



Máster Universitario en  
Sistemas Ferroviarios

# **Estudio de explotación de un sistema ferroviario urbano – interurbano. Alternativas de operación.**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CURSO: 2020/2021

Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA ICAI

Autor: Miguel Garrote García

Director: Alfonso Parra Pascual







**TÍTULO:** Estudio de explotación de un sistema ferroviario urbano – interurbano. Alternativas de operación.

**AUTOR:** Miguel Garrote García

Firma:



**DIRECTOR:** Alfonso Parra Pascual

Firma:





## FICHA TÉCNICA

AUTOR: Miguel Garrote García.

Director: Alfonso Parra Pascual.

Programa y curso académico: Máster universitario en Sistemas Ferroviarios. Curso 2020/2021.

Título: Estudio de explotación de un sistema ferroviario urbano – interurbano. Alternativas de operación.

### Resumen:

El presente Trabajo Fin de Máster aborda la definición de un programa de explotación de una línea ferroviaria que combina tramos urbanos e interurbanos.

Un programa de explotación debe cumplir las necesidades de transporte de una demanda previamente analizada, que será la que determine, junto con el material rodante utilizado, las frecuencias necesarias para alcanzar los niveles de servicio requeridos. El programa analizará no solo el año de la puesta en servicio del sistema, sino toda su vida útil.

Un plan de operación es clave para la correcta definición de un sistema de transporte. Sirve como dato de partida para la definición de muchos de los subsistemas restantes de un sistema ferroviario. Por esto, en el presente Trabajo Fin de Máster se indaga en algunos aspectos más allá del plan de operación propiamente dicho, como el dimensionamiento de personal o la descripción de otros subsistemas como señalización, electrificación, comunicaciones, etc.

El plan de explotación se valida finalmente mediante una malla de explotación que confirma la posibilidad de operar el sistema con las condiciones establecidas y demuestra la estabilidad del mismo.



<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
<b>3. PLANIFICACIÓN DE TAREAS .....</b>	<b>2</b>
<b>4. VISIÓN GENERAL DEL PROYECTO.....</b>	<b>2</b>
4.1.Requerimientos y objetivos generales del proyecto .....	2
4.2.Características de la línea .....	3
<b>5. ESTUDIO DE DEMANDA.....</b>	<b>4</b>
5.1.Movilidad diaria en la línea .....	4
5.2.Perfil de carga de la línea .....	4
5.3.Distribución horaria de la demanda.....	5
<b>6. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA .....</b>	<b>6</b>
6.1.Esquema funcional .....	6
6.1.1.Escapes de emergencia .....	6
6.1.2.Kilometraje de la línea .....	6
6.1.2.1.Posición de las estaciones .....	7
6.1.3.Diseño del trazado .....	7
6.1.3.1.Trazado horizontal .....	7
6.1.3.2.Trazado vertical .....	8
6.1.4.Infraestructura de vía .....	8
6.1.5.Aparatos de vía .....	8
6.2.Electrificación .....	8
6.3.Estaciones y terminales .....	9
6.3.1.Criterios de diseño .....	9
6.3.2.Estaciones .....	9
6.3.3.Terminales e intercambiadores.....	9
6.4.Material rodante .....	9
6.4.1.Curva de potencia y características del tren .....	10
6.4.2.Capacidad de los trenes .....	11
6.4.3.Acople/desacople de unidades .....	12
6.5.Sistemas de señalización y control de trenes.....	12
6.6.Sistemas de comunicaciones y control.....	12

6.7.Vehículos no comerciales .....	13
6.7.1.Operación de vehículos no comerciales .....	13
<b>7. ESTIMACIÓN DE TIEMPOS DE RECORRIDO Y DIMENSIONAMIENTO DE FLOTA.....</b>	<b>13</b>
7.1.Perfil de velocidad .....	13
7.2.Tiempos de parada .....	20
7.2.1.Hipótesis .....	20
7.2.2.Tiempos de parada calculados en horas punta .....	20
7.3.Inversión de marcha .....	23
7.3.1.Inversión de marcha en Estación 1 (inicial) .....	23
7.3.2.Inversión de marcha en Estación 20 (final).....	23
7.3.3.Inversión de marcha en Estación 13 (intermedia) .....	24
7.3.4.Inversión de marcha en Estación 1 (inicial) .....	25
7.3.5.Inversión de marcha en Estación 20 (final).....	25
7.3.6.Inversión de marcha en estación 13 (intermedia).....	26
7.4.Retrasos por la interacción con otros tráficoos .....	27
7.5.Tiempos de recorrido .....	27
<b>8. OPERACIÓN DE LA LINEA .....</b>	<b>30</b>
8.1.Análisis de alternativas de operación .....	30
8.1.1.Bucle único .....	31
8.1.1.1.Tiempos de recorrido .....	31
8.1.1.2.Frecuencia necesaria .....	31
8.1.1.3.Flota necesaria .....	31
8.1.1.4.Producción ferroviaria .....	32
8.1.2.Bucles tangenciales .....	32
8.1.2.1.Tiempos de recorrido .....	32
8.1.2.2.Frecuencia necesaria .....	32
8.1.2.3.Flota necesaria .....	33
8.1.2.4.Producción ferroviaria .....	33
8.1.3.Bucles concéntricos .....	34
8.1.3.1.Tiempos de recorrido .....	34
8.1.3.2.Frecuencia necesaria .....	34
8.1.3.3.Flota necesaria .....	34

8.1.3.4.Producción ferroviaria .....	34
8.1.4.Comparación entre modos de operación .....	35
8.2.Modos de conducción .....	35
8.2.1.Transición entre modos .....	36
8.3.Subida y bajada de viajeros .....	36
8.4.Inversión de marcha .....	37
8.4.1.Inspección de seguridad y limpieza.....	37
8.5.Gestión de pequeñas perturbaciones .....	37
8.6.Comienzo y cierre del servicio comercial .....	37
8.6.1.Preparación .....	37
8.6.2.Rutas de inserción y retirada de trenes.....	38
8.6.3.Cambios de frecuencia .....	41
8.6.4.Cierre de la línea .....	42
8.6.5.Bandas de mantenimiento .....	42
8.7.Supervisión de la operación .....	43
8.7.1.Monitorización de trenes .....	43
8.7.2.Control de Tráfico Centralizado (CTC) .....	43
8.7.3.Funciones del CTC .....	43
8.8.Parámetros de operación .....	44
8.8.1.Patrón de servicios .....	44
8.8.2.Días laborables .....	44
8.8.3.Sábados .....	44
8.8.4.Domingos y festivos .....	44
8.8.5.Horario .....	44
8.9.Capacidad de transporte para un día laborable.....	46
8.10.Tiempo de vuelta .....	50
8.11.Tiempo adicional para regulación .....	50
8.12.Velocidad comercial .....	50
8.13.Dimensionamiento de la flota .....	51
8.14.Kilometraje de los trenes .....	51
<b>9. PERSONAL.....</b>	<b>54</b>
9.1.Personal general: .....	56
9.2.Operación: .....	57

9.3.Mantenimiento:	58
<b>10.MODOS DEGRADADOS DE OPERACIÓN</b>	<b>59</b>
10.1.Perturbaciones e intervenciones	59
10.1.1.Recursos	59
10.1.2.Rescate de un tren fallido	59
10.1.3.Cierre parcial de una vía	60
10.1.4.Cierre parcial en las dos vías	60
10.1.5.Servicios sustitutivos de autobuses	61
10.1.6.Cierre total de la línea	61
10.2.Evacuación de pasajeros	61
10.2.1.Estaciones	61
10.2.2.En ruta	61
<b>11.RECINTO DE TALLERES Y COCHERAS (DEPÓSITO)</b>	<b>61</b>
11.1.Concepto	61
11.2.Funciones e instalaciones	61
11.2.1.Área de estacionamiento	61
11.2.2.Taller – Área de mantenimiento de material rodante	62
11.2.3.Área de mantenimiento de infraestructura e instalaciones fijas	62
11.2.4.Edificio del CTC	62
11.2.5.Alimentación eléctrica - subestación	62
11.2.6.Equipamiento e instalaciones externas para mantenimiento	62
11.2.7.Vía de pruebas	62
11.2.8.Otras instalaciones exteriores	62
<b>12.CONCLUSIONES Y APORTACIONES</b>	<b>63</b>
<b>13.BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>65</b>
ANEXO I. ESTUDIO DE DEMANDA	66
ANEXO II. CUADRO DE VELOCIDADES MÁXIMAS	72
ANEXO III. MALLA DE OPERACIÓN	73

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de explotación de un sistema ferroviario es uno de los primeros documentos que comienza a desarrollarse al inicio de un proyecto y uno de los últimos en cerrarse antes de finalizar el mismo. Es un documento vivo que tiene interacción con la gran mayoría de las disciplinas involucradas en un sistema ferroviario.

Esta interacción es bidireccional, pues las disciplinas se nutren de la información y resultados arrojados por el plan de operación, que a su vez necesita de los datos de partida proporcionados por las mismas disciplinas para su correcto desarrollo.

En la actualidad, existen programas y simuladores ferroviarios capaces de modelizar redes enteras de transporte con el fin de optimizar la explotación de las mismas, para lo que utilizan datos de infraestructura, señalización, material rodante, electrificación, etc. Estos programas, una vez introducidos los parámetros tanto de infraestructura e instalaciones como de explotación, simulan la marcha de los trenes y detectan los puntos conflictivos y cuellos de botella existentes en la red, permitiendo detectar rápidamente los problemas potenciales y abordar la solución de una manera eficiente.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster es la elaboración de un plan de explotación de una línea ferroviaria de tren-tram entre dos núcleos urbanos, poniendo énfasis en las particularidades que ofrece un trazado con secciones urbanas e interurbanas diferenciadas, cada una de las cuales requiere de unos sistemas diferentes para la explotación.

El documento tiene como objetivo presentar una metodología de trabajo encaminada a satisfacer las necesidades de transporte existente entre dos núcleos de población, en función de la demanda esperada y los niveles de servicio deseados, tanto para la puesta en servicio como para la totalidad de la vida útil del sistema.

El Trabajo busca también mostrar la influencia que tiene el plan de explotación a nivel global de un proyecto, las interfaces del mismo con el resto de disciplinas implicadas, así como demostrar que se trata de un documento vivo que se nutre de las aportaciones de otras disciplinas a lo largo del desarrollo del proyecto.

Se busca además mostrar la importancia de un buen plan de operación para el correcto diseño de todo el sistema de transporte, para lo cual se indagará en algunos aspectos más allá del plan de operación para los que este es dato de partida: dimensionamiento de personal y espacios, etc.

Como objetivo final se busca validar el plan de explotación definido mediante una malla de explotación que confirme la posibilidad de operar el sistema en las condiciones establecidas, así como que demuestre la estabilidad del mismo.

A título personal, se busca profundizar en el conocimiento en materia de explotación de un sistema de transporte ferroviario, cuyo futuro es prometedor.

### 3. PLANIFICACIÓN DE TAREAS

En el siguiente cronograma se incluyen las tareas identificadas y su planificación temporal

*Tabla 1: Cronograma de tareas*

	Marzo			Abril			Mayo			Junio		
Estudio de demanda												
Análisis de opciones de material rodante												
Determinación de frecuencias de servicio												
Cálculo de tiempos de recorrido (simulaciones)												
Dimensionamiento de flota y cálculo de producción ferroviaria												
Elaboración de malla de explotación												
Redacción de memoria e informe de resultados												

### 4. VISIÓN GENERAL DEL PROYECTO

La línea ferroviaria objeto de estudio de este Trabajo consiste en una línea entre dos ciudades de tamaño medio separadas unos 40,5 km entre sí. La línea combina un sistema de transporte público interurbano con un sistema de transporte de masas a nivel municipal. La tecnología tren-tram facilitará el viaje en los tramos urbanos e interurbanos sin necesidad de realizar un cambio de tren en el trayecto.

La línea busca complementar la red de servicios de transporte público existentes en la zona (autobuses, tren regional), dando servicio a los residentes de ambas ciudades, así como a los habitantes de las zonas atravesadas por el corredor. De esta forma, el sistema ferroviario absorberá parte del tráfico por carretera que realice el mismo trayecto, reduciendo la congestión, ruido y polución, especialmente durante las horas punta del día.

#### 4.1. Requerimientos y objetivos generales del proyecto

El objetivo de la línea de metro ligero es constituir un sistema seguro, fiable, de alta capacidad, moderno, accesible, atractivo y respetuoso con el medio ambiente, que conecte dos ciudades con alta movilidad entre ellas, además de dar servicio a los habitantes de las comunidades presentes en el corredor de la línea.

La línea operará como un sistema ferroviario de alta frecuencia ofreciendo servicios rápidos, eficientes y cómodos con el mayor nivel de fiabilidad. Su operación será una mezcla de elementos de los tranvías urbanos (en tramos urbanos) y los trenes de cercanías (en tramos interurbanos).

Los vehículos tendrán un ancho de 2,65 metros y hasta 70 metros de longitud. Para cubrir la demanda esperada, se anticipa que los intervalos mínimos serán de unos 5,5 minutos en el año 2030, bajando hasta los 4 minutos en el año 2050. Esto se describirá con más detalle en los capítulos referentes a operación, ubicados más adelante en el documento. Los patrones de servicio e intervalos calculados estarán sujetos a cambios a lo largo de la vida del proyecto, de acuerdo con la evolución real de la demanda, posibles desarrollos urbanísticos, etc.

Con el fin de garantizar la mayor flexibilidad posible al operador del sistema, el sistema de señalización se diseñará para soportar intervalos mínimos de 3 minutos a lo largo de la línea en el tramo más cargado (Estación 1 a Estación 13) y de 4 minutos en el resto de la línea.

Los vehículos operarán en marcha a la vista en los tramos urbanos, aunque los perfiles de velocidad serán controlados por un sistema ATP. En los tramos interurbanos se habilitará la operación bidireccional por medio del sistema ATP. La transición entre modos será iniciada de forma automática por el sistema de señalización y control mientras el tren está detenido en la estación frontera.

La línea tendrá una única área de talleres y cocheras situada cerca del extremo inicial. Tendrá espacio para el estacionamiento de los trenes, así como todos los servicios y niveles de mantenimiento necesarios para la flota completa.

#### **4.2. Características de la línea**

Toda la línea discurrirá en superficie, sin túneles ni secciones elevadas. En sus 40,5 km de longitud, como se ha mencionado, la línea recorre tramos urbanos e interurbanos, siendo la composición de la línea como sigue:

- Tramos interurbanos: 80%, velocidad máxima de diseño 100 km/h
- Tramos urbanos: 20%, velocidad máxima 50 km/h

Como toda línea de tranvía, el recorrido cuenta con varios cruces a nivel en zona urbana. Como elemento particular, cabe destacar la presencia de dos cruces a nivel en zona interurbana, que deberán protegerse mediante barreras y cuyas funciones de seguridad deberán incluirse dentro de las funcionalidades del sistema ATP instalado.

La línea cuenta con 20 estaciones.

Aunque el trazado de la línea ferroviaria estará segregado del tráfico rodado (a excepción de los cruces a nivel y las intersecciones urbanas), la ruta sigue en la mayor parte de su recorrido el trazado de otras calles y carreteras, lo que implica radios de curva reducidos y pendientes pronunciadas, que alcanzan valores de hasta 80 milésimas en algunos tramos. Salvo estas excepciones, las pendientes no suelen superar las 40 milésimas, y pendientes mayores son escasas y dispersas. Un sistema tren-tram tiene la ventaja de que permite alcanzar una capacidad de transporte similar a un sistema ferroviario convencional, pero con la particularidad de poder inscribirse en curvas de radios reducidos y superar pendientes longitudinales que un sistema ferroviario convencional es incapaz de salvar, lo que implica un ahorro en costes de infraestructura al evitarse la necesidad de construcción de túneles y grandes viaductos.

## 5. ESTUDIO DE DEMANDA

El presente capítulo resume los principales valores obtenidos del estudio de demanda, incluido como Anexo I del presente documento.

### 5.1. Movilidad diaria en la línea

La siguiente tabla resume la movilidad en horas punta en ambos sentidos de circulación:

Tabla 2: Movilidad total de la línea en horas punta en ambas direcciones

	Sentido Ida	Sentido Vuelta	Total
HP Mañana	4.852	6.878	11.730
HP Tarde	8.093	5.863	13.956

### 5.2. Perfil de carga de la línea

Las siguientes figuras muestran el perfil de carga de la línea en ambas direcciones durante las horas punta de la mañana y de la tarde:

Figura 1: Perfil de carga. Hora Punta de mañana

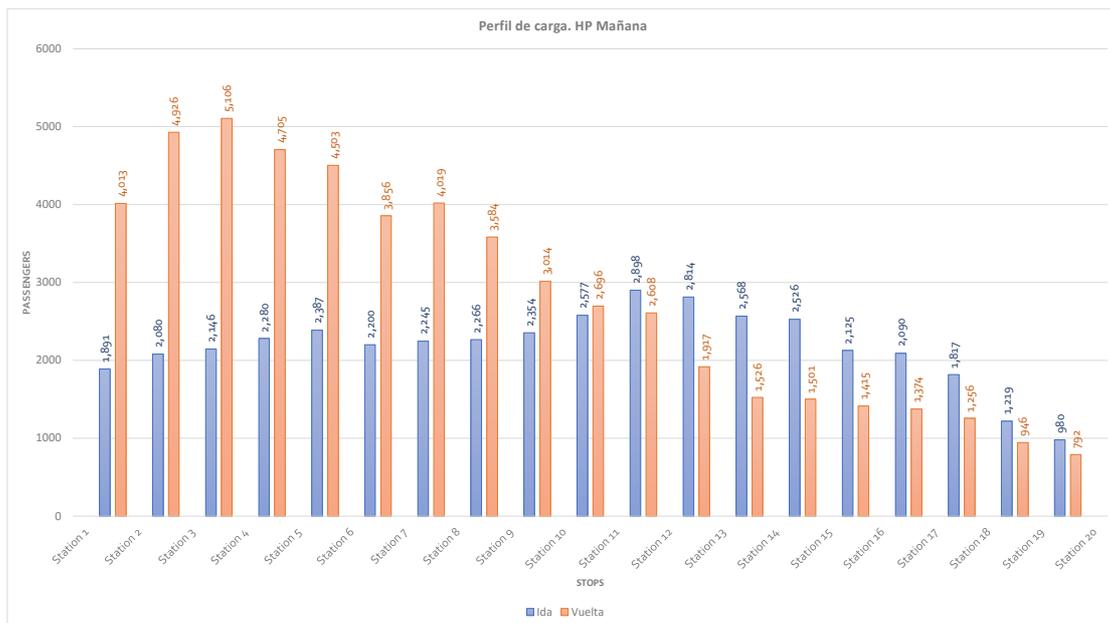
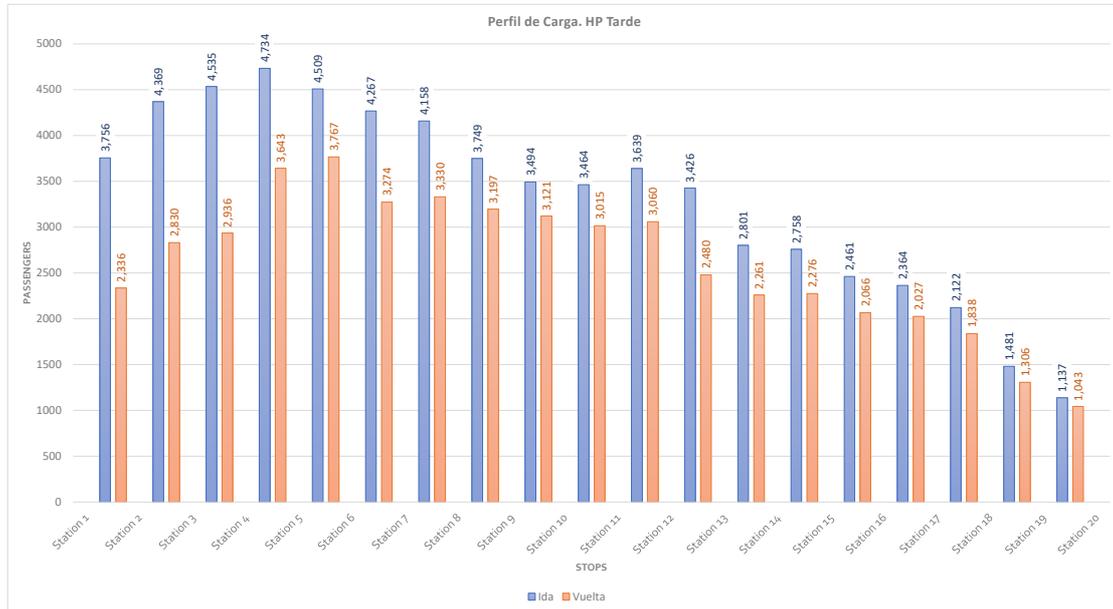


Figura 2: Perfil de carga. Hora Punta de la tarde



### 5.3. Distribución horaria de la demanda

La distribución horaria de la demanda a lo largo de la línea durante un día laborable es la mostrada en la siguiente tabla:

Tabla 3: Distribución horaria de la demanda en la línea

Mañana				Tarde		
05:30 - 06:00	06:00 - 07:00	07:00 - 09:00	09:00 - 15:00	15:00 - 19:00	19:00 - 22:00	22:00 - 00:00
25%	40%	100%	50%	93%	40%	25%

En algunos de los modos de operación descritos posteriormente (ver apartado 8.1), la línea se divide en dos partes: una entre las Estaciones 1 y 13, y otra entre las Estaciones 13 y 20. La demanda en esta segunda sección es más alta durante la hora punta de la tarde que durante la de la mañana, por lo que se hace necesario considerar una distribución horaria diferente, con el fin de adaptar mejor las frecuencias de servicios en esta sección. La siguiente tabla muestra la distribución horaria en la sección entre las Estaciones 13 y 20 utilizada para los cálculos de los modos de operación previamente mencionados.

Tabla 4: Distribución horaria de la demanda en la sección entre estaciones 13 y 20

Mañana				Tarde		
05:30 - 06:00	06:00 - 07:00	07:00 - 09:00	09:00 - 15:00	15:00 - 19:00	19:00 - 22:00	22:00 - 00:00
25%	40%	92%	50%	100%	40%	25%

Esta distribución de la demanda será el dato de partida para la definición de los horarios de operación de la línea en un día laborable, adaptando las frecuencias de servicio a las variaciones de la demanda a lo largo del día.

## 6. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

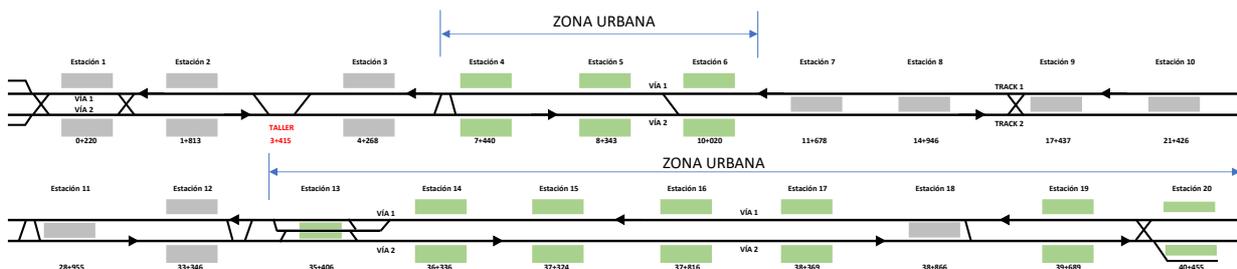
### 6.1. Esquema funcional

El esquema funcional es una cuestión estratégica para garantizar un sistema de transporte rápido, frecuente y seguro. Es un documento vivo, que se ha de actualizar de manera continua para que refleje los cambios producidos en el transcurso de los proyectos de diseño de detalle.

