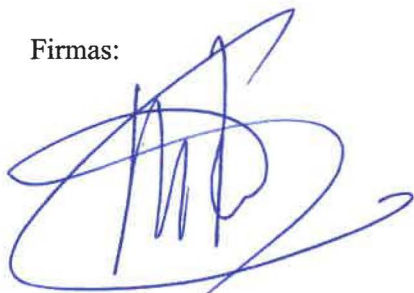
Se identifica los elementos de señalización que contiene la línea bajo análisis. Dentro de la documentación requerida para la caracterización de la línea ha sido necesario considerar: Cuadro de Velocidades máximas, perfiles de la línea, tiras de señalización y programas de explotación de la línea.

Uno de los pasos previos a realizar es el comportamiento dinámico de los trenes y el cálculo de los tiempos de circulación en un escenario concreto. Este cálculo de tiempos se corresponde con los cálculos habituales de cinemática.

Una vez definida todas las características de los puntos antes descritos se analizará la capacidad en las secciones o trayectos que se considere más desfavorable desde el punto de vista de capacidad de la línea y posteriormente en la estación terminal por haberse considerado como el punto más crítico, al concentrarse el mayor número de servicios y presentar una topología compleja logrando obtener la capacidad de la red general.

Al final de este análisis se realizará propuestas de mejoras para optimizar la capacidad en la línea en estudio.

Firmas:



Fernando Montes Ponce de León
Director



Javier Molejón Asenjo
Director



Patricia Huarancca Mesicano
Autor

MEMORIA

Tabla de contenido

PARTE 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	4
Capítulo 1. Resumen	4
Capítulo 2. Introducción.....	4
2.1. El sistema de señalización y la capacidad de transporte ferroviario	4
2.2. Líneas Ferroviarias. Tipos de líneas. Clasificación	5
2.3. Sistema de Señalización y protección de tren. Tipos.....	6
PARTE 2. PLANIFICACIÓN.....	9
Capítulo 1. Planificación de Tareas.....	9
PARTE 3. DESARROLLO	10
Capítulo 1. Capacidad de transporte	10
1.1. Definición de intervalo mínimo, capacidad de transporte e intervalo mínimo operativo	10
1.2. Influencias en la capacidad de transporte.....	12
1.2.1. Características del tren.....	12
1.2.2. Sistema de Señalización.....	12
1.2.3. Características de la línea	12
1.3. Capacidad e Intervalo mínimo en una línea con sistema de señalización ERTMS/ETCS Nivel 2.....	13
1.3.1. Intervalo Mínimo	13
1.3.2. Margen de reserva	14
1.3.3 Distancia de Frenado	15
1.3.4. Capacidad máxima.....	15
1.4. Capacidad e Intervalo mínimo en un punto singular con maniobras con sistema de señalización ERTMS/ETCS Nivel 2	16
1.4.1. Nomenclatura para las sucesiones de maniobras en puntos singulares	18
1.4.2. Determinación de la situación de los trenes para cálculos de intervalo	18
1.4.3. Definición del patrón, itinerarios y distribución de andenes	17
1.4.4. Puntos conflictos	19
Capítulo 2. Comportamiento Dinámico del tren.....	19
2.1. Introducción	19
2.2. Resistencia al avance del tren	20
2.3. Esfuerzo de tracción, adherencia	22
2.4. Distancia de Frenado	23
2.5. Cálculo del tiempo de viaje.....	24

2.5.1 aceleración	24
2.5.2 velocidad	25
2.5.3 tiempo	25
Capítulo 3. Estudio y Análisis de la Capacidad de una línea de alta velocidad equipada con Sistema de Señalización ERTMS nivel 2	25
3.1. Descripción y Problemática de la línea en estudio	26
3.1.1. Caracterización de la red sobre la que se realizará el estudio	26
3.1.2. Caracterización de la estación terminal donde se realizará el estudio	28
3.1.3. Caracterización del Sistema de Señalización de la línea en estudio.....	30
3.1.4. Análisis del comportamiento del tren que circula por la línea en estudio	30
3.1.5. Velocidad de recorrido del tren.....	31
3.1.6. Distancia de Frenado	33
3.1.7. Tiempo de recorrido	33
3.2. Estudio y análisis de la Capacidad de un tramo abierto representativo de la línea (en trayecto).....	34
3.2.1. Cálculo del Intervalo Mínimo.....	34
3.2.2. Resultado de la capacidad del tramo	37
3.3. Estudio y análisis de Capacidad de la estación terminal “L”	38
3.3.1. Caracterización sobre la explotación de la estación terminal	38
3.3.2. Cálculo de los intervalos mínimos de los itinerarios establecidos en el patrón	42
PARTE 4. CONCLUSIONES Y APORTACIONES.....	54
Capítulo 1. Resultados obtenidos.....	54
1.1. Determinación de la capacidad de la línea	54
1.2. Identificación de los puntos críticos de la línea	54
Capítulo 2. Propuestas de mejoras.....	55
Capítulo 3. Bibliografía.....	60
PARTE 5. ANEXOS	

PARTE 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Capítulo 1. Resumen

Este trabajo estudia la capacidad de transporte de una línea ferroviaria de alta velocidad equipada con sistema de señalización ERTMS nivel 2. Se realiza una descripción general de la línea, su problemática, así como el comportamiento del tren que circula por ella ya que son elementos que influyen directamente en la capacidad de transporte. El análisis de la capacidad se realiza primero en un tramo abierto representativo de la línea (trayecto entre estaciones) y luego en un punto singular de la línea considerado como el más desfavorable (estación terminal); el análisis del resultado de ambos estudios nos dará la capacidad de transporte de la línea considerado como el menor de los valores que resulte. Como punto final se dará unas indicaciones o recomendaciones para la mejora del intervalo o capacidad de transporte. Cabe mencionar que el análisis de capacidad de este proyecto considerará las características de la red, del sistema de señalización, del material rodante y del programa de explotación.

Chapter 1. Abstract

The purpose of this academic project is to research about the high speed railway transportation capacity, equipped with ERTMS signaling system level 2. First of all, it is been made a general description of the line and train performance, since those are elements that have a direct impact on the capacity of a railway lines. For this project the analysis of the capacity is divided is two parts. The first one analyses a representative opening stretch (along train stations) and the second part analyses the capacity in a singular point which is consider a unfavorable point (terminal station). As a result of both analysis, it will give us the right line capacity of transport, consider it as the less value of its outcome. The project will provide some recommendations to improve the capacity of transportation. It is important to mention that the analysis of capacity of this project considesr all the characteristics of the railway line, such as, signaling system, rolling stock and the operator's timetable.

Capítulo 2. Introducción

Este capítulo introduce el concepto de capacidad de transporte y su relación con el diseño de señalización de una línea, tipos de línea ferroviarias, tipos de señalización y protección de tren.

2.1. El sistema de señalización y la capacidad de transporte ferroviario

El diseño de la señalización de trenes de una línea no solo debe diseñarse para proporcionar la seguridad de la circulación de los trenes sino también para responder a las necesidades de

transporte del explotador, en número de trenes por hora, que se prevén que deben circular por esa línea.

Un sistema de señalización que permite una frecuencia alta de trenes tiene un coste mucho más elevado y por consiguiente será necesario seleccionar el tipo de sistema a instalar en función de la capacidad de transporte que se requiera. Es importante señalar que la solución más adecuada para una línea no tiene que ser la que técnicamente proporciona la máxima capacidad, sino la que técnicamente responda a las necesidades reales de transporte.

Es importante señalar que la capacidad de transporte medida en número de trenes por hora, es la característica más importante que determina el tipo de diseño del sistema ferroviario una vez que se ha garantizado la seguridad del sistema. Este requerimiento junto con el tiempo aceptable para el transporte entre dos puntos significativos, condiciona no sólo el tipo de equipo a instalar desde el punto de vista de señalización en su más amplio sentido, sino también, el trazado de las vías y las características del material rodante.

Por lo tanto, un adecuado estudio de capacidad de transporte previo es fundamental para el explotador ya que determina el diseño tanto desde el punto de vista de la infraestructura y sus instalaciones de seguridad como del material móvil.

En el caso de líneas ya en explotación, el estudio de capacidad ayuda a optimizar la capacidad actual mediante la identificación de puntos críticos de la línea y realizando propuestas de mejoras de la capacidad, en este proyecto se analiza la capacidad de transporte de una línea ya diseñada.

2.2. Líneas Ferroviarias. Tipos de líneas. Clasificación

Las necesidades, en cuanto a capacidad de transporte se refiere, dependen de muchos factores. Por una parte, de las propias características de la infraestructura: Obviamente no es lo mismo una línea de metro que una línea de largo recorrido. Tampoco puede tener el mismo tratamiento una línea subterránea con estaciones muy próximas, que un tramo en exterior que conecta poblaciones alejadas entre sí varios kilómetros, con trayectos en vía única o incluso con cruces a nivel con carreteras.

En función de sus características, podemos clasificar de manera general las líneas ferroviarias de la siguiente manera:

❖ **Líneas “Mass Transit” o Metropolitanas:** Se caracterizan por trazados con distancias cortas entre estaciones (entre 500 y 1000 m), todas ellas normalmente ubicadas en la misma población o núcleo urbano. Otra característica habitual es que su trazado discorra en túnel. Por otra parte, las velocidades máximas de operación son inferiores a los 100 km/h.

Son líneas con pocas o ninguna ramificación, de manera que los trenes siempre realizan el mismo recorrido. Por esta razón, se dice que los trenes circulan en modo “carrusel”. Ejemplos típicos de este tipo de línea son el Metro de Madrid ó el Metro de Barcelona.

Son las líneas con mayor exigencia en cuanto a intervalo, es decir, requieren una mayor proximidad entre trenes. Esto obliga a que, para que los trenes circulen con total seguridad, habitualmente se implanten en ellas Sistemas de Protección (ATP) y Conducción Automática (ATO) de altas prestaciones.

Si nos centramos en los Sistemas de ATP de tipo continuo, éstos se clasifican clásicamente de la siguiente forma, atendiendo a las prestaciones que proporcionan (de menor a mayor):

- Códigos de Velocidad
- Distancia Objetivo
- Cantón Móvil

❖ **Suburbanos o Líneas de Cercanías:** Se sitúan entre los dos tipos anteriores, ya que pueden presentar características comunes tanto a líneas “mass transit” como a líneas “main line”. Ejemplos típicos: Cercanías ADIF, FGC en Cataluña, FGV en Valencia.

❖ **Líneas “Main Line” o de largo recorrido:** A diferencia de las anteriores, constituyen trazados de una longitud muy superior, conectando diferentes poblaciones entre sí. Las velocidades máximas de circulación son siempre superiores a los 100 km/h. Pueden presentar ramificaciones, bifurcaciones o triángulos de conexión, de manera que los trenes que circulan por ellas realizan diferentes recorridos o “servicios” en función de las poblaciones y lugares que conectan. El ejemplo típico de este tipo de línea sería el ADIF, tanto en sus trazados de líneas convencionales, como en los de Alta Velocidad.

Las nuevas líneas de Alta Velocidad en España operan con señalización lateral disponiendo además de Sistemas de Protección de Tren de última generación (ERTMS niveles 1 y 2). Este es el tipo de línea que se considera en este proyecto.

2.3. Sistemas de Señalización y Protección de tren. Tipos

El objetivo fundamental de la señalización en el sector ferroviario es proporcionar seguridad al transporte de viajeros o mercancías y regular el tráfico ferroviario.

Los sistemas de señalización pasan desapercibidos para la mayoría de la gente. Surgieron casi al mismo tiempo que el ferrocarril, debido a la necesidad de controlar el movimiento de los trenes, saber dónde se encuentran en cada momento y autorizar su movimiento de manera segura.

Al principio se reducía simplemente a señales al pie de la vía. Estas señales fueron evolucionando desde banderas, pasando por señales mecánicas y por último señales eléctricas. Cuando las nuevas necesidades del transporte ferroviario crecieron (transporte de viajeros en el menor tiempo posible

entre dos ciudades y transportar el máximo número posible de viajeros en horas punta en las grandes ciudades) dieron lugar a la aparición y desarrollo de la señalización en cabina. Aparecieron los llamados sistemas ATP (Protección Automática de los Trenes) de información puntual y de supervisión continua.

Estos sistemas básicamente envían a través de balizas situadas en la vía, a pie de señal y en una posición previa a la señal (normalmente unos 300 m antes), la información correspondiente al aspecto de la señal en cada momento. Esta descripción por supuesto es muy general, y la complejidad y el nivel de supervisión al que han llegado los sistemas ATP's ha sido muy diferente dependiendo de las necesidades del área y de la inversión que se deseaba realizar, hasta que llego ERTMS.

Sistema de ATP en Europa

Hasta mediados de la década de los 90, gran parte de los ferrocarriles europeos habían funcionado de manera independiente, disponiendo de sus propios reglamentos de circulación, sus propios criterios de señalización, diferentes suministradores y diferentes sistemas de señalización.

Cada administración ferroviaria disponía de uno o varios sistemas ATP en su red. En total hay cerca de 15 sistemas diferentes que todavía hoy en día funcionan en Europa. Cada país puede tener varios sistemas de ATP en funcionamiento, lo que provoca que dependiendo de la ruta que recorra el tren necesite varios ATP's instalados en el mismo tren aumentando las probabilidades de error humano, alto coste de mantenimiento por el gran número de equipos en el tren, aumento en el tiempo de viaje y maniobras operacionales.

ERTMS forma parte de la estrategia de la Comunidad Europea para armonizar los sistemas de señalización ferroviaria. Nació con la idea de permitir que el tránsito de trenes en Europa fuese sencillo y seguro mediante el uso de un sistema ATP común. Es un producto de la industria ferroviaria europea, fruto de la colaboración de tanto las compañías ferroviarias como los suministradores.

ERTMS “Sistema de Gestión de Tráfico europeo”

Las siglas ERTMS corresponden a “European Railway Traffic Management System”, es decir “Sistema Europeo de Gestión del Tráfico Ferroviario”.

ERTMS introduce una nueva idea dentro de los sistemas de control de tráfico ferroviario, las comunicaciones continuas entre tren y vía a través de GSM-R (protocolo específico de comunicaciones ferroviarias basado en el estándar civil de comunicaciones GSM).

Los beneficios que se esperan del sistema de señalización ERTMS/ETCS se podrían listar:

- Aumentar la capacidad en líneas existentes y la capacidad de responder a las demandas crecientes del transporte: como sistema de señalización basado en comunicaciones continuas, ERTMS nivel 2 reduce la distancia entre trenes aumentando la capacidad en infraestructuras existentes
- Velocidades más altas: ERTMS permite llegar hasta velocidades de 500 km/h teóricos;
- Aumento índice de fiabilidad: ERTMS puede aumentar considerablemente los índices de fiabilidad y puntualidad, los cuales son cruciales tanto para transporte de pasajeros como de mercancías.
- Disminuir costes de fabricación y explotación: una vez probado, el sistema armonizado es fácil de instalar, mantener y fabricar haciendo a las compañías ferroviarias más competitivas.
- Reducir gastos de mantenimiento: con ERTMS nivel 2, la señalización lateral no es necesaria, lo cual reduce gastos de mantenimiento.
- Mercado abierto de suministradores: clientes podrán comprar equipos para instalar en cualquier fabricante de Europa. Cualquier suministrador debería poder acceder a cualquier mercado.
- Reducir proceso de ingeniería y por lo tanto tiempos de ejecución de contratos.
- Simplificar proceso de aprobación dentro de Europa una vez se haya pasado la fase inicial de conocimiento del sistema. Reducir gastos de certificación tradicionalmente asociados con la introducción de nuevos sistemas.
- Mejorar seguridad para pasajeros, empleados y transporte de mercancías.

La línea que se estudia en este proyecto esta implementada con el sistema de señalización ERTMS nivel 2.

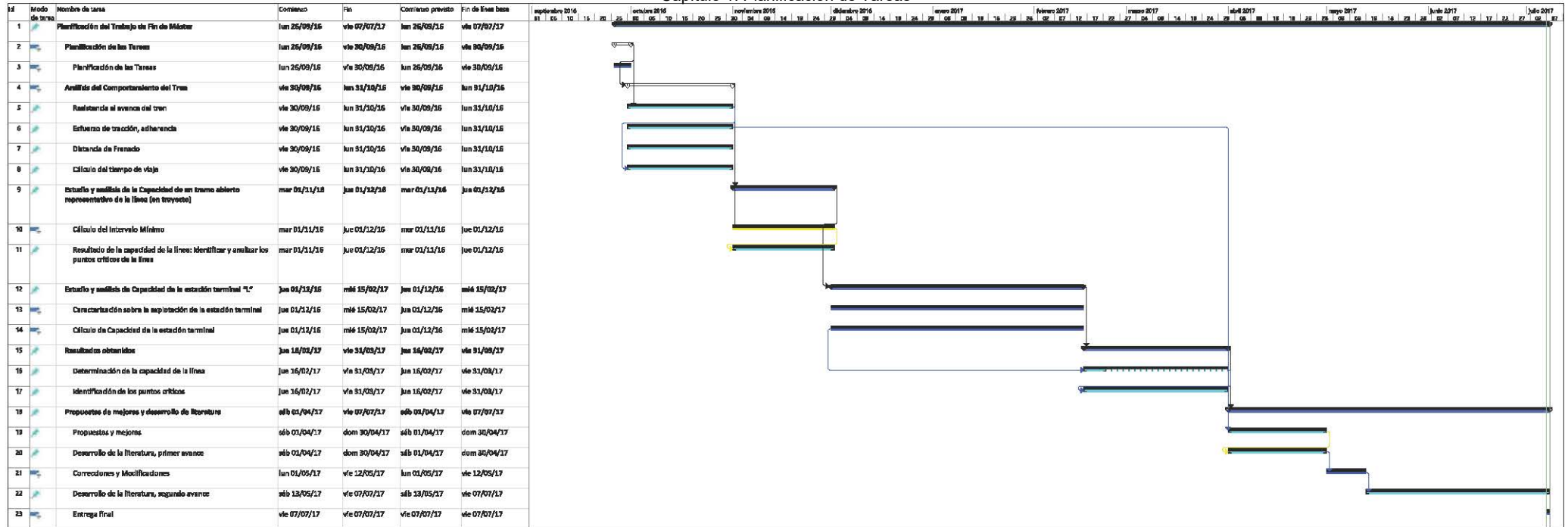
De las reflexiones anteriores se concluye que la capacidad de transporte depende directamente de los siguientes factores:

- De las características de los trenes que circulan por la línea.
- Del Sistema de Señalización – ATP: Señales laterales, ATP puntual, ATP continuo, etc.
- De las características de la línea.
- Programa de Explotación de la línea.

Estos factores se analizan de manera detallada en este proyecto.

PARTE 2. PLANIFICACIÓN

Capítulo 1. Planificación de Tareas



PARTE 3. DESARROLLO

Capítulo 1. Capacidad de transporte

Este capítulo define el intervalo mínimo y la capacidad de transporte de la línea. También se describe los principales factores que influyen en el análisis de la capacidad para luego centrarnos en las técnicas de estimación de capacidad en una línea y en los puntos singulares de la línea que se implementará en este proyecto, lo que permitirá conocer los puntos críticos donde actuar para mejorar la capacidad y obtener el intervalo mínimo posible en la línea.

1.1. Definición de intervalo mínimo, capacidad de transporte e intervalo mínimo operativo.

Dada la disparidad de nombres y definiciones del intervalo teórico mínimo existente en la literatura técnica, se ha elegido la propuesta en el curso del master universitario de sistemas ferroviarios.

Por lo cual se define el concepto de intervalo mínimo teórico, intervalo mínimo operativo y capacidad que se emplea en este proyecto:

- **Intervalo Mínimo:** La definición habitual de intervalo mínimo es la siguiente: “Tiempo mínimo que debe transcurrir entre circulaciones en un punto determinado de la línea, cumpliéndose además que la marcha del tren siguiente no se vea afectada por la marcha del primero”.

La definición anterior introduce una condición básica que siempre debe cumplirse: En su marcha el tren siguiente nunca debe verse obligado a disminuir su velocidad por las restricciones que imponga el tren precedente. Normalmente estas restricciones son, por ejemplo, que el tren encuentre a su paso señales laterales con aspectos restrictivos (amarillo, rojo) o recibir una autorización de movimiento (MA) indicando reducción de velocidad.

El intervalo puede considerarse como un concepto instantáneo o puntual ya que en cada punto de la línea puede existir un intervalo diferente. Cada punto de la línea o cada señal puede proporcionar un intervalo distinto, en este caso se determina que el intervalo mínimo de la línea corresponde con el máximo intervalo instantáneo (puntual) que existe en la línea.

Para determinar el intervalo mínimo es importante considerar los puntos singulares, tales como entradas en estaciones, vueltas en terminales al final de la línea, etc. que corresponden a los puntos en los que realmente queda limitado el intervalo y la capacidad de transporte en la línea pues es el punto de menor capacidad el que fija la capacidad de la línea en su conjunto. Este intervalo mínimo tiene en cuenta el tiempo de parada en las estaciones.

- **Capacidad de Transporte:** La capacidad de transporte se define como el número de trenes por hora circulando a la máxima velocidad que permite la línea por sus características constructivas sin que se vean

afectados por las condiciones de limitación de velocidad impuestas por el funcionamiento de la señalización. La señalización elegida influye en la capacidad de transporte de la línea. Así como el trazado y disposición de vías en las estaciones y en especial en las estaciones terminales.

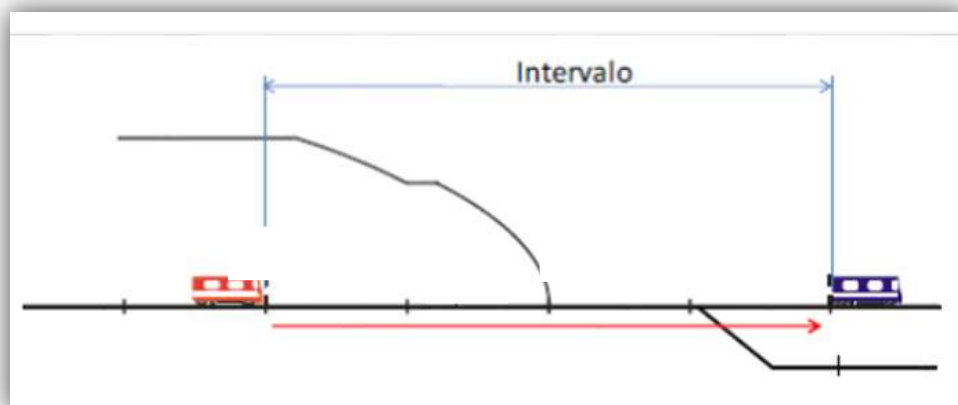
- Intervalo mínimo operativo. El Intervalo mínimo operativo es el intervalo mínimo más el margen (buffer time). El margen es el tiempo extra que se da para ajustar la malla e indican su robustez.

En este proyecto y para un mejor análisis del intervalo mínimo de la línea, se calcula el intervalo mínimo en el trayecto entre estaciones (sin considerar los puntos singulares) y por otro lado se realiza un análisis paralelo del intervalo mínimo en un punto singular considerado como más limitativo (estación terminal). Obteniendo de esta manera el intervalo mínimo máximo que equivale al mayor de los intervalos resultante analizados.

El intervalo mínimo en el trayecto entre estaciones se asemeja a una persecución pura de trenes, donde todos los trenes realizan siempre el mismo recorrido. En este proyecto se ha considerado el análisis de un tramo característico de la línea. El tramo que va de la estación terminal “L” hacia la siguiente estación más próxima (más detalle en el capítulo 3, parte 3).

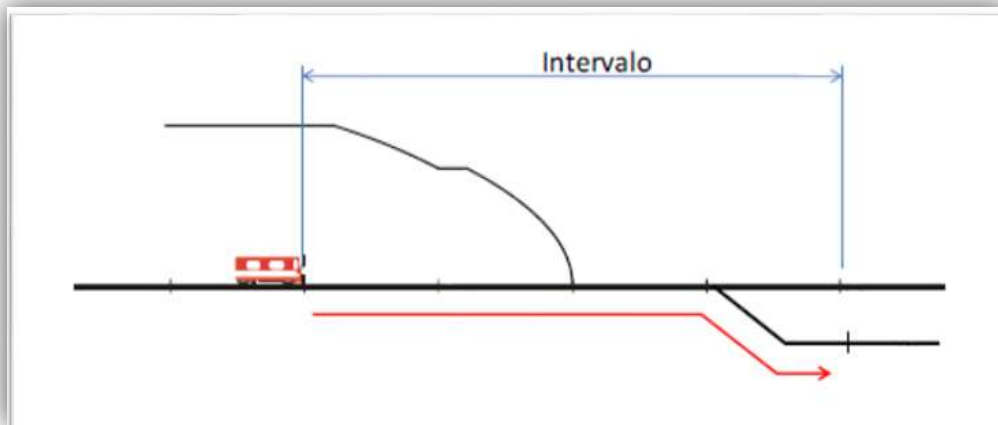
En el caso del intervalo mínimo en un punto singular de la línea para entender mejor este intervalo imaginemos dos trenes situados exactamente a distancia de intervalo en un punto determinado de la línea (ver figura 1). Como puede observarse en la figura, hemos elegido como punto de observación para el cálculo del intervalo el final del circuito de vía de agujas.

Figura 1



Ahora supongamos que el tren siguiente de color rojo, en realidad no pretende seguir al tren precedente (de color azul) sino que va a tomar la vía desviada en la bifurcación que se muestra esquemáticamente en la figura 2.

Figura 2



Para calcular este intervalo, a priori podríamos llegar a la conclusión de que su valor coincide con el intervalo anterior, pero hemos de tener en cuenta el factor que sobre dicho cálculo introduce la topología de la línea, ya que para que el tren siguiente no se vea afectado por la marcha del primero, considerando que va a tomar la ruta por vía desviada, el tren precedente ha de haber abandonado el circuito de vía de agujas (condición que debía también cumplirse a la hora de calcular el intervalo anterior) pero además habrá que considerar un tiempo adicional, el necesario para que el sistema (enclavamiento) desenclave la ruta a vía normal, la aguja se mueva a desviada y finalmente se establezca la nueva ruta. Por tanto, comprobamos que el valor del intervalo en este punto singular con paso por desviada es superior al que se daría un movimiento de persecución simple.

Por tanto, la existencia de puntos singulares, como por ejemplo agujas en terminales de línea, bifurcaciones o, en general, la necesidad de hacer pasos por directa/desviada sobre aparatos de vía influye directamente sobre el cálculo del intervalo y por consecuencia en la capacidad.

No podemos aplicar los mismos criterios para los intervalos sin paso por agujas (en trayecto entre estaciones) como para intervalos con pasos por agujas y/o itinerarios diferentes (servicios).

1.2 Influencias en la capacidad de transporte

Dentro de los factores que influyen en la capacidad de transporte que veremos en este proyecto están las características del material rodante (tracción y freno), el tipo de sistema de señalización, las características de la línea y tipo de explotación.

1.2.1. Características del tren

Este apartado se analizará con mayor detenimiento en el capítulo 4, en donde se define el tipo de tren utilizado en este proyecto y sus características.

1.2.2. Sistema de Señalización

Como se mencionó en la introducción existen diferentes tipos de señalización y protección de tren a nivel

europeo. En este proyecto en particular analizaremos la influencia del Sistema de Señalización ERTMS/ETCS nivel 2 en la capacidad de transporte.

- Influencia del ECTS/ERTMS en la capacidad

ETCS de nivel 1 es un sistema de control de trenes basado en transmisión de información puntual de la información necesaria para que el tren pueda realizar una supervisión continua de su movimiento. Las autoridades de movimiento se generan en vía y se transmiten al tren a través de Eurobalizas. Pueden colocarse Eurobalizas adicionales para transmitir la información previa y mejorar el intervalo práctico de la línea. En este caso, el sistema embarcado será capaz de mostrar nueva información al conductor tan pronto como esté disponible e incluso cuando el tren este parado.

ETCS nivel 2 es un sistema de control de tren basado en transmisión de radio. Las autoridades del movimiento se generan en la vía y se transmiten al tren a través de Euroradio. Se basan en Euroradio para la comunicación de vía a tren y en Eurobalizas como dispositivos de transmisión puntual principalmente como referencia de localización.

En el nivel 2, la sucesión entre trenes está determinada por la distancia de frenado de un tren al cantón ocupado por el tren que le precede, esta información se recibe desde el RBC vía radio al tren, la señalización lateral pasa a un segundo plano.

1.2.3. Características de la línea

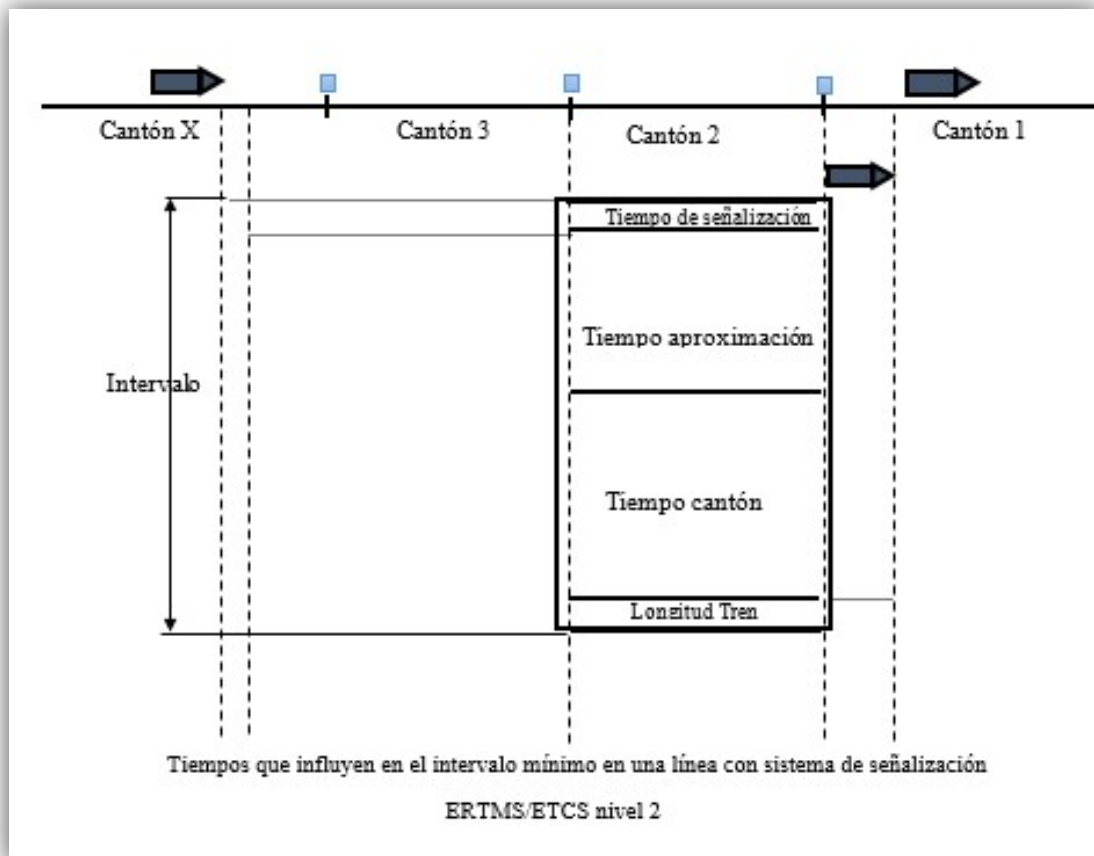
Como se mencionó en el capítulo 2 existen diferentes tipos de líneas, pero además del tipo de línea hay otros factores a considerar tanto para determinar el comportamiento del tren durante su recorrido como su explotación.

Estos factores son: Las velocidades máximas de la línea, perfil de la línea (gradiente, pendientes y radios de curvatura), tiras de señalización donde se identifica los elementos de la línea; así como el programa de explotación.

1.3. Capacidad e Intervalo mínimo en una línea con sistema de señalización ERTMS/ETCS Nivel 2

1.3.1. Intervalo Mínimo

Se ha dibujado con detalle todos los tiempos que influyen en el intervalo mínimo en una línea con sistema de señalización ERTMS/ETCS nivel 2, con el propósito de conocer bien el proceso.



Los tiempos que influyen en el intervalo son:

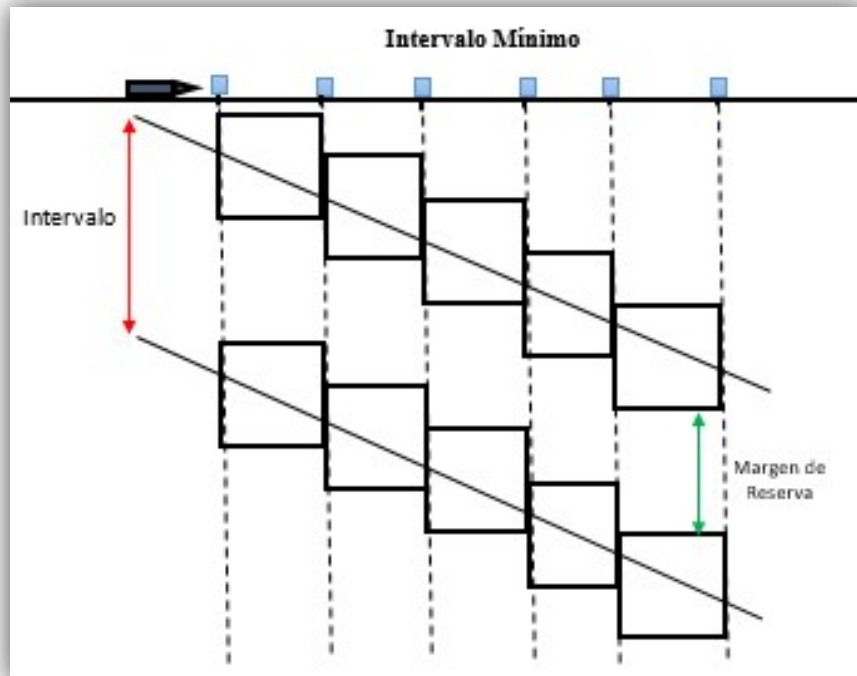
- Tiempo de señalización: es el tiempo que tardan los sistemas de señalización en actualizar la información cuando se alarga o modifica una ruta. Incluye el tiempo de establecimiento de ruta y procesado del enclavamiento.
- Tiempo de aproximación: En nivel 2, es determinada por la distancia de frenado de un tren al cantón ocupado del tren que le precede. En esta distancia de frenado es norma incorporar un factor de seguridad para tener en cuenta efectos difíciles de controlar como puede ser deslizamiento, distracciones, etc. Este factor de seguridad debe ser establecido en cada caso por la Autoridad Ferroviaria responsable de la explotación considerando tanto el comportamiento del tren como la posición de las señales.
- Tiempo del cantón: es el tiempo que tarda el tren en recorrer el último cantón. En nivel 2, se denomina como cantón a la distancia entre pantallas virtuales.
- Tiempo de tren: es el tiempo que tarda un tren en liberar el cantón anterior, es decir, desde que sale el morro del tren hasta que libera el cantón con la parte trasera del tren.

La suma de todos estos tiempos, dibujado sobre cada señal, da el intervalo que cada señal impone en la línea para ese tren.

1.3.2. Margen de Reserva

En el gráfico se ha representado el tiempo en cada señal virtual ocupado por dos trenes moviéndose a lo

largo de una línea. En este gráfico se puede ver el intervalo existente entre estos dos trenes representado en el dibujo en trazo rojo, así como el margen de reserva de tiempo entre trenes, representado en verde, esta reserva de tiempo es el máximo tiempo que se podría reducirse el intervalo y este tiempo es determinado por el operador.



1.3.3. Distancia de Frenado

Este apartado se analizará con mayor detenimiento en el capítulo 4.

1.3.4. Capacidad Máxima

La fórmula general usada para el cálculo de la capacidad ferroviaria en la mayoría de las bibliografías es la siguiente:

$$NM = \frac{\text{Entero } (TR)}{IL}$$

Donde:

NM: número máximo de trenes que se pueden introducir en la línea sin que se perturben.

TR: tiempo de recorrido o tiempo que tarda un tren en recorrer la línea completa

IL: es el mayor de los intervalos que se dan en una línea.

1.4. Capacidad e Intervalo mínimo en un punto singular con maniobras con sistema de señalización ERTMS/ETCS Nivel 2

Este tipo de intervalo aparece con frecuencia en líneas con nodos (bifurcaciones, cruces) de topología variada y compleja, donde no es posible resolver el cálculo del intervalo atendiendo exclusivamente a las prestaciones de cada sistema de explotación, puesto que la configuración de vías juega un papel fundamental como es el caso que tenemos en nuestro proyecto.

Hasta ahora hemos puesto como ejemplo una secuencia de maniobras relativamente sencilla, la correspondiente a una bifurcación en la que el tren precedente toma la ruta normal y el tren siguiente la ruta a desviada. Pero en función de la naturaleza de la topología del nudo, las secuencias de maniobras pueden ser mucho más complejas. De hecho, éstas no tienen por qué obedecer a movimientos en el mismo sentido de marcha. Este tipo de maniobras pueden darse por ejemplo en nodos y bifurcaciones donde las vías se superponen (los movimientos sobre esta topología suelen denominarse cizallamientos).

En conclusión, para calcular este tipo de intervalos es necesario estudiar en profundidad cada nodo de forma particularizada como es el caso del proyecto que nos ocupa, analizando la operativa del mismo.

1.4.1. Nomenclatura para las sucesiones de maniobras en puntos singulares

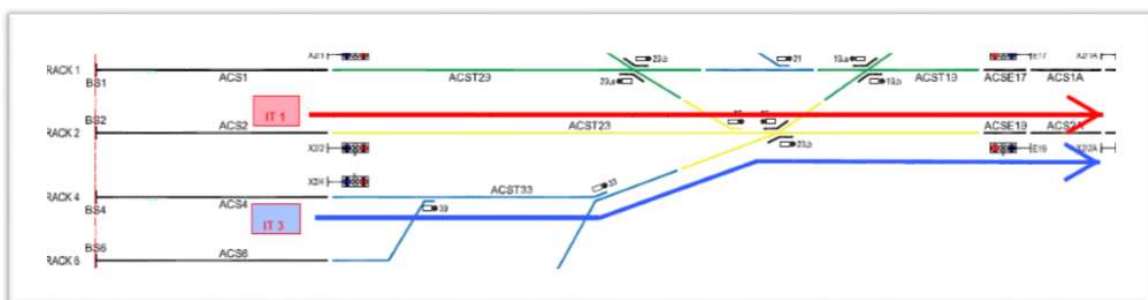
Al objeto de identificar de forma clara las diferentes sucesiones de movimientos que pueden realizarse en un determinado nodo de topología compleja, se ha determinado su estandarización y clasificación en los siguientes tipos de intervalos:

- Intervalo Salida – Salida
- Intervalo Salida – Llegada
- Intervalo Llegada – Salida
- Intervalo Llegada – Llegada

Su identificación y cálculo permiten posteriormente calcular la capacidad máxima del nodo, de forma aislada del resto de la instalación. A continuación, se procede a describir cada uno de los tipos de intervalos.

- Intervalo Salida – Salida

El intervalo Salida – Salida es el tiempo que transcurre desde que el primer tren sale de la estación hasta que un segundo tren puede salir en condiciones de marcha no perturbada, es decir, sin restricciones. Por ejemplo, salida del itinerario 1- salida del itinerario 3 como se muestra en el siguiente gráfico.

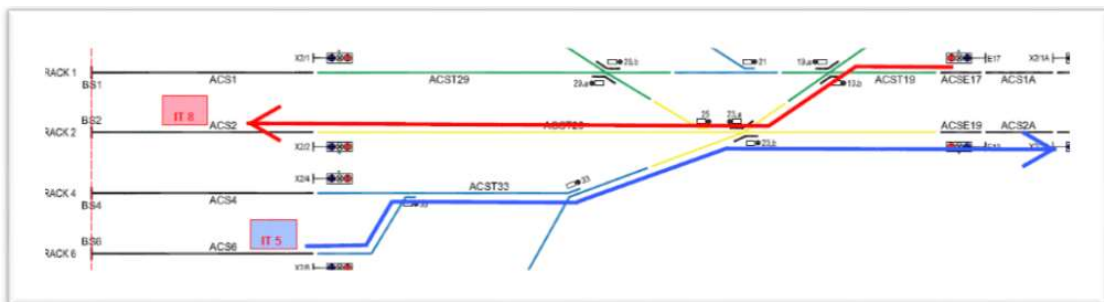


- Intervalo Salida – Llegada

El intervalo Salida – Llegada se corresponde con una suma de tiempos, y el proceso de cálculo sería el siguiente:

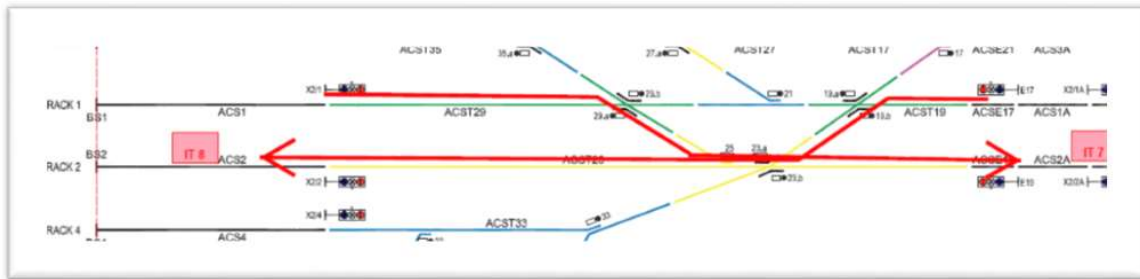
- Primeramente, se necesita calcular el tiempo que debe transcurrir desde que un primer tren sale de la estación hasta que provoca un evento tal (normalmente la liberación de un determinado punto de la vía) que permite al segundo tren efectuar la maniobra de entrada a la estación (Ta)
- En segundo lugar, hay que determinar dónde se situaría el segundo tren para no verse perturbado por el primero cuando se sitúa un instante antes de liberar el punto que provoca el evento anterior.
- A continuación, hay que considerar los tiempos totales que pudiera requerir el sistema para el establecimiento de la nueva ruta de entrada a la estación (tiempo de desenclavamiento, tiempo de movimiento de agujas y tiempo de establecimiento del itinerario de entrada, Tb)
- Finalmente hay que calcular el tiempo de recorrido del movimiento de llegada del segundo tren desde su punto de “no perturbación”, punto desde el cual la ruta de entrada queda enclavada, distancia del enclavamiento de proximidad, hasta su detención en el estacionamiento (Tc)

En definitiva, el valor total para el intervalo salida – llegada sería la suma $Ta+Tb+Tc$. Como en el caso anterior, la salida y la entrada pueden corresponder a diferentes vías, dependiendo de la topología del nudo. Por ejemplo, salida del itinerario 5- salida del itinerario 8 como se muestra en el siguiente gráfico.



- Intervalo Llegada – Salida

El intervalo Llegada – Salida también está formado básicamente por dos tiempos, aunque en este caso sus valores deben restarse. De hecho, el resultado es siempre un número negativo. Da idea del momento en que puede salir el tren siguiente de la estación y vía correspondiente, antes de que el primer tren llegue y se detenga. Ese tiempo de recorrido (con signo negativo) del primer tren desde que libera el punto singular de incompatibilidad hasta parar en la estación y vía correspondiente es por tanto el intervalo llegada – salida. Por ejemplo, llegada del itinerario 8- salida del itinerario 7 como se muestra en el siguiente gráfico.



- Intervalo Llegada – Llegada

El intervalo Llegada – Llegada también está formado por tiempos que se restan entre sí. Para su obtención primeramente se calcula el tiempo del tren siguiente en recorrer, desde el punto de “no perturbación” con respecto al punto singular de incompatibilidad, hasta detenerse en la estación y vía correspondiente, y a este valor se le resta el tiempo del primer tren desde que libera el punto singular de incompatibilidad hasta parar en la estación y vía correspondiente.

Normalmente además de los tiempos anteriores hay que considerar los tiempos de desenclavamiento, movimiento de agujas y establecimiento del nuevo itinerario que ha de invertir del sistema de señalización.

1.4.2. Determinación de la situación de los trenes para cálculos de intervalo

Una vez descritos los diferentes intervalos de seguimiento que hemos estandarizado, vamos a identificar los pasos que han de seguirse para determinar la posición que ocupan los trenes en el estudio de una determinada maniobra, dado que este aspecto es clave para calcular los tiempos de forma correcta.

- Por una parte, es necesario analizar e identificar correctamente los itinerarios de enclavamiento que intervienen en esa maniobra.
- Por otra parte, se requiere también analizar e identificar el punto de “no perturbación”, normalmente un circuito de vía que presenta un código “máximo” con respecto a la ubicación del punto que presenta la restricción (una incompatibilidad, o la posición del tren precedente)

Como documentos soporte se deberán utilizar fundamentalmente los cuadros de servicio de enclavamiento, los cuales normalmente proporcionan información acerca de incompatibilidades de itinerarios, así como de condiciones de apertura de señales para los diferentes aspectos. Este documento puede complementarse, además, en el caso de que la instalación este dotada de un sistema de protección, con los cuadros de servicio de ATP, que proporcionan información sobre los códigos de ATP y las diferentes escaleras de reducción (lógica de ATP) programadas en la instalación.

1.4.3. Definición del patrón, itinerarios y distribución de andenes

Establecer o identificar un **patrón** de comportamiento de los trenes de la estación es un punto clave para

el inicio del análisis ya que nos determina un orden de salidas y entradas de las circulaciones de los diferentes servicios.

Los **itinerarios** establecerán los recorridos que tomará cada tren tanto para su ingreso como para la salida. Otro punto importante a definir y establecer es la **distribución** de los trenes en los andenes tanto para agilizar la próxima salida de dichos trenes como para establecer un andén fijo desde el punto de vista del pasajero; además una óptima distribución de trenes en los andenes nos permitirá requerir de una menor flota de trenes.

El explotador definirá el tiempo que requiere un tren para el proceso de embarque y desembarque de pasajeros como para el proceso de limpieza del mismo antes de su próxima salida. Este tiempo es importante que sea lo menor posible ya que de esta manera se genera mayor fluidez en el re-uso de los trenes y se reduce la flota de trenes.

1.4.4. Puntos conflictivos

Una vez definido el patrón, los itinerarios y la distribución de los trenes en los andenes, se identificarán los itinerarios compatibles y no compatibles. Los itinerarios no compatibles nos ayudan a identificar los puntos conflictivos del punto singular.

Capítulo 2: Comportamiento y análisis del Tren. Tiempos y Distancias

Como ya se ha indicado en los capítulos precedentes, el comportamiento dinámico del tren tiene una influencia importante en la capacidad de transporte de una línea. En este capítulo analizaremos el comportamiento del tren, los tiempos de recorrido, así como su distancia de frenado considerando los valores especificados en las ETI de material rodante y se analizará la influencia que juega estos valores en la capacidad de la línea en su conjunto.

2.1. Introducción

En este capítulo se va a analizar la dinámica longitudinal del tren, es decir, el movimiento del tren en la dirección de la vía y las fuerzas (aceleradoras o retardadoras) que inciden sobre ese movimiento.

La dinámica longitudinal del tren es un campo de estudio básico para la explotación ferroviaria, puesto que en ella se basan aspectos tan relevantes como el cálculo de los tiempos de viaje, de los consumos de energía del tren, determinación de las cargas máximas, etc.

Fuerzas que actúan sobre el tren

Sobre un tren pueden actuar en un momento determinado muchas y muy diferentes fuerzas longitudinales: unas son independientes de la acción del propio tren (fuerza de gravedad, efecto del aire); mientras que otras son producidas por una acción en el tren (como las fuerzas de tracción y defrenado). Estas fuerzas provocan una aceleración sobre la masa del tren que hace que este se mueva y avance sobre la vía.

Rampas y pendientes. - En los tramos en los que la vía no es horizontal, es decir, donde tiene una inclinación, esta se considera de signo positivo y se denomina “rampa” cuando la vía aumenta su altitud en el sentido de la marcha del tren. Por el contrario, se considera negativa y se denomina “pendiente” cuando la vía disminuye su altitud al recorrerla en el sentido de la marcha del tren. Las inclinaciones en la dinámica ferroviaria suelen medirse en tanto por mil (“milésimas”).

Fuerzas longitudinales. - Las fuerzas que actúan longitudinalmente sobre el tren son de dos tipos:

- *Fuerzas pasivas*: que son aquellas que soporta el tren sin que el mismo realice ninguna acción especial. Son fuerzas pasivas la *resistencia al avance* (en recta y en curva) y la fuerza gravitatoria.

- *Fuerzas activas* son aquellas que se derivan de acciones del propio tren; en concreto, son las fuerzas de tracción y frenado.