Este proyecto consta de una vía doble en todo el trayecto, equipada con los siguientes elementos:

- Dos estaciones terminales (1 y 20) en los extremos de la línea, equipadas para realizar las maniobras de inversión de marcha de los trenes. La Estación 1 tiene dos bretelles, una por delante y otra por detrás de andén, mientras que la Estación 20 solo cuenta con una bretelle antes de la estación.
- Una terminal intermedia (Estación 13) equipada para la inversión de marcha de los trenes.
- Zona de taller y cocheras, conectada a la línea en el P.K. 3+415.
- Posiciones de estacionamiento en cada terminal, hasta 3 en la Estación 1 y 2 en la Estación 20, que pueden utilizarse para estacionar trenes durante las horas valle, además de una posición extra en la terminal intermedia.
- Escapes repartidos a lo largo de la línea para poder invertir la marcha de los trenes o pasar a la otra vía en caso de que una de las vías esté inutilizada.
- La mayoría de las estaciones de la línea cuentan con andenes laterales, a excepción de las Estaciones 7, 8, 9, 10, 11 y 18, que tienen un único andén central.

Figura 3: Esquema funcional de la línea



#### 6.1.1. Banalización de la línea

Los aparatos de vía localizados a lo largo de la línea permitirán dar la vuelta a los trenes en caso necesario debido a algún fallo en el sistema. Normalmente, estos escapes se sitúan en estaciones con acceso a otros modos de transporte o en estaciones con un elevado número de viajeros. Además, lo deseable es que estos escapes dividan la línea en secciones de longitudes lo más parecidas posible

En la línea de estudio se colocarán al menos en las fronteras entre zona urbana e interurbana, posibilitando así la operación en vía única en caso de incidencia.

#### 6.1.2. Kilometraje de la línea

El origen de P.K. se sitúa en las toperas de la Estación 1, creciendo hacia la Estación 20. La longitud de la línea es de unos 40,5 km.

### 6.1.2.1. Posición de las estaciones

Como ya se ha mencionado, hay 20 estaciones a lo largo de la línea. El P.K. de cada una de ellas se sitúa en el punto medio del andén. Los P.K. de las estaciones se incluyen en la tabla siguiente:

Tabla 5: Ubicación de estaciones a lo largo de la línea

Estación	P.K.
Estación 1	0+220
Estación 2	1+803
Estación 3	4+261
Estación 4	7+611
Estación 5	8+320
Estación 6	10+038
Estación 7	11+700
Estación 8	14+958
Estación 9	17+306
Estación 10	21+397
Estación 11	28+916
Estación 12	33+328
Estación 13	35+439
Estación 14	36+320
Estación 15	37+304
Estación 16	37+804
Estación 17	38+355
Estación 18	38+844
Estación 19	39+665
Estación 20	40+481

### 6.1.3. Diseño del trazado

El trazado horizontal y vertical de la línea se basa en los estándares de la industria del transporte. Los siguientes criterios se han utilizado para el diseño:

#### 6.1.3.1. Trazado horizontal

- Mínimo radio de curvatura\*:
  - Mínimo deseable, carril Vignole: 150 m
  - Mínimo absoluto, carril Vignole: 50 m
  - Mínimo deseable, carril de garganta: 35 m
  - Mínimo absoluto, carril de garganta: 25 m

\*Incluye talleres y cocheras y vías no comerciales

- Peralte máximo:
  - Deseable: 100 mm
  - Máximo absoluto: 120 mm

- Casos excepcionales: 150 mm
- Aceleración lateral:
  - Deseable: 0,2 m/s<sup>2</sup>
  - Máximo absoluto: 0,65 m/s<sup>2</sup>
  - Casos excepcionales: 0,98 m/s<sup>2</sup>

#### **6.1.3.2. Trazado vertical**

- En vía:
  - Pendiente máxima sostenida: 8%, cualquier longitud
  - Pendiente máxima absoluta: 9%
- En vías mango (terminales):
  - Pendiente máxima deseable: 0,2%
  - Pendiente máxima absoluta: 1%
- En talleres y cocheras:
  - Pendiente máxima en vías de paso: 1%
  - Pendiente máxima en vías de estacionamiento: 0,2%
- Acuerdos verticales (cóncavos y convexos):
  - Mínimo deseable: 625 m
  - Mínimo absoluto: 500 m
- Radios de curvatura en andenes:
  - Mínimo absoluto horizontal: 500 m
  - Mínimo absoluto vertical: 1.500 m

#### **6.1.4. Infraestructura de vía**

El trazado discurrirá sobre vía en placa. Se utilizarán carriles y desvíos estándar, tanto Vignole como de garganta.

#### **6.1.5. Aparatos de vía**

Todos los aparatos de vía (desvíos, escapes, bretelles) estarán motorizados y telemandados, monitorizados de forma continua por el subsistema de Control, Mando y Señalización.

### **6.2. Electrificación**

El sistema eléctrico de tracción de la línea consistirá en una línea aérea de contacto que alimentará los trenes mediante corriente continua a 1.500 V, siendo el retorno a través de los carriles. Este voltaje, si bien no es el habitual en sistemas tranviarios (para los que suele optarse por 750V CC) ni en sistemas de cercanías (normalmente 3.000V CC), permite aunar las características de ambos sistemas optimizando la inversión en cuanto al número de subestaciones y la tipología de la catenaria.

Además, habrá un sistema de distribución en corriente alterna a 22 kV para alimentar los sistemas tanto ferroviarios como de edificios a lo largo de la línea.

Ambos sistemas podrán ser controlados mediante el sistema SCADA desde el CTC. El sistema SCADA tendrá información y/o control sobre todos los interruptores y seccionadores de ambos sistemas.

### **6.3. Estaciones y terminales**

#### **6.3.1. Criterios de diseño**

Los andenes de las estaciones tendrán una longitud útil de al menos 65 metros, y la altura del andén será aproximadamente de 350 mm sobre la cota de carril. Las estaciones serán completamente accesibles para las personas con movilidad reducida.

Los espacios vertical y horizontal entre el borde de andén y las entradas a los trenes estarán controladas de manera que los pasajeros en silla de ruedas puedan subir y bajar del vehículo sin asistencia.

#### **6.3.2. Estaciones**

Las estaciones tendrán acceso desde el nivel de la calle. Habrá rampas de acceso para personas en sillas de ruedas.

Habrá equipamiento de venta y validación de billetes en los andenes. No habrá tornos de acceso, por lo que no habrá separación entre zonas de pago o no de pago en las estaciones. Sin embargo, los pasajeros deberán poseer un título válido de transporte antes de subirse al tren.

#### **6.3.3. Terminales e intercambiadores**

En la línea de estudio habrá tres estaciones término: dos en los extremos de la línea y una intermedia para los servicios parciales previstos durante las horas punta.

### **6.4. Material rodante**

Se usarán trenes con suelo bajo total o parcial. El diseño se adaptará a las condiciones particulares de la línea, así como a los modos de operación previstos en la misma.

Los vehículos tendrán un ancho de 2,65 m y hasta 70 m de longitud. Todas las puertas estarán en zonas de piso bajo. Las composiciones podrán consistir en un único vehículo de 65-70 metros de longitud o dos unidades acopladas de 32-35 metros, con la misma capacidad de transporte.

Los trenes requerirán de una cabina de conducción en cada extremo, pero no son necesarias cabinas intermedias para la operación en composiciones de dos coches.

Se ha realizado un estudio de mercado del material rodante existente en sistemas ferroviarios de características similares al estudiado en el presente Trabajo. Se ha analizado tanto material rodante de tipo tranviario como de tipo más interurbano, con el fin de determinar las características principales del material rodante que finalmente podría ser utilizado en un proyecto de este tipo.

En la tabla siguiente se muestran las características de dos modelos de vehículo potenciales para esta línea, el Citadis de Alstom, funcionando en Estrasburgo, y el Citylink de Vossloh, implementado en la red tren-tram de Alicante.

Figura 4: Alstom Citadis (izda) y Vossloh Citylink (dcha)



Tabla 6: Características Material Rodante

	Alstom Citadis 403	Vossloh CityLink
V <sub>max</sub> (km/h)	80 km/h	100 km/h
Longitud (m)	43.73	37.20
Piso Bajo (%)	100%	70 - 30 %
Tara	55.50	68.00
Plazas sentadas	78	98
Plazas de pie (4 pax/m <sup>2</sup> )	224	140
Peso/pasajero (kg)	75	75
Plazas totales (4 pax/m <sup>2</sup> )	302	238
Nivel de confort (%)	26%	41%
Peso en carga AW2 (t)	78.15	85.85
N.º ejes	8	8
Peso/eje (t)	9.77	10.73
Pasajeros/ml	6.91	6.40

Como puede apreciarse, se analizan vehículos con características diferentes, pero ambos viables para el sistema analizado en este Trabajo.

Ambos modelos de tren son modulares, lo que permite una gran adaptabilidad y escalabilidad en caso necesario. Las cajas suspendidas y semisuspendidas permiten la inscripción en radios de curva pequeños. En ambos casos, su longitud se podría adaptar a composición simple de hasta 70 m o una composición doble de dos unidades de 32-35 m.

El piso bajo del 100% dota de accesibilidad total a todo el vehículo, pero baja la velocidad máxima alcanzable debido al tipo de bogie requerido para conseguir esta arquitectura. El Citylink, con el 30% de piso elevado admite bogies ferroviarios con suspensiones de mejores prestaciones que permiten aumentar la velocidad máxima de circulación hasta 100 km/h.

La ratio de pasajeros por metro lineal de tren es similar en ambos tipos de vehículo, dato que se tomará como referencia para la estimación de capacidad de transporte del tren tipo para este proyecto.

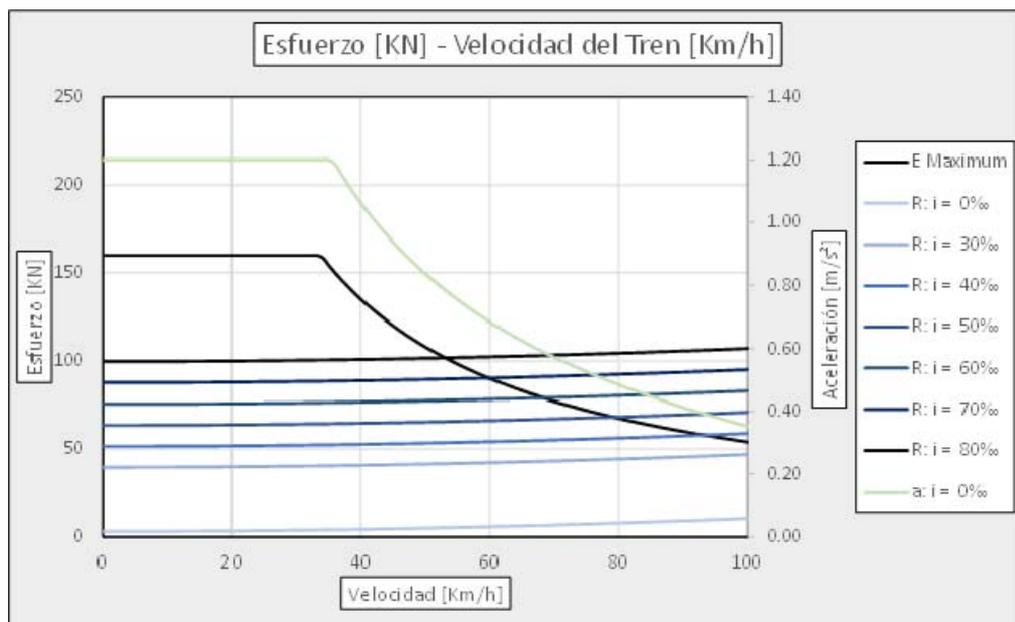
#### 6.4.1. Curva de potencia y características del tren

Para realizar las simulaciones de marcha se ha definido un tren tipo cuyas características son similares a aquellos que normalmente se usan en sistemas de estas características. Las características principales son:

- Aceleración máxima: 1,2 m/s<sup>2</sup>
- Freno de servicio: 1 m/s<sup>2</sup>
- Velocidad máxima: 100 km/h
- Velocidad de operación: 80 km/h
- Potencia: 2.000 kW
- Máx. Esfuerzo tractor: 225 kN
- Ejes motorizados: 12
- Longitud: 70 m
- Tara: 133 t
- Masa total (tren lleno a 4 pax/m<sup>2</sup>): 165,9 t

La figura siguiente muestra la curva de esfuerzo-velocidad del tren utilizado para las simulaciones, junto con las curvas de resistencia al avance en función de la pendiente.

Figura 5: Curva de esfuerzo-velocidad del tren tipo usado en las simulaciones



#### 6.4.2. Capacidad de los trenes

En vista del estudio de mercado realizado, se considera una capacidad total de 470 pasajeros para el tren tipo, con un 30% de estas plazas sentadas, un valor habitual en sistemas tranviarios alrededor del mundo.

Tabla 7: Características arquitectura del tren tipo

	Ancho (m)	Long. máx. (m)	Capacidad (4 pax/m <sup>2</sup> )	Asientos
<b>Características del tren</b>	2,65	70	470	30%

### **6.4.3. Acople/desacople de unidades**

En el caso de que los trenes se compongan de dos unidades de 32-35 metros de longitud, no se realizarán acoples y desacoples de unidades durante el horario comercial de operación. Estas operaciones se llevarán a cabo en el taller, y únicamente si una de las dos unidades necesita mantenimiento.

Por otro lado, debe mencionarse que la operación con unidades desacopladas permitiría optimizar la oferta de plazas y operar con composiciones simples de 35 metros en periodos de baja demanda, como domingos y festivos.

### **6.5. Sistemas de señalización y control de trenes**

Todos los trenes estarán equipados con un Sistema de señalización y control a bordo. Para composiciones dobles, el equipo embarcado en la cabina de cabeza tendrá el control, de forma que un fallo en la unidad de cola no tenga efecto en la operación. El sistema tendrá, entre otras, las siguientes funciones:

- Monitorizar los aparatos de vía y proteger a los trenes ante maniobras incompatibles y descarrilos en secciones con desvíos.
- Generar enrutamientos automáticos para los trenes en servicio comercial basados en un horario predefinido (editable en tiempo real) o intervalo.
- Proporcionar información al maquinista mediante el DMI embarcado.
- Asegurar las transiciones entre modos de conducción sin reducir el nivel de seguridad.
- Permitir la creación de nuevos encaminamientos sin necesidad de retirar los trenes del servicio.
- Proporcionar al CTC la localización de los trenes.

El sistema de señalización y control de trenes interactuará con el sistema de señales de tráfico rodado para establecer la prioridad de paso en las intersecciones.

### **6.6. Sistemas de comunicaciones y control**

Estos sistemas estarán compuestos, entre otros, por:

- Red de comunicación móvil (incluyendo GSMR).
- Red de comunicaciones fija.
- Sistemas de información al viajero (SIV) incluyendo megafonía, pantallas, etc.
- Telemando de energía.
- Sistema de videovigilancia.
- Control de accesos y sistema anti-intrusión.
- Sistemas de alarma y detección de incendios.
- Localización automática de trenes.
- Sistema de información de seguridad física.

## 6.7. Vehículos no comerciales

Para el mantenimiento de la línea se necesitará una serie de maquinaria que puede incluir:

- Vehículo bi-vial para mantenimiento de catenaria
- Vehículo bi-vial para mantenimiento de vía
- Vehículo de maniobras para arrastrar trenes sin tracción en cocheras
- Vehículo bi-vial de rescate para casos de incidencias

### 6.7.1. Operación de vehículos no comerciales

La circulación de vehículos no comerciales será autorizada durante un periodo de posesión (p.e. fuera del horario comercial de la línea, cuando no hay más trenes circulando por la misma) y requerirá de un permiso de trabajo autorizada por el operador. Las posesiones se planificarán con una semana de adelanto con respecto al trabajo a realizar. Los vehículos podrían no estar equipados con sistema ATP, pero deberán ser operados bajo estricto control procedimental por parte de operarios competentes y certificados bajo autorización del CTC. Para cualquier trabajo planificado que pueda requerir que personal o equipos se aproximen mucho a la línea aérea de contacto será necesario el previo aislamiento eléctrico de la zona de trabajos antes de que den comienzo las tareas.

## 7. ESTIMACIÓN DE TIEMPOS DE RECORRIDO Y DIMENSIONAMIENTO DE FLOTA

### 7.1. Perfil de velocidad

Los tiempos de recorrido se han calculado teniendo en cuenta la información descrita en los capítulos previos, así como otras consideraciones adicionales tomadas como hipótesis.

- Trazado.
- Características del material rodante: definidas en el capítulo 6.4.
- Cuadro de velocidades máximas: incluido en el Anexo II de este documento.
- Limitaciones de velocidad en intersecciones urbanas:

Dada la naturaleza urbana de una parte del recorrido, los trenes se verán obligados a compartir espacio tanto con el tráfico rodado como con peatones en varios puntos y secciones de la traza.

Esta interacción con otros usuarios del espacio de la traza hace necesaria la realización de un estudio pormenorizado de cada intersección desde el punto de vista de la seguridad del sistema. Este análisis deberá tener en cuenta, entre otras cosas;

- Capacidad de frenado del tren.
- Visibilidad de la intersección desde todas las direcciones.
- Modelización de peatones y tráfico rodado (Este análisis debería realizarse con un software específico de modelización de tráfico peatonales y de vehículos).

Se han modelizado 11 intersecciones urbanas teniendo en cuenta estos parámetros, y se han determinado las velocidades máximas de aproximación a cada uno de los cruces desde ambas direcciones, con el fin de permitir el frenado del tren desde la distancia de

visibilidad en caso de existir cualquier presencia externa al sistema en el cruce (peatón, vehículo u objeto).

Este análisis deberá ir acompañado de un estudio de los ciclos semafóricos y de la integración semafórica del tranvía con la menor perturbación posible a otros medios de transporte e infraestructuras.

Debe buscarse, en la medida de lo posible, la onda verde para los trenes a lo largo de la sección urbana de la línea. Esta onda verde permitiría el paso del tren a su máxima velocidad permitida, lo que derivaría en cumplimiento estricto de horarios y en la menor afección posible al resto de tráficos, al reducir al mínimo el tiempo de ocupación de la intersección por parte del tren.

El escenario óptimo sería conseguir esta prioridad semafórica para el 100% de los trenes, para lo cual se implementarían balizas de detección que al paso del tren comenzarían el ciclo semafórico correspondiente, con paso para los trenes y rojo para los vehículos y peatones. En caso de no conseguirse esta prioridad para el 100% de los trenes, debido a ciclos semafóricos elevados (más de 100-120 segundos conlleva nerviosismo para peatones y conductores y eleva el peligro), deberán establecerse unos niveles mínimos de servicio de compromiso con el fin de que un tren sin prioridad no afecte a los horarios de trenes sucesores.

Aunque este aspecto de un proyecto debe analizarse pormenorizadamente y realizarse un análisis de seguridad de cada intersección, con modelos, simulaciones, registros de riesgos, etc., a modo teórico y con fines académicos, se ha realizado una estimación teórica de las intersecciones que se incluye en la tabla siguiente:

Tabla 8: Velocidades máximas recomendadas en intersecciones

Cruce			v aproximación (km/h)	
Inicio	Fin	Nombre	Vuelta	Ida
55+502	55+543	Intersección 1	35	15
56+252	56+298	Intersección 2	15	-
56+783	56+815	Intersección 3	50	50
57+040	57+061	Intersección 4	45	50
57+244	57+259	Intersección 5	50	-
57+631	57+659	Intersección 6	-	35
57+852	57+871	Intersección 7	45	35
58+126	58+191	Intersección 8	-	15
59+144	59+220	Intersección 9	30	30
59+642	59+733	Intersección 10	25	30
59+900	59+952	Intersección 11	50	40

- Limitaciones de velocidad en cruces a nivel interurbanos

En el caso de los cruces a nivel interurbanos, contarán con barreras cuya bajada se activará al paso del tren por la baliza de detección, cerrando el cruce y permitiendo el paso expedito del tren. Se han tenido en cuenta también las limitaciones existentes de visibilidad y frenado del tren para determinar las velocidades máximas en estos cruces, siendo esta de 80 km/h para el primero y 70 km/h para el segundo, en sentido de P.K. ascendente.

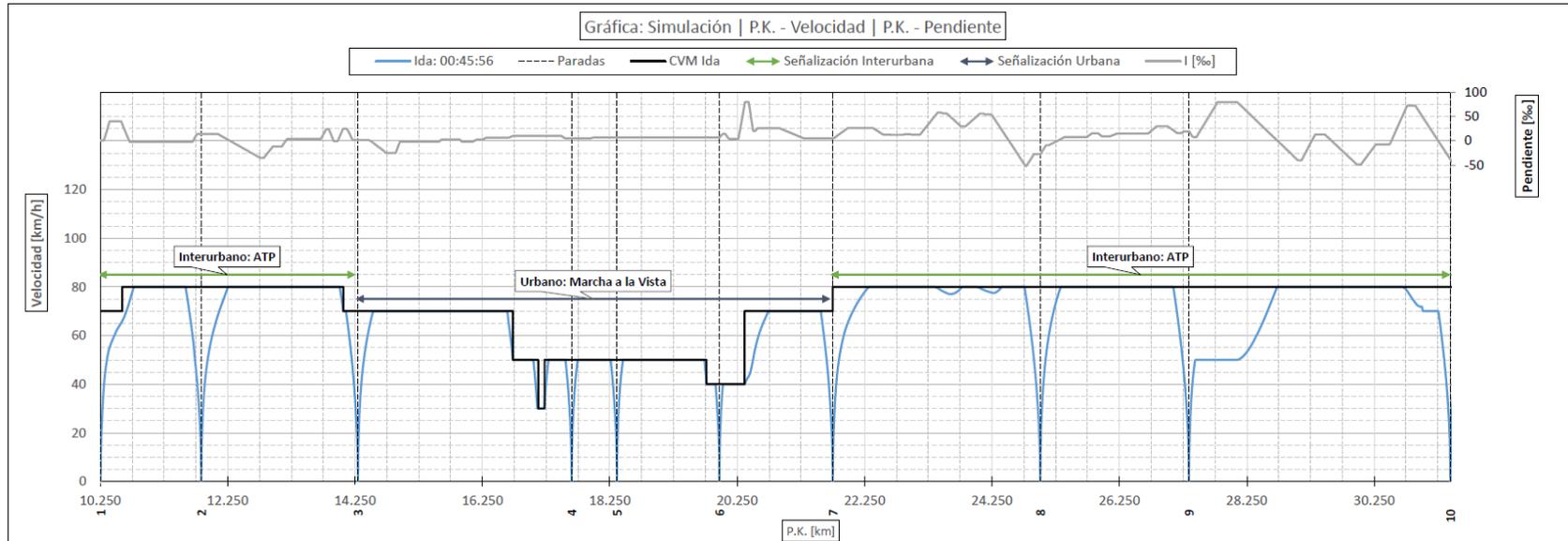
- Limitación a 30 km/h en pendientes descendentes de más del 7%.

Las simulaciones se han realizado teniendo en cuenta todos estos aspectos mediante un programa de desarrollo propio. Las gráficas siguientes muestran las curvas de velocidad (azul para la ida y amarillo para la vuelta).

Se ha considerado para las simulaciones una velocidad máxima de operación de 80 km/h, aunque la velocidad máxima de diseño sea de 100 km/h.

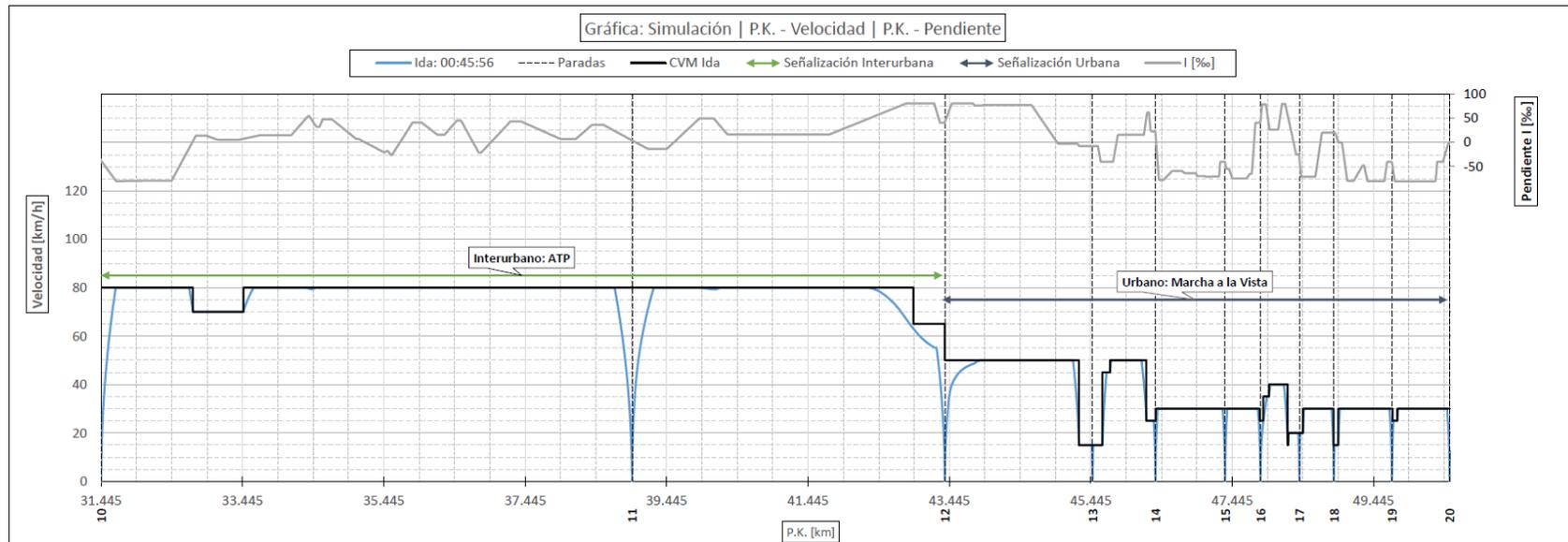
La línea negra en los gráficos indica el cuadro de velocidades máximas a lo largo de la línea, determinado por condiciones geométricas. El cuadro puede consultarse en el Anexo II de este documento e incluye todas las curvas y limitaciones de velocidad de la línea en ambas direcciones.

Figura 6: Resultado de la simulación. Perfil de velocidad. Ida. Estación 1 - 10



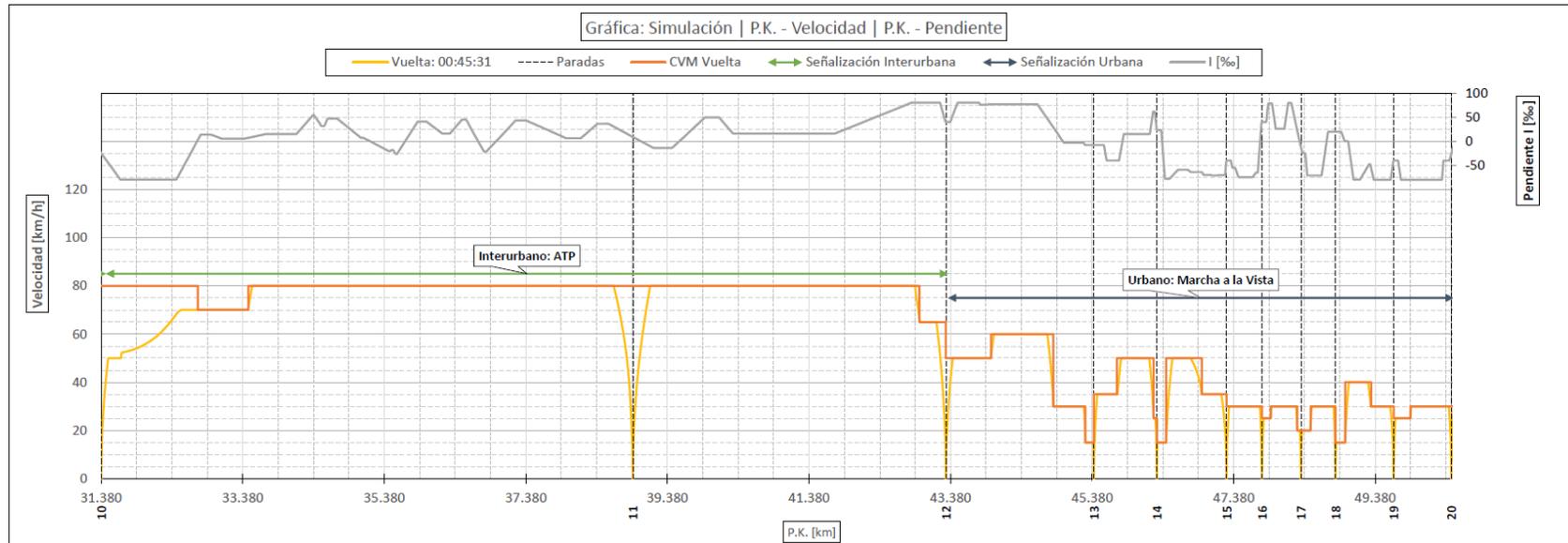
Las reducciones de velocidad entre las estaciones 3 y 7 se deben a restricciones geométricas y a la señalización (zona urbana entre estaciones 4 y 6). Las reducciones de velocidad que se aprecian en la zona interurbana entre las estaciones 7 y 10 se deben a la presencia de rampas pronunciadas en las que el tren no puede alcanzar su máxima aceleración y pierde velocidad.

Figura 7: Resultado de la simulación. Perfil de velocidad. Ida. Estación 10 - 20



La restricción de velocidad a 50 km/h a partir de la Estación 12 se debe a la circulación por zona urbana.

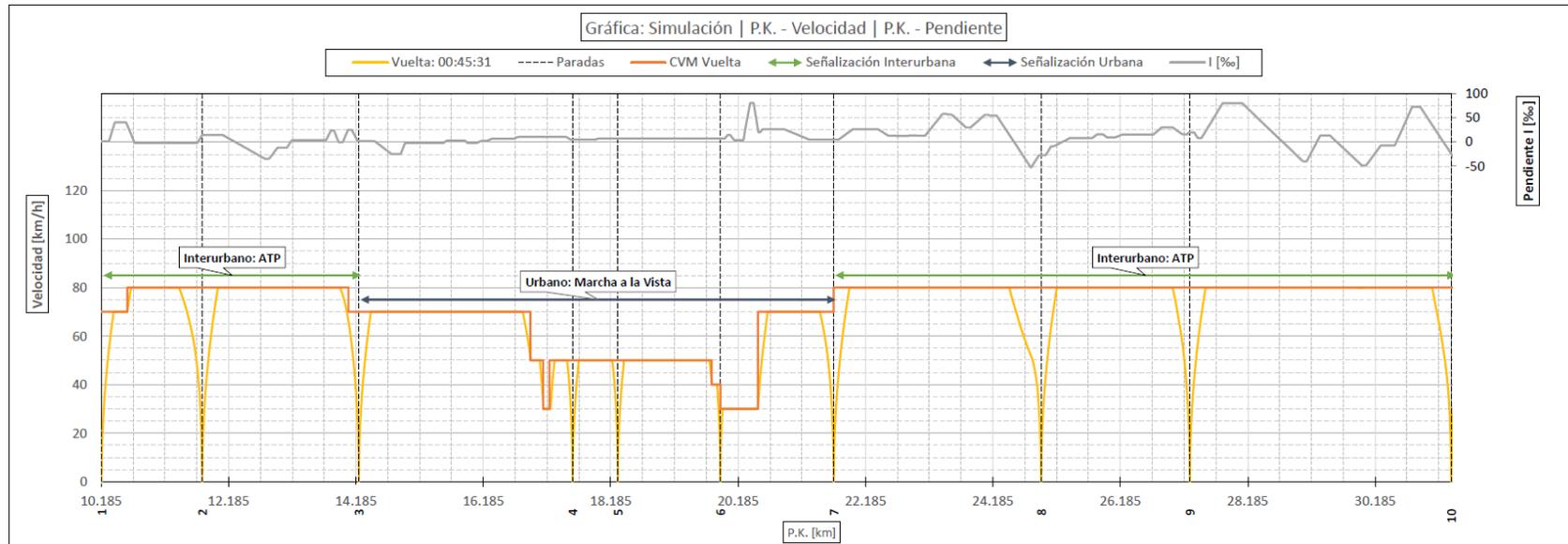
Figura 8: Resultado de la simulación. Perfil de velocidad. Vuelta. Estación 20 - 10.



La velocidad entre las estaciones 20 y 13 se restringe a 50 km/h por la circulación en zona urbana.

Entre las estaciones 13 y 12 la restricción se aumenta a 60 km/h porque la plataforma ferroviaria se encuentra segregada del tráfico rodado.

Figura 9: Resultado de la simulación. Perfil de velocidad. Vuelta. Estación 10 - 1.



Entre las estaciones 7 y 3 la velocidad se ve restringida por el sistema de señalización (zona urbana, marcha a la vista) y por limitaciones geométricas.

## 7.2. Tiempos de parada

### 7.2.1. Hipótesis

El tiempo de parada se define como el tiempo transcurrido desde que el tren se detiene en una estación (confirmación de que el vehículo está parado y con el freno aplicado) hasta su salida desde la misma estación (cierre y bloqueo de puertas, tracción aplicada). Este tiempo incluye:

- Tiempo de subida y bajada de viajeros (basado en estudio de flujo, número de puertas y anchura de las mismas, sistema de validación de billete, etc.),
- Tiempo de apertura de puertas, tiempo de cierre de puertas y tiempo necesario para comprobación de tren parado o tren listo para arrancar.

Habitualmente el tiempo de parada se estima para cada parada, en ambas direcciones, durante las horas punta. El cálculo se basa en los siguientes elementos:

- Volumen de viajeros (subidos y bajados)
- Distribución de pasajeros: se considera que los pasajeros se distribuyen de manera uniforme por el andén.
- Número de puertas por tren: se consideran 9 puertas por cada lado.
- Anchura de puerta (número de filas): se considera una única fila de viajeros por puerta.
- Flujo de viajeros: se considera un flujo de 1 pasajero por puerta por segundo para bajar y 3 segundos por viajero por puerta para subir y validar el billete.
- Intervalo entre trenes: 5,5 minutos en 2030, 4,5 minutos en 2040 y 4 minutos en 2050.
- Tiempo de apertura/cierre de puertas: se consideran 3 segundos para la apertura y 5 para el cierre de puertas y verificación desde la cabina de conducción.

Tabla 9: Hipótesis consideradas para el cálculo de tiempos de parada

Subida y validación		Bajada		Tiempos de operación	
3	seg/pax	1	seg/pax	3	Apertura de puertas (seg)
9	puertas	9	puertas	5	Cierre de puertas y verificación (seg)
1	pax/puerta	1	pax/puerta		
Distribución uniforme en andén y dentro del tren					

El tiempo de parada se calcula considerando el tiempo que necesita el último pasajero (el más lejano a la puerta) para bajar del vehículo.

Para este estudio se ha considerado un tiempo de parada de 25 segundos como medio de regulación de la operación en todas las paradas intermedias. En las terminales se ha considerado 60 segundos para las extremas (Estaciones 1 y 20) y 30 segundos para la intermedia (Estación 13).

### 7.2.2. Tiempos de parada calculados en horas punta

Para calcular los tiempos de parada se utiliza la siguiente fórmula

$$\text{apertura} + \frac{\text{viajeros subidos} * \text{flujo de subida}}{\text{puertas} * \text{flujo por puerta}} + \frac{\text{viajeros bajados} * \text{flujo de bajada}}{\text{puertas} * \text{flujo por puerta}} + \text{cierre}$$

Con los valores descritos en el apartado anterior, la fórmula queda como sigue:

$$\text{Tiempo de parada (segundos)} = 3 + \frac{\text{viajeros subidos} * 3}{9 * 1} + \frac{\text{viajeros bajados} * 1}{9 * 1} + 5$$

Los tiempos de parada teóricos obtenidos como resultado de la fórmula anterior se redondean al múltiplo de 5 segundos superior. Las tablas siguientes muestran los resultados obtenidos por cada dirección en la hora punta más cargada: por la mañana en sentido vuelta y por la tarde en sentido ida.

Tabla 10: Tiempos de parada teóricos. Hora punta de mañana.

AM								
STOPS	Vuelta							
	Bajados / tren	Pax / Doors	Tiempo bajada (seg)	Subidos / tren	Pax / Puerta	Tiempo subida (seg)	Tiempo total	Parada redondeada
Estación 1	317	36	36	0	0	0	0:00:44	00:00:45
Estación 2	72	9	9	0	1	3	0:00:20	00:00:20
Estación 3	15	2	2	1	1	3	0:00:13	00:00:15
Estación 4	14	2	2	46	6	18	0:00:28	00:00:30
Estación 5	19	3	3	35	4	12	0:00:23	00:00:25
Estación 6	23	3	3	74	9	27	0:00:38	00:00:40
Estación 7	15	2	2	3	1	3	0:00:13	00:00:15
Estación 8	6	1	1	40	5	15	0:00:24	00:00:25
Estación 9	4	1	1	49	6	18	0:00:27	00:00:30
Estación 10	7	1	1	33	4	12	0:00:21	00:00:25
Estación 11	11	2	2	18	3	9	0:00:19	00:00:20
Estación 12	11	2	2	66	8	24	0:00:34	00:00:35
Estación 13	28	4	4	45	6	18	0:00:30	00:00:30
Estación 14	7	1	1	11	2	6	0:00:15	00:00:15
Estación 15	6	1	1	20	3	9	0:00:18	00:00:20
Estación 16	5	1	1	11	2	6	0:00:15	00:00:15
Estación 17	5	1	1	24	3	9	0:00:18	00:00:20
Estación 18	5	1	1	54	6	18	0:00:27	00:00:30
Estación 19	1	1	1	25	3	9	0:00:18	00:00:20
Estación 20	0	0	0	125	14	42	0:00:50	00:00:50
								00:08:45

Tabla 11: Tiempos de parada teóricos. Hora punta de tarde.

PM								
STOPS	Ida							
	Bajados / tren	Pax / Puerta	Tiempo bajada (seg)	Subidos / tren	Pax / Puerta	Tiempo subida (seg)	Tiempo total	Parada redondeada
Estación 1	0	0	0	297	33	99	0:01:47	00:01:50
Estación 2	0	1	1	49	6	18	0:00:27	00:00:30
Estación 3	5	1	1	18	2	6	0:00:15	00:00:15
Estación 4	17	2	2	33	4	12	0:00:22	00:00:25
Estación 5	33	4	4	16	2	6	0:00:18	00:00:20
Estación 6	53	6	6	34	4	12	0:00:26	00:00:30
Estación 7	30	4	4	21	3	9	0:00:21	00:00:25
Estación 8	48	6	6	16	2	6	0:00:20	00:00:20
Estación 9	39	5	5	19	3	9	0:00:22	00:00:25
Estación 10	45	6	6	43	5	15	0:00:29	00:00:30
Estación 11	15	2	2	29	4	12	0:00:22	00:00:25
Estación 12	53	6	6	36	4	12	0:00:26	00:00:30
Estación 13	63	8	8	28	4	12	0:00:28	00:00:30
Estación 14	17	2	2	10	2	6	0:00:16	00:00:20
Estación 15	55	7	7	8	1	3	0:00:18	00:00:20
Estación 16	20	3	3	5	1	3	0:00:14	00:00:15
Estación 17	42	5	5	4	1	3	0:00:16	00:00:20
Estación 18	105	12	12	4	1	3	0:00:23	00:00:25
Estación 19	55	7	7	1	1	3	0:00:18	00:00:20
Estación 20	180	20	20	0	0	0	0:00:28	00:00:30
								00:09:25

Para el cálculo del tiempo de vuelta, como se ha dicho anteriormente, se considera un tiempo mínimo de 25 segundos para las paradas con volúmenes bajos de viajeros con el fin de regular la operación.

Aunque hay varias estaciones en las que el volumen de viajeros requiere más de 25 segundos, se considera que la instalación de validadoras en andén reducirá estos tiempos teóricos, permitiendo las paradas de 25 segundos programadas.

La siguiente tabla resume los tiempos de parada considerados para el cálculo de los tiempos de vuelta:

*Tabla 12: Tiempos de parada considerados para el cálculo de los tiempos de vuelta.*

Estación	Tiempo de parada
Estación 1	0:01:00
Estación 2	0:00:25
Estación 3	0:00:25
Estación 4	0:00:25
Estación 5	0:00:25
Estación 6	0:00:25
Estación 7	0:00:25
Estación 8	0:00:25
Estación 9	0:00:25
Estación 10	0:00:25
Estación 11	0:00:25
Estación 12	0:00:25
Estación 13	0:00:30
Estación 14	0:00:25
Estación 15	0:00:25
Estación 16	0:00:25
Estación 17	0:00:25
Estación 18	0:00:25
Estación 19	0:00:25
Estación 20	0:01:00
<b>TOTAL</b>	<b>0:09:35</b>

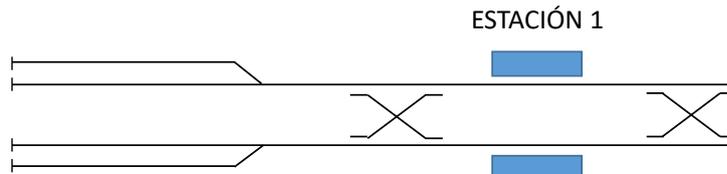
### 7.3. Inversión de marcha

Las maniobras de inversión de marcha en las diferentes terminales de la línea se muestran en las siguientes figuras:

#### 7.3.1. Inversión de marcha en Estación 1 (inicial)

La siguiente figura muestra la configuración de la Estación 1.

Figura 10: Esquema funcional Estación 1



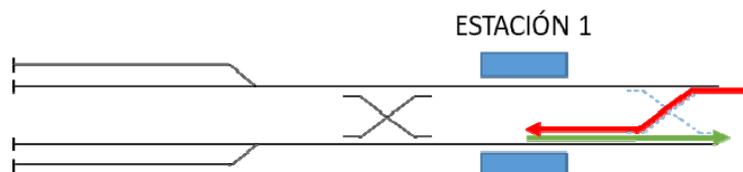
La doble bretelle por delante y detrás de la estación permite realizar la maniobra de inversión de marcha tanto en topera como en el propio andén. La maniobra normal se realizará en una de las toperas disponibles

Figura 11: Esquema de maniobra de inversión de marchas en Estación 1 por toperas



La bretelle delante de la estación permite realizar la inversión de marcha en el andén mientras los pasajeros bajan y suben del tren. Esto, pese a mezclar flujos de viajeros, reduciría el tiempo de la maniobra, permitiendo la recuperación de posibles retrasos.

Figura 12: Esquema de maniobra de inversión de marchas en la Estación 1 por delante de la estación

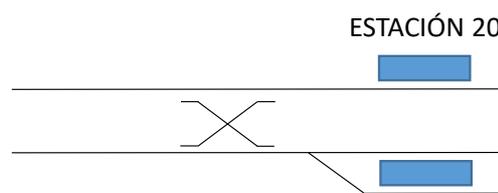


Los trenes saldrían siempre desde el mismo andén, de manera que no se causase confusión a los viajeros.

#### 7.3.2. Inversión de marcha en Estación 20 (final)

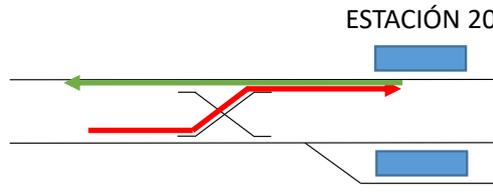
La siguiente figura muestra la configuración de la Estación 20:

Figura 13: Esquema funcional Estación 20



La configuración de la estación obliga a los trenes a realizar la maniobra de inversión de marcha en el andén, mezclando flujos de viajeros subidos y bajados.

*Figura 14: Esquema de maniobra de inversión de marcha en Estación 20*



### 7.3.3. Inversión de marcha en Estación 13 (intermedia)

La siguiente figura muestra la configuración de la Estación 13:

*Figura 15: Esquema funcional Estación 13*



La maniobra de inversión de marcha se realizará habitualmente en la vía central tras desembarcar todos los viajeros.

*Figura 16: Esquema de maniobra de inversión de marcha en vía central*



El doble escape al oeste de la estación permite la realización de la inversión de marcha en vía lateral, aunque no es recomendable realizar esta maniobra en esta vía general, ya que el tren detenido en el andén interferiría con los trenes pasantes.

*Figura 17: Esquema de maniobra de inversión de marcha en vía principal*

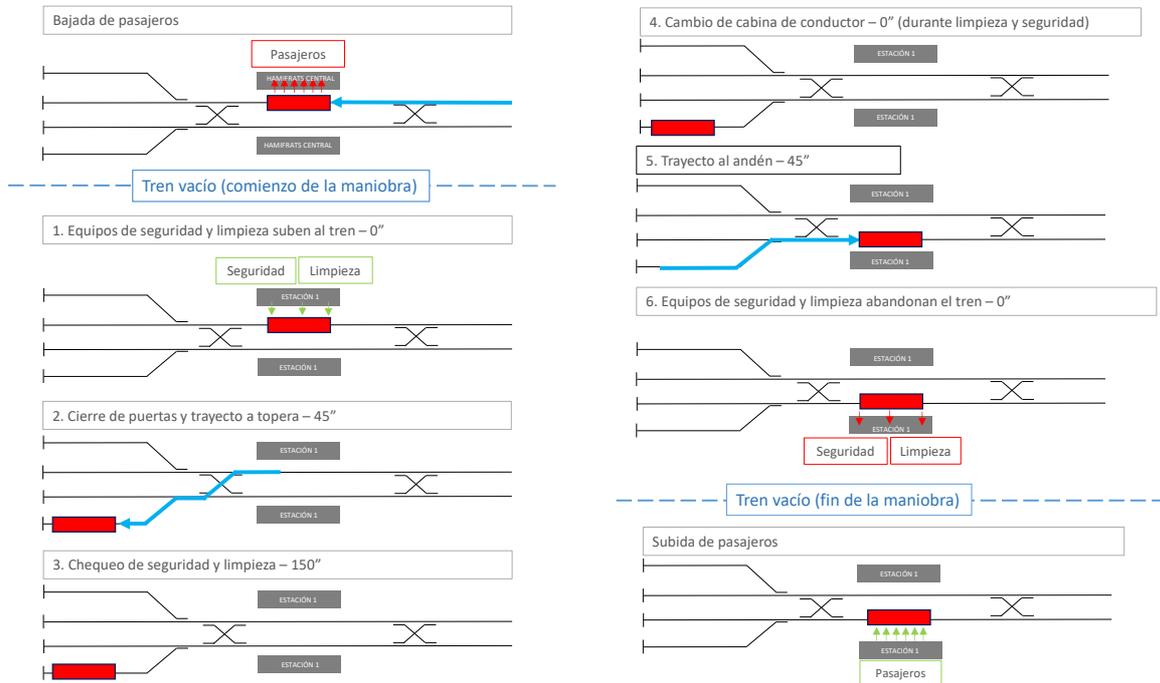


Los tiempos de inversión de marcha son un factor muy importante en un sistema de transporte ferroviario. De hecho, en muchas ocasiones condicionan el intervalo práctico mínimo alcanzable en la línea.