Se denomina *resistencia al avance* a la resultante de las fuerzas que se oponen al movimiento del tren en la dirección longitudinal de la vía, diferentes de las gravitatorias y de las fuerzas de tracción y frenado. La *resistencia al avance* es siempre una fuerza de valor negativo (se opone al movimiento del tren).

Además de la *resistencia al avance*, es preciso tener en cuenta el efecto de la fuerza de la gravedad, que actúa sobre el tren en las pendientes (tiene signo positivo, pues es a favor del movimiento) y en las rampas (de signo negativo, pues se opone al movimiento).

También actúan sobre el tren en sentido longitudinal las *fuerzas activas* de tracción (a favor del movimiento) y de freno (oponiéndose al movimiento), que se realizan desde el propio tren.

2.2. Resistencia al avance del Tren

Resistencia al avance en recta

El valor de la resistencia al avance en recta depende de características físicas del tren; en concreto, de su masa, de su forma, del área de su sección transversal y de su superficie mojada (que a su vez está muy influenciada por su longitud). La resistencia al avance también depende, y de forma muy importante, de la velocidad a la que circula.

La resistencia al avance suele expresarse con una función polinómica de segundo grado que relaciona, para cada tren, la resistencia en avance en recta con la velocidad instantánea.

La expresión polinómica más habitual de la resistencia al avance de un tren es la siguiente:

$$R_{recta} = A + B \cdot v + C \cdot v^2$$

Donde:

- R_{recta} es la resistencia al avance en recta, que se expresa normalmente en decanewtons [daN]. Será siempre de valor negativo, pues se opone al movimiento del tren y tiene sentido contrario a la velocidad V .

- V es la velocidad del tren, expresada normalmente en kilómetros por hora [km/h].

- A , B y C son coeficientes que dependen de las características físicas del material rodante, que se miden, respectivamente, en [daN], [daN/(km/h)] y [daN/(km/h)²].

A , B y C son los coeficientes específicos de la resistencia al avance. La v es la velocidad del tren.

Resistencia al avance debido a la curva

En el caso de que la vía no esté en alineación recta en un punto determinado, la resistencia al avance en recta (R_{recta}) es solo una componente de la *resistencia al avance total* que debe sumarse a la *resistencia al avance* debido a la curva.

La resistencia debido a la curva puede ser obtenida mediante la siguiente ecuación:

$$R_{curva} = m \cdot g \cdot \frac{800}{R}, \text{ para vía de ancho 1668 mm}$$

$$R_{curva} = m \cdot g \cdot \frac{600}{R}, \text{ para vía de ancho 1435 mm}$$

Donde:

- R_{curva} es la resistencia al avance debida a la curva en daN.
- R es el radio de la curva, en m.
- m es la masa del tren, en t.

Para este proyecto se adoptará el valor correspondiente a la vía de 1.435mm, por ser esta la empleada en las líneas de alta velocidad.

Resistencia total al avance

En virtud de lo expuesto anteriormente, la resistencia al avance total de un tren (que circula a velocidad de V km/h) se compone de la *resistencia al avance en horizontal y en recta*, más la resistencia al avance en curva. La primera, a su vez, es diferente a cielo abierto y en túnel (en este proyecto no hay túneles), y varía con la velocidad y trayectoria del viento. En cada instante es, por lo tanto:

$$R_{total} = \left(A + B \cdot v + C \cdot v^2 \right) + \left(m \cdot g \cdot \frac{600}{R} \right)$$

Resistencia gravitatoria al avance

La fuerza de la gravedad terrestre disminuye (en las pendientes) o aumenta (en las rampas) la resistencia al avance. El valor de esta resistencia adicional es el resultante de formula siguiente:

$$R_{ag} = m \cdot g \cdot i$$

Donde:

- R_{ag} es la resistencia al avance debida a la fuerza de la gravedad en decanewtons [daN]. Puede ser positiva o negativa según sea el signo de i .
- g es la aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)
- M es la masa del tren, en toneladas [t].

- i es la inclinación local expresada en “milésimas” o milímetros por metro (mm/m). Puede tener valor positivo si es una subida (rampa) o negativo si se trata de una bajada (pendiente).

2.3. Esfuerzo de tracción, adherencia

Esfuerzo de tracción

Esta curva es variable en función de la velocidad. Al ser los motores del tren motores de corriente alterna controlados por convertidores de frecuencia y tensión, la curva resultante de par de velocidad presenta unas características convencionales de los sistemas de tracción.

Esta fuerza es *moderable*, ya que el maquinista (o el sistema de conducción automático) puede aplicar la fuerza máxima disponible o un valor menor, para adecuar la velocidad del tren a las necesidades de la marcha.

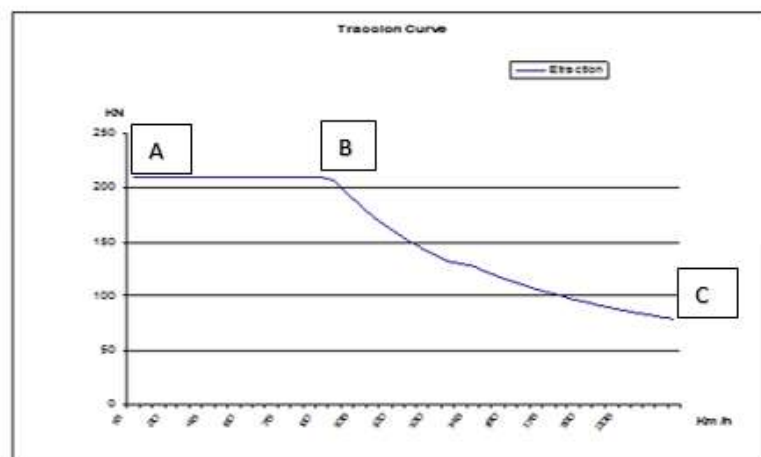
El *esfuerzo de tracción* es diferente para cada vehículo motor. El esfuerzo está muy ligado a la potencia disponible del vehículo, pero la forma de las curvas que relacionan el esfuerzo máximo de tracción con la velocidad viene muy condicionada por el tipo de vehículo motor (tracción eléctrica o diésel) y su sistema de control de la marcha.

Así la curva del esfuerzo real de tracción se obtiene de la conjunción de tres curvas: Curva de fuerza máxima de tracción, esfuerzo de potencia constante y curva de adherencia.

De la siguiente figura, la parte A-B corresponde al tramo horizontal que es limitado por el esfuerzo de la adherencia y el par de motores. La parte B-C corresponde a la potencia.

$$P = Ft \times v$$

Donde P es potencia, Ft es esfuerzo de tracción y v es velocidad



Adherencia

Cuando el par motor sobre una rueda es muy alto, y en concreto, cuando es superior al par resistente, la rueda desliza o patina sobre el carril. La adherencia de la rueda sobre el carril es más grande cuanto mayor sea la masa que apoya sobre la rueda motriz, que se denomina masa adherente. Existe un cierto límite del

par motor (y correlativamente del esfuerzo de tracción y frenado) a partir del cual la rueda desliza (patina); este el esfuerzo de tracción es una fracción de la masa adherente (M_{adh}):

$$E_{tmax} = M_{adh} \times g \times \mu$$

Donde μ es el coeficiente de adherencia ($\mu < 1$)

$$\mu = \frac{7.5}{44 + 3.6 \cdot v} + 0.161$$

Hay muchas teorías y estudios en el cálculo del coeficiente de adherencia, pero todos ellos llegan a la conclusión que el coeficiente de adherencia decrece con el incremento de velocidad. Aunque el estado de la vía (mojado, seca, sucia, etc) tiene una gran influencia en este coeficiente. Entre las diferentes leyes de adherencia disponibles en literaturas especializadas (la siguiente figura representa tres de ellas). Este factor tiene un papel muy importante en el comportamiento de los trenes de alta velocidad ya que a velocidades muy altas el factor de adherencia es muy bajo, limitando no solo la capacidad real de tracción sino, lo que puede ser más importante, la capacidad de frenado de los trenes de alta velocidad.

En concreto, a fin de asegurar una disponibilidad de tracción elevada, la ETI exige no superar los valores de adherencia que se indican a continuación:

- En arranque y a muy baja velocidad: 25 %
- A 100 km/h: 25 %,
- A 200 km/h: 17,5 %,
- A 300 km/h: 10 %.

Para el frenado, según la ETI, la demanda máxima del *coeficiente de adherencia* no deberá superar los valores siguientes:

- Entre 50 y 200 km/h: 0,15;
- Por encima de esta velocidad decrece linealmente hasta el valor de 0,10 a 350 km/h.

2.4. Distancia de Frenado

La distancia de frenado es calculada desde la velocidad nominal hasta llegar a 0km/h, usando el freno de servicio. Estas distancias de frenado son calculadas de acuerdo a las características de frenado del tren cumpliendo con las TSI de material rodante. Por lo tanto, el documento de las TSI será de referencia para el cálculo.

Formula General para el cálculo de distancia de frenado

Stopping distances: the stopping distance 'S' calculated as a function of the minimum decelerations defined above can be defined by using the formula:

$$S = V_0 \times t_e + \frac{V_0^2 - V_1^2}{2ab_1} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2ab_2} + \dots + \frac{V_n^2}{2ab_n}$$

where: V_0 = initial speed (measured in m/s)

$V_1 \dots V_n$ = speed given in Table 4.1.5c (measured in m/s)

$ab_1 \dots ab_n$ = specified deceleration over the speed band under consideration (measured in m/s^2)

t_e = equivalent time of application (measured in s)

Valores de deceleración de la ETI de material rodante

Table 8

Minimum mean deceleration levels for service braking

Braking mode	t_e	Minimum mean deceleration measured between end of t_e and reaching the target speed [m/s^2]			
	[s]	350-300 (km/h)	300-230 (km/h)	230-170 (km/h)	170-0 (km/h)
Service braking	2	0,30	0,35	0,6	0,6

t_e [s] = Equivalent time of application

2.5. Cálculo del Tiempo de viaje

El tiempo de viaje es calculado de la siguiente manera:

- La velocidad de un tren puede ser calculado en cada punto de la línea obteniendo su aceleración.
- Conociendo la velocidad del tren en cada punto de la línea, podemos determinar el tiempo que el tren necesita para viajar de un punto a otro. El tiempo, la velocidad y aceleración están relacionadas a través de las ecuaciones básicas de la cinemática.
- Para calcular la aceleración en cada punto, se toman en cuenta de manera separada el proceso de aceleración y de frenado. El valor de la aceleración mientras se acelera es obviamente positivo y es obtenido mediante la resta del esfuerzo de tracción y las resistencias del avance.
- El esfuerzo de tracción es lo mínimo entre la hipérbola de la potencia constante y el máximo esfuerzo tractor del tren.
- Cuando el tren haya alcanzado la velocidad máxima en una sección de la línea, la aceleración es cero.

2.5.1. Aceleración

La aceleración se calculará en función de la resistencia del avance (R_{total}), esfuerzo de tracción (F_t), masa equivalente (M_{eq}) y gradiente de la línea en cada punto, como se detalla en la siguiente formula:

$$a = \frac{F_t + M \times g \times p - F_f - M \times g \times r - A - B \times V - C \times T_f \times V^2 - M \times \frac{600}{R}}{M_{eq}}$$

Donde:

- a es la aceleración resultante.
- F_t y F_f es el esfuerzo de tracción y frenado, respectivamente.
- $(M \times g \times p)$ y $(M \times g \times r)$ representa la resistencia al avance de pendiente y rampa como ya se ha indicado en el punto 2.2.
- $R_{recta} = A + B \cdot v + C \cdot v^2$, es la resistencia en recta. Según el punto 2.2.
- $R_{curva} = m \cdot g \cdot \frac{600}{R}$, es la resistencia en curva.
- M_{eq} es la masa equivalente y M es la masa.

La máxima aceleración del tren es calculada cuando la velocidad es igual a 0 ($t=0$).

2.5.2. Velocidad

La velocidad en ($\frac{km}{h}$) es calculada como en cada punto de la línea:

$$V_o = \sqrt{(V_i)^2 + 2 \cdot a \cdot s}$$

Si la velocidad actual es menor que la velocidad máxima permitida y velocidad de frenado. Entonces el tren está usando su fuerza de tracción como fuerza total.

Si la velocidad actual es mayor a la velocidad permitida y la velocidad de frenado. Entonces el tren está usando su fuerza de frenado como fuerza total, por lo tanto, la aceleración será un valor negativo, lo que significa que estará decelerando.

2.5.3. Tiempo

El tiempo de recorrido del tren es calculada empleando la siguiente formula:

$$s = v \cdot t + 1/2 a \cdot t^2$$

Capítulo 3. Estudio y Análisis de la Capacidad de una línea de alta velocidad equipada con Sistema de Señalización ERTMS nivel 2

Este capítulo estudia la capacidad de transporte de una línea ferroviaria de alta velocidad equipada con sistema de señalización ERTMS nivel 2. Se realiza una descripción general de la línea, su problemática, así como el comportamiento del tren que circula por ella ya que son elementos que influyen directamente en la capacidad de transporte. El análisis de la capacidad se realiza primero en un tramo abierto representativo de la línea (trayecto entre estaciones) y luego en un punto singular de la línea considerado como el más desfavorable (estación terminal); el análisis del resultado de ambos estudios nos dará la capacidad de transporte de la línea considerado como el menor de los valores que resulte. Como punto final se dará unas indicaciones o recomendaciones para la mejora del intervalo o capacidad de transporte.

Cabe mencionar que el análisis de capacidad de este proyecto considerará las características de la red, del sistema de señalización, del material rodante y del programa de explotación.

3.1. Descripción y problemática de la línea en estudio

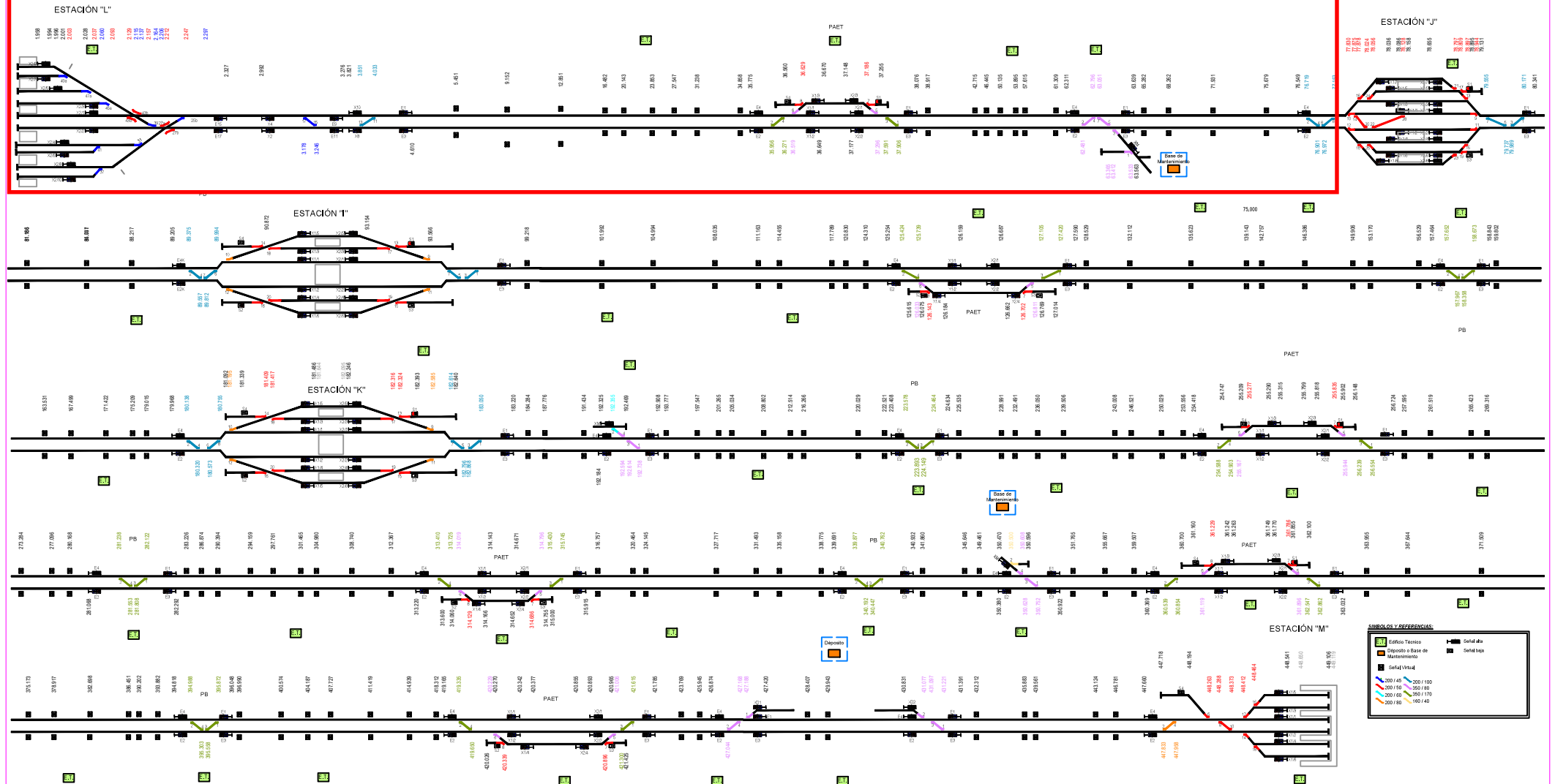
3.1.1. Caracterización de la red sobre la que se realiza el estudio

La línea en estudio es una línea de alta velocidad de aproximadamente 400 kilómetros de longitud que cuenta con tres estaciones intermedias y dos estaciones terminales.

Es una línea de vía doble banalizada, es decir los trenes pueden circular por las vías principales en ambos sentidos, de ancho UIC 1435 mm, además a lo largo de la línea se ubican diversos puestos de adelantamiento y estacionamiento de trenes (PAET) y puestos de banalización (PBA) que mejora la entrada y salida de los trenes a las dos vías y que se utilizan principalmente en caso de una incidencia en la línea o para servicio de viajero y por consiguiente no influye en la capacidad de transporte y por lo tanto en el estudio detallado no se tendrá en cuenta.

A continuación, se muestra un esquema general de la línea:

Estación y Tramo de estudio



3.1.2. Caracterización de la estación terminal donde se realizará el estudio

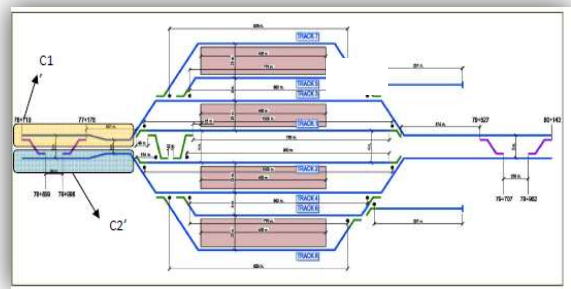
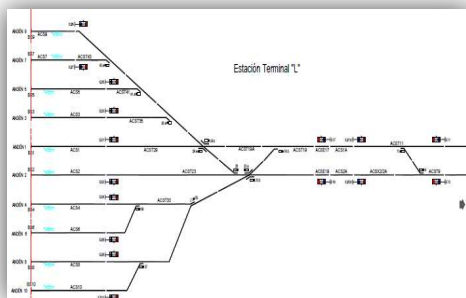
Las estaciones son diseñadas con el objetivo de obtener la máxima flexibilidad durante las operaciones de entradas, salidas y maniobras. La línea en estudio cuenta con cinco estaciones: dos estaciones terminales y tres estaciones intermedias. Cada una de las estaciones cuenta con una tipología y necesidades de explotación distinta.

- a) La estación terminal “L”: cuenta con diez andenes, brinda tres tipos de servicios y un total de seis circulaciones por hora. Esta estación terminal se ha considerado la más problemática desde el punto de vista del flujo de entrada y salida de trenes, debido al trazado convencional con que está diseñada. En esta estación entran seis trenes a la hora y salen seis trenes lo que supone un intervalo de 10 minutos entre trenes.
- b) La estación “J”: cuenta con ocho andenes, brinda tres tipos de servicios y un total de seis circulaciones por hora. A pesar de tener un flujo de trenes igual a la estación “L” no se ha considerado crítica por la disposición de entradas y salidas de los trenes.
- c) La estación “I”: cuenta con seis andenes, brinda dos tipos de servicios y un total de tres circulaciones por hora.
- d) La estación “K”: cuenta con seis andenes, brinda dos tipos de servicios y un total de dos circulaciones por hora.
- e) La estación “M”: cuenta con seis andenes, brinda dos tipos de servicios y un total de dos circulaciones por hora.

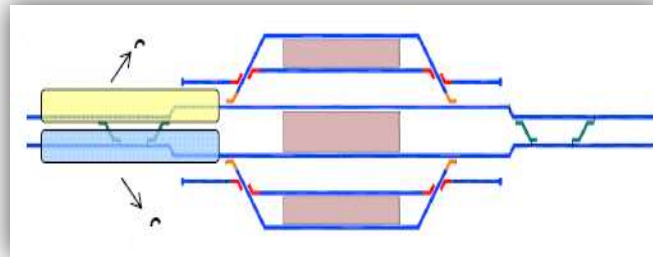
Vista esquemática de las estaciones a lo largo de la línea:



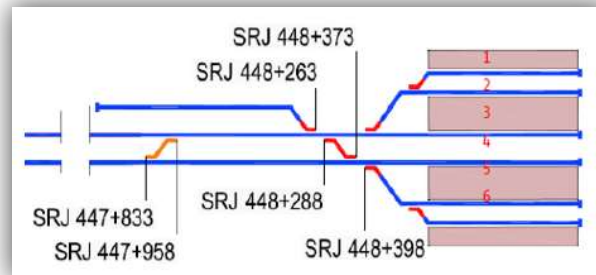
Esquema representativo de la Estación terminal “L” Esquema representativo de la Estación intermedia “J”



Esquema representativo de las Estaciones intermedias “I” y “K”, tipología similar



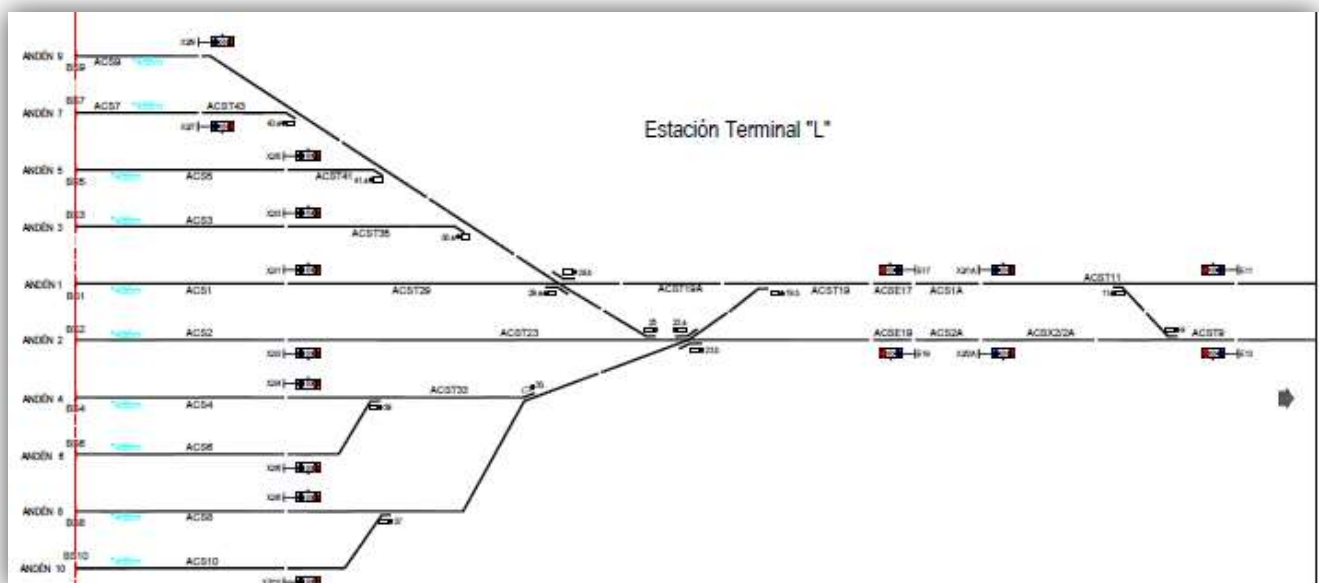
Esquema representativo de la Estación terminal “M”



Como se ha descrito anteriormente se ha tomado como estación de referencia la **estación terminal “L”** debido a que es la estación más compleja de la línea ya que soporta el mayor número de servicios y circulaciones por hora y, al ser una estación terminal es un punto crítico de entrada y salidas de trenes por hora.