Las figuras siguientes muestran la secuencia de la maniobra en las diferentes terminales, detallando las etapas de la maniobra y el tiempo requerido para cada una de ellas:

### 7.3.4. Inversión de marcha en Estación 1 (inicial)

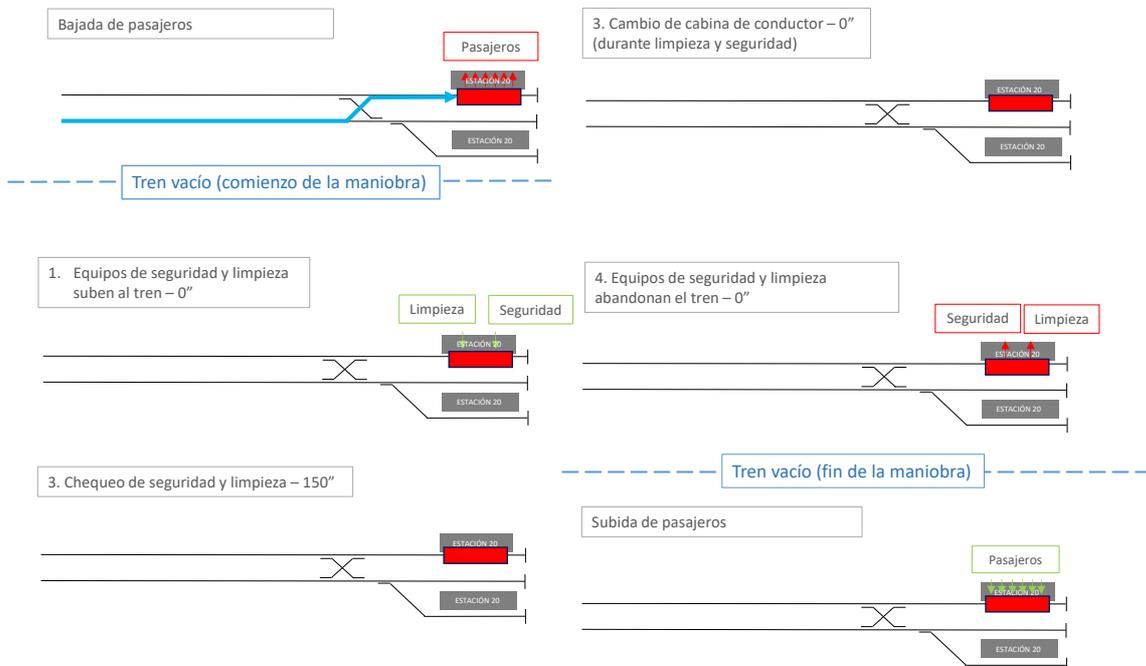
Figura 18: Maniobra de inversión de marcha en Estación 1



El tiempo de inversión de marchas en la Estación 1 se estima en unos **4 minutos**.

### 7.3.5. Inversión de marcha en Estación 20 (final)

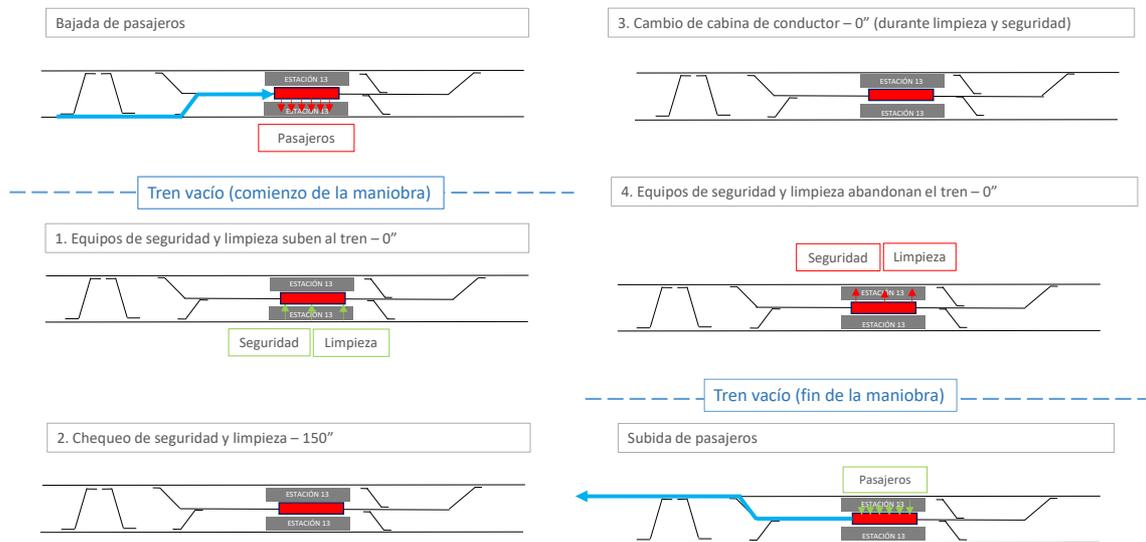
Figura 19: Maniobra de inversión de marcha en Estación 20



El tiempo de inversión de marchas en la Estación 20 se estima en unos **2,5 minutos**.

### 7.3.6. Inversión de marcha en estación 13 (intermedia)

Figura 20: Maniobra de inversión de marcha en Estación 13



El tiempo de inversión de marchas en la Estación 13 se estima en unos **2,5 minutos**.

La siguiente tabla muestra un resumen de los tiempos de inversión de marcha estimados en las diferentes terminales de la línea, incluyendo los tiempos de subida y bajada de viajeros, con el fin de evaluar las rutas compatibles dentro de las terminales. El recuadro rojo marca el tiempo puro de inversión de marcha (entre la bajada y la subida de pasajeros).

Tabla 13: Estimación de tiempos de movimientos en las diferentes terminales

	EST. 20	EST. 13	EST. 1
Bajada de pasajeros	00:01:00	00:00:30	00:01:00
Trayecto andén - topera	00:00:00	00:00:00	00:00:45
Limpieza y seguridad	<b>00:02:30</b>	<b>00:02:30</b>	<b>00:02:30</b>
Trayecto topera - andén	00:00:00	00:00:00	00:00:45
Subida de pasajeros	00:01:00	00:00:30	00:01:00
<b>Tiempo total</b>	<b>0:04:30</b>	<b>0:03:30</b>	<b>0:06:00</b>

Estos tiempos son los mínimos considerados. Sin embargo, en la confección de la malla de operación se añade cierto tiempo extra de regulación que permita garantizar las frecuencias deseadas.

Tabla 14: Tiempos de inversión de marcha en hora punta

	EST. 20	EST. 13	EST. 1
Bajada de pasajeros	00:01:00	00:00:30	00:01:00
Trayecto andén - topera	00:00:00	00:00:00	00:00:45
Limpieza y seguridad	00:02:30	00:02:30	00:02:30
Regulación	00:04:11	00:02:13	00:02:00
Trayecto topera - andén	00:00:00	00:00:00	00:00:45
Subida de pasajeros	00:01:00	00:00:30	00:01:00
<b>Inversión de marcha (tren cerrado a pasajeros)</b>	<b>0:06:41</b>	<b>0:04:43</b>	<b>0:06:00</b>
<b>Tiempo total desde la llegada a la salida del tren</b>	<b>0:08:41</b>	<b>0:05:43</b>	<b>0:08:00</b>

Los tiempos en la Estación 1 implican el uso de un tren extra, dado que este tiempo es superior a la frecuencia ofrecida en las horas punta, por lo que el tren que llega no tiene tiempo suficiente para convertirse en la siguiente salida. Este tren extra es la razón del tiempo tan largo de regulación en la Estación 1 durante las horas punta.

#### 7.4. Retrasos por la interacción con otros tráfico

Se dará prioridad total, siempre que sea posible, a los trenes en todas las intersecciones y pasos a nivel a lo largo de la línea. Sin embargo, los volúmenes de tráfico en ciertas intersecciones podrían causar retrasos a los trenes.

Se considera que los márgenes de seguridad tenidos en cuenta para el cálculo de los tiempos de viaje incluye los potenciales retrasos debido a la congestión del tráfico.

#### 7.5. Tiempos de recorrido

Los perfiles de velocidad presentados en el apartado anterior arrojan los tiempos de recorrido incluidos en la columna T1 de las tablas siguientes. Es el llamado tiempo de simulación pura.

A este tiempo de simulación se añade un resguardo para la obtención de márgenes operativos ante los posibles retrasos, logrando una operación más robusta. El margen considerado es de un 5% del tiempo de viaje obtenido de la simulación.

Las tablas siguientes muestran los tiempos de recorrido entre estaciones con el tiempo adicional, siendo;

- $T1 =$  tiempo de simulación pura
- $\Delta T = T1 * 5\%$
- $T2 = T1 + \Delta T$

T2 es el valor considerado como tiempo de recorrido para los cálculos de tiempo de vuelta y el dimensionamiento de la flota.

Las tablas siguientes muestran los tiempos de vuelta obtenidos. La suma al final de la tabla muestra el tiempo empleado por un tren en recorrer la línea de extremo a extremo incluyendo los tiempos de parada definidos en el capítulo 7.2.2.

Tabla 15: Tiempos de recorrido. Simulación y márgenes. Ida

Ida						
Estación	P.K.	Distancia entre estaciones	Tiempo simulado	T1	$\Delta T$ (T1*5%)	T2 (T1 + $\Delta T$ )
Estación 1	0+220					
Estación 2	1+803	1+583	0:02:39	0:01:36	0:00:05	0:01:41
Estación 3	4+261	2+458	0:04:53	0:02:14	0:00:07	0:02:21
Estación 4	7+611	3+351	0:08:28	0:03:36	0:00:11	0:03:46
Estación 5	8+320	0+709	0:09:32	0:01:04	0:00:03	0:01:07
Estación 6	10+038	1+718	0:11:44	0:02:11	0:00:07	0:02:18
Estación 7	11+700	1+662	0:13:51	0:02:07	0:00:06	0:02:13
Estación 8	14+958	3+258	0:16:41	0:02:51	0:00:09	0:02:59
Estación 9	17+306	2+348	0:18:48	0:02:06	0:00:06	0:02:13
Estación 10	21+397	4+092	0:22:42	0:03:54	0:00:12	0:04:06
Estación 11	28+916	7+519	0:28:45	0:06:03	0:00:18	0:06:22
Estación 12	33+328	4+412	0:32:33	0:03:48	0:00:11	0:03:59
Estación 13	35+439	2+110	0:35:52	0:03:19	0:00:10	0:03:29
Estación 14	36+320	0+881	0:37:39	0:01:47	0:00:05	0:01:52
Estación 15	37+304	0+985	0:39:45	0:02:06	0:00:06	0:02:13
Estación 16	37+804	0+500	0:40:52	0:01:08	0:00:03	0:01:11
Estación 17	38+355	0+552	0:42:11	0:01:19	0:00:04	0:01:23
Estación 18	38+844	0+489	0:43:20	0:01:09	0:00:03	0:01:12
Estación 19	39+665	0+821	0:45:13	0:01:53	0:00:06	0:01:58
Estación 20	40+481	0+816	0:47:00	0:01:47	0:00:05	0:01:52
				0:45:57	0:02:18	0:48:14

<b>Tiempo de viaje (simulación + margen + paradas)</b>	0:57:49
--	---------

<b>Velocidad comercial</b>	43,27 km/h
----------------------------	------------

Tabla 16: Tiempos de recorrido. Simulación y márgenes. Vuelta

Vuelta						
Estación	P.K.	Distancia entre estaciones	Tiempo simulado	T1	$\Delta T$ (T1*5%)	T2 (T1 + $\Delta T$ )
Estación 20	40+481					
Estación 19	39+665	0+816	0:02:04	0:01:51	0:00:06	0:01:57
Estación 18	38+844	0+821	0:03:58	0:01:54	0:00:06	0:01:59
Estación 17	38+355	0+489	0:05:12	0:01:14	0:00:04	0:01:17
Estación 16	37+804	0+552	0:06:30	0:01:18	0:00:04	0:01:22
Estación 15	37+304	0+500	0:07:38	0:01:08	0:00:03	0:01:11
Estación 14	36+320	0+985	0:09:35	0:01:57	0:00:06	0:02:03
Estación 13	35+439	0+881	0:11:02	0:01:27	0:00:04	0:01:32
Estación 12	33+328	2+110	0:14:15	0:03:13	0:00:10	0:03:23
Estación 11	28+916	4+412	0:17:57	0:03:42	0:00:11	0:03:53
Estación 10	21+397	7+519	0:24:20	0:06:23	0:00:19	0:06:42
Estación 9	17+306	4+092	0:27:47	0:03:27	0:00:10	0:03:38
Estación 8	14+958	2+348	0:29:54	0:02:06	0:00:06	0:02:12
Estación 7	11+700	3+258	0:32:46	0:02:53	0:00:09	0:03:01
Estación 6	10+038	1+662	0:35:14	0:02:28	0:00:07	0:02:35
Estación 5	8+320	1+718	0:37:25	0:02:10	0:00:07	0:02:17
Estación 4	7+611	0+709	0:38:28	0:01:04	0:00:03	0:01:07
Estación 3	4+261	3+351	0:41:59	0:03:30	0:00:11	0:03:41
Estación 2	1+803	2+458	0:44:10	0:02:12	0:00:07	0:02:18
Estación 1	0+220	1+583	0:45:45	0:01:34	0:00:05	0:01:39
				0:45:32	0:02:17	0:47:48

<b>Tiempo de viaje (simulación + margen + paradas)</b>	0:57:23
--	---------

<b>Velocidad comercial</b>	43,61 km/h
----------------------------	------------

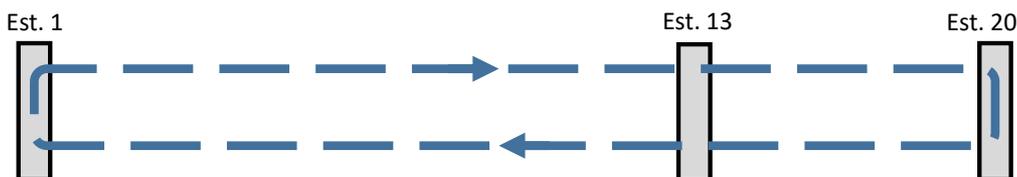
## 8. OPERACIÓN DE LA LÍNEA

### 8.1. Análisis de alternativas de operación

Se analizan tres modos de operación para la línea de estudio, con el fin de comparar entre ellos y elegir el más eficiente para la operación (flota, km recorridos, etc.) y para el pasajero.

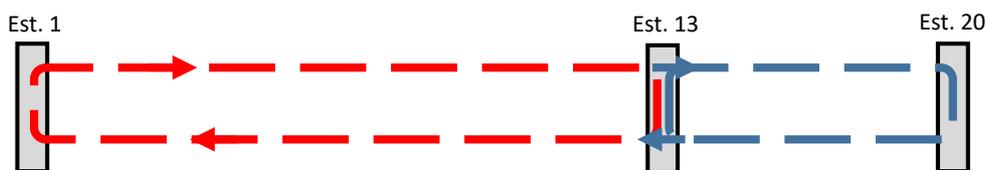
- Modo 1: carrusel único de extremo a extremo con trenes parando en todas las estaciones.

*Figura 21: Operación en bucle único (OP1)*



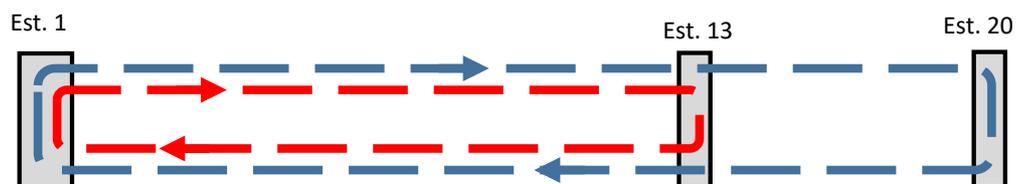
- Modo 2: dos bucles tangenciales en la Estación 13.

*Figura 22: Operación en bucles tangenciales (OP2)*



- Modo 3: Dos bucles concéntricos: Estación 1 a 13 y Estación 1 a 20. Se plantea este modo como complementario al modo 1 para reforzar el servicio en el tramo más cargado en horas punta.

*Figura 23: Operación en bucles concéntricos (OP3)*



Se establece la Estación 13 como estación pivote debido al salto que se produce en la carga máxima entre los tramos adyacentes a la misma.

Se analiza para el tren tipo de descrito en el apartado 6.4 y para la demanda del año 2030 y para un día laborable que multiplicamos por 302 días equivalentes anuales. Se comparará esta producción ferroviaria, la flota necesaria y los km recorridos por cada elemento de dicha flota, con el fin de determinar el modo de operación más eficiente para el sistema.

Con los tiempos de recorrido calculados en el capítulo 7 y las frecuencias necesarias para mover la demanda esperada, se determinan los siguientes aspectos:

- Plazas ofertadas.
- Número de circulaciones diarias.
- Número de trenes necesario para alcanzar los números anteriores.

Con el tamaño de flota y el número de circulaciones se calcula la producción ferroviaria del sistema.

### 8.1.1. Bucle único

#### 8.1.1.1. Tiempos de recorrido

De los tiempos de recorrido calculados en el apartado anterior, se toma el tiempo de vuelta calculado para el total de la línea, establecido en 2:01:43.

#### 8.1.1.2. Frecuencia necesaria

Tomando el número de plazas por tren definido en el apartado 6.4 (470 plazas), se determinan las frecuencias necesarias para mover la demanda esperada en el tramo más cargado durante cada hora del día. La siguiente tabla muestra las frecuencias necesarias para mover la demanda con niveles de ocupación cercanos al 80-85%.

Tabla 17: Modo de operación 1. Horario para 2030

		OP1					Trenes requeridos para el servicio
		Sección 1 - 20					
Intervalo horario		Carga máx.	Intervalo	Servicios / hora	Capacidad de tte.	Ocupación (%)	
05:30:00	06:00:00	1100	00:15:00	4	1880	59%	9
06:00:00	07:00:00	1760	00:12:00	5	2350	75%	11
07:00:00	08:00:00	4400	00:05:30	11	5170	85%	23
08:00:00	09:00:00	4400	00:05:30	11	5170	85%	23
09:00:00	10:00:00	2200	00:10:00	6	2820	78%	13
10:00:00	11:00:00	2200	00:10:00	6	2820	78%	13
11:00:00	12:00:00	2200	00:10:00	6	2820	78%	13
12:00:00	13:00:00	2200	00:10:00	6	2820	78%	13
13:00:00	14:00:00	2200	00:10:00	6	2820	78%	13
14:00:00	15:00:00	2200	00:10:00	6	2820	78%	13
15:00:00	16:00:00	4079	00:05:30	11	5170	79%	23
16:00:00	17:00:00	4079	00:05:30	11	5170	79%	23
17:00:00	18:00:00	4079	00:05:30	11	5170	79%	23
18:00:00	19:00:00	4079	00:05:30	11	5170	79%	23
19:00:00	20:00:00	1760	00:12:00	5	2350	75%	11
20:00:00	21:00:00	1760	00:12:00	5	2350	75%	11
21:00:00	22:00:00	1760	00:12:00	5	2350	75%	11
22:00:00	23:00:00	1100	00:15:00	4	1880	59%	9
23:00:00	00:00:00	1100	00:15:00	4	1880	59%	9

#### 8.1.1.3. Flota necesaria

El número de trenes necesario para cumplir las frecuencias deseadas en hora punta se obtiene con la siguiente fórmula:

$$N = \frac{T}{H}$$

Donde “T” es el tiempo de vuelta y “H” es el intervalo ofertado.

La columna de la derecha de la tabla anterior muestra el número de trenes circulando simultáneamente necesarios para alcanzar la capacidad de transporte necesaria durante cada hora del día. El número máximo, durante las horas punta, indica el tamaño mínimo de la flota necesaria para este modo de operación, siendo un total de **23 trenes**.

Considerando un 5% de reserva operativa y un 5% de trenes en mantenimiento, la flota total se quedaría en **26 trenes**.

#### 8.1.1.4. Producción ferroviaria

Se calcula la producción ferroviaria (tren.km) para un día laborable tipo, mediante la multiplicación del número de viajes por la distancia recorrida.

Tabla 18: Producción ferroviaria. Modo de operación 1

	Viajes	Distancia (km)	Producción ferroviaria	Tren.km/tren
Diaria	260	40.261	10,467.87	402.61
Anual	78,520	40.261	3,161,297.80	121,588.38

La producción ferroviaria total es de unos 10.500 tren.km diarios y algo más de 3 millones de tren.km anuales.

Dividiendo este número entre el número total de trenes de la flota (26) se obtiene que cada tren recorrerá unos 400 km diarios, que, multiplicado por 302 días equivalentes, suma un total de 121.600 km anuales por tren.

#### 8.1.2. Bucles tangenciales

##### 8.1.2.1. Tiempos de recorrido

De los tiempos de recorrido calculados en el apartado anterior, en este modo de operación se toman los tiempos de vuelta entre las Estaciones 1 y 13, establecido en 1:31:40, y entre las Estaciones 13 y 20, establecido en 35:33.

##### 8.1.2.2. Frecuencia necesaria

De nuevo considerando las 470 plazas por tren, se determinan las frecuencias necesarias para mover la demanda esperada en el tramo más cargado de cada uno de los bucles durante cada hora del día. La siguiente tabla muestra las frecuencias necesarias para mover la demanda con niveles de ocupación cercanos al 85%.

Tabla 19: Modo de operación 2. Horario para 2030

		OP2											
		Sección 1 - 13						Sección 13 - 20					
Intervalo horario	Carga máx	Intervalo	Servicios / hora	Capacidad de tte.	Ocupación (%)	Trenes requeridos para el servicio	Carga máx.	Intervalo	Servicios / hora	Capacidad de tte.	Ocupación(%)	Trenes requeridos para el servicio	
05:30:00	06:00:00	1100	00:15:00	4	1880	59%	7	544	00:15:00	4	1880	29%	3
06:00:00	07:00:00	1760	00:12:00	5	2350	75%	8	870	00:12:00	5	2350	37%	3
07:00:00	08:00:00	4400	00:05:30	11	5170	85%	17	2176	00:11:00	6	2820	77%	4
08:00:00	09:00:00	4400	00:05:30	11	5170	85%	17	2176	00:11:00	6	2820	77%	4
09:00:00	10:00:00	2200	00:10:00	6	2820	78%	10	1088	00:10:00	6	2820	39%	4
10:00:00	11:00:00	2200	00:10:00	6	2820	78%	10	1088	00:10:00	6	2820	39%	4
11:00:00	12:00:00	2200	00:10:00	6	2820	78%	10	1088	00:10:00	6	2820	39%	4
12:00:00	13:00:00	2200	00:10:00	6	2820	78%	10	1088	00:10:00	6	2820	39%	4
13:00:00	14:00:00	2200	00:10:00	6	2820	78%	10	1088	00:10:00	6	2820	39%	4
14:00:00	15:00:00	2200	00:10:00	6	2820	78%	10	1088	00:10:00	6	2820	39%	4
15:00:00	16:00:00	4079	00:05:30	11	5170	79%	17	2376	00:11:00	6	2820	84%	4
16:00:00	17:00:00	4079	00:05:30	11	5170	79%	17	2376	00:11:00	6	2820	84%	4
17:00:00	18:00:00	4079	00:05:30	11	5170	79%	17	2376	00:11:00	6	2820	84%	4
18:00:00	19:00:00	4079	00:05:30	11	5170	79%	17	2376	00:11:00	6	2820	84%	4
19:00:00	20:00:00	1760	00:12:00	5	2350	75%	8	950	00:12:00	5	2350	40%	3
20:00:00	21:00:00	1760	00:12:00	5	2350	75%	8	950	00:12:00	5	2350	40%	3
21:00:00	22:00:00	1760	00:12:00	5	2350	75%	8	950	00:12:00	5	2350	40%	3
22:00:00	23:00:00	1100	00:15:00	4	1880	59%	7	594	00:15:00	4	1880	32%	3
23:00:00	00:00:00	1100	00:15:00	4	1880	59%	7	594	00:15:00	4	1880	32%	3

### 8.1.2.3. Flota necesaria

La columna de la derecha de cada una de las secciones muestra el número necesario de trenes circulando simultáneamente para alcanzar la capacidad de transporte requerida durante cada hora del día en cada uno de los bucles.