A continuación, se muestra un esquema de la estación terminal “L”: en el esquema se aprecia la distribución de los andenes, la ubicación de las señales laterales, los cantones y los aparatos de vía.

Esquema de la Estación Terminal “L”



3.1.3. Caracterización del Sistema de Señalización de la línea en estudio

El subsistema de señalización de la línea en estudio cuenta con el sistema ERTMS/ETCS nivel 2, y se basa en la información proporcionada por el enclavamiento para detectar la presencia del tren en una sección de vía, usando la red de radio GSM-R para intercambiar mensajes entre el RBC y el equipo de a bordo. El subsistema ERTMS/ETCS debe permitir circular a 320 km/h (velocidad a la cual está diseñada) o a la máxima velocidad permitida por la geometría de la línea, en dirección normal y reversa. Aunque la velocidad de operación final es definida por el operador y para este proyecto se ha considerado una velocidad de operación máxima de 300 km/h.

Las eurobalizas se utilizan como puntos de referencia para la localización del tren permitiendo la calibración del sistema de odometría del equipo a bordo. Además, se puede utilizar para otros usos, incluyendo, pero no limitado para las transiciones de nivel o handover entre RBC's.

Específicamente, los grupos de balizas (BG) se instalarán con el fin de minimizar el error de odometría ante lugares de parada para el nivel 2.

Dentro de los criterios para la ubicación de las eurobalizas y señales virtuales se considera los siguientes puntos:

- El tren debe recibir información de localización cada 1500 metros como máximo mediante la eurobaliza.
- Se instalará una eurobaliza antes de cada señal virtual (250 metros antes de cada señal virtual).
- Cada señal virtual de nivel 2 deberá ser ubicada en el límite de dos secciones consecutivas.
- La longitud de las secciones de los cantones será de 4000 metros como máximo.

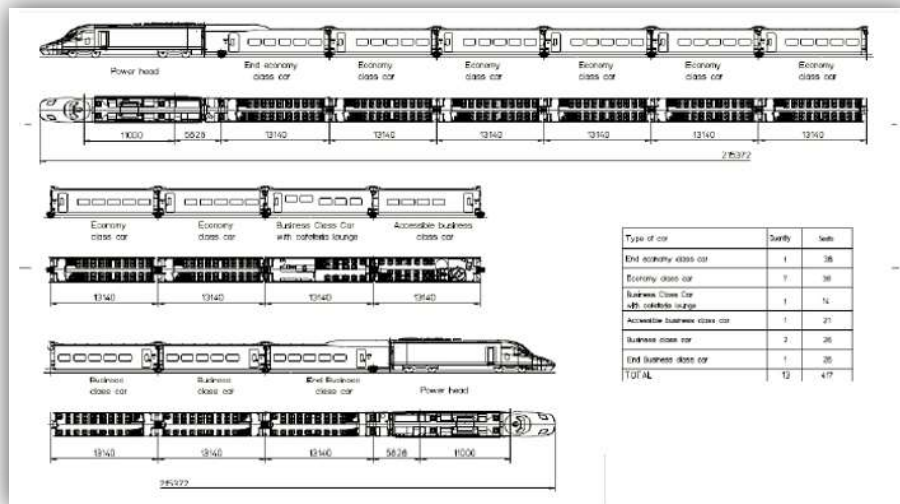
3.1.4. Análisis del comportamiento del tren que circula por la línea en estudio

En este proyecto se considera que por la línea circula solo trenes homogéneos, con las mismas características de aceleración y de frenado, de la misma longitud, 215 metros y la misma velocidad máxima de circulación para toda la flota de trenes (300km/h). Estas características uniformes asemejan esta línea a líneas tipo metropolitanas lo cual hace suponer que la capacidad de circulación de trenes se puede incrementar sensiblemente siempre que el trazado de las vías y disposición de andenes en las estaciones, como puntos críticos, lo permitan.

El tren que circula es un tren auto propulsado con una cabina en cada extremo con una configuración de push-pull y 13 coches intermedios. Cada cabeza tractora tiene dos motores ubicados en ambos bogies.

El siguiente gráfico muestra un esquema general de la composición del material rodante.

Esquema de la composición del material rodante



3.1.5. Velocidad de recorrido del tren

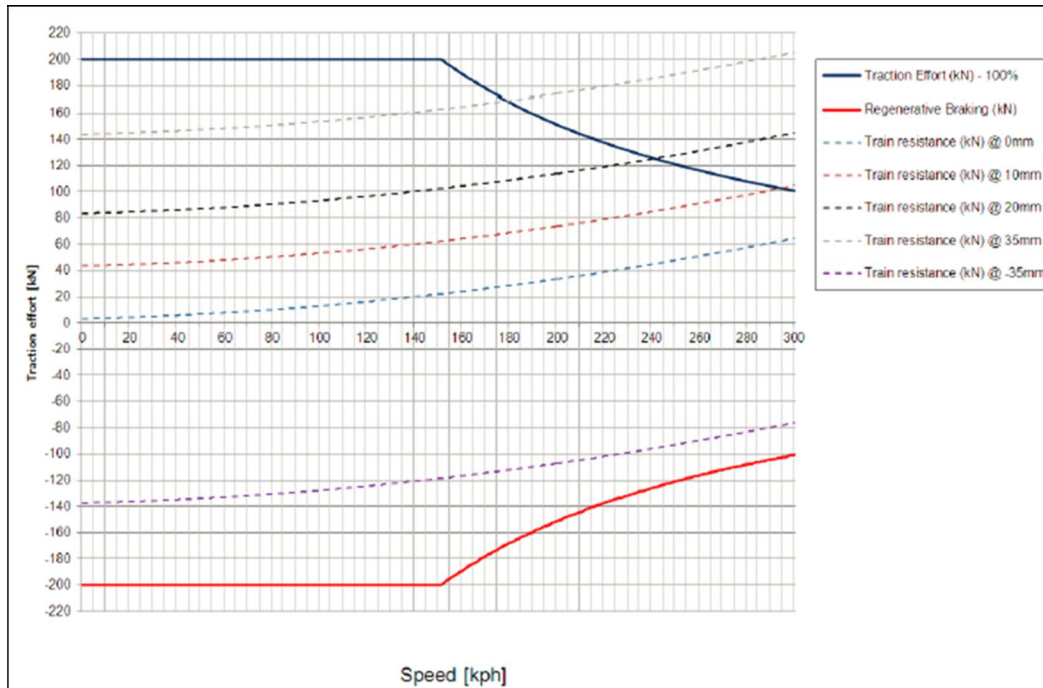
En el capítulo 2, parte 3 'Comportamiento y análisis del Tren. Tiempos y Distancias' se detalla las fórmulas que se implementará en este apartado. La velocidad de circulación del tren se calcula considerando las características de aceleración y de frenado del tren y las características de la línea (perfil de gradiente en milésimas y radio de curvatura en metros).

En este apartado se detalla los datos del tren para el cálculo de la velocidad de circulación del tren.

Características	Valor
Peso Nominal del tren	374 tn
Peso tara del tren	347,31 tn
Coefficiente de masa rotatoria	1,04
Masa equivalente del tren	389 tn
Coefficientes Aerodinámicos del tren	
- Coeficiente A	3,165 kN
- Coeficiente B	0,0448 kN/(km/h)
- Coeficiente C	0,000534 kN/(km/h) ²
Potencia del tren	8,4 MW
Fuerza de arranque	200 KN
Aceleración inicial del tren	0,506 m/s ²
Velocidad comercial máxima de la línea	300km/h

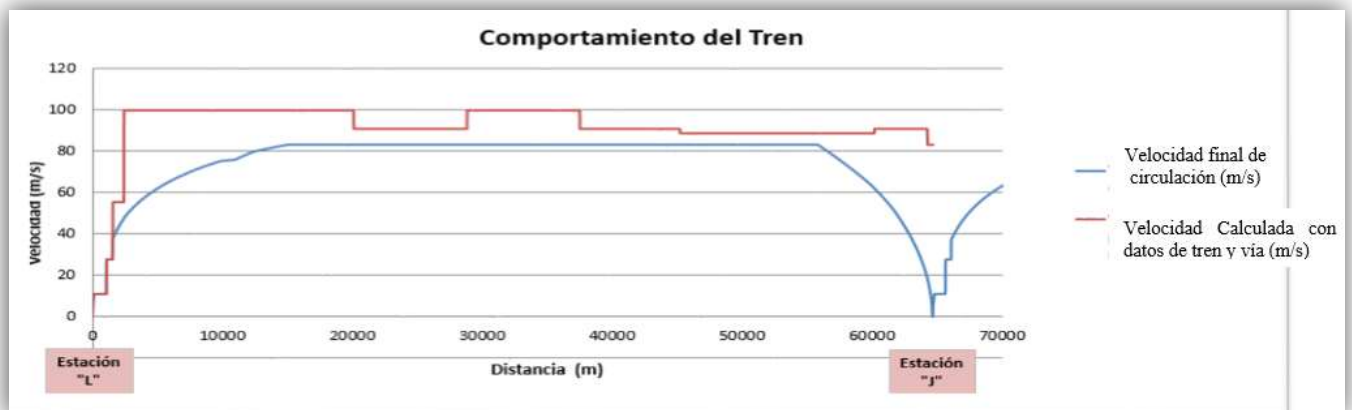
El siguiente gráfico representa la curva de Tracción & Curvas de Resistencia de avance del tren en estudio obtenidos en base a la información del tren.

Curva de Tracción & Curvas de Resistencia de avance del tren



El siguiente gráfico representa las velocidades máximas desde la estación terminal “L” hasta la estación intermedia “J”.

Comportamiento del tren desde la estación “L” hasta la estación siguiente “J”



La línea continua roja representa las velocidades máximas a la cual puede circular el tren debido a las características de diseño de la vía y tren. La línea continua azul representa la velocidad real final máxima a la que circulara el tren considerando la limitación de velocidad impuesta por el administrador u operador de infraestructura.

En el anexo A se muestra una tabla de la velocidad del tren para un tramo de 2000 metros.

3.1.6. Distancia de Frenado

La distancia de frenado es calculada de acuerdo a las características de frenado del tren que cumplen con las especificaciones técnicas de interoperabilidad (ETI) de Material Rodante. Por lo tanto, nos referiremos al documento ETI para realizar los cálculos.

Los parámetros mínimos de deceleración de frenado de servicio que debe cumplir un tren de alta velocidad interoperable, están establecidos en el punto 4.3.7 de la especificación técnica de interoperabilidad (ETI) del material rodante de alta velocidad. El tiempo de reacción del freno de servicio lo establece la ETI de material rodante en 2 segundos, y para el tiempo de reacción del maquinista Adif, en el documento Requisitos Funcionales y Reglas de Ingeniería ERTMS Nivel 1 y Nivel 2, propone un valor de 4 segundos. Para este proyecto la distancia de frenado es calculada desde la velocidad máxima de operación de 300km/h hasta llegar a 0 km/h, usando el freno de servicio. En esta distancia de frenado es norma incorporar un factor de seguridad para tener en cuenta efectos difíciles de controlar como puede ser deslizamiento, distracciones, etc. Este factor de seguridad debe ser establecido en cada caso por la Autoridad Ferroviaria responsable de la explotación considerando tanto el comportamiento del tren como la posición de las señales. Este proyecto no se ha determinado un factor de seguridad. Lo cual presupone que la capacidad que obtenemos tendrá un carácter optimista.

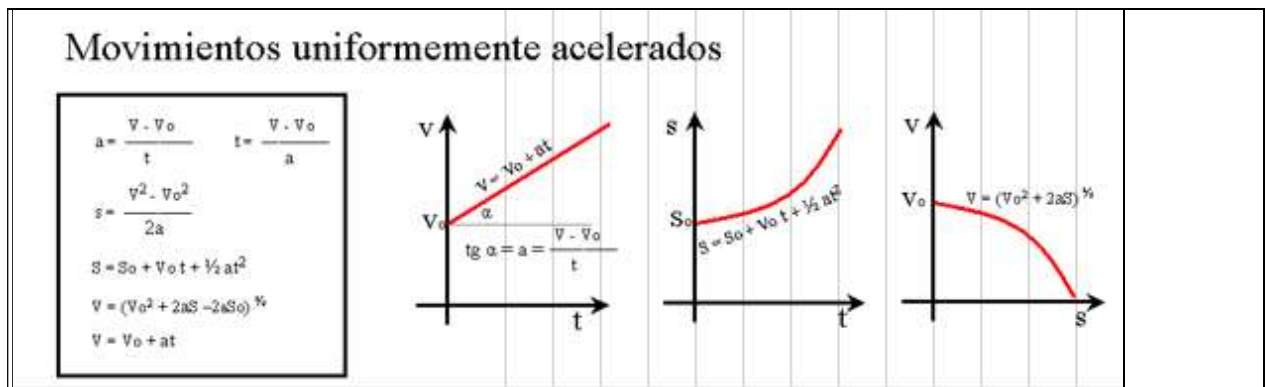
Deceleraciones mínimas para freno de servicio

Deceleraciones mínimas para freno de servicio					
Braking mode	t_e	Minimum mean deceleration measured between end of t_e and reaching the target speed [m/s ²]			
	[s]	350-300 (km/h)	300-230 (km/h)	230-170 (km/h)	170-0 (km/h)
Service braking	2	0,30	0,35	0,6	0,6
t_e [s] = Equivalent time of application					

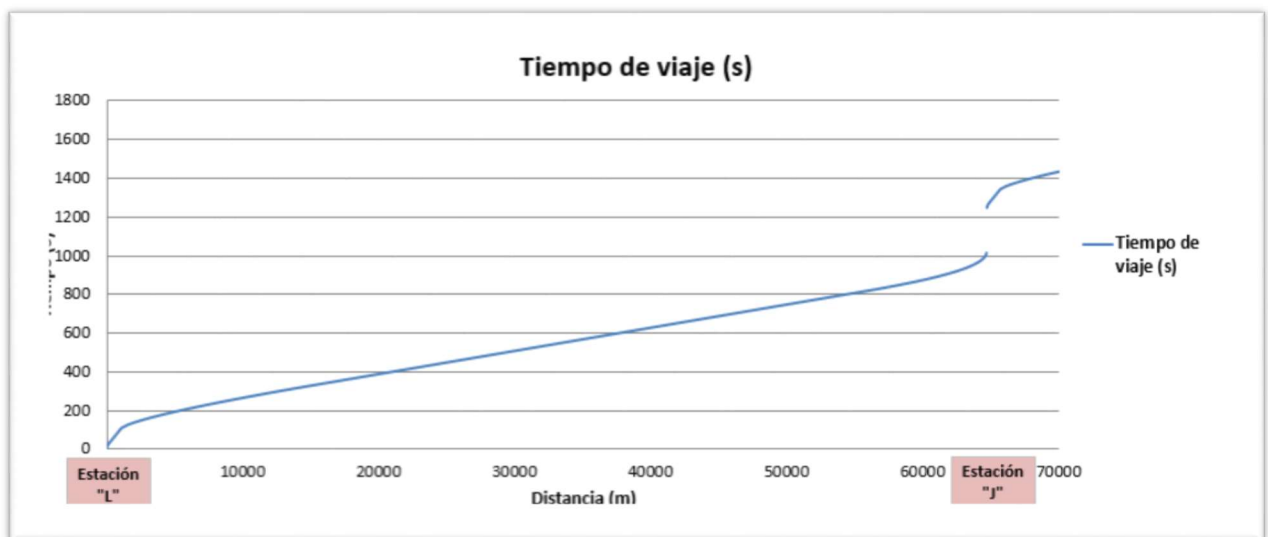
En el anexo B, se muestra una tabla con la Distancia de Frenado calculada.

3.1.7 Tiempo de recorrido

El tiempo de recorrido se ha calculado en base a la aceleración, velocidades de circulación y distancia de recorrido implementados las fórmulas de Movimiento uniformemente acelerado que se muestran a continuación:



El siguiente gráfico muestra el tiempo de viaje del tren desde la estación terminal “L” hasta la estación intermedia “J”, siendo de 1020,1 segundos.



En el anexo C, se muestra una tabla con el tiempo de recorrido de los trenes para una distancia de 2000 metros.

3.2. Estudio y análisis de la Capacidad de un tramo abierto representativo de la línea (en trayecto)

3.2.1. Cálculo del Intervalo Mínimo

Para obtener la capacidad de la línea es necesario considerar el tiempo de seguimiento entre dos trenes para determinar cuál es el punto crítico, el valor del intervalo máximo a la cual se debe encontrar el tren precedente y consecutivo es de gran relevancia ya que este punto será el que marque la capacidad máxima de la línea. En este apartado se analiza el intervalo mínimo en trayecto (tramo entre estaciones). Se considera como referencia el tramo que se encuentra entre la estación terminal “L” y la estación intermedia “J” ya que es el tramo por el que circula el mayor número de trenes por hora de la línea completa y presenta unas características típicas de toda la línea.

El tramo en estudio se ha sido dividido en cantones desde el cantón C1 hasta el cantón C31 definidos por las señales virtuales determinadas en la línea que corresponde a zonas de detección de trenes diferenciadas para el enclavamiento y posicionamiento de los trenes, para cada uno de los cantones se ha determinado el intervalo mínimo que impone ese cantón teniendo en cuenta la distancia de frenado desde la máxima velocidad operativa que puede alcanzar el tren en ese punto como se muestra en la siguiente tabla donde:

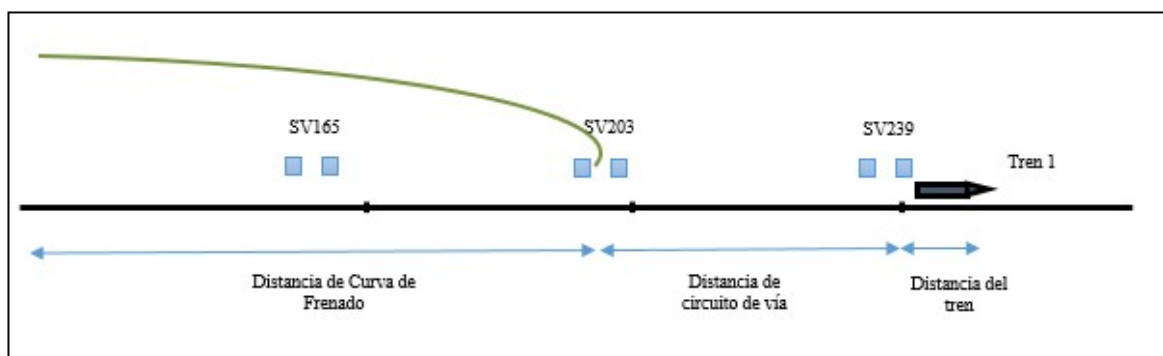
- 1ª señal, representa la señal de entrada del cantón
- 2ª señal, representa la señal de salida del cantón
- Longitud, es la distancia entre cantones
- Tiempo CdF, es el tiempo que le tomará al tren frenar frente a la 2ª señal, teniendo en cuenta las características de la vía y tren.
- Tiempo cantón, es el tiempo que tarda el tren en pasar el cantón
- Tiempo del tren, es el tiempo que le toma al tren pasar su propia longitud
- Tiempo de Señalización, es el tiempo de respuesta que se considera para el sistema de señalización y el sistema ERTMS.

La siguiente tabla resume los valores antes descritos para cada cantón:

Cantones	1ª señal	2ª señal	Longitud cantón	Tiempo Cdf	Tiempo cantón	Tiempo del tren	Tiempo de Señalización
C1	E6	X2/2	1.144	106,26	13,73	2,58	10
C2	E2	E6	2.000	100,95	24,00	2,58	10
C3	SV757	E2	914	89,90	10,97	2,58	10
C4	SV721	SV757	3.696	91,90	44,35	2,58	10
C5	SV683	SV721	3.677	91,90	44,13	2,58	10
C6	SV653	SV683	2.980	91,90	35,76	2,58	10
C7	E2	SV653	2.971	100,95	35,65	2,58	10
C8	SV615	E2	1.002	103,53	12,02	2,58	10
C9	SV577	SV615	3.694	91,90	44,33	2,58	10
C10	SV539	SV577	3.720	89,90	44,64	2,58	10
C11	SV503	SV539	3.760	91,90	45,12	2,58	10
C12	SV465	SV503	3.690	91,90	44,28	2,58	10
C13	SV429	SV465	3.730	91,90	44,76	2,58	10
C14	SV391	SV429	3.798	81,18	45,58	2,58	10
C15	X2/2	SV391	1.738	88,00	20,86	2,58	10
C16	E2	X2/2	1.404	103,53	16,85	2,58	10
C17	SV349	E2	917	89,90	11,00	2,58	10
C18	SV313	SV349	3.620	91,90	43,44	2,58	10
C19	SV277	SV313	3.691	91,90	44,29	2,58	10
C20	SV239	SV277	3.694	91,90	44,33	2,58	10
C21	SV203	SV239	3.710	106,26	44,52	2,58	10
C22	SV165	SV203	3.661	91,90	43,93	2,58	10

Cantones	1ª señal	2ª señal	Longitud cantón	Tiempo Cdf	Tiempo cantón	Tiempo del tren	Tiempo de Señalización
C23	SV129	SV165	3.711	91,90	44,53	2,58	10
C24	E2	SV129	3.065	89,90	36,78	2,58	10
C25	SV89	E2	850	91,90	10,20	2,58	10
C26	SV35	SV89	1.737	91,90	20,84	2,58	10
C27	SV53	SV35	1.507	91,90	18,08	2,58	10
C28	X2/3B	SV53	2.195	106,26	26,34	2,58	10
C29	X2/2A	X2/3B	425	88,00	5,10	2,58	10
C30	X2/2	X2/2A	995	103,53	11,94	2,58	10
C31	Topera	X2/2	1.997	103,53	23,96	2,58	10

A modo de ejemplo véase a continuación, el ejemplo para el cantón C21;



Con los tiempos calculados en la tabla anterior obtenemos el tiempo mínimo entre trenes para cada cantón:

Cantones	PK cantón		Long. Cd F	PK empiece CdF	Comienza CdFen:	t. entre trenes
C1	77571	78715	8412,08	69158,92	C5	127,26
C2	75571	75571	7491,45	68079,55	C6	126,48
C3	75635	76549	8412,08	67222,92	C6	115,44
C4	71939	75635	7657,66	64281,34	C7	148,83
C5	68262	71939	7657,66	60604,34	C9	148,60
C6	65282	68262	7657,66	57624,34	C9	149,29
C7	62311	65282	8412,08	53898,92	C10	151,76
C8	61309	62311	8627,02	52681,98	C11	116,50
C9	57615	61309	7657,66	49957,34	C12	146,81
C10	53895	57615	7491,45	46403,55	C13	149,12
C11	50135	53895	7657,66	42477,34	C14	149,60
C12	46445	50135	7657,66	38787,34	C15	148,76
C13	42715	46445	7657,66	35057,34	C17	138,53
C14	38917	42715	6765,06	32151,94	C18	146,16
C15	37179	38917	7332,88	29846,12	C19	136,97

Cantones	PK cantón		Long. Cd F	PK empiece CdF	Comienza CdFen:	t. entre trenes
C16	35775	37179	8627,02	27147,98	C20	119,33
C17	34858	35775	7491,45	27366,55	C20	115,48
C18	31238	34858	7657,66	23580,34	C21	147,92
C19	27547	31238)	7657,66	19889,34	C22	148,77
C20	23853	27547	7657,66	16195,34	C23	163,17
C21	20143	23853	8854,42	11288,58	C24	149,00
C22	16482	20143	7657,66	8824,34	C26	148,41
C23	12771	16482	7657,66	5113,34	C28	147,01
C24	9706	12771	7491,45	2214,55	C30	141,26
C25	8856	9706	7657,66	1198,34	C31	114,68
C26	7119	8856	1)	1)	1)	1)
C27	5612	7119	1)	1)	1)	1)
C28	3417	5612	1)	1)	1)	1)
C29	2992	3417	1)	1)	1)	1)
C30	1997	2992	1)	1)	1)	1)
C31	0	1997	1)	1)	1)	1)

1) En las tablas de resultados, no se ha considerado el tiempo entre trenes para aquellos cantones en los que, por características de la línea, no se inicia una curva de frenado potencial para el tren perseguidor.

Como resumen se observa que el intervalo mínimo mayor entre trenes se encuentra en el cantón C20 de 163.17 segundos que equivale a **2 minutos y 45 segundos**.