La suma de los números máximos, que se dan durante las horas punta, indica el tamaño mínimo de la flota necesaria para este modo de operación, siendo un total de **21 trenes** (17 para la sección 1-13 y 4 para la sección 13-20).

Considerando un 5% de reserva operativa y un 5% de trenes en mantenimiento, la flota total se quedaría en **24 trenes**.

### 8.1.2.4. Producción ferroviaria

Se calcula la producción ferroviaria (tren.km) para un día laborable tipo, mediante la multiplicación del número de viajes por la distancia recorrida. En este caso, se deberán sumar las producciones de cada uno de los bucles.

Tabla 20: Producción ferroviaria. Modo de operación 2

	Viajes	Distancia (km)	Producción ferroviaria	Tren.km/tren
Bucle 1-13	260	35.220	9,157.20	381.55
Bucle 13-20	200	5.040	1,008.00	42.00
Anual	138,920	12,159	3,069,890	127,912

Los números en cuanto a la producción ferroviaria son muy parecidos a los del apartado anterior, con un total de unos 10.150 tren.km diarios y algo más de 3 millones de tren.km anuales.

Al ser la flota necesaria menor, cada tren recorrerá una cantidad mayor de km. Dividiendo los tren.km totales entre los 24 trenes de la flota se obtiene que cada tren recorrerá unos 128.000 km anuales.

### 8.1.3. Bucles concéntricos

#### 8.1.3.1. Tiempos de recorrido

En este caso, los tiempos de recorrido necesarios para el cálculo son el tiempo de vuelta de la línea completa (2:01:43) y el tiempo de vuelta entre las Estaciones 1 y 13 (1:31:40).

#### 8.1.3.2. Frecuencia necesaria

La siguiente tabla muestra las frecuencias necesarias, con trenes de 470 plazas, para mover la demanda esperada con niveles de ocupación cercanos al 80-85%.

En la tabla, durante las horas punta, aparecen frecuencias diferentes en las dos secciones de la línea. La frecuencia de la sección 13 – 20 viene condicionada por la frecuencia necesaria en la sección 1-13, en la que coinciden durante estas horas los servicios del bucle corto y del bucle largo.

Tabla 21: Modo de operación 3. Horario para 2030

Intervalo horario		OP3										Trenes requeridos para el servicio
		Sección 1 - 13					Sección 13 - 20					
Carga máx.	Intervalo	Servicios / hora	Capacidad de tte.	Ocupación (%)	Carga máx.	Intervalo	Servicios / hora	Capacidad de tte.	Ocupación (%)			
05:30:00	06:00:00	1100	00:15:00	4	1880	59%	544	00:15:00	4	1880	29%	9
06:00:00	07:00:00	1760	00:12:00	5	2350	75%	870	00:12:00	5	2350	37%	11
07:00:00	08:00:00	4400	00:05:30	11	5170	85%	2176	00:11:00	6	2820	77%	20
08:00:00	09:00:00	4400	00:05:30	11	5170	85%	2176	00:11:00	6	2820	77%	20
09:00:00	10:00:00	2200	00:10:00	6	2820	78%	1088	00:10:00	6	2820	39%	13
10:00:00	11:00:00	2200	00:10:00	6	2820	78%	1088	00:10:00	6	2820	39%	13
11:00:00	12:00:00	2200	00:10:00	6	2820	78%	1088	00:10:00	6	2820	39%	13
12:00:00	13:00:00	2200	00:10:00	6	2820	78%	1088	00:10:00	6	2820	39%	13
13:00:00	14:00:00	2200	00:10:00	6	2820	78%	1088	00:10:00	6	2820	39%	13
14:00:00	15:00:00	2200	00:10:00	6	2820	78%	1088	00:10:00	6	2820	39%	13
15:00:00	16:00:00	4079	00:05:30	11	5170	79%	2376	00:11:00	6	2820	84%	20
16:00:00	17:00:00	4079	00:05:30	11	5170	79%	2376	00:11:00	6	2820	84%	20
17:00:00	18:00:00	4079	00:05:30	11	5170	79%	2376	00:11:00	6	2820	84%	20
18:00:00	19:00:00	4079	00:05:30	11	5170	79%	2376	00:11:00	6	2820	84%	20
19:00:00	20:00:00	1760	00:12:00	5	2350	75%	950	00:12:00	5	2350	40%	11
20:00:00	21:00:00	1760	00:12:00	5	2350	75%	950	00:12:00	5	2350	40%	11
21:00:00	22:00:00	1760	00:12:00	5	2350	75%	950	00:12:00	5	2350	40%	11
22:00:00	23:00:00	1100	00:15:00	4	1880	59%	594	00:15:00	4	1880	32%	9
23:00:00	00:00:00	1100	00:15:00	4	1880	59%	594	00:15:00	4	1880	32%	9

#### 8.1.3.3. Flota necesaria

La columna de la derecha de la tabla muestra el número de trenes circulando simultáneamente necesarios para alcanzar la capacidad de transporte necesaria durante cada hora del día. El número máximo, durante las horas punta, indica el tamaño mínimo de la flota necesaria para este modo de operación, siendo un total de **20 trenes**.

Con un 5% de reserva operativa y un 5% adicional de trenes en mantenimiento, la flota total alcanzaría los **23 trenes**.

#### 8.1.3.4. Producción ferroviaria

Se calcula la producción ferroviaria (tren.km) para un día laborable tipo, mediante la multiplicación del número de viajes por la distancia recorrida.

*Tabla 22: Producción ferroviaria. Modo de operación 3*

	Viajes	Distancia (km)	Producción ferroviaria	Tren.km/tren
Bucle 1-20	200	40.261	8,052.21	350.10
Bucle 1 - 13	72	35.219	2,535.74	110.25
Anual	82,144	22,795	3,197,562	139,024.43

La producción ferroviaria total es de unos 10.500 tren.km diarios y unos 3,2 millones de tren.km anuales.

Dividiendo este número entre el número total de trenes de la flota (23) se obtiene que cada tren recorrerá un total de 139.000 km anuales.

#### **8.1.4. Comparación entre modos de operación**

La siguiente tabla muestra la comparativa entre los valores anteriores

*Tabla 23: Datos comparativos entre modos de operación*

	Flota	km/año	km/año tren
OP1	27	3.161.297,80	121.588,38
OP2	24	3.069.890,40	127.912,10
OP3	23	3.197.561,91	139.024,43

El modo 1 de operación necesita una flota mayor de trenes que las otras dos opciones, lo que implica una mayor inversión inicial en material rodante, así como mayores costes de operación y mantenimiento. Además, este modo de operación implicaría una infrutilización de las plazas ofertadas en las últimas estaciones de la línea, en las que la demanda es sensiblemente más baja que en las primeras.

El modo 2 de operación, si bien requiere una flota menor que el modo 1 y los km recorridos por la flota son menores que en el modo 3, tiene la gran desventaja de añadir un transbordo en la Estación 13 para aquellos pasajeros con origen en una estación de una sección y destino una estación de la otra sección.

El modo 3 es el que mejor permite adaptar la oferta de plazas a la demanda esperada, con un incremento de tan solo el 8,6% en los kilómetros anuales recorridos por cada tren con respecto al modo 2.

Por tanto, el modo de operación elegido para la línea es el modo de operación 3, en bucle único durante todo el día complementado por un bucle corto concéntrico durante las horas punta. Se desarrollará este modo de operación en el resto del documento.

#### **8.2. Modos de conducción**

La línea puede ser dividida en tres secciones: talleres y cocheras, zona urbana y zona interurbana. En cada una de ellas el ATP adoptará un diferente modo de conducción.

- Talleres y cocheras – Modo maniobras.
- Zona interurbana – Modo supervisión total.
- Zona urbana – Modo responsabilidad el maquinista.

### **Talleres y cocheras - maniobras**

Dentro de los talleres y cocheras no habrá supervisión de señales o agujas por parte del ATP. El modo maniobras limitará la velocidad máxima a 15 km/h. El ATP es responsable de la supervisión de la velocidad máxima y de detener el tren cuando sobrepase la frontera definida del área de maniobras estando en este modo de conducción.

### **Zona interurbana – supervisión total**

El ATP embarcado es totalmente responsable de la protección del tren excepto:

El conductor es responsable de respetar el final de la autoridad de movimiento cuando se aproxime a este punto con una velocidad de liberación.

Cuando se muestre “entrando en modo supervisión total” al conductor, este es responsable de respetar las restricciones de velocidad que aplican a la parte del tren no cubierta por el perfil estático de velocidades y los datos de pendientes.

### **Zona urbana – responsabilidad del maquinista**

Este modo equivale a marcha a la vista, aunque el sistema limitará la velocidad máxima dentro de la zona urbana y controlará el lado correcto de apertura de puertas.

En pendientes superiores al 7% la sección estará bloqueada por señales para permitir un único tren y así evitar posibles alcances.

En las terminales habrá secciones con operación bidireccional y rutas combinadas. Un sistema de enclavamiento se usará para el establecimiento de itinerarios, incluyendo la prevención de movimientos incompatibles. En el resto de la zona urbana la conducción será manual.

#### ***8.2.1. Transición entre modos***

Habrán tres cambios de modo de conducción de responsabilidad del maquinista a supervisión total y viceversa. Las transiciones serán supervisadas por el ATP, produciéndose de manera automática cuando el cambio es de responsabilidad del maquinista (zona urbana) a supervisión total (zona interurbana), y de forma manual por el maquinista cuando el cambio es a la inversa, mientras el tren está parado en la estación de transición.

#### ***8.3. Subida y bajada de viajeros***

Las puertas se abrirán de forma individual bajo petición del viajero tras la liberación del sistema por parte del maquinista con el tren parado. El conductor también podrá abrir simultáneamente todas las puertas.

En las paradas en zona urbana el conductor deberá asegurarse de que todas las puertas se encuentren en la sección horizontal del andén.

En las estaciones término el tren que finaliza el viaje abrirá todas las puertas del lado de andén y anunciará el fin de trayecto y desplegará el mensaje “no se admiten pasajeros”. El tren cerrará las puertas y realizará la inversión de marcha, las tareas de limpieza y la inspección de seguridad, y el cierre de pupitre y apertura del pupitre del otro extremo por parte del maquinista. Una vez finalizado el proceso, el tren abrirá de nuevo las puertas del lado de andén para permitir a los viajeros subir al vehículo para comenzar el viaje en la dirección opuesta.

#### **8.4. Inversión de marcha**

Las estaciones terminales son clave para la gestión de la línea. De hecho, normalmente condicionan el intervalo mínimo alcanzable en la línea. Las terminales tienen zonas de maniobras que permiten:

- Maniobras de inversión de marcha de los trenes que pueden ser en andén o en topera.
- Inserción y retirada de trenes entre horas punta y valle. Los trenes quedarán estacionados en las vías disponibles.
- Intercambio de un tren estropeado por uno de reserva.
- Acceso a zona de taller y cocheras (solo desde la Estación 1).

La flexibilidad de la operación depende de la posición de la bretelle delante o detrás de la estación. Con intervalos cortos, el cambio de vía antes de la estación puede, en caso de retraso, afectar a los tiempos de recorrido tanto del tren saliente como del entrante, causando por tanto un retraso en la salida del tren y la consiguiente perturbación a los pasajeros. Por otro lado, el cambio de vía antes de entrar a la estación es interesante en caso de retraso del tren entrante, pues permite recuperar parte del retraso al acortar el tiempo de inversión de marcha con respecto a la vuelta por detrás de la estación.

Dependiendo de la configuración de vías, las maniobras de inversión de marcha pueden realizarse siguiendo diferentes encaminamientos en función de las circunstancias. Normalmente habrá una ruta preferente que se usará como regla general, y rutas alternativas que podrán usarse en caso de incidencias en la operación normal de la línea.

##### **8.4.1. Inspección de seguridad y limpieza**

Después de cada viaje, y una vez hayan descendido todos los viajeros, se llevarán a cabo tareas de limpieza e inspección de seguridad en los espacios destinados a pasajeros. Estas tareas serán consideradas parte de las maniobras de inversión de marcha en las terminales.

#### **8.5. Gestión de pequeñas perturbaciones**

La línea estudiada estará sujeta a las típicas fuentes de retrasos de este tipo de sistemas de transporte, como la demanda fluctuante y las interferencias con el tráfico rodado. Además, la línea tiene una longitud considerable, de más de 40 km, lo que aumenta la posibilidad de acumular retrasos en el viaje.

Es técnicamente posible compensar los retrasos menores reduciendo los tiempos de parada cuando se pueda o dando prioridad semafórica al tren si es posible. La marcha a la vista puede manejar intervalos de hasta un minuto entre trenes, aunque esto depende de los ciclos semafóricos de las intersecciones. En las zonas interurbanas, como se ha indicado con anterioridad, la señalización permite un intervalo de 180 segundos.

Una compensación mayor de estos pequeños retrasos se llevará a cabo en las terminales, en función del tiempo de regulación incluido en la maniobra de inversión de marcha.

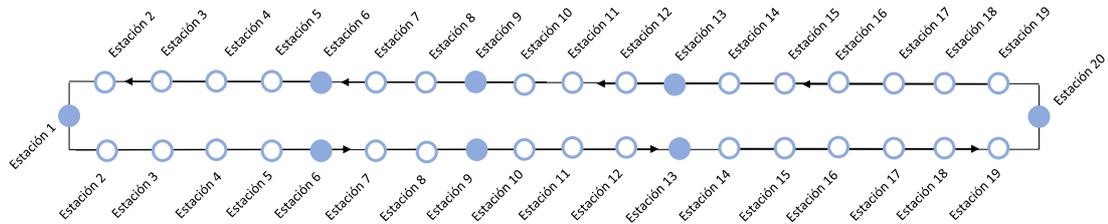
#### **8.6. Comienzo y cierre del servicio comercial**

##### **8.6.1. Preparación**

El servicio comercial comenzará a las 5:30 con una frecuencia de 15 minutos entre servicios a lo largo de toda la línea. Para ello, los trenes saldrán de las cocheras con la antelación suficiente para tomar posiciones en las estaciones necesarias para poder garantizar la frecuencia deseada en las primeras horas de operación. Los trenes que empiezan su servicio

en dirección descendente alcanzarán su posición rodando por la vía derecha hasta el escape más cercano a la estación que deben alcanzar. Desde ese escape circularán a contravía por vía izquierda hasta el andén. La siguiente figura muestra la posición de los trenes al comienzo de un día laborable.

Figura 24: Posición inicial de los trenes para el comienzo del servicio



Esta posición de los trenes debe garantizar el comienzo del servicio a las 5:30 y la frecuencia necesaria para mover la demanda esperada durante las primeras horas del día.

**8.6.2. Rutas de inserción y retirada de trenes**

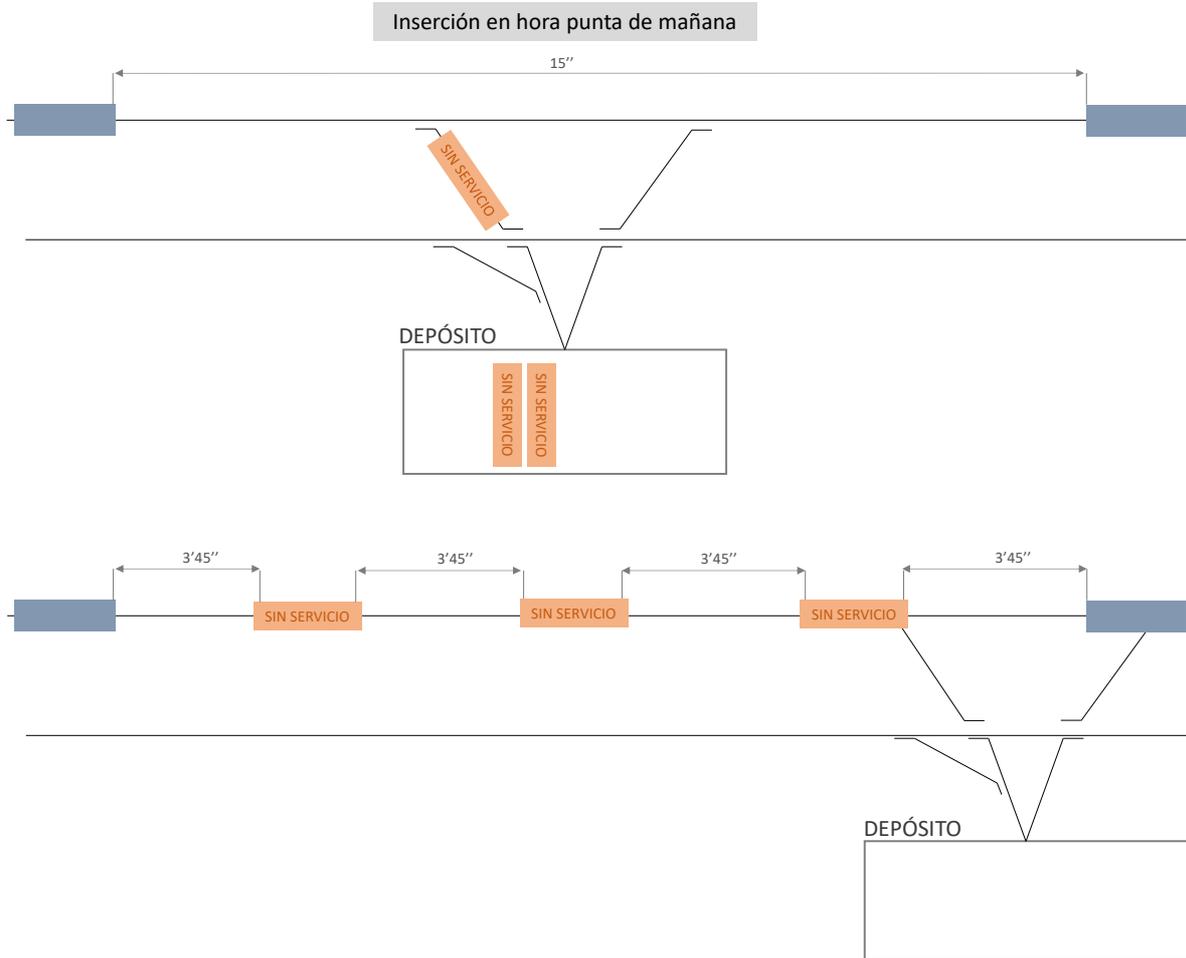
Durante la operación diaria será necesario insertar trenes o retirarlos del servicio con el fin de adaptar las frecuencias a las fluctuaciones de la demanda entre horas punta y horas valle.

La inserción de trenes en la línea se realizará desde la Estación 1. El tren insertado saldrá de cocheras con el cartel “fuera de servicio” y no parará en estaciones intermedias hasta alcanzar el final de línea y colocarse en el andén de la estación inicial.

El tren saliente de cocheras dejará la distancia necesaria con el tren precedente para rodar sin paradas hasta la Estación 1 sin frenar, y no deberá interferir en la marcha del tren sucesor.

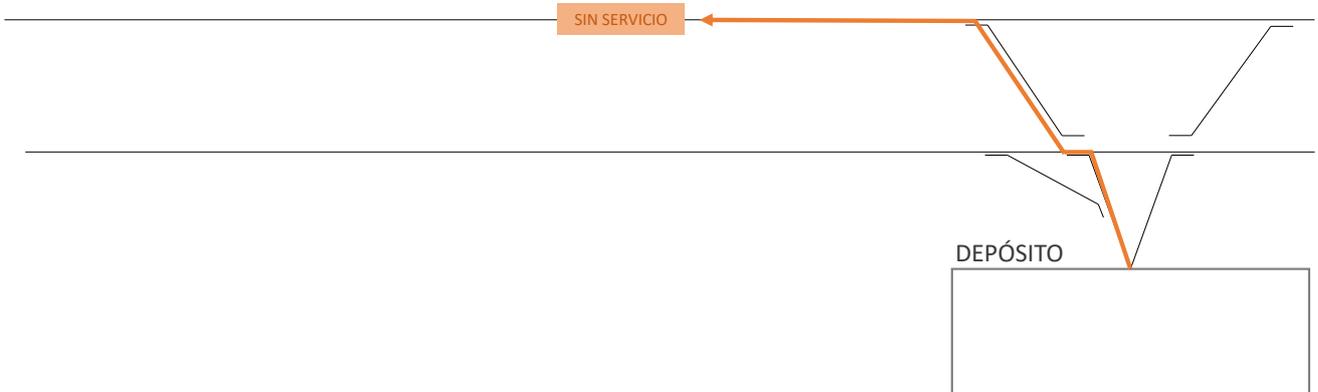
La inserción desde toperas es más sencilla. El tren insertado tomará posición después de que el tren precedente haya abandonado la estación, y comenzará su servicio con la frecuencia programada.

*Figura 25: Inserción de trenes desde el depósito*

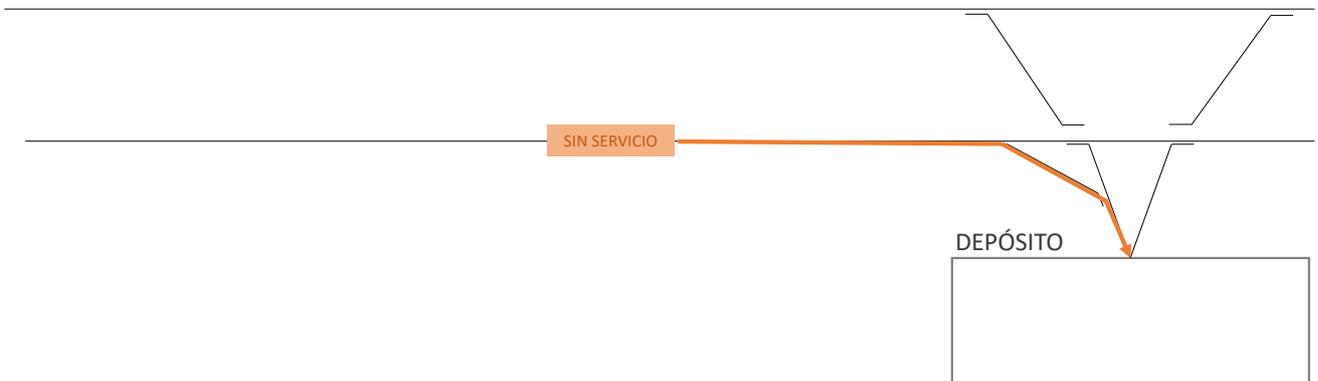


Las figuras siguientes muestran las rutas de los trenes en su salida y entrada al depósito:

*Figura 26: Ruta de salida desde el depósito a la línea principal*



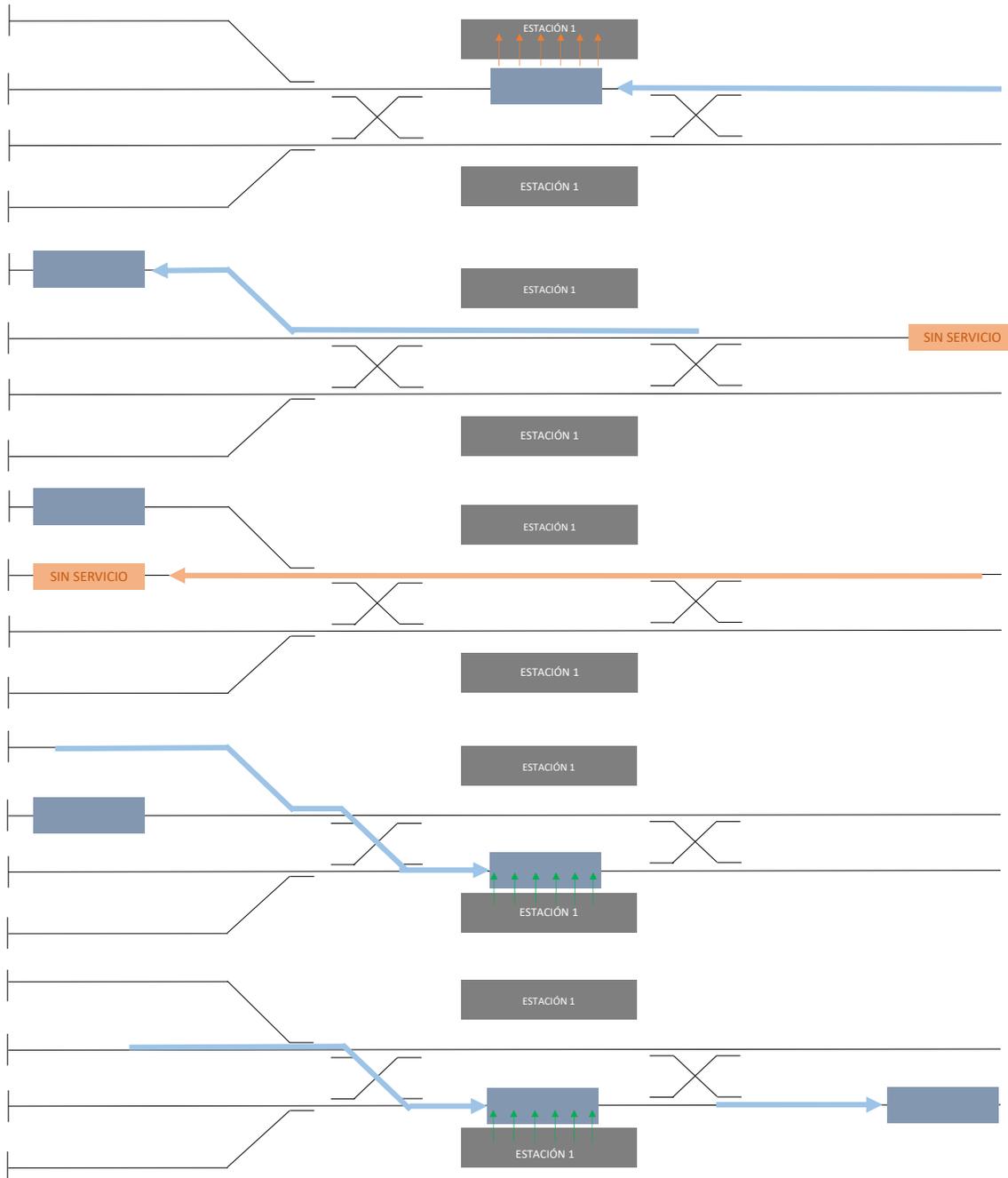
*Figura 27: Ruta de entrada de línea principal al depósito*



### 8.6.3. Cambios de frecuencia

A lo largo del día, será necesario insertar o retirar trenes de la línea en las transiciones entre horas punta y horas valle, con el fin de adaptar la capacidad de transporte a la demanda.

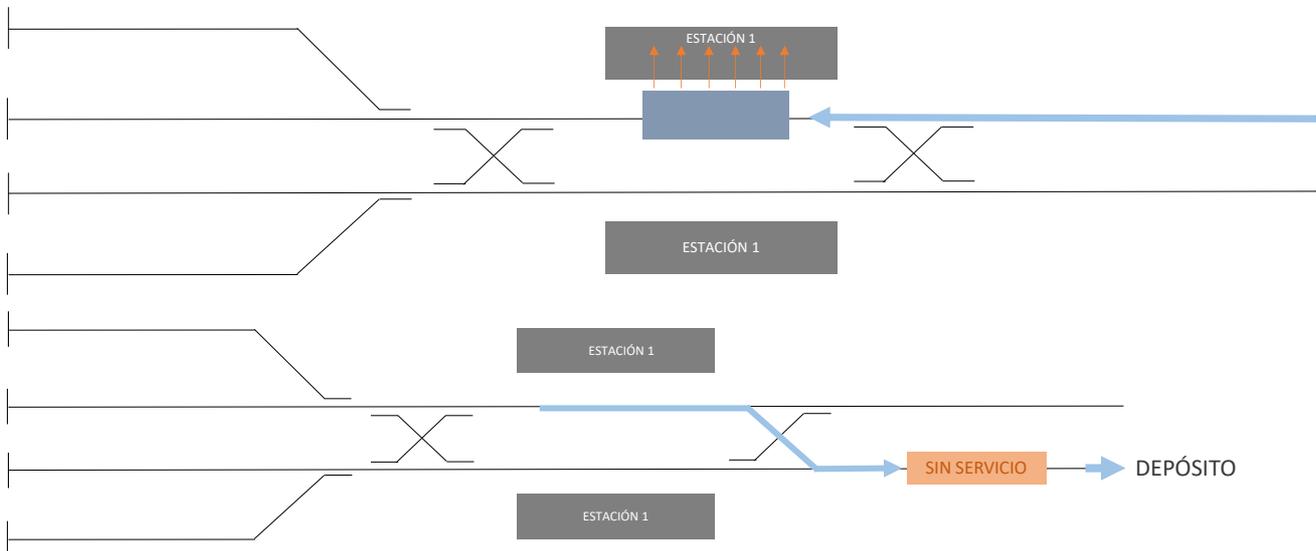
Figura 28: Inserción de un tren. Cambio de frecuencia



Los trenes retirados se estacionarán en las posiciones disponibles cuando sea posible. El resto de los trenes retirados se llevarán a cocheras, donde se estacionarán hasta que sean requeridos de nuevo para el servicio. Esta estancia en cocheras puede aprovecharse para realizar tareas pequeñas de mantenimiento en los vehículos.

Para la retirada de vehículos, los trenes terminarán su trayecto en la estación terminal y, una vez hayan descendido todos los viajeros, mostrará el mensaje “fuera de servicio” y se dirigirá a una vía de estacionamiento o a cocheras.

*Figura 29: Retirada de un tren al depósito al final del servicio*



#### **8.6.4. Cierre de la línea**

El último servicio desde cada cabecera saldrá a las 0:00, terminando su servicio comercial cerca de la 1:00. Los servicios que terminen en la Estación 1 más tarde de las 0:00 se dirigirán a cocheras, y los trenes que terminen en el otro extremo después de las 0:00 realizarán el viaje de regreso en vacío hasta cocheras.

#### **8.6.5. Bandas de mantenimiento**

El horario comercial, de 5:30 a alrededor de la 1:00, además del tiempo necesario antes (para el emplazamiento de los trenes por la mañana) y después (para la retirada de los últimos trenes hacia cocheras) de dicho horario, hace que el tiempo disponible para el mantenimiento diario de la línea sea escaso.

Debido a ello, habrá ocasiones en las que vehículos de mantenimiento deban entrar en la línea antes de que todos los trenes estén estacionados en cocheras. Esto deberá ser autorizado desde el CTC.

Para maximizar estas bandas de mantenimiento, los vehículos y equipos de mantenimiento deberán acercarse al punto de acceso más próximo a la zona de trabajos. Al ser vehículos bi-viales, podrán hacerlo por carretera y después acceder a las vías. También deberá tratar de reducirse al máximo los tiempos de comienzo y fin de posesión de la línea mediante el sistema de señalización.

Las tablas siguientes resumen las bandas de mantenimiento estimadas para cada vía, considerando 5 minutos para comenzar la posesión tras el paso del último tren por una estación y 15 minutos para finalizar la posesión antes de que el primer tren de la mañana pase por una estación.

Tabla 24: Últimos servicios comerciales y ventanas de mantenimiento

Estación	Última salida desde Est. 1	Último tren pasando	Comienzo de posesión	Fin de posesión	Ventana total
Estación 1	00:00	01:00:00	01:05:00	05:15:00	04:10:00
Estación 2		01:02:13	01:07:13	05:15:00	04:07:47
Depósito		00:03:21	00:08:21	04:31:06	04:22:45
Estación 3		00:05:05	00:10:05	04:32:00	04:21:55
Estación 4		00:09:38	00:14:38	04:36:03	04:21:24
Estación 5		00:11:18	00:16:18	04:37:12	04:20:55
Estación 6		00:14:14	00:19:14	04:39:38	04:20:24
Estación 7		00:16:26	00:21:26	04:41:22	04:19:56
Estación 8		00:20:01	00:25:01	04:44:24	04:19:23
Estación 9		00:22:47	00:27:47	04:46:36	04:18:50
Estación 10		00:27:19	00:32:19	04:50:35	04:18:16
Estación 11		00:34:39	00:39:39	04:57:22	04:17:43
Estación 12		00:39:19	00:44:19	05:01:30	04:17:11
Estación 13		00:43:01	00:48:01	05:04:39	04:16:38
Estación 14		00:45:00	00:50:00	05:06:11	04:16:11
Estación 15		00:47:18	00:52:18	05:07:54	04:15:36
Estación 16		00:48:50	00:53:50	05:08:51	04:15:01
Estación 17		00:50:32	00:55:32	05:10:04	04:14:32
Estación 18		00:52:04	00:57:04	05:11:10	04:14:06
Estación 19		00:54:28	00:59:28	05:13:04	04:13:36
Estación 20		00:56:48	01:01:48	05:15:00	04:13:12

Estación	Última salida desde Est. 20	Último tren pasando	Comienzo de posesión	Fin de posesión	Ventana total
Estación 20	00:00	01:00:00	01:05:00	05:15:00	04:10:00
Estación 19		01:02:06	01:07:06	05:15:00	04:07:54
Estación 18		01:03:46	01:08:46	05:15:00	04:06:14
Estación 17		01:04:54	01:09:54	05:15:00	04:05:06
Estación 16		01:06:03	01:11:03	05:15:00	04:03:57
Estación 15		01:06:55	01:11:55	05:15:00	04:03:05
Estación 14		01:08:42	01:13:42	05:15:00	04:01:18
Estación 13		01:10:09	01:15:09	05:15:00	03:59:51
Estación 12		01:12:59	01:17:59	05:15:00	03:57:01
Estación 11		01:17:01	01:22:01	05:15:00	03:52:59
Estación 10		01:24:02	01:29:02	05:09:04	03:40:02
Estación 9		01:27:46	01:32:46	05:09:04	03:36:18
Estación 8		01:29:58	01:34:58	05:09:04	03:34:06
Estación 7		01:33:02	01:38:02	05:09:04	03:31:02
Estación 6		01:34:44	01:39:44	05:06:38	03:26:54
Estación 5		01:37:13	01:42:13	05:06:38	03:24:24
Estación 4		01:38:22	01:43:22	05:06:38	03:23:15
Estación 3		01:42:13	01:47:13	05:06:38	03:19:24
Depósito		01:43:06	01:48:06	05:06:38	03:18:32
Estación 2			01:05:00	05:13:13	04:08:13
Estación 1			01:05:00	05:13:13	04:08:13

Los números rojos se deben al hecho de que el último tren que pasa por estas estaciones es el último tren que termina su servicio en la Estación 1 hacia la 1:00 y que tiene que ir a cocheras.

El tiempo deseable de mantenimiento es de unas 4 horas por noche. En las tablas se aprecia que este valor apenas se alcanza en la vía de ida, mientras que en la vía de vuelta hay varias secciones en las que no se alcanza dicho valor.

## 8.7. Supervisión de la operación

### 8.7.1. Monitorización de trenes

Los movimientos de los trenes se monitorizarán y supervisarán desde el Control de Tráfico Centralizado (CTC), que tendrá una visión general de toda la línea.

Cada maquinista recibirá diariamente la información relevante para su servicio: rutas, horarios, frecuencias, etc.

La tendencia actualmente es automatizar al máximo posible la operación de los trenes mediante la incorporación de tanta IA a bordo como sea razonablemente posible. Las funcionalidades a bordo incluirán comparativas entre marcha programada y marcha real, activación de prioridad semafórica, localización del vehículo, etc.

### 8.7.2. Control de Tráfico Centralizado (CTC)

Todo el Sistema de transporte será supervisado, gestionado y controlado desde un centro de Control de Tráfico Centralizado (CTC), localizado en un edificio dentro del recinto de talleres y cocheras.

### 8.7.3. Funciones del CTC

Algunas de las funciones del CTC son:

- Monitorizar los movimientos de los trenes y regula los servicios para asegurar las frecuencias y el cumplimiento de horarios.
- Monitorizar los movimientos de viajeros en andenes y área de estaciones mediante el CCTV.

- Monitorizar el estado de la señalización, sistema ATP, instalaciones, máquinas de venta de billetes, validadoras, e iniciar intervenciones y reparaciones requeridas a corto plazo.
- Proporcionar información al viajero sobre retrasos e incidencias en el servicio, así como cualquier información sobre interrupciones a otros modos de transporte.
- Ser el primer punto de contacto en situaciones de emergencia, encargándose de la coordinación con los servicios de emergencia, informar a los viajeros, etc.
- Monitorizar el suministro eléctrico y gestionarlo con la compañía suministradora.
- Gestión del sistema de seguridad (control de accesos, alarmas, documentación, etc.)

Además de monitorizar y controlar, el CTC también se usará para:

- Informar sobre fallos en las instalaciones o material rodante a los encargados de mantenimiento.
- Informar sobre incidentes, accidentes, delitos, a las autoridades competentes.

## **8.8. Parámetros de operación**

### **8.8.1. Patrón de servicios**

La distribución de la demanda varía a lo largo del día y en función del día de la semana. Por esto, la frecuencia de servicios debe adaptarse a estos cambios. Sin embargo, el horario comercial de la línea permanecerá invariable todos los días de la semana.

Dicho horario comercial irá desde las 5:30 hasta alrededor de la 1:00. Los últimos servicios partirán de las terminales a las 0:00.

Estos horarios pueden estar sujetos a variaciones puntuales debidas a la celebración de eventos especiales (conciertos, eventos deportivos, acontecimientos culturales, etc.)

### **8.8.2. Días laborables**

El día laborable medio se caracteriza por dos horas punta, una por la mañana y otra por la tarde. Entre ellas, la demanda y por tanto la frecuencia del servicio decrece. Antes de la hora punta de la mañana y después de la de la tarde se considera una frecuencia menor que en la hora valle entre horas punta.

### **8.8.3. Sábados**

Los sábados se establece una frecuencia de 7,5 minutos en hora punta en el tramo común y de 15 minutos en horas valle para toda la línea.

### **8.8.4. Domingos y festivos**

Los domingos y festivos se establece un intervalo constante de 15 minutos durante el día completo para toda la línea.

### **8.8.5. Horario**

Si bien todo el sistema se diseña para conseguir frecuencias de 4 minutos, se espera que este intervalo se alcance varios años después de la puesta en servicio del sistema, comenzando el servicio con intervalos más grandes, adaptando la capacidad de transporte a la demanda esperada, y aumentando después la frecuencia de servicios en función del crecimiento de la demanda.

Las tablas siguientes resumen los horarios considerados y los intervalos propuestos para los escenarios analizados (2030, 240 y 2050):

*Tabla 25: Horario para 2030 por día de la semana*

Intervalo horario		Día laborable		Sábados		Domingos y festivos	
		Intervalo 1-13	Intervalo 13-20	Intervalo 1-13	Intervalo 13-20	Intervalo 1-13	Intervalo 13-20
05:30	06:00	00:15:00		00:15:00		00:15:00	
06:00	07:00	00:12:00		00:15:00		00:15:00	
07:00	08:00	00:05:30	00:11:00	00:07:30		00:15:00	
08:00	09:00	00:05:30	00:11:00	00:07:30		00:15:00	
09:00	10:00	00:10:00		00:15:00		00:15:00	
10:00	11:00	00:10:00		00:15:00		00:15:00	
11:00	12:00	00:10:00		00:15:00		00:15:00	
12:00	13:00	00:10:00		00:15:00		00:15:00	
13:00	14:00	00:10:00		00:15:00		00:15:00	
14:00	15:00	00:10:00		00:15:00		00:15:00	
15:00	16:00	00:05:30	00:11:00	00:07:30		00:15:00	
16:00	17:00	00:05:30	00:11:00	00:07:30		00:15:00	
17:00	18:00	00:05:30	00:11:00	00:07:30		00:15:00	
18:00	19:00	00:05:30	00:11:00	00:07:30		00:15:00	
19:00	20:00	00:12:00		00:15:00		00:15:00	
20:00	21:00	00:12:00		00:15:00		00:15:00	
21:00	22:00	00:12:00		00:15:00		00:15:00	
22:00	23:00	00:15:00		00:15:00		00:15:00	
23:00	00:00	00:15:00		00:15:00		00:15:00	

*Tabla 26: Horario para 2030 por día de la semana*

Intervalo horario		Día laborable		Sábados		Domingos y festivos	
		Intervalo 1-13	Intervalo 13-20	Intervalo 1-13	Intervalo 13-20	Intervalo 1-13	Intervalo 13-20
05:30	06:00	00:15:00		00:15:00		00:15:00	
06:00	07:00	00:11:00		00:15:00		00:15:00	
07:00	08:00	00:04:30	00:09:00	00:07:30		00:15:00	
08:00	09:00	00:04:30	00:09:00	00:07:30		00:15:00	
09:00	10:00	00:09:00		00:15:00		00:15:00	
10:00	11:00	00:09:00		00:15:00		00:15:00	
11:00	12:00	00:09:00		00:15:00		00:15:00	
12:00	13:00	00:09:00		00:15:00		00:15:00	
13:00	14:00	00:09:00		00:15:00		00:15:00	
14:00	15:00	00:09:00		00:15:00		00:15:00	
15:00	16:00	00:04:30	00:09:00	00:07:30		00:15:00	
16:00	17:00	00:04:30	00:09:00	00:07:30		00:15:00	
17:00	18:00	00:04:30	00:09:00	00:07:30		00:15:00	
18:00	19:00	00:04:30	00:09:00	00:07:30		00:15:00	
19:00	20:00	00:11:00		00:15:00		00:15:00	
20:00	21:00	00:11:00		00:15:00		00:15:00	
21:00	22:00	00:11:00		00:15:00		00:15:00	
22:00	23:00	00:15:00		00:15:00		00:15:00	
23:00	00:00	00:15:00		00:15:00		00:15:00	

*Tabla 27: Horario para 2030 por día de la semana*

Intervalo horario		Día laborable		Sábados		Domingos y festivos	
		Intervalo 1-13	Intervalo 13-20	Intervalo 1-13	Intervalo 13-20	Intervalo 1-13	Intervalo 13-20
05:30	06:00	00:15:00		00:15:00		00:15:00	
06:00	07:00	00:10:00		00:15:00		00:15:00	
07:00	08:00	00:04:00	00:08:00	00:07:30		00:15:00	
08:00	09:00	00:04:00	00:08:00	00:07:30		00:15:00	
09:00	10:00	00:08:00		00:15:00		00:15:00	
10:00	11:00	00:08:00		00:15:00		00:15:00	
11:00	12:00	00:08:00		00:15:00		00:15:00	
12:00	13:00	00:08:00		00:15:00		00:15:00	
13:00	14:00	00:08:00		00:15:00		00:15:00	
14:00	15:00	00:08:00		00:15:00		00:15:00	
15:00	16:00	00:04:00	00:08:00	00:07:30		00:15:00	
16:00	17:00	00:04:00	00:08:00	00:07:30		00:15:00	
17:00	18:00	00:04:00	00:08:00	00:07:30		00:15:00	
18:00	19:00	00:04:00	00:08:00	00:07:30		00:15:00	
19:00	20:00	00:10:00		00:15:00		00:15:00	
20:00	21:00	00:10:00		00:15:00		00:15:00	
21:00	22:00	00:10:00		00:15:00		00:15:00	
22:00	23:00	00:15:00		00:15:00		00:15:00	
23:00	00:00	00:15:00		00:15:00		00:15:00	

La primera y última salidas se resumen en la siguiente tabla:

*Tabla 28: Primera y última salida*

Primera salida	5:30 (simultáneo en toda la línea)
Última salida	0:00 desde cada extremo de la línea

### 8.9. Capacidad de transporte para un día laborable

Las tablas siguientes muestran las plazas ofertadas en un día laborable (de lunes a viernes) para los horizontes 2030, 2040 y 2050 considerados en el presente proyecto.

En las tablas se presentan dos valores de frecuencia en las horas punta. Estos se refieren al bucle corto y al bucle largo. En horas no punta las frecuencias son las mismas para toda la línea.