3.2.2. Resultado de la Capacidad del tramo

Una vez determinada el intervalo mínimo del tramo en estudio, desde la estación “L” hasta la estación “J”, que en este caso es el cantón C20 con 163.17 segundos determinamos la capacidad máxima para el tramo, usando la fórmula descrita en el capítulo 3.

$$\text{Capacidad máxima} = \frac{3600}{\text{Intervalo Mínimo}} = \left(\frac{\text{trenes}}{\text{hora}} \right)$$

Reemplazando:

$$C_{max} = \frac{3600 \text{ seg}}{163,17 \text{ seg}} = 22.03 \left(\frac{\text{trenes}}{\text{hora}} \right)$$

La capacidad máxima que podría tener el tramo analizado es de 22.03 trenes por hora. Claramente se ve que esta capacidad es muy superior a la fijada comercialmente lo que indica que en el futuro y, en relación a la línea, se podría conseguir mucha más capacidad de transporte de personas por hora hasta un 40 % más.

El siguiente paso trata de analizar la capacidad que nos puede proporcionar la estación terminal.

3.3. Estudio y Análisis de Capacidad de la estación terminal “L”

En este apartado se analiza el intervalo en un punto singular de la línea, la estación terminal “L” que marca como se verá la capacidad real de esta línea.

3.3.1. Caracterización del Explotación de la estación terminal “L”

El primer paso para conocer la capacidad que proporciona la estación es la definición por parte del operador de los servicios que quiere realiza. El programa de explotación de la estación terminal “L” establece tres destinos que se detallan a continuación:

- Primer destino: desde la Estación “L” a la Estación “I” (representado en color rojo).

Este destino cuenta con 2 circulaciones de entrada y 2 circulaciones de salida de la estación “L” por hora.

- Segundo destino: desde la Estación “L” a la Estación “K”. (representado en color azul).

Este destino cuenta con 3 circulaciones de entrada y 3 circulaciones de salida de la estación “L” por hora.

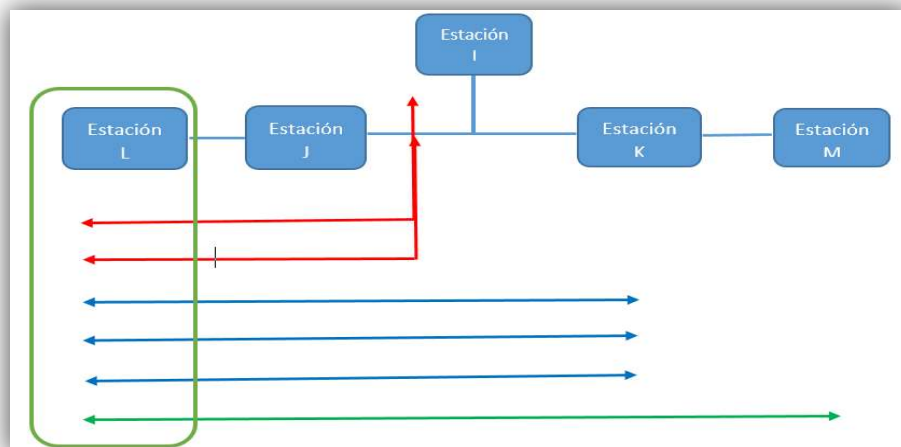
- Tercer destino: desde la Estación “L” a la Estación “M”. (representado en color verde)

Este destino cuenta con 1 circulación de entrada y 1 circulaciones de salida de la estación “L” por hora.

A continuación, se muestra un esquema de las tres estaciones de destino; así como el número de circulaciones de entradas y salidas a la estación terminal “L” por hora.

Por otro lado, Se determina que un tren requiere de 30 minutos para labores de embarque y desembarque de pasajeros y limpieza antes de su próxima salida.

Distribución de los servicios y circulaciones por hora de la estación “L”



Establecimiento de un patrón

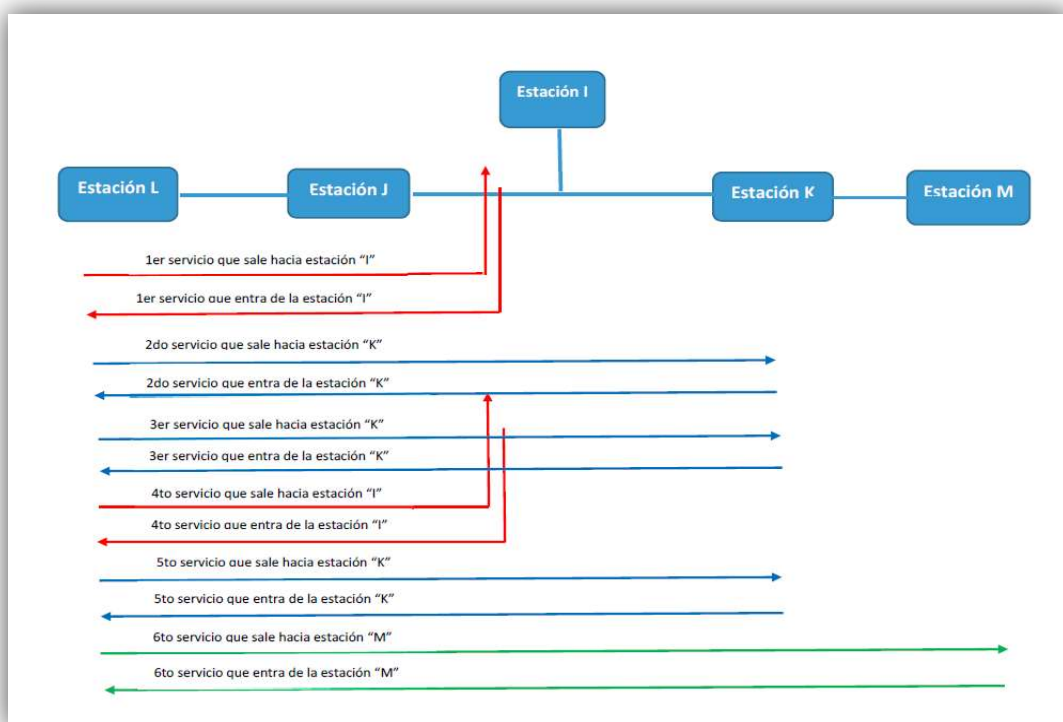
En base a la topología de la estación (número de andenes, desvíos, ubicación de señales y circuitos de vía) y el programa de explotación descrito se establece un patrón de circulación. Este patrón describe el orden de circulación de los trenes, determinando el orden de entradas y salidas de la estación, de cada uno de los servicios para un período de una hora. El patrón que se establece para este proyecto tiene el siguiente orden: Servicios de salida de la estación:

- El primer servicio que sale es hacia la estación intermedia “I”
- El segundo y tercer servicio de salida es hacia la estación intermedia “K”
- El cuarto servicio de salida es hacia la estación intermedia “I”
- El quinto servicio de salida es hacia la estación intermedia “K”
- El sexto servicio de salida es hacia la estación terminal “M”

Servicio de entrada de la estación:

- El primer servicio de entrada de la estación intermedia “I”
- El segundo y tercer servicio de entrada es de la estación intermedia “K”
- El cuarto servicio de entrada es de la estación intermedia “I”
- El quinto servicio de entrada es de la estación intermedia “K”
- El sexto servicio de entrada es de la estación terminal “M”

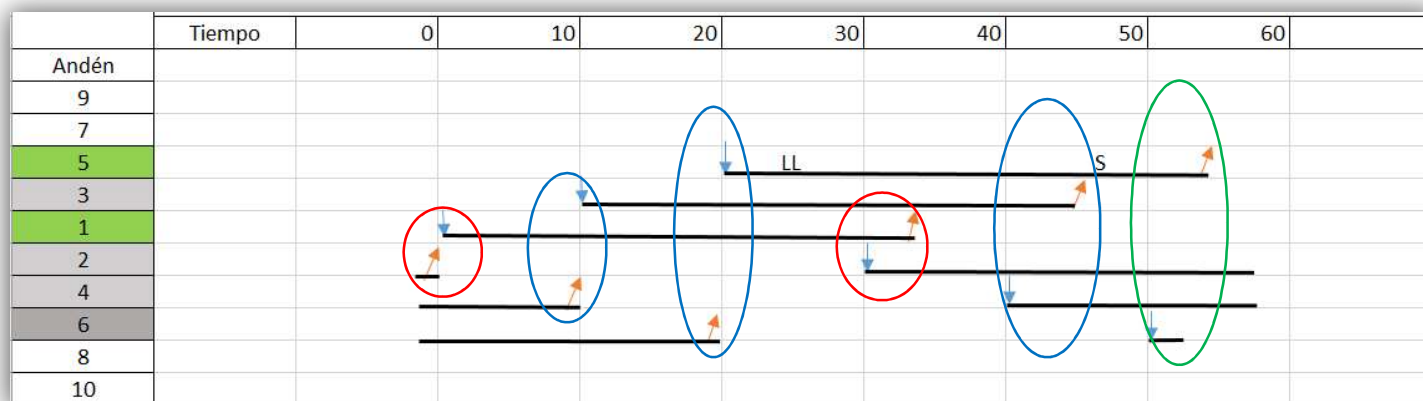
El siguiente gráfico representa el orden de las entradas y salidas de los servicios en un período de tiempo.



Distribución de la Ocupación de andenes

Siguiendo el programa de explotación determinado y el patrón establecido se ubicarán los trenes que ingresan y salen de la manera más óptima considerando que cada tren debe permanecer 30 minutos en el andén previo a su próxima salida. La ubicación de los trenes en los andenes es de vital importancia ya que una inadecuada distribución ocasionaría la necesidad de un mayor número de trenes y unos intervalos mínimos mayores ocasionados a las demoras de salida o entrada de trenes.

El siguiente esquema representa la ubicación de los trenes en los andenes de la estación terminal “L” con el fin de cumplir con el patrón establecido. Las líneas horizontales negras representan el período que un tren estará ocupando el andén, las fechas azules representa los trenes que entran al andén y las fechas rojas representan los trenes que salen del andén. Durante la distribución de los trenes se considera que los servicios siempre salgan e ingresen al mismo andén con el objetivo de no confundir al pasajero.



Itinerarios Establecidos

Una vez determinado el patrón, orden de entradas y salidas de los trenes, y la ubicación de los trenes en los andenes de la estación iniciamos el cálculo del intervalo mínimo entre los itinerarios programados para cumplir el patrón.

Los siguientes esquemas representan los itinerarios establecidos.

Concluyendo de los esquemas que existen itinerarios compatibles y no compatibles. Los itinerarios incompatibles son los que ocasionan que el intervalo mínimo sea mayor por lo cual se procederá a su análisis de cada uno.

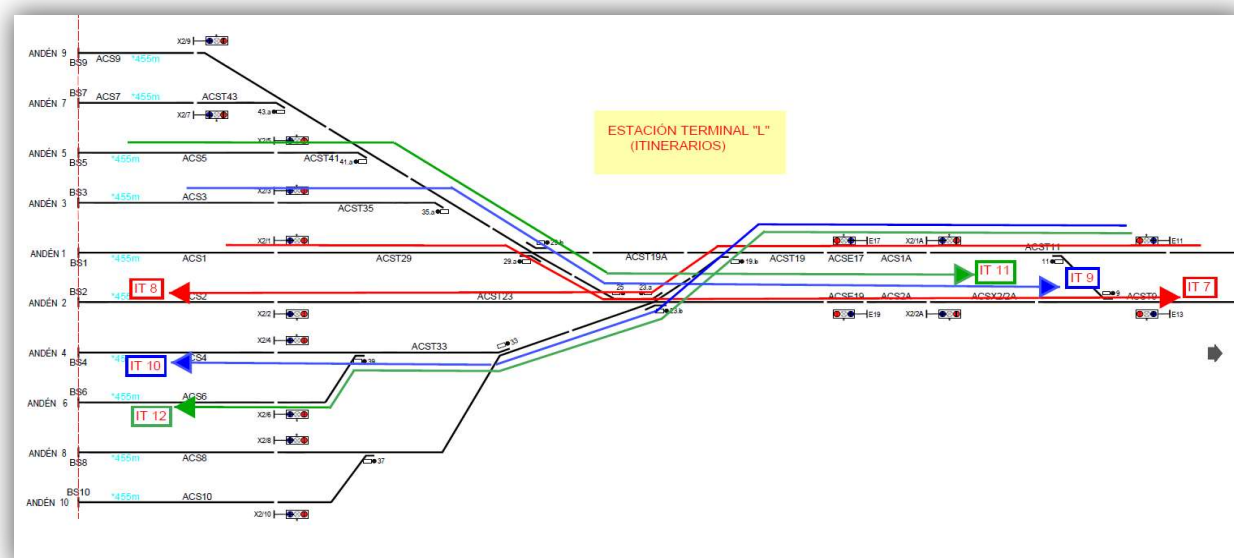
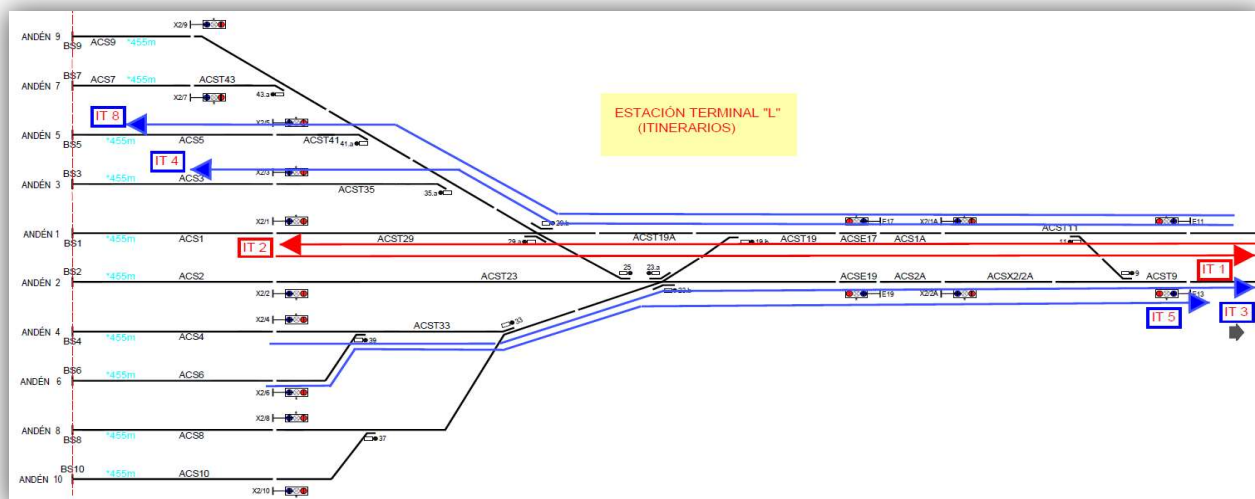


Tabla de las incompatibilidades de los itinerarios establecidos

La tabla de incompatibilidades representa todas las rutas compatibles e incompatibles de acuerdo al patrón. Los itinerarios incompatibles, que son los que no se pueden establecer al mismo tiempo, son los que ocasionan que el intervalo mínimo sea mayor por lo cual se procederá al análisis particular de cada uno de ellos.

Tabla de Incompatibilidades

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	X2/2 - vía 2		I	I	I	I	I	C	C	C	I	I	I
2	X2/4 - vía 2	I		I	I	I	I	C	C	C	I	I	I
3	X2/6 - vía 2	I	I		I	I	I	C	C	C	I	I	I
4	X2/1 - vía 2	I	I	I		I	I	I	I	I	I	I	I
5	X2/3 - vía 2	I	I	I	I		I	I	I	I	I	I	I
6	X2/5 - vía 2	I	I	I	I	I		I	I	I	I	I	I
7	E17 - BS1	C	C	C	I	I	I		I	I	I	I	I
8	E17 - BS3	C	C	C	I	I	I	I		I	I	I	I
9	E17 - BS5	C	C	C	I	I	I	I	I		I	I	I
10	E17 - BS2	I	I	I	I	I	I	I	I	I		I	I
11	E17 - BS4	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I		I
12	E17 - BS6	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	

3.3.2. Cálculo de los intervalos mínimos de los itinerarios establecidos en base al patrón

En base al patrón establecido previamente, que determina el orden de entrada y salida a la estación, se designa los itinerarios, que determina la ruta que seguirá el tren. Una vez designado los itinerarios se realiza el cálculo de los intervalos de cada uno de los itinerarios incompatibles.

Tabla de itinerarios y sus intervalos

Movimiento (Origen – Destino)	Itinerario	Movimiento (Origen – Destino)	Itinerario	Comentario	Intervalo
X2/2 - vía 2	It1	E17- BS 1	It2	Compatible	-
X2/4 - vía 2	It3	E17- BS 3	It4	Compatible	-
X2/6 - vía 2	It5	E17- BS 5	It6	Compatible	-
E17- BS 2	It8	X2/1 - vía 2	It7	Incompatible	34.0
E17 - BS 4	It10	X2/3 - vía 2	It9	Incompatible	41.0
E17- BS 6	It12	X2/5 - vía 2	It11	Incompatible	41.0
X2/2 - vía 2	It1	X2/4 - vía 2	It3	Incompatible	75.90
X2/4 - vía 2	It3	X2/6 - vía 2	It5	Incompatible	68.70
X2/6 - vía 2	It5	E17- BS 2	It8	Incompatible	249.70
X2/1 - vía 2	It7	E17 - BS 4	It10	Incompatible	249.90
X2/3 - vía 2	It9	E17- BS 6	It12	Incompatible	251,90
X2/5 - vía 2	It11	X2/2 - vía 2	It1	Incompatible	68.70

Desarrollo del Cálculo de los intervalos mínimos de los itinerarios Incompatibles

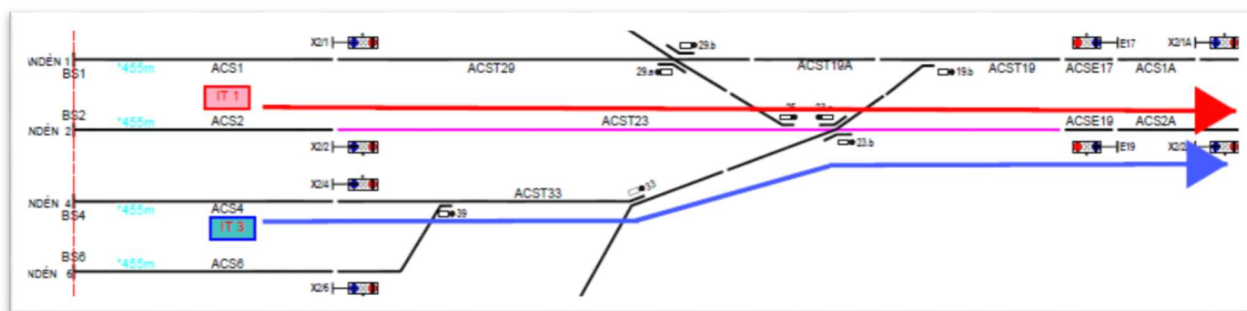
• Intervalo mínimo entre los itinerarios It1- It3, tipo de intervalo SALIDA – SALIDA

Es el tiempo que transcurre desde que el primer tren sale de la estación hasta que un segundo tren pueda salir en condiciones de marcha no perturbada. Se determina mediante la suma de dos tiempos.

- Tiempo del primer tren desde el andén hasta liberar el cantón conflictivo/compartido: desde el andén 2 hasta liberar el cantón ACST23.
- Tiempo de que le toma al enclavamiento desenclavar el itinerario anterior, movimiento de agujas y establecimiento de nuevo itinerario: se ha establecido que será de 10 segundos, este valor se ha establecido debido a que es el valor que se indica en las bibliografías revisadas.

El siguiente esquema representa parte del recorrido de los dos itinerarios incompatibles y el cantón conflictivo/compartido:

Gráfico Itinerarios It1- It3



La siguiente tabla resume los tiempos (a) y (b) calculados:

	Tiempo en liberar ACST23 (a)	Tiempo del desenclavamiento, aguja, nuevo itinerario (b)	Tiempo del Intervalo
It1- It3	65.90	10	75.90

Explicación de los tiempos calculados:

Considerando las características de aceleración del tren, las características de vía de la línea, la distancia de recorrido del tren hasta liberar el cantón compartido ACST23 y la longitud del propio tren obtenemos el tiempo que le tomará al primer tren (It1) liberar el cantón ACST23 desde donde se encuentra estacionado.

Distancia Recorrida vs Tiempo

El gráfico muestra la relación entre la distancia recorrida y el tiempo de viaje. La línea azul con marcadores de diamante indica el tiempo de viaje en segundos para cada distancia en metros.

Distancia (m)	Tiempo de viaje (s)
1997	0
2027	10
2058	20
2089	25
2119	28
2150	31
2180	33
2211	36
2242	38
2270	41
2301	44
2331	47
2362	49
2392	51
2423	54
2454	57
2484	60
2515	63
2545	66

El gráfico está dividido en tres secciones de fondo:

- ACS2** (Azul): Desde 1997 hasta 2027.
- ACST23** (Verde): Desde 2027 hasta 2362.
- TREN** (Gris): Desde 2362 hasta 2545.

Es el tiempo que transcurre desde que el primer tren sale de la estación hasta que un segundo tren pueda salir en condiciones de marcha no perturbada. Se determina mediante la suma de dos tiempos.

- El siguiente esquema representa parte del recorrido de los dos itinerarios incompatibles y el cantón conflictivo/compartido:

	Tiempo en liberar ACST23 (a)	Tiempo del desenclavamiento, aguja, nuevo itinerario (b)	Tiempo del Intervalo
It3- It5	67.70	10	68.70

Explicación de los tiempos calculados:

Considerando las características de aceleración del tren, las características de vía de la línea, la distancia de recorrido del tren hasta liberar el cantón compartido ACST23 y la longitud del propio tren obtenemos el tiempo que le tomará al primer tren (It3) liberar el cantón ACST23 desde donde se encuentra estacionado.

Gráfico de espacio – tiempo del primer tren



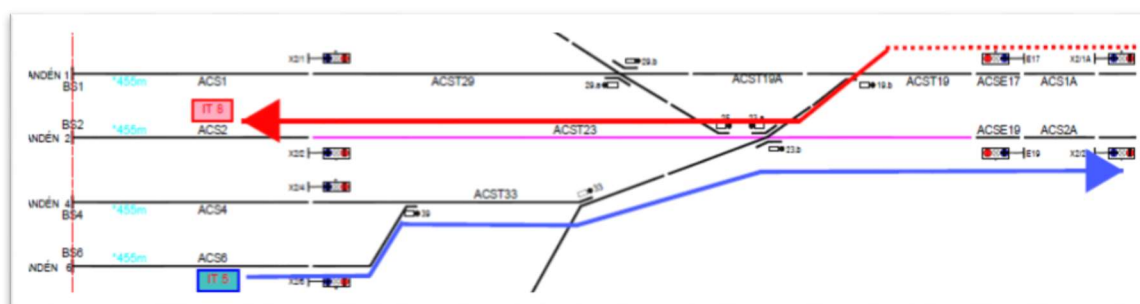
• **Intervalo mínimo entre los itinerarios It5- It8, tipo de intervalo SALIDA – LLEGADA**

Es el tiempo que transcurre desde que el primer tren sale de la estación hasta que libera un punto tal que permite al segundo tren efectuar la maniobra de entrada a esa estación. El segundo tren se sitúa para el cálculo en un punto de “no perturbación”. Se determina mediante la suma de tres tiempos:

- Tiempo de recorrido del primer tren desde el andén hasta liberar el cantón conflictivo/compartido: el cantón ACST23.
- Tiempo de que le toma al enclavamiento desenclavar el itinerario anterior, movimiento de agujas y establecimiento de nuevo itinerario: se ha establecido que será de 10 segundos.
- Tiempo de recorrido del segundo tren desde un punto de la línea donde el tren se encuentra circulando sin ninguna perturbación hasta llegar al andén correspondiente: andén 2.