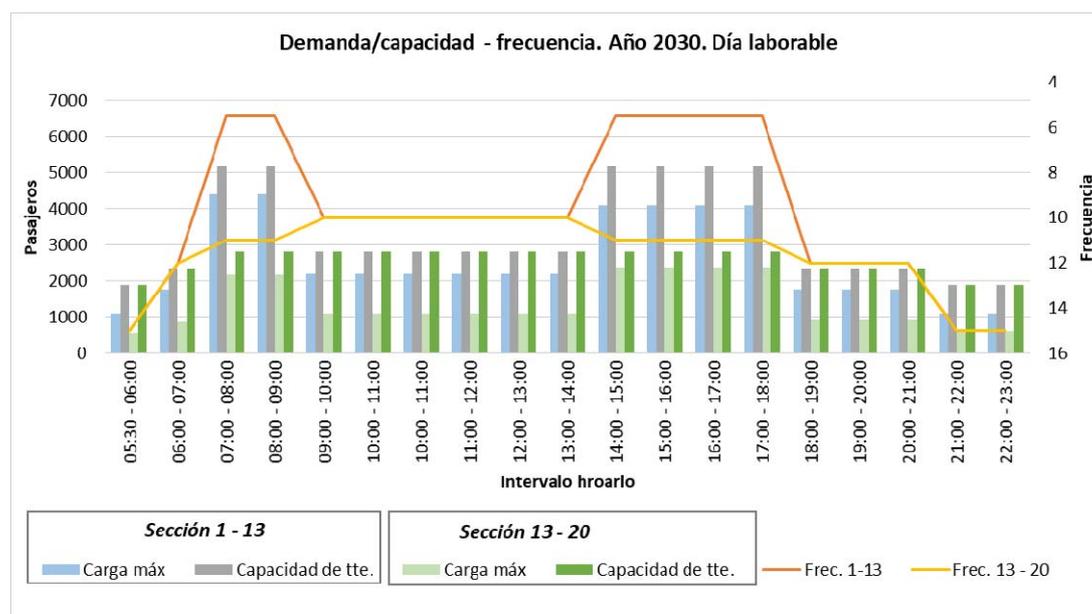
Año 2030

*Tabla 29: Horario operativo para 2030. Frecuencias, oferta de plazas, ocupación y flota necesaria*

Intervalo horario		2030								
		Sección 1 - 13				Sección 13 - 20				Trenes requeridos para el servicio
Carga máx.	Intervalo	Servicios / hora	Ocupación (%)	Carga máx.	Intervalo	Servicios / hora	Ocupación (%)			
05:30:00	06:00:00	1100	00:15:00	4	59%	544	00:15:00	4	29%	9
06:00:00	07:00:00	1760	00:12:00	5	75%	870	00:12:00	5	37%	11
07:00:00	08:00:00	4400	00:05:30	11	85%	2176	00:11:00	6	77%	20
08:00:00	09:00:00	4400	00:05:30	11	85%	2176	00:11:00	6	77%	20
09:00:00	10:00:00	2200	00:10:00	6	78%	1088	00:10:00	6	39%	13
10:00:00	11:00:00	2200	00:10:00	6	78%	1088	00:10:00	6	39%	13
11:00:00	12:00:00	2200	00:10:00	6	78%	1088	00:10:00	6	39%	13
12:00:00	13:00:00	2200	00:10:00	6	78%	1088	00:10:00	6	39%	13
13:00:00	14:00:00	2200	00:10:00	6	78%	1088	00:10:00	6	39%	13
14:00:00	15:00:00	2200	00:10:00	6	78%	1088	00:10:00	6	39%	13
15:00:00	16:00:00	4079	00:05:30	11	79%	2376	00:11:00	6	84%	20
16:00:00	17:00:00	4079	00:05:30	11	79%	2376	00:11:00	6	84%	20
17:00:00	18:00:00	4079	00:05:30	11	79%	2376	00:11:00	6	84%	20
18:00:00	19:00:00	4079	00:05:30	11	79%	2376	00:11:00	6	84%	20
19:00:00	20:00:00	1760	00:12:00	5	75%	950	00:12:00	5	40%	11
20:00:00	21:00:00	1760	00:12:00	5	75%	950	00:12:00	5	40%	11
21:00:00	22:00:00	1760	00:12:00	5	75%	950	00:12:00	5	40%	11
22:00:00	23:00:00	1100	00:15:00	4	59%	594	00:15:00	4	32%	9
23:00:00	00:00:00	1100	00:15:00	4	59%	594	00:15:00	4	32%	9

El siguiente gráfico muestra la oferta de plazas por hora, la demanda esperada y las frecuencias en el año 2030. Muestra las distintas frecuencias de servicio ofrecidas en las distintas secciones de la línea durante las horas punta de la mañana y de la tarde, cuando se introducen los servicios de bucle corto entre las Estaciones 1 y 13.

*Figura 30: Demanda/capacidad – frecuencia. Horario 2030*



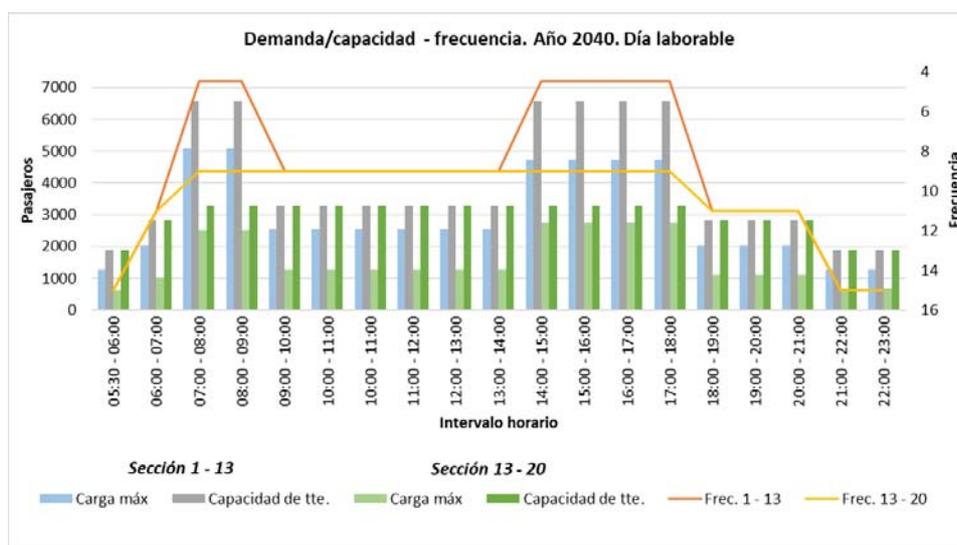
Año 2040

*Tabla 30: Horario operativo para 2040. Frecuencias, oferta de plazas, ocupación y flota necesaria*

		2040								Trenes requeridos para el servicio
		Sección 1 - 13				Sección 13 - 20				
Intervalo horario	Carga máx.	Intervalo	Servicios / hora	Ocupación (%)	Carga máx.	Intervalo	Servicios / hora	Ocupación (%)		
05:30:00	06:00:00	1277	00:15:00	4	68%	631	00:15:00	4	34%	9
06:00:00	07:00:00	2043	00:11:00	6	72%	1010	00:11:00	6	36%	12
07:00:00	08:00:00	5106	00:04:30	14	78%	2526	00:09:00	7	77%	25
08:00:00	09:00:00	5106	00:04:30	14	78%	2526	00:09:00	7	77%	25
09:00:00	10:00:00	2553	00:09:00	7	78%	1263	00:09:00	7	38%	14
10:00:00	11:00:00	2553	00:09:00	7	78%	1263	00:09:00	7	38%	14
11:00:00	12:00:00	2553	00:09:00	7	78%	1263	00:09:00	7	38%	14
12:00:00	13:00:00	2553	00:09:00	7	78%	1263	00:09:00	7	38%	14
13:00:00	14:00:00	2553	00:09:00	7	78%	1263	00:09:00	7	38%	14
14:00:00	15:00:00	2553	00:09:00	7	78%	1263	00:09:00	7	38%	14
15:00:00	16:00:00	4734	00:04:30	14	72%	2758	00:09:00	7	84%	25
16:00:00	17:00:00	4734	00:04:30	14	72%	2758	00:09:00	7	84%	25
17:00:00	18:00:00	4734	00:04:30	14	72%	2758	00:09:00	7	84%	25
18:00:00	19:00:00	4734	00:04:30	14	72%	2758	00:09:00	7	84%	25
19:00:00	20:00:00	2043	00:11:00	6	72%	1103	00:11:00	6	39%	12
20:00:00	21:00:00	2043	00:11:00	6	72%	1103	00:11:00	6	39%	12
21:00:00	22:00:00	2043	00:11:00	6	72%	1103	00:11:00	6	39%	12
22:00:00	23:00:00	1277	00:15:00	4	68%	689	00:15:00	4	37%	9
23:00:00	00:00:00	1277	00:15:00	4	68%	689	00:15:00	4	37%	9

El siguiente gráfico muestra la oferta de plazas por hora, la demanda esperada y las frecuencias en el año 2030. Muestra las distintas frecuencias de servicio ofrecidas en las distintas secciones de la línea durante las horas punta de la mañana y de la tarde, cuando se introducen los servicios de bucle corto entre las Estaciones 1 y 13.

*Figura 31: Demanda/capacidad – frecuencia. Horario 2040*



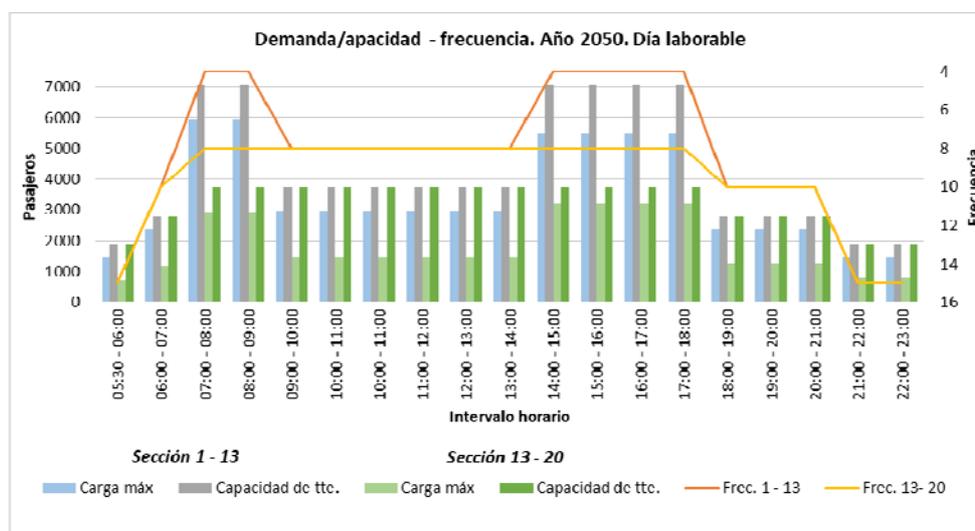
**Año 2050**

*Tabla 31: Horario operativo para 2050. Frecuencias, oferta de plazas, ocupación y flota necesaria*

Intervalo horario		2050								Trenes requeridos para el servicio
		Sección 1 - 13				Sección 13 - 20				
		Carga máx.	Intervalo	Servicios / hora	Ocupación (%)	Carga máx.	Intervalo	Servicios / hora	Ocupación (%)	
05:30:00	06:00:00	1482	00:15:00	4	79%	733	00:15:00	4	39%	9
06:00:00	07:00:00	2370	00:10:00	6	84%	1172	00:10:00	6	42%	13
07:00:00	08:00:00	5926	00:04:00	15	84%	2931	00:08:00	8	78%	28
08:00:00	09:00:00	5926	00:04:00	15	84%	2931	00:08:00	8	78%	28
09:00:00	10:00:00	2963	00:08:00	8	79%	1466	00:08:00	8	39%	16
10:00:00	11:00:00	2963	00:08:00	8	79%	1466	00:08:00	8	39%	16
11:00:00	12:00:00	2963	00:08:00	8	79%	1466	00:08:00	8	39%	16
12:00:00	13:00:00	2963	00:08:00	8	79%	1466	00:08:00	8	39%	16
13:00:00	14:00:00	2963	00:08:00	8	79%	1466	00:08:00	8	39%	16
14:00:00	15:00:00	2963	00:08:00	8	79%	1466	00:08:00	8	39%	16
15:00:00	16:00:00	5494	00:04:00	15	78%	3200	00:08:00	8	85%	28
16:00:00	17:00:00	5494	00:04:00	15	78%	3200	00:08:00	8	85%	28
17:00:00	18:00:00	5494	00:04:00	15	78%	3200	00:08:00	8	85%	28
18:00:00	19:00:00	5494	00:04:00	15	78%	3200	00:08:00	8	85%	28
19:00:00	20:00:00	2370	00:10:00	6	84%	1280	00:10:00	6	45%	13
20:00:00	21:00:00	2370	00:10:00	6	84%	1280	00:10:00	6	45%	13
21:00:00	22:00:00	2370	00:10:00	6	84%	1280	00:10:00	6	45%	13
22:00:00	23:00:00	1482	00:15:00	4	79%	800	00:15:00	4	43%	9
23:00:00	00:00:00	1482	00:15:00	4	79%	800	00:15:00	4	43%	9

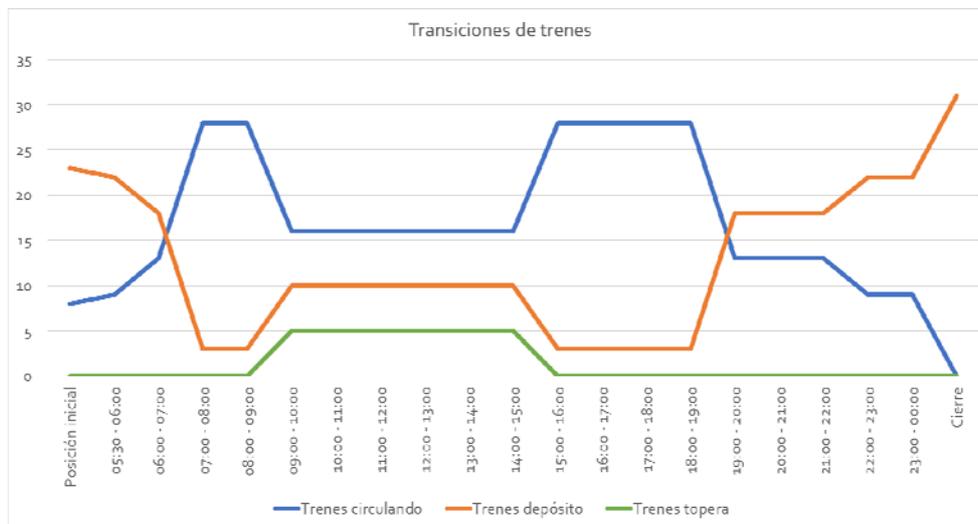
El siguiente gráfico muestra la oferta de plazas por hora, la demanda esperada y las frecuencias en el año 2030. Muestra las distintas frecuencias de servicio ofrecidas en las distintas secciones de la línea durante las horas punta de la mañana y de la tarde, cuando se introducen los servicios de bucle corto entre las Estaciones 1 y 13.

*Figura 32: Demanda/capacidad – frecuencia. Horario 2050*



Adicionalmente, el siguiente gráfico muestra las transiciones en el número de trenes durante un día laborable en el año 2050:

Figura 33: Gráfico de transición en el número de trenes. Día laborable 2050



### 8.10. Tiempo de vuelta

El tiempo de vuelta se define como el tiempo transcurrido desde el momento en que un tren se encuentra en un punto determinado de la línea hasta que el tren se vuelve a encontrar en la misma situación exacta. Normalmente se mide desde la salida del tren desde la estación terminal en un sentido hasta el momento en el que el tren se encuentra preparado para comenzar el siguiente viaje en el mismo sentido.

Es el resultado de sumar los siguientes factores:

- Tiempos de viaje en ambas direcciones (tiempo de simulación + márgenes + paradas).
- Tiempos de inversión de marcha en las terminales.

Considerando los resultados obtenidos en las tablas anteriores, así como los tiempos de inversión de marcha incluidos en el capítulo 7.3, los tiempos de vuelta de los diferentes bucles son los indicados en la siguiente tabla:

Tabla 32: Tiempos de vuelta

Trayecto	Tiempo de viaje	Inversión de marcha (mm:ss)			Tiempo de vuelta
		Estación 1	Estación 13	Estación 20	
Bucle largo ida	00:57:49	-	-	02:30	02:01:43
Bucle largo vuelta	00:57:23	04:00	-	-	
Bucle corto ida	00:42:32	-	02:30	-	01:31:40
Bucle corto vuelta	00:42:38	04:00	-	-	

### 8.11. Tiempo adicional para regulación

En la malla de operación, incluida en el Anexo III de este documento, se aprecia que con frecuencias de 4 minutos en hora punta existe un tiempo de regulación adicional en las terminales que permite obtener intervalos estables durante el servicio (ver tabla 14).

### 8.12. Velocidad comercial

La velocidad comercial es la velocidad percibida por el viajero en un trayecto siguiendo el horario comercial (incluyendo márgenes de operación y tiempos de parada). Se mide el tiempo

que tarda el tren en llegar desde el punto A al punto B y se divide entre la distancia entre ambos puntos.

Las velocidades comerciales obtenidas en la línea son las siguientes:

*Tabla 33: Velocidades comerciales*

Velocidad comercial	
Zona urbana	36.10 km/h
Zona interurbana	55.49 km/h
<b>Línea completa</b>	<b>43.44 km/h</b>

### 8.13. Dimensionamiento de la flota

La fórmula para el dimensionamiento de la flota se ha explicado en apartados anteriores.

Considerando una reserva operativa de 3 trenes adicionales como suma de las unidades de reserva necesarias para la operación diaria y las unidades paradas por trabajos de mantenimiento, el tamaño de la flota para diferentes intervalos analizados es la siguiente:

*Tabla 34: Flota necesaria según frecuencia*

Frecuencia	5:30	4:30	4:00
Máx. trenes circulando	20	25	28
Mantenimiento + reserva	3	3	3
<b>FLOTA TOTAL</b>	<b>23</b>	<b>28</b>	<b>31</b>

Los trenes de reserva y en mantenimiento se han redondeado como medida de disponibilidad de la flota (fiabilidad del servicio en caso de fallo simultáneo de dos unidades en la línea). Sin embargo, siempre es responsabilidad del operador definir esta reserva operativa garantizando siempre la disponibilidad del número mínimo de unidades necesarias para la operación diaria de la línea, asumiendo el riesgo, si así lo considera, de reducir esta reserva operativa.

### 8.14. Kilometraje de los trenes

Para calcular la producción ferroviaria de un año completo, se consideran las siguientes hipótesis:

- Días laborables (lunes a viernes): 247
- Domingos: 52
- Sábados: 52
- Festivos: 14

Las siguientes tablas muestran los resultados para los horizontes considerados y sus correspondientes frecuencias y horarios.

*Tabla 35: Producción ferroviaria 2030*

Producción bucle largo - 2030				Producción bucle corto - 2030			
	Días	Viajes / día	Total		Días	Viajes / día	Total
Día laborable	247	200	49,400	Día laborable	247	72	17,784
Sábados	52	144	7,488	Sábados	52	48	2,496
Domingos y festivos	66	144	9,504	Domingos y festivos	66	0	0
Viajes/año			66,392	Viajes/año			20,280
Recorrido (km)			40.261	Recorrido (km)			35.219
km con pax / año			2,775,879	km con pax / año			714,234
km en vacío /	4.54%	166,118					
km / año			3,656,231				
Flota	23						
km / tren-año	158,967						

*Tabla 36: Producción ferroviaria 2040*

Producción bucle largo - 2040				Producción bucle corto - 2040			
	Días	Viajes / día	Total		Días	Viajes / día	Total
Día laborable	247	232	57,304	Día laborable	247	84	20,748
Sábados	52	144	7,488	Sábados	52	48	2,496
Domingos y festivos	66	144	9,504	Domingos y festivo	66	0	0
Viajes/año			74,296	Viajes/año			23,244
Recorrido (km)			40.261	Recorrido (km)			35.219
km con pax / año			3,094,102	km con pax / año			818,622
km en vacío /	4.51%	184,794					
km / año			4,097,519				
Flota	28						
km / tren-año	146,340						

*Tabla 37: Producción ferroviaria 2050*

Producción bucle largo - 2050				Producción bucle corto - 2050			
	Días	Viajes / día	Total		Días	Viajes / día	Total
Día laborable	247	256	63,232	Día laborable	247	96	23,712
Sábados	52	144	7,488	Sábados	52	48	2,496
Domingos y festivos	66	144	9,504	Domingos y festivo	66	0	0
Viajes/año			80,224	Viajes/año			26,208
Recorrido (km)			40.261	Recorrido (km)			35.219
km con pax / año			3,332,770	km con pax / año			923,010
km en vacío /	4.55%	202,649					
km / año			4,458,429				
Flota			31				
km / tren-año			143,820				

Los kilómetros sin viajeros se refieren a las circulaciones realizadas antes del comienzo del servicio para el posicionamiento de los trenes, después de la finalización del servicio para volver a cocheras y las transiciones entre horas punta y valle cuando los trenes se dirigen a cocheras o a las posiciones de estacionamiento en toperas.

Las distancias recorridas por cada tren son altas debido a la longitud de la línea (40,5 km) y a los intervalos esperados (4 minutos). Cada vehículo recorrerá unos 159.000 km por año en los primeros años del proyecto, bajando hasta los 143.820 en el año 2050, debido al aumento de flota, de acuerdo con los números expuestos en las tablas anteriores.

El porcentaje de km en vacío está en torno al 4,5%.

La siguiente tabla resume los km recorridos por la flota en función de la frecuencia considerada en hora punta.

*Tabla 38: Producción ferroviaria en función de la frecuencia*

	Días al año	5:30		4:30		4:00	
		km con pax / día	km en vacío / día	km con pax / día	km en vacío / día	km con pax / día	km en vacío / día
Día laborable	247	10870	476	12581	551	13970	588
Sábados	52	7770	417	7770	417	7770	588
Domingos y festivos	66	6079	409	6079	409	6079	409
<b>TOTAL (km)</b>		<b>3,490,113</b>	<b>166,118</b>	<b>3,912,724</b>	<b>184,794</b>	<b>4,255,780</b>	<b>202,649</b>
<b>TOTAL (km/tren)</b>		<b>151,744</b>	<b>7,223</b>	<b>139,740</b>	<b>6,600</b>	<b>137,283</b>	<b>6,537</b>

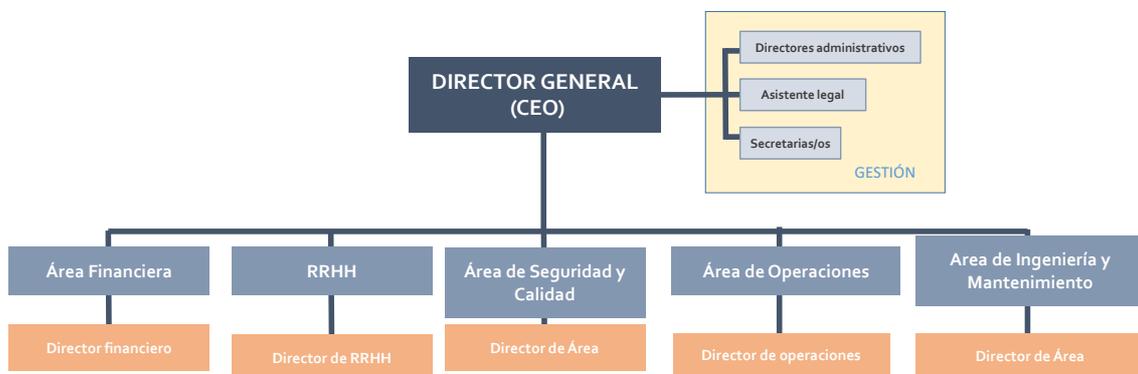
## 9. PERSONAL

El personal necesario para la operación y mantenimiento de un sistema de tren-tram como el estudiado en este Trabajo se suele dividir en tres categorías principales:

- Personal general.
- Personal de operación.
- Personal de mantenimiento.

La siguiente figura muestra el organigrama básico recomendado. El cuadro cubre los principales departamentos necesarios para la coordinación del sistema.