El siguiente esquema representa parte del recorrido de los dos itinerarios incompatibles y el cantón conflictivo/compartido:

Gráfico Itinerarios It5- It8



La siguiente tabla resume los tiempos (a), (b) y (c) calculados:

	Tiempo del tren 1 en liberar el cantón ACST23 (a)	Tiempo de desenclavamiento, aguja y nuevo itinerario (b)	Tiempo del Tren 2 (c)	Tiempo del Intervalo
It5-It8	67.70	10	172.00	249.70

Explicación de los tiempos calculados:

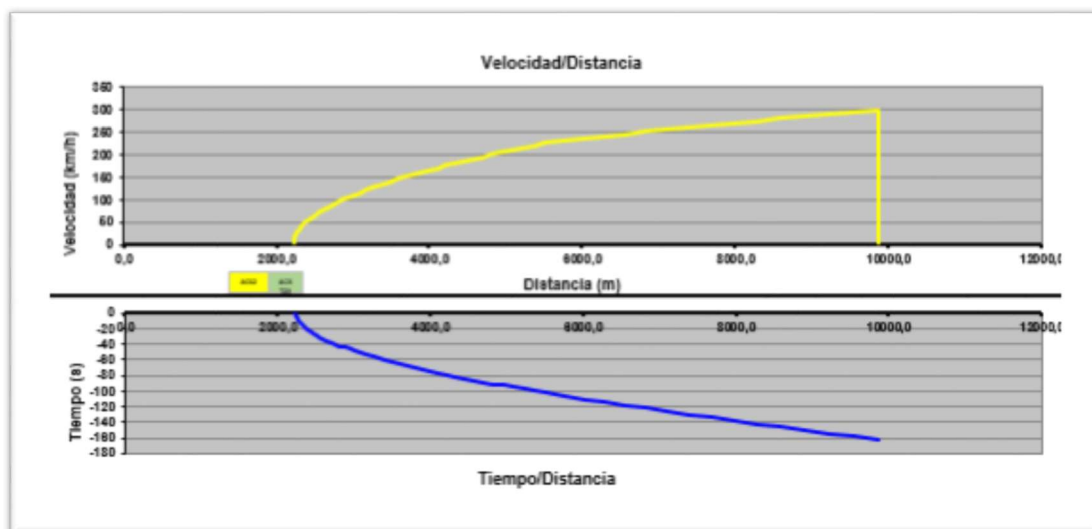
Para el primer tiempo (a) considerando las características de aceleración del tren, las características de la vía de la línea, la distancia de recorrido del tren desde el andén hasta liberar el cantón compartido ACST23 y la longitud del propio tren obtenemos el tiempo que le tomará al primer tren (IT5) liberar el cantón ACST23 desde el andén 6: 67.70 segundos.

Gráfico de espacio – tiempo del primer tren



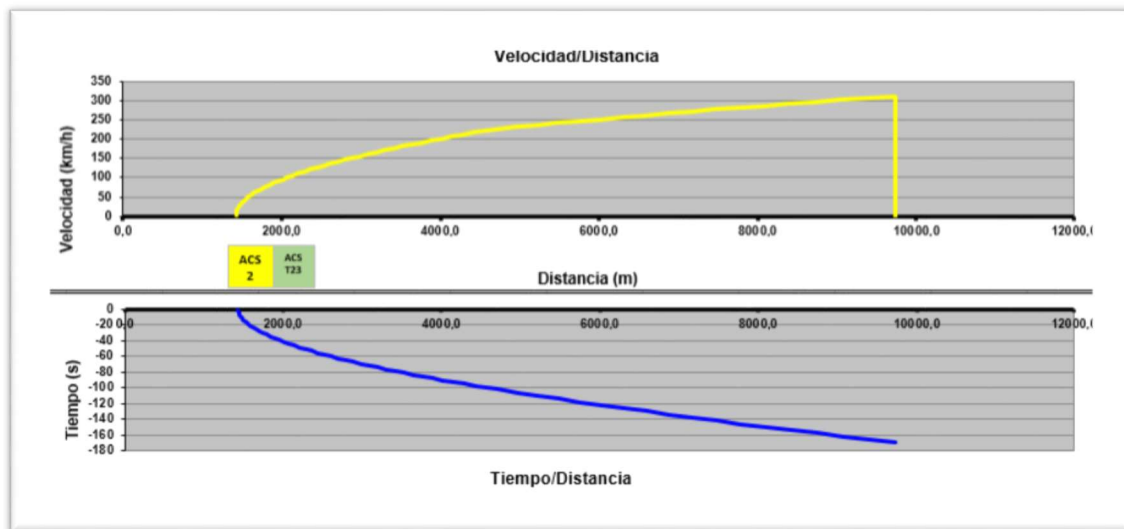
Par el cálculo del tercer tiempo (c), el segundo tren debe encontrarse en un punto de la línea dónde se encuentre circulando sin ninguna perturbación y a la velocidad nominal de 300 km/h instante antes de que el primer tren libere el cantón compartido ACS T23. El siguiente gráfico muestra el punto kilométrico donde debe encontrarse el segundo tren cuando el primer tren libere el cantón ACST23, así como el tiempo de recorrido hacia llegar al inicio del cantón.

Gráfico de espacio vs velocidad y espacio vs tiempo del segundo tren



Una vez determinado el punto en el cual debe ubicarse el segundo tren (gráfico anterior) hay que determinar el tiempo que le tomará recorrer desde ese punto hasta el andén correspondiente. Para lo cual el siguiente gráfico muestra el **tiempo** del segundo tren desde el cantón donde el tren se encuentra circulando sin ser perturbado y en su velocidad nominal de 300 km/h hasta llegar al andén 2: 172,0 segundos. Así como la distancia de recorrido total del tren hasta llegar al andén: 8473m.

Gráfico de espacio vs velocidad y espacio vs tiempo del segundo tren hasta el andén 2



- Intervalo mínimo entre los itinerarios It8- It7, tipo de intervalo LLEGADA-SALIDA**

Es el tiempo del tren perseguidor en salir de la estación y vía correspondiente, menos el tiempo del primer tren desde que libera el punto singular de incompatibilidad hasta parar en la estación y vía correspondiente.

El siguiente esquema representa los dos itinerarios incompatibles:

Gráfico Itinerarios It8- It7



La siguiente tabla resume los tiempos involucrados en el cálculo del intervalo:

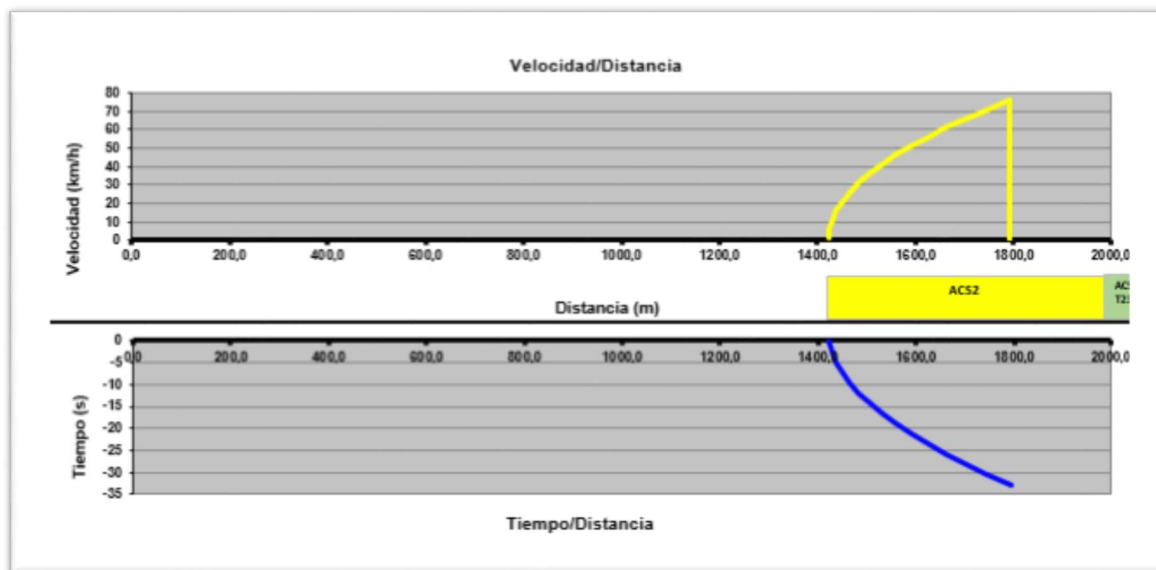
	t. Tren1	intervalo
L8-S7	34.0	34.0

Cálculos:

El siguiente gráfico muestra donde debe ubicarse el primer tren cuando libera el punto de incompatibilidad

(ACS 2) teniendo en cuenta la longitud del tren (p.k. 1784)

También nos muestra el tiempo del primer tren en llegar al andén: 34 segundos.



• **Intervalo mínimo entre los itinerarios It7- It10, tipo de intervalo SALIDA – LLEGADA**

Es el tiempo que transcurre desde que el primer tren sale de la estación hasta que libera un punto tal que permite al segundo tren efectuar la maniobra de entrada a esa estación. El segundo tren se sitúa para el cálculo en un punto de “no perturbación”. Se determina mediante la suma de tres tiempos.

- Tiempo de recorrido del primer tren desde el andén hasta liberar el cantón conflictivo/compartido: el cantón ACST23.
- Tiempo de que le toma al enclavamiento desenclavar el itinerario anterior, movimiento de agujas y establecimiento de nuevo itinerario: se ha establecido que será de 10 segundos.
- Tiempo de recorrido del segundo tren desde un punto de la línea donde el tren se encuentra circulando sin ninguna perturbación hasta llegar al andén correspondiente: andén 4.

El siguiente esquema representa parte del recorrido de los dos itinerarios incompatibles y el cantón conflictivo/compartido:

Gráfico Itinerarios It7- It10



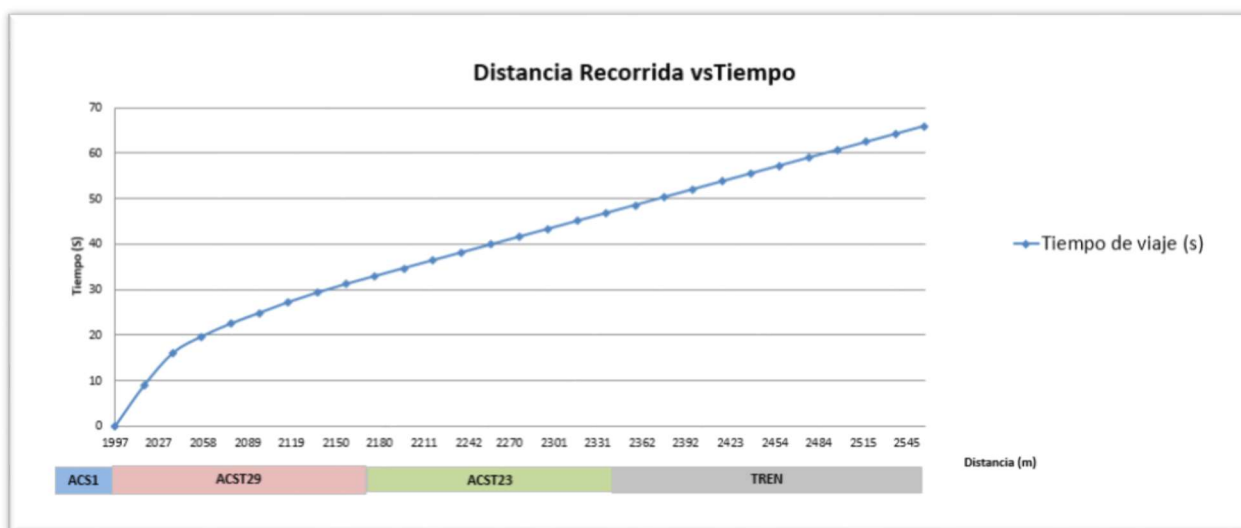
La siguiente tabla resume los tiempos (a), (b) y (c) calculados:

	Tiempo del tren 1 en liberar el cantón ACST23 (a)	Tiempo de desenclavamiento, aguja y nuevo itinerario (b)	Tiempo del Tren 2 (c)	Tiempo del Intervalo
It7-It10	65,90	10	174.00	249.90

Explicación de los tiempos calculados:

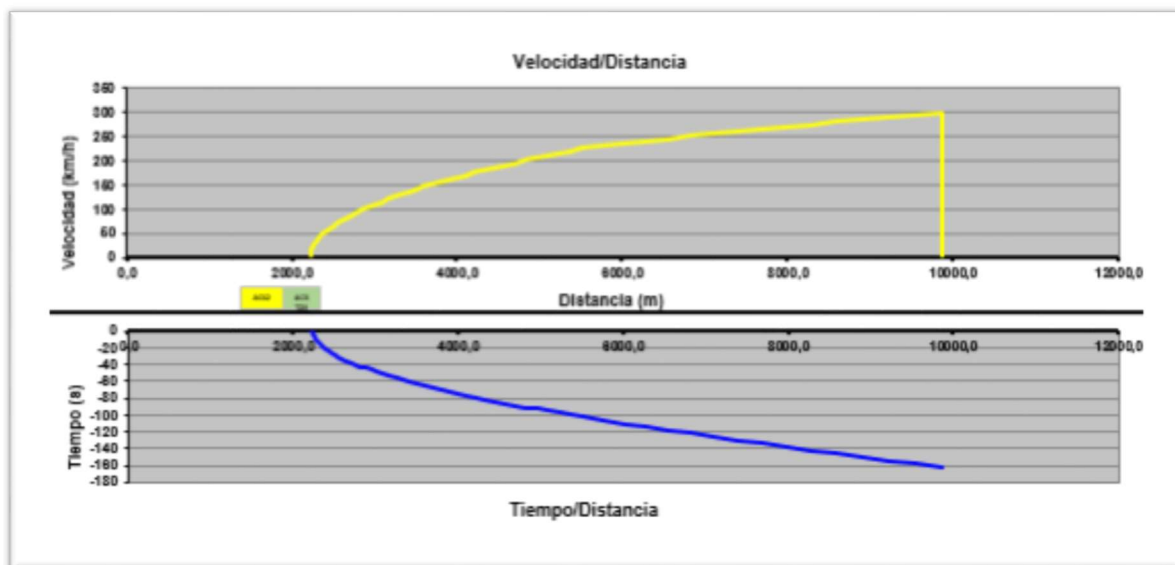
Para el primer tiempo (a) considerando las características de aceleración del tren, las características de la vía de la línea, la distancia de recorrido del tren desde el andén hasta liberar el cantón compartido ACST23 y la longitud del propio tren obtenemos el tiempo que le tomará al primer tren (IT7) liberar el cantón ACST23 desde el andén 1: 65.90 segundos.

Gráfico de espacio – tiempo del primer tren



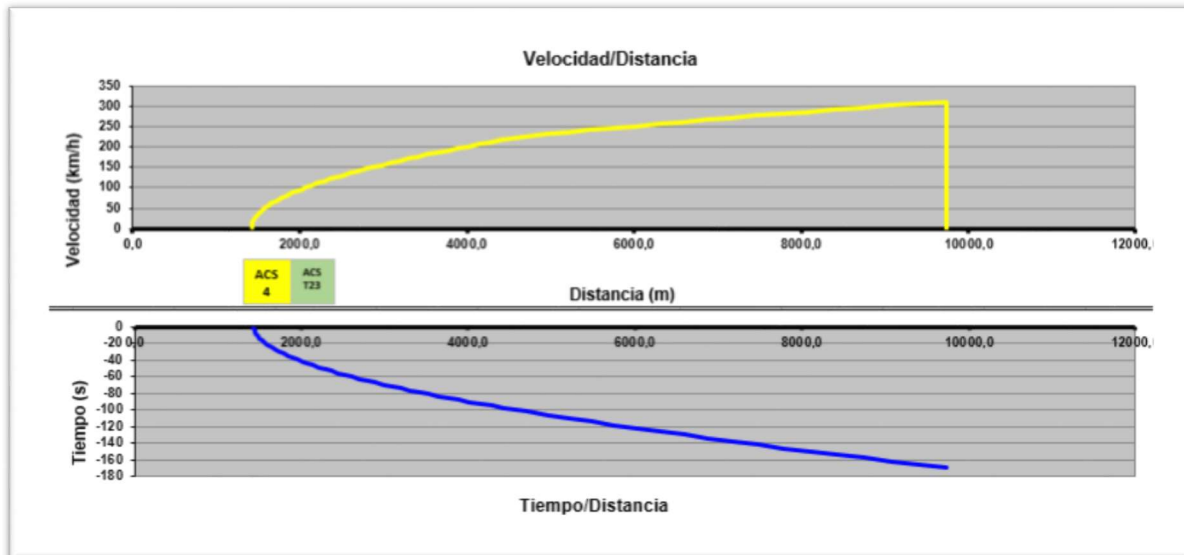
Par el cálculo del tercer tiempo (c), el segundo tren debe encontrarse en un punto de la línea dónde se encuentre circulando sin ninguna perturbación y a la velocidad nominal de 300 km/h instante antes de que el primer tren libere el cantón compartido ACS T23. El siguiente gráfico muestra el punto kilométrico donde debe encontrarse el segundo tren cuando el primer tren libere el cantón ACST23, así como el tiempo de recorrido hacia llegar al inicio del cantón.

Gráfico de espacio vs velocidad y espacio vs tiempo del segundo tren



Una vez determinado el punto en el cual debe ubicarse el segundo tren (gráfico anterior) hay que determinar el tiempo que le tomará recorrer desde ese punto hasta el andén correspondiente. El siguiente gráfico muestra el tiempo que le toma al segundo tren desde el cantón donde el tren se encuentra circulando sin ser perturbado y en su velocidad nominal de 300 km/h hasta llegar al andén 4: 174,0 segundos. Así como la distancia de recorrido total del segundo tren hasta llegar al andén: 8503m.

Gráfico de espacio vs velocidad y espacio vs tiempo del segundo tren hasta el andén 4

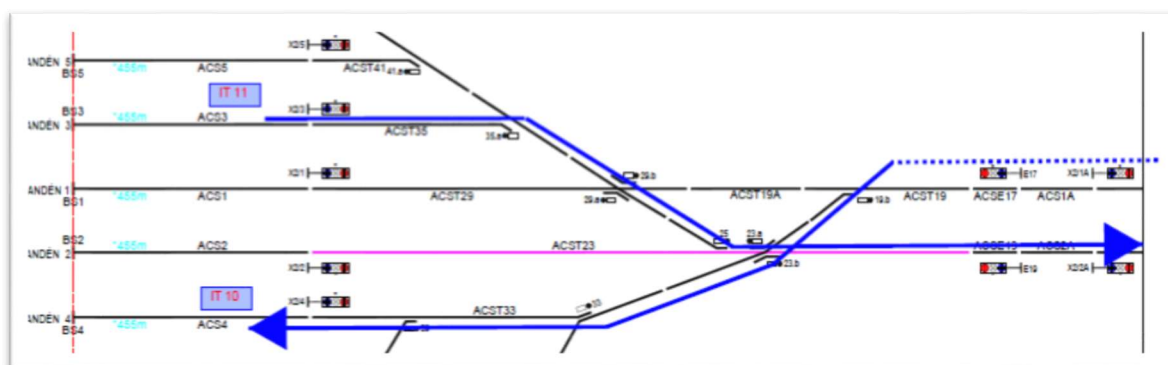


- Intervalo mínimo entre los itinerarios It10- It9, tipo de intervalo LLEGADA-SALIDA**

Es el tiempo del tren perseguidor en salir de la estación y vía correspondiente, menos el tiempo del primer tren desde que libera el punto singular de incompatibilidad hasta parar en la estación y vía correspondiente.

El siguiente esquema representa los dos itinerarios incompatibles:

Gráfico Itinerarios It10- It9



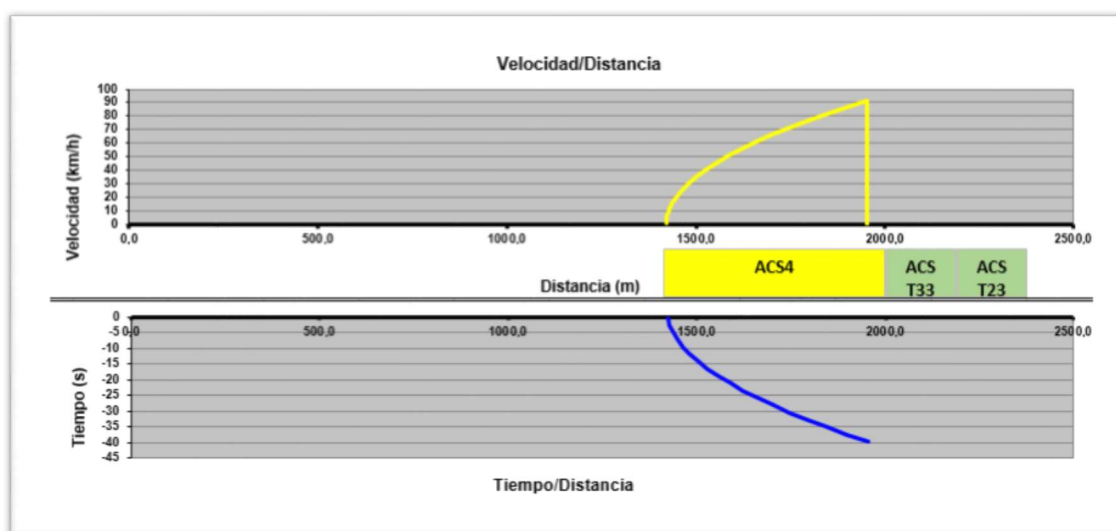
La siguiente tabla resume los tiempos involucrados en el cálculo del intervalo:

	t. Tren1	intervalo
L10-S9	41.0	41.0

Cálculos:

El siguiente gráfico muestra donde debe ubicarse el primer tren para liberar el punto de incompatibilidad (ACS 2) teniendo en cuenta la longitud del tren (p.k. 1956 m).

También nos muestra el tiempo del primer tren en llegar al andén: 41 segundos.



• Intervalo mínimo entre los itinerarios It9- It12, tipo de intervalo SALIDA – LLEGADA

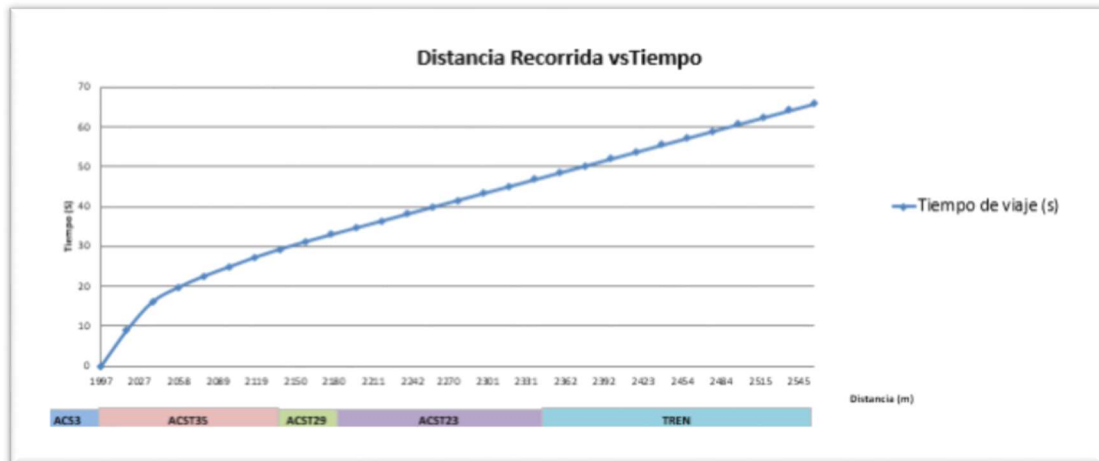
Es el tiempo que transcurre desde que el primer tren sale de la estación hasta que libera un punto tal que permite al segundo tren efectuar la maniobra de entrada a esa estación. El segundo tren se sitúa para el cálculo en un punto de “no perturbación”. Se determina mediante la suma de tres tiempos.

- El siguiente esquema representa parte del recorrido de los dos itinerarios incompatibles y el cantón conflictivo/compartido:

	Tiempo del tren 1 en liberar el cantón ACST23 (a)	Tiempo de desenclavamiento, aguja y nuevo itinerario (b)	Tiempo del Tren 2 (c)	Tiempo del Intervalo
It9-It12	65.90	10	176.00	251,90

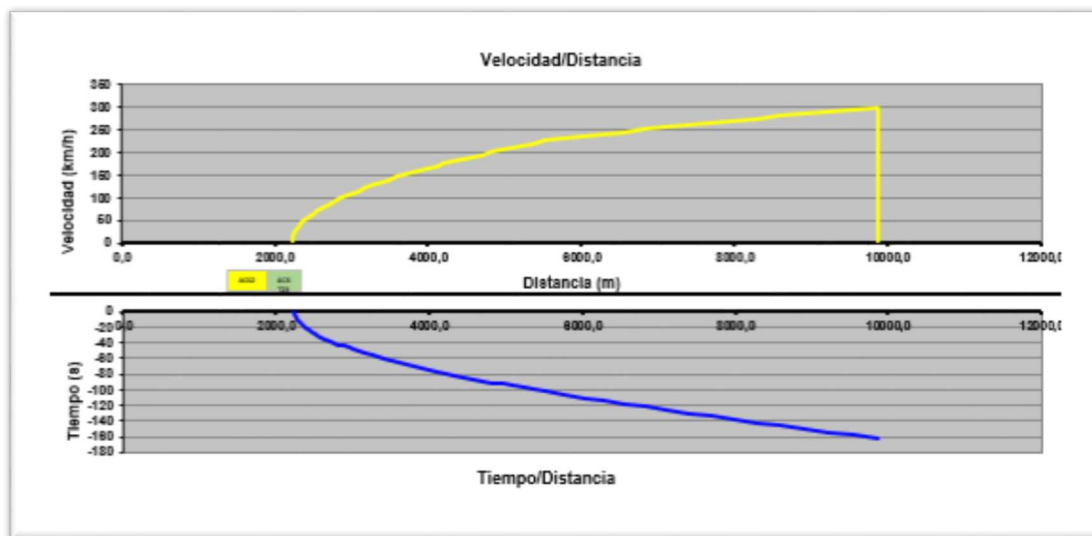
Para el primer tiempo (a) considerando las características de aceleración del tren, las características de la vía de la línea, la distancia de recorrido del tren desde el andén hasta liberar el cantón compartido ACST23 y la longitud del propio tren obtenemos el tiempo que le tomará al primer tren (IT9) liberar el cantón ACST23 desde el andén 3: 65.90 segundos, como se muestra en el siguiente gráfico de espacio - tiempo.

Gráfico de espacio – tiempo del primer tren



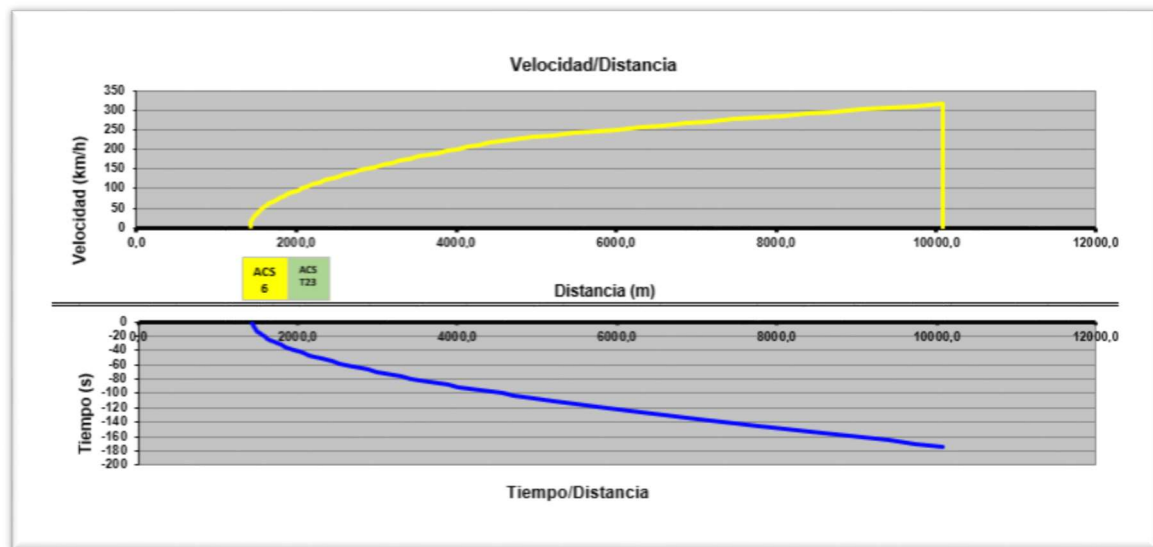
Par el cálculo del tercer tiempo (c), el segundo tren debe encontrarse en un punto de la línea dónde se encuentre circulando sin ninguna perturbación y a la velocidad nominal de 300 km/h instante antes de que el primer tren libere el cantón compartido ACST23. El siguiente gráfico muestra el punto kilométrico donde debe encontrarse el segundo tren cuando el primer tren libere el cantón ACST23, así como el tiempo de recorrido hacia llegar al inicio del cantón.

Gráfico de espacio vs velocidad y espacio vs tiempo del segundo tren



Una vez determinado el punto en el cual debe ubicarse el segundo tren (gráfico anterior) hay que determinar el tiempo que le tomará recorrer desde ese punto hasta el andén correspondiente. El siguiente gráfico muestra el tiempo de recorrido del segundo tren desde el cantón donde se encuentra circulando sin ser perturbado y en su velocidad nominal de 300 km/h hasta llegar al andén 6: 176,0 segundos. Así como la distancia de recorrido total del segundo tren hasta llegar al andén: 8533m.

Gráfico de espacio vs velocidad y espacio vs tiempo del segundo tren hasta el andén 6

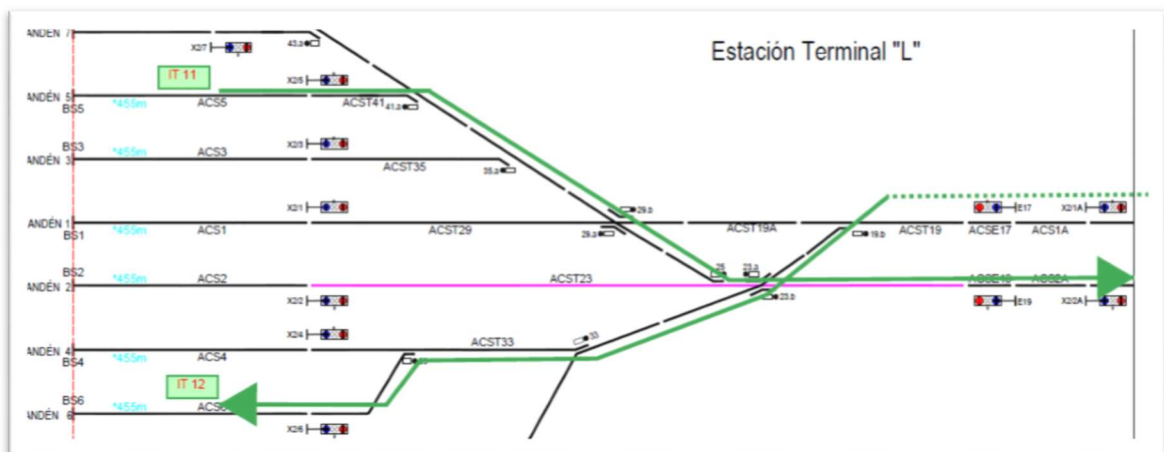


- Intervalo mínimo entre los itinerarios It12- It11, tipo de intervalo LLEGADA-SALIDA**

Es el tiempo del tren perseguidor en salir de la estación y vía correspondiente, menos el tiempo del primer tren desde que libera el punto singular de incompatibilidad hasta parar en la estación y vía correspondiente.

El siguiente esquema representa los dos itinerarios incompatibles:

Gráfico Itinerarios It12- It11

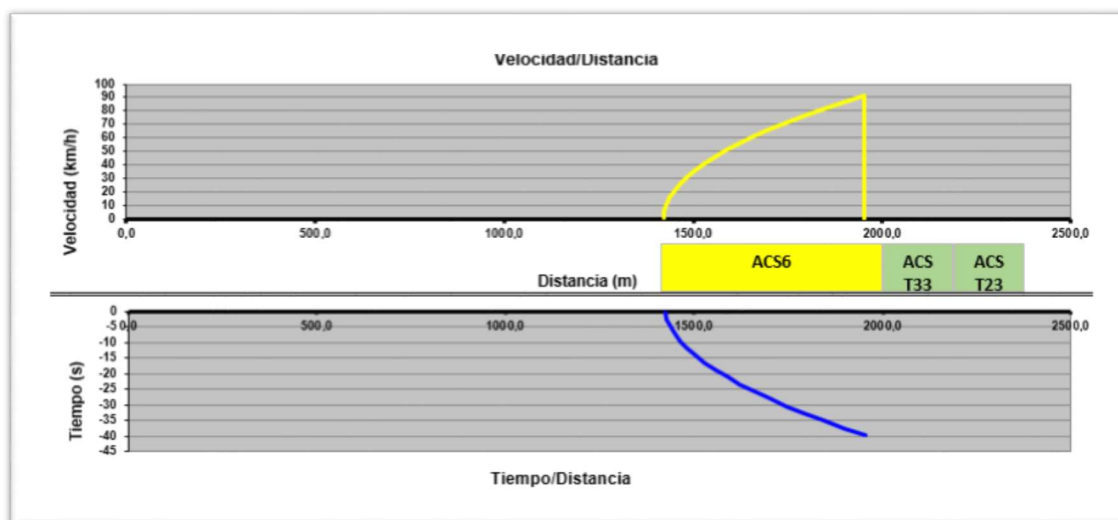


La siguiente tabla resume los tiempos involucrados en el cálculo del intervalo:

	t. Tren1	intervalo
L12-S11	41.0	41.0

El siguiente gráfico muestra donde debe ubicarse el primer tren para liberar el punto de incompatibilidad (ACS 2) teniendo en cuenta la longitud del tren (p.k. 1966 m).

También nos muestra el tiempo del primer tren en llegar al andén: 41 segundos.



- **Intervalo mínimo entre los itinerarios It11- It1, tipo de intervalo SALIDA – SALIDA**

Es el tiempo que transcurre desde que el primer tren sale de la estación hasta que un segundo tren pueda salir en condiciones de marcha no perturbada. Se determina mediante la suma de dos tiempos.

- a) Tiempo del primer tren desde el andén hasta liberar el cantón conflictivo/compartido: desde el andén 5 hasta liberar el cantón ACST23.
- b) Tiempo de que le toma al enclavamiento desenclavar el itinerario anterior, movimiento de agujas y establecimiento de nuevo itinerario: se ha establecido que será de 10 segundos.

El siguiente esquema representa parte del recorrido de los dos itinerarios incompatibles y el cantón conflictivo/compartido:

Gráfico Itinerarios Itl l- Itl



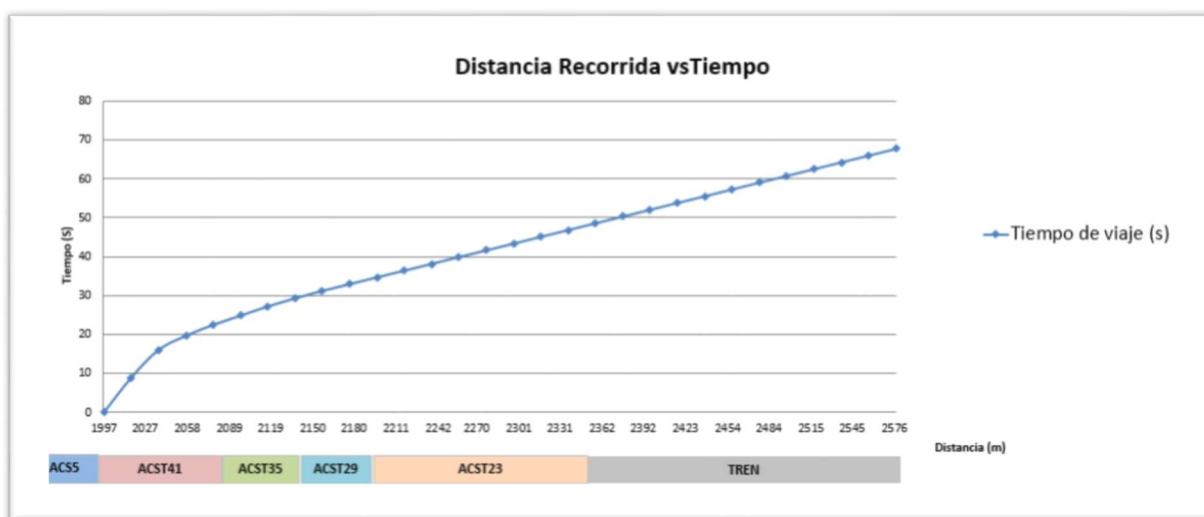
La siguiente tabla resume los tiempos (a) y (b) calculados:

	Tiempo en liberar ACST23 (a)	Tiempo del desenclavamiento, aguja, nuevo itinerario (b)	Tiempo del Intervalo
It11- It1	67.70	10	68.70

Explicación de los tiempos calculados:

Tiempo (a), considerando las características de aceleración del tren, las características de vía de la línea, la distancia de recorrido del tren hasta liberar el cantón compartido ACST23 y la longitud del propio tren obtenemos el tiempo que le tomará al primer tren (It11) liberar el cantón ACST23 desde donde se encuentra estacionado, el andén 2: 67.70 segundos.

Gráfico de espacio – tiempo del primer tren



PARTE 4. CONCLUSIONES Y APORTACIONES

Capítulo 1. Resultados obtenidos

1.1. Determinación de la capacidad de la línea

Como resultado del análisis del intervalo mínimo realizado en el capítulo anterior tanto en trayecto entre estaciones como en la estación terminal “L” se obtiene los siguientes valores:

- Intervalo mínimo teórico máximo en el trayecto de bloqueo es igual a 163,17 segundos.
- Intervalo mínimo teórico máximo en la estación terminal es de 249,90 segundos.

Como se puede observar los intervalos difieren, el intervalo en trayecto es mucho menor que el intervalo en la estación terminal.

Como se ha enfatizado a lo largo del proyecto el intervalo mínimo de la línea lo fija el mayor intervalo de la línea, en la línea en estudio el máximo intervalo mínimo se encuentra en la estación terminal “L”. Una vez identificado el intervalo mínimo de la línea se realiza el cálculo de la capacidad máxima que es determinada por el número de trenes máximo que puede circular por la línea a máxima velocidad y sin verse perturbada por la marcha del tren de adelante.

- Capacidad Máxima de la línea:

$$C_{max} = \frac{3600 \text{ seg}}{249,90 \text{ seg}} = 14.41 \left(\frac{\text{trenes}}{\text{hora}} \right)$$

Para la línea en estudio se establece que la capacidad máxima de la línea permite la circulación de 14.41 trenes por hora.

La estación terminal limita y reduce la capacidad de la línea debido a varios factores como son: rutas de entradas y salidas con intervalos más prolongados, posición crítica de las señales de entrada, longitud de circuitos de vía específicos, trenes estacionados, tiempo de embarque y desembarque de pasajeros, maniobras dentro de la estación. Debido a estos factores la capacidad de la línea dependerá directamente de la capacidad del punto singular.

1.2. Identificación de los puntos críticos de la línea

Durante el análisis de la capacidad se ha identificado los puntos críticos de la línea, los cuales se detallan a continuación:

La tipología de la Estación terminal: Un punto crítico que se ha identificado es la tipología de la estación terminal, el diseño de la estación terminal es un diseño tradicional denominado “fondo de saco”. Esta tipología define un determinado tipo de operación y movimiento de vehículos y pasajeros, pero desde un punto de vista tradicional. Actualmente las estaciones de las líneas de alta velocidad, como es la línea en estudio, requieren de una mayor fluidez de trenes y pasajeros para lo cual las tipologías de estaciones tradicionales como son la de “fondo de saco” quedan limitadas operativamente. La tipología de la estación puede limitar la capacidad de la línea debido a la necesidad de maniobras adicionales para el movimiento de los trenes de un andén a otro.

Otro punto crítico identificado es el cantón ACST23: Este cantón debido a su ubicación y longitud es un punto crítico para la entrada y salida de los trenes de la estación. Este cantón es el tramo de ingreso y salida de tres andenes (el andén 1, 2 y 4). Por lo cual cuando el cantón está siendo ocupado imposibilita el ingreso y salida de otro tren.

Capítulo 2. Propuestas de mejoras

Con el objetivo de optimizar la capacidad de la línea se propone las siguientes mejoras y como resultado del proyecto (estudio realizado) se ha visto una serie de posibles mejoras que se proponen y explican a continuación.

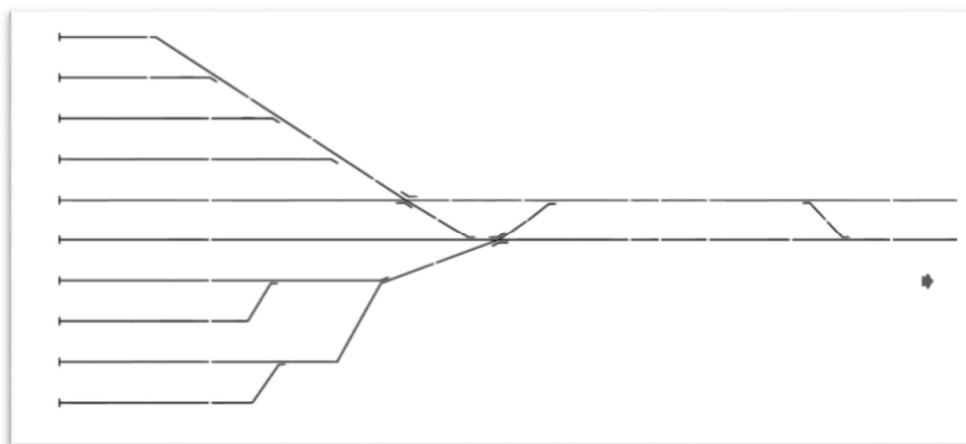
Modificación de la Tipología de la estación terminal “L” y tiempos de paradas en los andenes

La tipología actual es la denominada “fondo de saco” y se propone una tipología diferente en la que la estación terminal disponga de desvíos o travesías al final de la estación, con vías de maniobras previo a las toperas (como se muestra el gráfico “*Diseño propuesto*”) con lo que se logra principalmente aumentar la fluidez durante las maniobras de reubicación de trenes y vuelta de trenes, ya sea en los andenes para las próximas salidas o reubicación en las vías o andenes de apartado y disminuir los tiempos de paradas en los andenes.

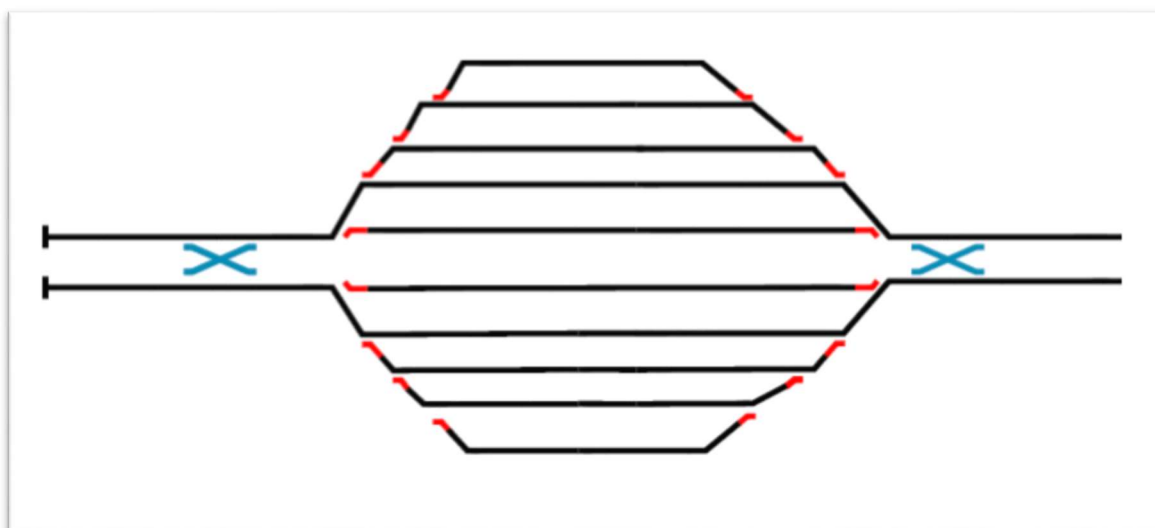
La ubicación de los desvíos por detrás de la estación permite que las maniobras se realicen por la parte posterior como se suele realizar en las líneas metropolitanas logrando de esta manera minimizar o eliminar las maniobras por delante de la estación que puedan obstaculizar el ingreso o salida de los trenes en servicio u ocasionar intervalos mayores entre los trenes en servicio. Esta maniobra siempre sería posible en situaciones en las que no se requiera tener una gran capacidad de tráfico o como situación de emergencia en caso de avería de los desvíos posteriores.

A continuación, se muestra la tipología actual y la propuesta.

Diseño actual: Tipología de estación en “fondo de saco”.



Diseño propuesto: Tipología de estación con desvíos en ambos extremos



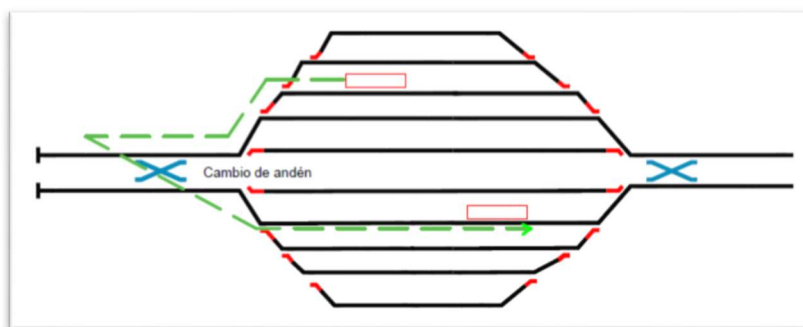
Por otro lado, como se ha indicado se propone disminuir el tiempo de parada en los andenes de 30 minutos a 9 minutos y adicionar 2 minutos para las maniobras de un andén a otro. Esta disminución de tiempo de parada en el andén es posible debido a la nueva topología de la vía.

En consecuencia, teniendo en cuenta la nueva topología propuesta con desvíos o travesías en la parte posterior de la estación terminal y considerando el tiempo de parada de 9 minutos y de 2 minutos de maniobra, se ha realizado un nuevo análisis de la capacidad de transporte en la estación, obteniendo como resultado una mejora notable en la capacidad de la estación

La capacidad mejora de **14 trenes que entran y salen a la hora** (con la topología anterior y tiempo de parada) a **20 trenes que entran y salen a la hora** (topología propuesta).

Explicación:

- Con la nueva topología, los trenes llegan a la estación desembarcan a los pasajeros (se estima 9 minutos para el desembarque de pasajeros) y se les reubican los trenes en otro andén para su próxima salida por la parte posterior de la estación mediante los desvíos o travesías (se estima un tiempo de maniobra de 2 minutos), permitiendo de esta manera que el andén quede libre para la llegada del siguiente tren.



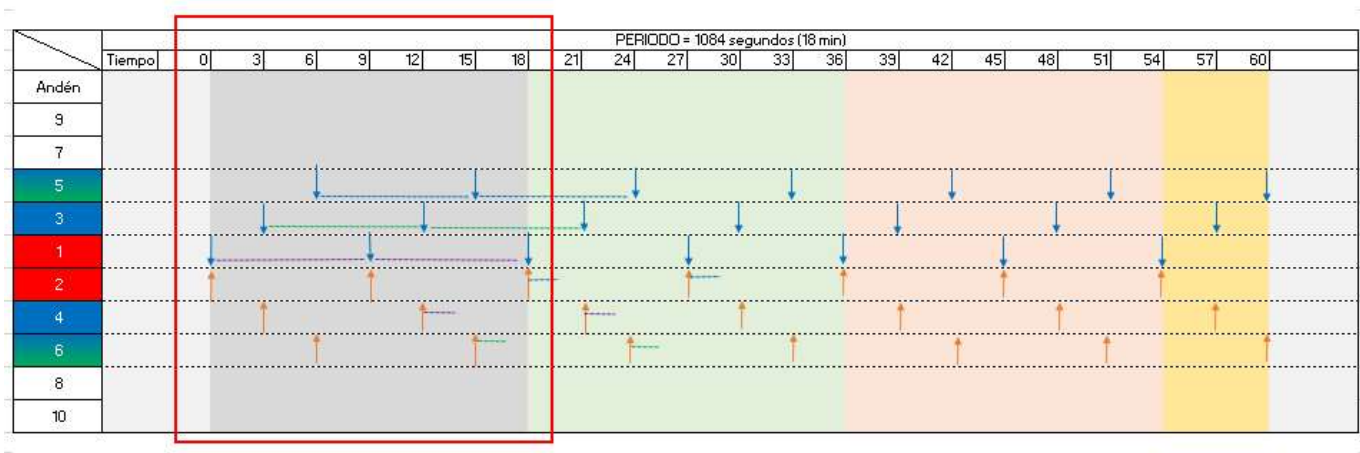
- Con la nueva topología también se logra establecer andenes fijos para cada tipo de servicio, a fin de no ocasionar confusión a los pasajeros.
- Con los nuevos parámetros descritos se establece nuevos itinerarios y se calcula el intervalo mínimo máximo, obteniendo como resultado que el intervalo máximo es de 180 segundos.

Tabla de Intervalos Mínimos entre itinerarios

Movimiento (Origen – Destino)	Itinerario	Movimiento (Origen – Destino)	Itinerario	Comentario	Intervalo (s)	Intervalo (m)
X2/2 - vía 2	S2	X2/4 - vía 2	S4	Incompatible	65,9	1,1
X2/4 - vía 2	S4	X2/6 - vía 2	S6	Incompatible	68,7	1,1
X2/6 - vía 2	S6	X2/2 - vía 2	S2	Incompatible	66	1,1
E17- BS 1	E1	E17- BS 3	E3	Incompatible	178	3,0
E17- BS 3	E3	E17- BS 5	E5	Incompatible	180	3,0
E17- BS 5	E5	E17- BS 1	E1	Incompatible	172	2,9

- El tiempo de parada en cada andén es de máximo de 9 minutos y de 2 minutos de maniobras.
- El siguiente gráfico andén – tiempo, muestra la distribución de los trenes en los andenes (del 1 al 6) y el minuto en el que un tren entra y sale de la estación (intervalo de 180 segundos entre trenes), las flechas azules representan los trenes que entran al andén y las flechas rojas representan los trenes que salen del andén. Las líneas discontinuas representan el tiempo que el tren se encuentra aparcado en el andén (9 minutos). Con la nueva topología y tiempos de paradas y tiempo de maniobras de los trenes se obtiene que el patrón se repite cada 1084 segundos equivalente a 18 minutos. Esto equivale a que pueden entrar y salir 20 trenes por hora como se muestra en el gráfico.

Gráfico Andén – Tiempo



- Con la nueva topología el número de itinerarios y rutas incompatible se reduce, debido a que los andenes que antes (con la tipología anterior) estaban ocupados debido a los 30 minutos de parada en el andén ahora se encuentran libres por la reducción del tiempo de parada.

Tabla de Incompatibilidades con la nueva tipología de estación

	X2/2 - vía 2	X2/4 - vía 2	X2/6 - vía 2	E17 - BS1	E17 - BS3	E17 - BS5
X2/2 - vía 2		I	I	C	C	C
X2/4 - vía 2	I		I	C	C	C
X2/6 - vía 2	I	I		C	C	C
E17 - BS1	C	C	C		I	I
E17 - BS3	C	C	C	I		I
E17 - BS5	C	C	C	I	I	

Tiempo de parada en la estación

Como se ha mencionado en el punto anterior el tiempo de vuelta y parada tiene un papel determinando en la capacidad de la línea y en el número de trenes de reserva de la línea.

Actualmente el explotador ha determinado para esta línea un tiempo de parada en el andén de 30 minutos por tren (para desembarque de pasajeros y limpieza en general) requiriendo como mínimo tener 3 trenes reserva para mantener la frecuencia de 14 trenes de entrada y salida por hora. Para la nueva configuración se ha determinado un tiempo de parada de 9 minutos aumentando la capacidad en 20 trenes de entrada y salida por hora considerando tener 4 trenes de reserva.

Se recomienda reducir el tiempo de parada de los trenes en los andenes, ya que a menor tiempo de parada de tren menor será el número de reservas de trenes que se requiera y menor será el intervalo entre trenes y mayor será la capacidad.

Características de aceleración y deceleración

Como se ha visto, en los capítulos anteriores el tiempo de movimiento de los trenes en las vueltas en las estaciones es crítico para la capacidad de la línea. Una forma de reducir estos tiempos de maniobra sería mejorando el par de arranque y frenado de los motores, es decir aumentando su potencia. Se propone mejorar las características de la aceleración y deceleración con el objeto de llegar a los valores de las líneas metropolitanas.

Diseño de los trenes

De igual manera, el tiempo de subida o bajada de viajeros influye de forma importante en la capacidad de la línea. Se propone que durante el diseño de los trenes se minimice la distancia entre las puertas o que en su defecto se considere un mayor número de puertas en el diseño de los trenes, con el objetivo que el tiempo de embarque y desembarque de pasajeros sea menor. El mucho menor tiempo de viaje de los trenes de alta velocidad, unido a un mejor servicio, y a una mayor movilidad del viajero de Alta Velocidad parece que aconseja modificar las características del vehículo ferroviario para adaptarlos a los nuevos requerimientos de servicio.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Montes Ponce De León, Fernando “Los Sistemas de Control de Tráfico y Señalización en el Ferrocarril”, Madrid, España 2011.

[2] García Álvarez, Alberto “Dinámica de los trenes en Alta Velocidad”, 10ª Edición Madrid 2015.

[3] Apuntes del Master Universitario en Sistemas Ferroviarios de la Universidad Pontificia Comillas de Madrid sobre “Sistemas Avanzados de Diseño y Control de Tráfico”.

[4] IRSE artículo, J.D. Francis “Optimising Performance Saving seconds”, 2017.

[5] UIC 406 leaflet “Capacity”, 1era edición 2004.

[6] UIC 510 leaflet “Influence of ETCS on line Capacity, Generic study”, 2007.

PARTE 5

ANEXOS

Anexo A

La siguiente tabla muestra el resultado del análisis de tres tipos de velocidades: (1) es la velocidad máxima impuesta por el operador para la explotación de la línea en un punto o tramo determinado. (2) es la velocidad calculada considerando las características de diseño tanto del tren como de la vía, como se detalla en el punto 2.5.1 'aceleración'. (3) es la velocidad final de circulación del tren considerando la menor de las dos tipos de velocidades anteriores de acuerdo al punto donde se encuentre el tren (a continuación, un muestreo de un tramo de 2000 metros):

Tabla de Velocidad de Recorrido

Metros	(1) Velocidad Máxima permitida por Vía (m/s)	Gradient e en milésimas	Curvatura (1/metros)	Aceleración (m/s2)= (F(N)-Frr)/Mequ	(2) Velocidad Calculada con datos tren y vía (m/s)	(3) Velocidad Final de Circulación (m/s)	Fuerza de Tracción (N)	Masa equivalente (Kg)/factor Cmg:1.04	Frr (KN)	Coef A (N)	Coef B (Ns/m)	Coef C (Ns ² /m ²)
0	11,11	0	0,000000	0,506	0	0	200000	388960	3,17	3165	161,28	6,92
20	11,11	0	0,000000	0,506	1,00	1,00	200000	388960	3,33	3165	161,28	6,92
40	11,11	0	0,000000	0,504	4,61	4,61	200000	388960	4,05	3165	161,28	6,92
60	11,11	0	0,000000	0,503	6,43	6,43	200000	388960	4,49	3165	161,28	6,92
80	11,11	0	0,000000	0,502	7,84	7,84	200000	388960	4,86	3165	161,28	6,92
100	11,11	0	0,000000	0,501	9,03	9,03	200000	388960	5,19	3165	161,28	6,92
120	11,11	0	0,000000	0,500	10,08	10,08	200000	388960	5,49	3165	161,28	6,92
140	11,11	0	0,000000	0,499	11,03	11,03	200000	388960	5,78	3165	161,28	6,92
160	11,11	0	0,000000	0,499	11,90	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
180	11,11	0	0,000000	0,499	12,71	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
200	11,11	0	0,000000	0,499	13,47	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
220	11,11	0	0,000000	0,499	14,19	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
240	11,11	0	0,000000	0,499	14,88	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
260	11,11	0	0,000000	0,499	15,54	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
280	11,11	0	0,000000	0,499	16,17	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92

Metros	(1) Velocidad Máxima permitida por Vía (m/s)	Gradient e en milésim as	Curvatura (1/metros)	Aceleración (m/s2)= (F(N)- Frr)/Mequ	(2) Velocidad Calculada con datos tren y vía (m/s)	(3) Velocidad Final de Circulación (m/s)	Fuerza de Tracción (N)	Masa equivalente (Kg)/factor Cmg:1.04	Frr (KN)	Coef A (N)	Coef B (Ns/m)	Coef C (Ns^2/m^ 2)
300	11,11	5,3	0,000000	0,449	16,77	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
320	11,11	5,3	0,000000	0,449	17,30	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
340	11,11	5,3	0,000000	0,449	17,81	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
360	11,11	5,3	0,000000	0,449	18,31	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
380	11,11	5,3	0,000000	0,449	18,79	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
400	11,11	5,3	0,000000	0,449	19,27	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
420	11,11	5,3	0,000000	0,449	19,73	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
440	11,11	5,3	0,000000	0,449	20,18	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
460	11,11	5,3	0,000000	0,449	20,62	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
480	11,11	5,3	0,000000	0,449	21,05	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
500	11,11	5,3	0,000000	0,449	21,47	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
520	11,11	5,3	0,000000	0,449	21,89	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
540	11,11	5,3	0,000000	0,449	22,29	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
560	11,11	5,3	0,000000	0,449	22,69	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
580	11,11	5,3	0,000000	0,449	23,09	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
600	11,11	5,3	0,000000	0,449	23,47	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
620	11,11	5,3	0,000000	0,449	23,85	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
640	11,11	5,3	0,000000	0,449	24,22	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
660	11,11	5,3	0,000000	0,449	24,59	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
680	11,11	5,3	0,000000	0,449	24,96	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
700	11,11	5,3	0,000000	0,449	25,31	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
720	11,11	5,3	0,000000	0,449	25,67	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
740	11,11	5,3	0,000000	0,449	26,01	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
760	11,11	5,3	0,000000	0,449	26,36	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
780	11,11	5,3	0,000000	0,449	26,70	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92

Metros	(1) Velocidad Máxima permitida por Vía (m/s)	Gradient e en milésim as	Curvatura (1/metros)	Aceleración (m/s2)= (F(N)- Frr)/Mequ	(2) Velocidad Calculada con datos tren y vía (m/s)	(3) Velocidad Final de Circulación (m/s)	Fuerza de Tracción (N)	Masa equivalente (Kg)/factor Cmg:1.04	Frr (KN)	Coef A (N)	Coef B (Ns/m)	Coef C (Ns^2/m^ 2)
800	11,11	5,3	0,000000	0,449	27,03	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
820	11,11	5,3	0,000000	0,449	27,36	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
840	11,11	5,3	0,000000	0,449	27,69	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
860	11,11	5,3	0,000000	0,449	28,01	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
880	11,11	5,3	0,000000	0,449	28,33	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
900	11,11	5,3	0,000000	0,449	28,64	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
920	11,11	5,3	0,000000	0,449	28,96	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
940	11,11	5,3	0,000000	0,449	29,26	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
960	11,11	5,3	0,000000	0,449	29,57	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
980	11,11	5,3	0,000000	0,449	29,87	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
1000	11,11	5,3	0,000000	0,449	30,17	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
1020	11,11	5,3	0,000000	0,449	30,47	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
1040	11,11	5,3	0,000000	0,449	30,76	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
1060	11,11	5,3	0,000000	0,449	31,05	11,11	200000	388960	5,81	3165	161,28	6,92
1080	27,77	5,3	0,000000	0,431	31,34	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1100	27,77	5,3	0,000000	0,431	31,61	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1120	27,77	5,3	0,000000	0,431	31,89	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1140	27,77	5,3	0,000000	0,431	32,15	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1160	27,77	5,3	0,000000	0,431	32,42	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1180	27,77	5,3	0,000000	0,431	32,69	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1200	27,77	5,3	0,000000	0,431	32,95	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1220	27,77	5,3	0,000000	0,431	33,21	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1240	27,77	5,3	0,000000	0,431	33,47	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1260	27,77	5,3	0,000000	0,431	33,72	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1280	27,77	5,3	0,000000	0,431	33,98	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92

Metros	(1) Velocidad Máxima permitida por Vía (m/s)	Gradient e en milésimas	Curvatura (1/metros)	Aceleración (m/s2)= (F(N)-Frr)/Mequ	(2) Velocidad Calculada con datos tren y vía (m/s)	(3) Velocidad Final de Circulación (m/s)	Fuerza de Tracción (N)	Masa equivalente (Kg)/factor Cmg:1.04	Frr (KN)	Coef A (N)	Coef B (Ns/m)	Coef C (Ns^2/m^2)
1300	27,77	5,3	0,000000	0,431	34,23	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1320	27,77	5,3	0,000000	0,431	34,48	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1340	27,77	5,3	0,000000	0,431	34,73	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1360	27,77	5,3	0,000000	0,431	34,98	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1380	27,77	5,3	0,000000	0,431	35,22	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1400	27,77	5,3	0,000000	0,431	35,47	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1420	27,77	5,3	0,000000	0,431	35,71	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1440	27,77	-5,3	0,000000	0,531	35,95	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1460	27,77	-5,3	0,000000	0,531	36,24	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1480	27,77	-5,3	0,000000	0,531	36,54	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1500	27,77	-5,3	0,000000	0,531	36,83	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1520	27,77	-5,3	0,000000	0,531	37,11	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1540	27,77	-5,3	0,000000	0,531	37,40	27,77	200000	388960	12,98	3165	161,28	6,92
1560	55,55	-5,3	0,000000	0,515	37,68	37,68	200000	388960	19,07	3165	161,28	6,92
1580	55,55	-5,3	0,000000	0,515	37,95	37,95	200000	388960	19,25	3165	161,28	6,92
1600	55,55	-5,3	0,000000	0,514	38,22	38,22	200000	388960	19,44	3165	161,28	6,92
1620	55,55	-5,3	0,000000	0,514	38,49	38,49	200000	388960	19,63	3165	161,28	6,92
1640	55,55	-5,3	0,000000	0,513	38,76	38,76	200000	388960	19,81	3165	161,28	6,92
1660	55,55	-5,3	0,000000	0,513	39,02	39,02	200000	388960	19,99	3165	161,28	6,92
1680	55,55	-5,3	0,000000	0,512	39,28	39,28	200000	388960	20,18	3165	161,28	6,92
1700	55,55	-5,3	0,000000	0,512	39,54	39,54	200000	388960	20,36	3165	161,28	6,92
1720	55,55	-5,3	0,000000	0,511	39,80	39,80	200000	388960	20,55	3165	161,28	6,92
1740	55,55	-5,3	0,000000	0,511	40,06	40,06	200000	388960	20,73	3165	161,28	6,92
1760	55,55	-5,3	0,000000	0,510	40,31	40,31	200000	388960	20,91	3165	161,28	6,92
1780	55,55	-5,3	0,000000	0,510	40,56	40,56	200000	388960	21,09	3165	161,28	6,92

Metros	(1) Velocidad Máxima permitida por Vía (m/s)	Gradient e en milésim as	Curvatura (1/metros)	Aceleración (m/s2)= (F(N)- Frr)/Mequ	(2) Velocidad Calculada con datos tren y vía (m/s)	(3) Velocidad Final de Circulación (m/s)	Fuerza de Tracción (N)	Masa equivalente (Kg)/factor Cmg:1.04	Frr (KN)	Coef A (N)	Coef B (Ns/m)	Coef C (Ns^2/m^ 2)
1800	55,55	-5,3	0,000000	0,509	40,81	40,81	200000	388960	21,27	3165	161,28	6,92
1820	55,55	-5,3	0,000000	0,509	41,06	41,06	200000	388960	21,46	3165	161,28	6,92
1840	55,55	-5,3	0,000000	0,509	41,31	41,31	200000	388960	21,64	3165	161,28	6,92
1860	55,55	-5,3	0,000000	0,508	41,56	41,56	200000	388960	21,82	3165	161,28	6,92
1880	55,55	-5,3	0,000000	0,508	41,80	41,80	200000	388960	22,00	3165	161,28	6,92
1900	55,55	-5,3	0,000000	0,510	42,04	42,04	200958,41	388960	22,18	3165	161,28	6,92
1920	55,55	-5,3	0,000000	0,506	42,28	42,28	199800,78	388960	22,36	3165	161,28	6,92
1940	55,55	-5,3	0,000000	0,503	42,52	42,52	198658,47	388960	22,54	3165	161,28	6,92
1960	55,55	-5,3	0,000000	0,499	42,76	42,76	197543,04	388960	22,71	3165	161,28	6,92
1980	55,55	-5,3	0,000000	0,496	42,99	42,99	196453,49	388960	22,89	3165	161,28	6,92
2000	55,55	-5,3	0,000000	0,493	43,22	43,22	195388,81	388960	23,06	3165	161,28	6,92

Anexo B

Tabla de Distancia de Frenado

Tabla de Distancia de Frenado						
FRENO DE SERVICIO						
TABLA DE DISTANCIA DE FRENADO (m)						
GRAD	300-0	200-0	160-0	100-0	50-0	30-0
-0,025	19583,9	4461,2	2873,0	1143,1	299,7	114,5
-0,024	18259,0	4344,2	2798,1	1113,8	292,3	111,9
-0,023	17126,8	4233,3	2727,1	1086,1	285,4	109,4
-0,022	16146,2	4128,0	2659,7	1059,8	278,8	107,0
-0,021	15287,2	4028,0	2595,7	1034,8	272,6	104,8
-0,02	14527,3	3932,8	2534,8	1011,0	266,6	102,7
-0,019	13849,4	3842,2	2476,8	988,3	261,0	100,6
-0,018	13240,2	3755,7	2421,5	966,7	255,6	98,7
-0,017	12689,2	3673,2	2368,6	946,1	250,4	96,8
-0,016	12187,9	3594,3	2318,2	926,4	245,5	95,0
-0,015	11729,5	3518,9	2269,9	907,5	240,8	93,3
-0,014	11308,5	3446,6	2223,6	889,4	236,2	91,7
-0,013	10920,1	3377,4	2179,3	872,1	231,9	90,2
-0,012	10560,5	3310,9	2136,8	855,5	227,8	88,7
-0,011	10226,4	3247,1	2095,9	839,6	223,8	87,2
-0,01	9915,1	3185,8	2056,7	824,2	219,9	85,8
-0,009	9624,2	3126,9	2019,0	809,5	216,3	84,5
-0,008	9351,6	3070,2	1982,7	795,3	212,7	83,2
-0,007	9095,5	3015,5	1947,7	781,7	209,3	82,0
-0,006	8854,4	2962,9	1914,0	768,5	206,0	80,8
-0,005	8627,0	2912,1	1881,5	755,8	202,8	79,7
-0,004	8412,1	2863,1	1850,2	743,6	199,8	78,6
-0,003	8208,6	2815,8	1819,9	731,7	196,8	77,5
-0,002	8015,5	2770,1	1790,6	720,3	194,0	76,5
-0,001	7832,1	2725,9	1762,3	709,2	191,2	75,5
0	7657,7	2683,1	1735,0	698,6	188,5	74,5
0,001	7491,4	2641,8	1708,5	688,2	185,9	73,6
0,002	7332,9	2601,7	1682,9	678,2	183,4	72,7
0,003	7181,4	2562,9	1658,0	668,5	181,0	71,8
0,004	7036,6	2525,2	1633,9	659,1	178,7	71,0
0,005	6897,9	2488,8	1610,6	650,0	176,4	70,2
0,006	6765,1	2453,4	1587,9	641,1	174,2	69,4
0,007	6637,6	2419,0	1565,9	632,5	172,0	68,6
0,008	6515,2	2385,6	1544,6	624,2	169,9	67,8

Tabla de Distancia de Frenado						
FRENO DE SERVICIO						
TABLA DE DISTANCIA DE FRENADO (m)						
GRAD	300-0	200-0	160-0	100-0	50-0	30-0
0,009	6397,5	2353,2	1523,8	616,1	167,9	67,1
0,01	6284,4	2321,7	1503,7	608,2	165,9	66,4
0,011	6175,4	2291,1	1484,1	600,5	164,0	65,7
0,012	6070,5	2261,3	1465,0	593,1	162,2	65,0
0,013	5969,3	2232,3	1446,4	585,8	160,4	64,4
0,014	5871,6	2204,1	1428,4	578,8	158,6	63,8
0,015	5777,3	2176,6	1410,8	571,9	156,9	63,1
0,016	5686,2	2149,8	1393,7	565,2	155,2	62,5
0,017	5598,1	2123,7	1377,0	558,7	153,6	62,0
0,018	5512,9	2098,3	1360,7	552,4	152,0	61,4
0,019	5430,4	2073,5	1344,8	546,2	150,4	60,8
0,02	5350,5	2049,3	1329,3	540,1	148,9	60,3
0,021	5273,0	2025,7	1314,3	534,2	147,4	59,7
0,022	5198,0	2002,7	1299,5	528,5	146,0	59,2
0,023	5125,1	1980,2	1285,1	522,8	144,6	58,7
0,024	5054,4	1958,3	1271,1	517,4	143,2	58,2
0,025	4985,8	1936,9	1257,4	512,0	141,9	57,7

Anexo C

Tabla de Tiempo de recorrido

Metros	Aceleración(m/s ²)	Velocidad Final de Circulación (m/s)	Tiempo de viaje (s)
0	0,506	0	0
20	0,506	1,00	8,9
40	0,504	4,61	16,0
60	0,503	6,43	19,6
80	0,502	7,84	22,5
100	0,501	9,03	24,8
120	0,500	10,08	26,9
140	0,499	11,03	28,8
160	0,499	11,11	30,6
180	0,499	11,11	32,3
200	0,499	11,11	34,0
220	0,499	11,11	35,8
240	0,499	11,11	37,5
260	0,499	11,11	39,2
280	0,499	11,11	41,0
300	0,449	11,11	42,7
320	0,449	11,11	44,4
340	0,449	11,11	46,2
360	0,449	11,11	47,9
380	0,449	11,11	49,6
400	0,449	11,11	51,4
420	0,449	11,11	53,1
440	0,449	11,11	54,9
460	0,449	11,11	56,6
480	0,449	11,11	58,3
500	0,449	11,11	60,1
520	0,449	11,11	61,8
540	0,449	11,11	63,6
560	0,449	11,11	65,3
580	0,449	11,11	67,0
600	0,449	11,11	68,8
620	0,449	11,11	70,5
640	0,449	11,11	72,2
660	0,449	11,11	74,0
680	0,449	11,11	75,7
700	0,449	11,11	77,5
720	0,449	11,11	79,2
740	0,449	11,11	80,9

Metros	Aceleración(m/s ²)	Velocidad Final de Circulación (m/s)	Tiempo de viaje (s)
760	0,449	11,11	82,7
780	0,449	11,11	84,4
800	0,449	11,11	86,2
820	0,449	11,11	87,9
840	0,449	11,11	89,6
860	0,449	11,11	91,4
880	0,449	11,11	93,1
900	0,449	11,11	94,9
920	0,449	11,11	96,6
940	0,449	11,11	98,3
960	0,449	11,11	100,1
980	0,449	11,11	101,8
1000	0,449	11,11	103,5
1020	0,449	11,11	105,3
1040	0,449	11,11	107,0
1060	0,449	11,11	108,8
1080	0,431	27,77	110,5
1100	0,431	27,77	111,2
1120	0,431	27,77	111,9
1140	0,431	27,77	112,7
1160	0,431	27,77	113,4
1180	0,431	27,77	114,1
1200	0,431	27,77	114,8
1220	0,431	27,77	115,5
1240	0,431	27,77	116,2
1260	0,431	27,77	117,0
1280	0,431	27,77	117,7
1300	0,431	27,77	118,4
1320	0,431	27,77	119,1
1340	0,431	27,77	119,8
1360	0,431	27,77	120,5
1380	0,431	27,77	121,2
1400	0,431	27,77	122,0
1420	0,431	27,77	122,7
1440	0,531	27,77	123,4
1460	0,531	27,77	124,1
1480	0,531	27,77	124,8
1500	0,531	27,77	125,5
1520	0,531	27,77	126,3
1540	0,531	27,77	127,0
1560	0,515	37,68	127,7
1580	0,515	37,95	128,2

Metros	Aceleración(m/s ²)	Velocidad Final de Circulación (m/s)	Tiempo de viaje (s)
1600	0,514	38,22	128,7
1620	0,514	38,49	129,3
1640	0,513	38,76	129,8
1660	0,513	39,02	130,3
1680	0,512	39,28	130,8
1700	0,512	39,54	131,3
1720	0,511	39,80	131,8
1740	0,511	40,06	132,3
1760	0,510	40,31	132,8
1780	0,510	40,56	133,3
1800	0,509	40,81	133,8
1820	0,509	41,06	134,3
1840	0,509	41,31	134,8
1860	0,508	41,56	135,3
1880	0,508	41,80	135,7
1900	0,510	42,04	136,2
1920	0,506	42,28	136,7
1940	0,503	42,52	137,2
1960	0,499	42,76	137,6
1980	0,496	42,99	138,1
2000	0,493	43,22	138,6