Figura 34: Áreas principales propuestas para la organización del sistema



Cada departamento contará con los trabajadores necesarios colgando de sus correspondientes directores. Las siguientes figuras muestran para cada una de las áreas de la figura anterior, las principales secciones y posiciones a cubrir en un sistema de estas características. Las cajas verdes representan áreas que pueden ser subcontratadas (limpieza, recaudación y seguridad física)

Figura 35: Puestos principales. Recursos humanos y área financiera

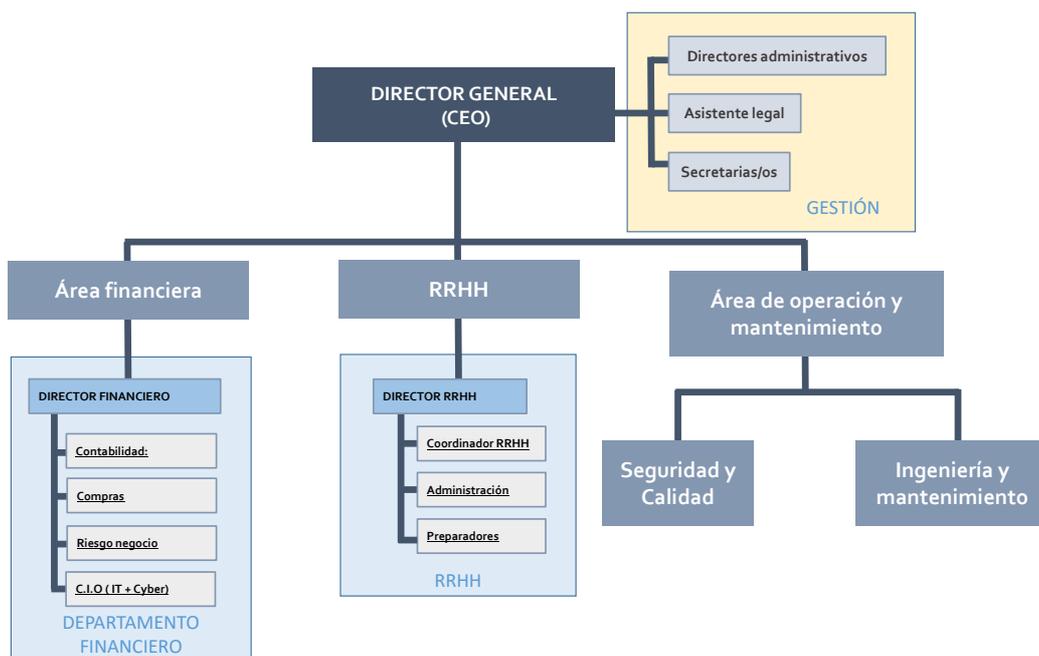
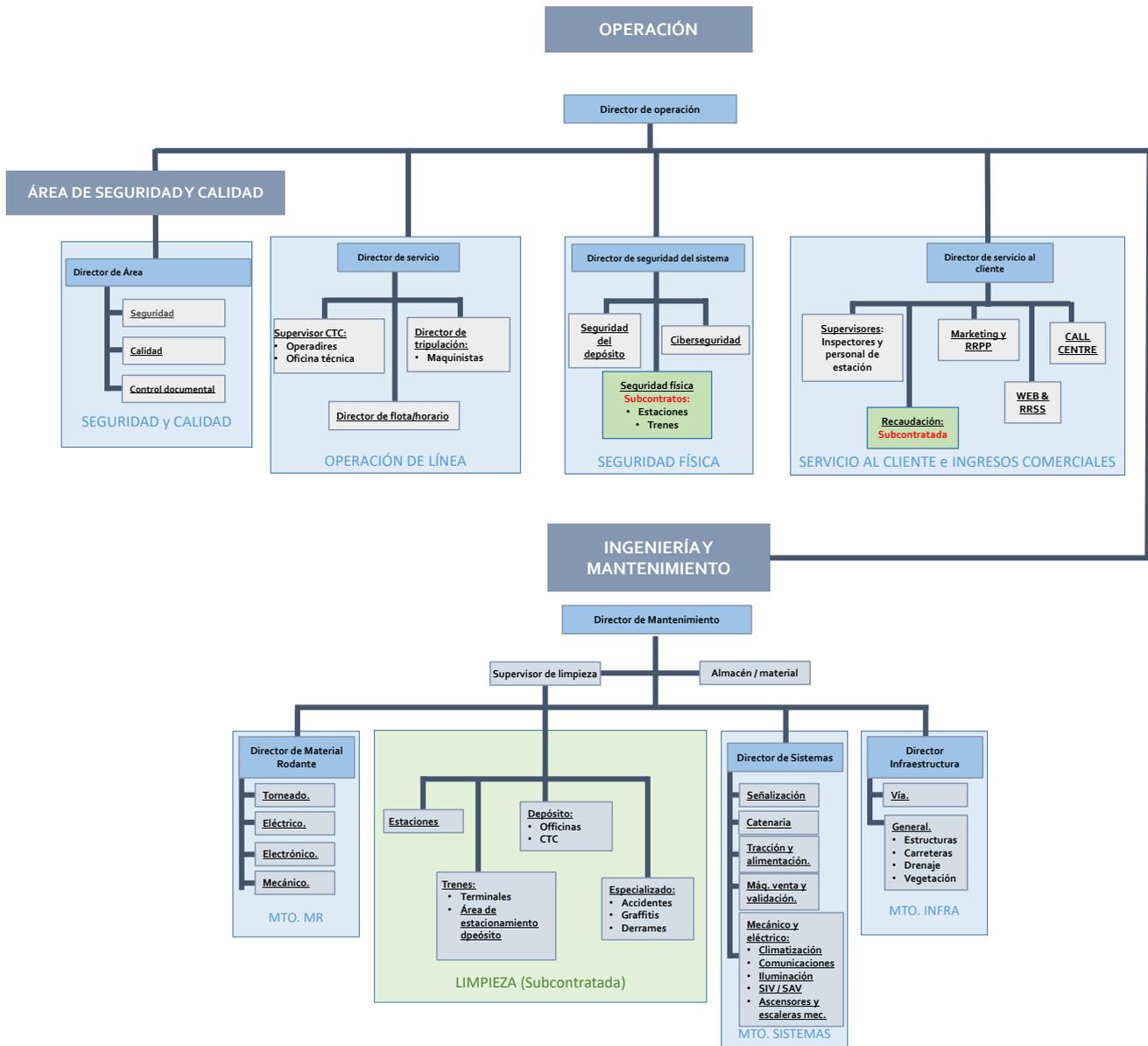


Figura 36: Puestos principales. Operación y mantenimiento



En las tablas siguientes se da una lista de los puestos de trabajo, para cada una de las áreas del organigrama, considerados necesarios para el correcto funcionamiento de un sistema de tren ligero como el tratado en este Trabajo. Para todos los puestos de trabajo se suponen turnos de 8,5 horas (Con 30 minutos de pausa para comer), 5 días a la semana, lo que suma un total de 1722 horas laborables al año.

**9.1. Personal general:**

*Tabla 39: Personal general*

<b>GENERAL</b>		
<b>Posición</b>	<b>Personas</b>	<b>Total</b>
<b>DIRECTOR GENERAL (CEO) - Gestión</b>		<b>5</b>
Director general (CEO)	1	
Administrativos	2	
Secretaria/o	1	
Asistente legal	1	
<b>AREA FINANCIERA</b>		<b>10</b>
Director financiero	1	
Jefe de administración	1	
Jefe de compras	1	
Director de gestión de riesgos	1	
Administrativos	2	
C.I.O (IT + ciberseg.)	1	
Operadores	3	
<b>RRHH</b>		<b>9</b>
Director RRHH	1	
Coordinador RRHH	1	
Coordinador de administración	1	
Personal de formación	3	
Administrativos / Secretarios	3	
<b>TOTAL GENERAL</b>		<b>24</b>

Un total de 24 personas se consideran necesarias para llevar a cabo las tareas asociadas a la gestión general de este sistema.

## 9.2. Operación:

Tabla 40: Personal de operación

OPERACIÓN		
Posición	Personas	Total
<b>General</b>		<b>1</b>
Director de Operación	1	
<b>Operación de la línea</b>		<b>103</b>
Jefe de turno de operación	1	
Supervisor CTC	3	
Operador (Línea + depósito + señalización + SIV)	8	
Operador (Alim. Eléctrica + SCADA)	5	
Ingeniero de transportes	1	
Jefe de tripulación	3	
<b>Maquinistas</b>	<b>81</b>	
Gestor de flota / calendario	1	
<b>Seguridad física</b>		<b>1</b>
Director de la red de seguridad física	1	
Operador de seguridad física	8	
Agentes de seguridad en depósito	4	
Agentes de seguridad en terminales	6	
Agentes de seguridad a bordo		
<b>Ingresos</b>		<b>27</b>
Director de ingresos	1	
Supervisor de ingresos	1	
Revisores y personal de estación	25	
<b>Atención al cliente</b>		<b>8</b>
Director	1	
Call Centre	4	
Web y RRSS	1	
RRRPP y marketing	2	
<b>SEGURIDAD Y CALIDAD</b>		<b>4</b>
Director de seguridad y riesgos	1	
Ingeniero de seguridad	1	
Técnico de calidad	1	
Control documental	1	
<b>TOTAL OPERACIÓN</b>		<b>144</b>

Se calcula que se necesitan 144 personas para el área de operación del sistema

Para el cálculo del número de maquinistas necesarios para cada año horizonte, se divide la cantidad total de horas de conducción de un año completo por el número de horas de trabajo anuales de un maquinista, calculado teniendo en cuenta la jornada diaria, los descansos necesarios durante la jornada, la parada para comer y el absentismo.

### Gestión de ingresos

El número de revisores (25) se ha calculado de manera que se mantenga un nivel de fraude aceptable establecido en un 8%. Este nivel se alcanza revisando al 10% de los pasajeros anuales, para lo que, con los niveles de demanda esperados (unos 30 millones de viajeros al año), deben realizarse 3 millones de revisiones al año.

Si se exigiese un nivel de fraude menor, deberían añadirse revisores para realizar esta tarea.

### Atención al cliente

La interacción entre operador y cliente la llevará a cabo el personal dependiente del director de atención al cliente: 2 personas en un call center, un responsable de contenido web y RRSS, y un responsable de relaciones públicas y marketing.

### 9.3. Mantenimiento:

Tabla 41: Personal de mantenimiento

MANTENIMIENTO		
Posición	Personas	Total
<b>MANTENIMIENTO GENERAL</b>		<b>5</b>
Director de ingeniería y mantenimiento	1	
Supervisor de limpieza	1	
Almacén/materiales	3	
<b>Mantenimiento MR</b>		<b>49</b>
Director MR	1	
Ingeniero eléctrico	1	
Ingeniero electrónico	1	
Ingeniero mecánico	1	
Técnicos	45	
<b>Mantenimiento sistemas</b>		<b>27</b>
Director de sistemas	1	
Señalización	4	
LAC	4	
Alimentación eléctrica	8	
Máquinas de billetes	4	
Escaleras y ascensores	6	
<b>Mantenimiento infraestructura</b>		<b>17</b>
Director mantenimiento infraestructura	1	
Vía	4	
Infraestructura	12	
<b>Limpieza (subcontrata)</b>		<b>0</b>
Estaciones	4	
Trenes	3	
Depósito (estacionamiento)	2	
Depósito (oficinas y CTC)	2	
Especial (por encargo: accidentes, grafiti...)	3	
<b>TOTAL MANTENIMIENTO</b>		<b>98</b>

Se necesitarían unas 49 personas para mantenimiento de material rodante y 44 más para mantenimiento de instalaciones fijas (infraestructura y sistemas).

Las tres tablas anteriores reúnen todas las categorías y miembros de personal que se estiman necesarias para el correcto funcionamiento del sistema.

## 10. MODOS DEGRADADOS DE OPERACIÓN

### 10.1. *Perturbaciones e intervenciones*

La operación en condiciones degradadas ocurrirá en caso de perturbaciones que afecten a la marcha normal de los trenes. El personal de operación deberá estar entrenado para manejar estas situaciones, pues requerirán tanto la resolución de fallos técnicos como el ajuste del servicio para recuperar el horario previsto.

En general, las consideraciones de seguridad deben determinar si la operación puede continuar en modo degradado o si es preciso el cierre parcial o total de la línea.

#### 10.1.1. *Recursos*

Los recursos para la gestión de incidentes típicos para un sistema de tren ligero son, entre otros:

Vehículos bi-viales de rescate y mantenimiento, personal entrenado, equipamiento y material adecuado para actuaciones de emergencia. Todos estos recursos tendrían su base en talleres y cocheras.

#### 10.1.2. *Rescate de un tren fallido*

Esta operación debe tener como objetivo liberar la línea de cualquier perturbación lo más rápidamente posible. Los trenes que no puedan continuar la marcha por sí mismos serán remolcados o empujados hasta las cocheras o hasta las posiciones de estacionamiento disponibles en las terminales más alejadas de ellas, esperando a ser llevados al taller en las horas valle o al final del día tras el cierre comercial de la línea.

Los trenes serán empujados o remolcados bien por:

- Otro tren: si los trenes son composiciones dobles, el procedimiento habitual es que la unidad sana remolque o empuje toda la composición.
- Un vehículo de tracción auxiliar: si la composición es una composición simple, la maniobra de rescate será realizada por un vehículo bi-vial capaz de remolcar el peso del tren lleno de viajeros.

En ambos casos, los pasajeros serán evacuados antes de las maniobras de remolcado. Si esto no es posible, el tren será remolcado hasta estación más cercana, donde se vaciará de pasajeros en condiciones de seguridad, antes de continuar la maniobra de rescate del vehículo.

Actualmente existen en el mercado vehículos capaces de remolcar hasta 1000 toneladas de peso. La siguiente tabla muestra algunos ejemplos:

Tabla 42: Ejemplos de vehículos de rescate bi-viales. Capacidad de arrastre en recta y pendiente 0.

Marca	Modelo	Capacidad de arrastre (t)
Uromac	T-Rail SV	1600
Iveco	Eurocargo duo 4x4	1000
Mercedes	Unimog	1000
Colmar	Diesel	4000
	Eléctrico	1000
Rotrac	RR	4000
Niteq	Varios	1000

El vehículo de rescate estará equipado para ser compatible con los sistemas de detección de tren instalados para que el CTC conozca su posición. La longitud total de la composición (vehículo de rescate + tren) deberá ser detectada, de forma que se eviten colisiones o alcances con otros trenes circulando por la línea.

### 10.1.3. Cierre parcial de una vía

Este es el caso en el que el fallo afecta solo a una vía y el servicio puede mantenerse con frecuencias reducidas en operación en vía única gracias a los escapes de emergencia. El caso más común resultante en la operación en vía única es el de un tren que se queda parado en la vía. Otros escenarios pueden contemplar el fallo de cualquier instalación que afecte a una única vía (rotura de carril, fallo en la detección del tren mediante los circuitos de vía, fallo de señal, etc.).

Para dotar de flexibilidad a la operación de la línea, el diseño contempla la instalación de escapes y bretelles, junto con su señalización asociada, a lo largo de la línea, tal y como se ha visto en el esquema funcional de la misma.

Estos aparatos de vía posibilitarán la operación bidireccional, si bien la capacidad de la línea entre dos escapes consecutivos en caso de cierre de una de las vías se verá reducida a unos 3 o 4 trenes por hora y sentido. Además, estos trenes deberán circular a velocidad reducida por la sección afectada para garantizar la seguridad de los equipos de mantenimiento que estén trabajando en la reparación del fallo.

Debido a esta reducción de servicios, podría reforzarse el transporte mediante un servicio complementario de autobuses que cubra la sección afectada.

### 10.1.4. Cierre parcial en las dos vías

En caso de incidencia que afecte a las dos vías, la línea se partirá en dos y se operará en dos carruseles independientes, aislando la sección afectada hasta que se resuelva la incidencia.

El servicio no puede darse de extremo a extremo de la línea, pero dependiendo de la ubicación de la sección aislada, podrá mantenerse bien a un lado o a ambos lados de dicha sección. Entre las situaciones que pueden desencadenar este escenario están

- Choque entre trenes o choque entre tren y coche con heridos o fallecidos.
- Atropello de un pasajero.
- Descarrilamiento.

#### **10.1.5. Servicios sustitutos de autobuses**

En caso de modo degradado que implique el cierre de una sección de la línea durante un periodo de tiempo largo, el servicio entre las estaciones más cercanas a la sección afectada deberá realizarse mediante autobuses.

#### **10.1.6. Cierre total de la línea**

Existe una serie de situaciones que inevitablemente llevarán al cierre total de la línea hasta que sean resueltos y sus efectos mitigados. Por ejemplo:

- Ataque o amenaza terrorista
- Desastres naturales (terremoto. Inundaciones, huracanes, etc.)

En cualquiera de estos casos y otros de similares consecuencias, la persona al mando deberá declarar la situación de emergencia, se evacuará a todos los pasajeros en la siguiente estación disponible y se cerrará la línea hasta que las autoridades den permiso para reabrir y reanudar el servicio en condiciones de seguridad.

### **10.2. Evacuación de pasajeros**

#### **10.2.1. Estaciones**

La evacuación de los pasajeros será dirigida por el maquinista, bajo supervisión del CTC. Las estaciones se diseñarán para permitir la evacuación desde el punto más alejado del andén hasta el punto de encuentro o salida en menos de 6 minutos.

#### **10.2.2. En ruta**

La línea deberá incluir un camino de evacuación paralelo a las vías en zona interurbana, que permita la evacuación segura en caso de emergencia.

Deberán existir zonas seguras al lado de las vías a lo largo de la línea, fuera del gálibo dinámico de los vehículos.

## **11. RECINTO DE TALLERES Y COCHERAS (DEPÓSITO)**

### **11.1. Concepto**

El depósito de la línea se encuentra a 3,4 km de distancia de la Estación 1. Servirá para estacionamiento, limpieza y mantenimiento de la flota y la maquinaria de mantenimiento.

El depósito tendrá una conexión directa con la línea mediante un doble ramal que permitirá a los trenes entrar y salir del depósito en cualquiera de las direcciones. Aun así, las entradas y salidas se harán preferentemente en dirección a la Estación 1.

### **11.2. Funciones e instalaciones**

La distribución del depósito debería incluir, al menos, las siguientes instalaciones

#### **11.2.1. Área de estacionamiento**

Se diseñarán 10 vías de estacionamiento para acomodar 36 unidades de hasta 70 metros de longitud. Todas las vías estarán electrificadas. El área estará techada pero no cerrada en los laterales.

Contará también con instalaciones para el personal, almacenamiento de productos de limpieza y cuartos técnicos con acceso directo a las vías.

### **11.2.2. Taller – Área de mantenimiento de material rodante**

El taller debería tener un mínimo de 2 vías para mantenimiento preventivo de nivel 1 y una vía para mantenimiento correctivo. Estas tres vías deberán contar con foso y línea aérea de contacto. Además, serán necesarias otras dos vías para mantenimiento de nivel 2 con maquinaria elevadora y sin línea aérea de contacto.

También deberá contar con instalaciones para el personal, almacenamiento, talleres especializados y cuartos técnicos.

### **11.2.3. Área de mantenimiento de infraestructura e instalaciones fijas**

Esta área estará destinada a los vehículos y materiales de mantenimiento de la línea. Consistirá en una vía sin electrificar y un edificio con cuartos técnicos, instalaciones para el personal y almacenamiento. Habrá un área de almacenamiento de grandes componentes en el exterior, cerca del edificio.

### **11.2.4. Edificio del CTC**

Las instalaciones del CTC se integrarán dentro del edificio del taller.

### **11.2.5. Alimentación eléctrica - subestación**

Una subestación eléctrica alimentará el anillo de distribución para todas las instalaciones del depósito. La subestación también alimentará la sección de la línea más cercana al depósito.

### **11.2.6. Equipamiento e instalaciones externas para mantenimiento**

Estas comprenderán los siguientes elementos:

- Planta de lavado: para el lavado diario del exterior de los vehículos
- Área de suministros
- Torno
- Nave de pintura:
- Aparatos de medida de parámetros del perfil de rueda y de inspección de pantógrafo.

### **11.2.7. Vía de pruebas**

Se utilizará para pruebas internas del nuevo material rodante, así como para ensayos y pruebas tras grandes reparaciones.

### **11.2.8. Otras instalaciones exteriores**

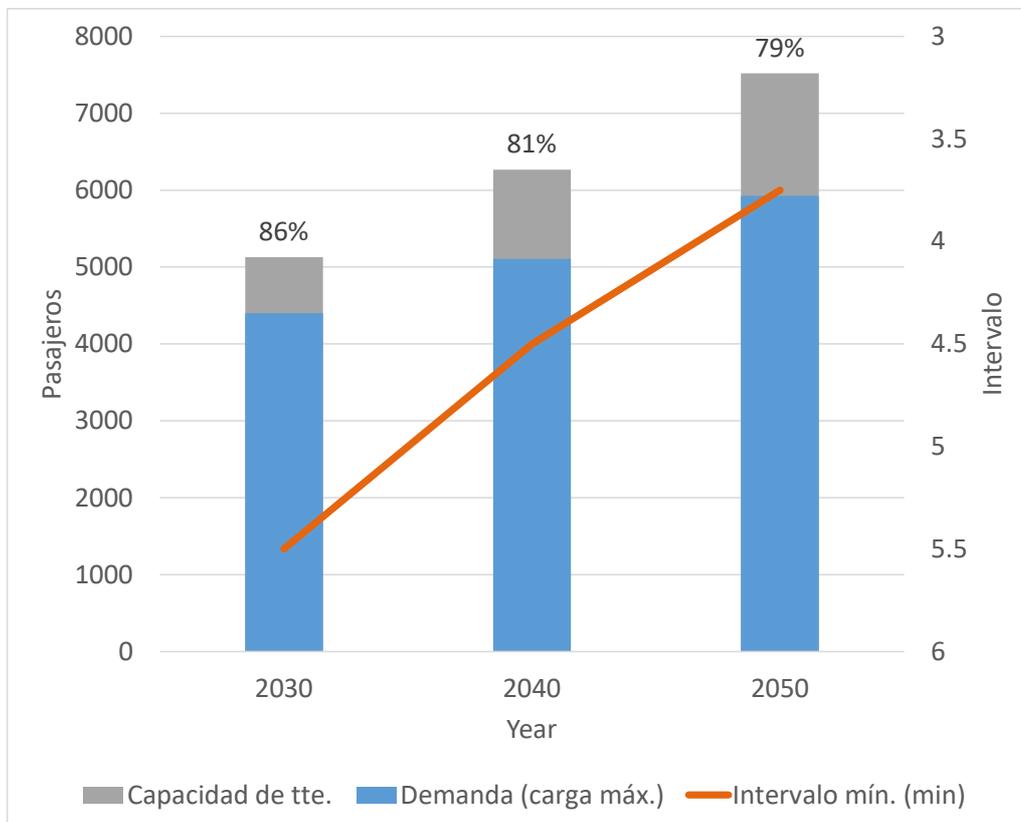
- Zona de recolección de residuos para almacenar todo tipo de residuos.
- Área de entrega: una vía específica de trasvase que permite la carga y descarga de unidades o módulos de material rodante mediante camiones especiales.
- Planta de tratamiento de aguas.
- Depósitos de agua para bomberos y abastecimiento.

## 12. CONCLUSIONES Y APORTACIONES

Una vez se han analizado todas las características de la línea, material rodante, esquema funcional y demanda, se ha desarrollado el plan de operación alcanzando las siguientes conclusiones:

- Los intervalos pequeños (menos de 6 minutos) son solo necesarios durante las horas punta y únicamente en la sección más cargada, entre las Estaciones 1 y 13. Por eso se elige un modo de operación en bucle único reforzado por servicios en el bucle corto durante estas horas punta.
- La velocidad comercial del sistema, la percibida por el viajero, está por encima de 43 km/h, alta para este tipo de sistemas. Los cruces a nivel e intersecciones urbanas obligan a reducir la velocidad para evitar consecuencias fatales en caso de choque con un coche o arrollamiento de un peatón.
- Estas reducciones de velocidad aumentan el tiempo de viaje y por tanto la flota necesaria para operar la línea. La eliminación de los cruces a nivel y la consecución de prioridad total en las intersecciones resultaría en tiempos de viaje más cortos, velocidades comerciales más altas y una flota de trenes más pequeña, con la consecuente disminución de costes de inversión, así como de operación y mantenimiento.
- Con las condiciones analizadas, la flota necesaria para operar la línea de estudio es de 23 trenes para el año de apertura, 2030, subiendo a 28 en 2040 y hasta los 31 trenes en 2050. Estas flotas son las necesarias para transportar la demanda esperada con niveles de ocupación del entorno del 80-85%, como puede apreciarse en el siguiente gráfico:

Figura 37: Demanda, intervalos, niveles de ocupación

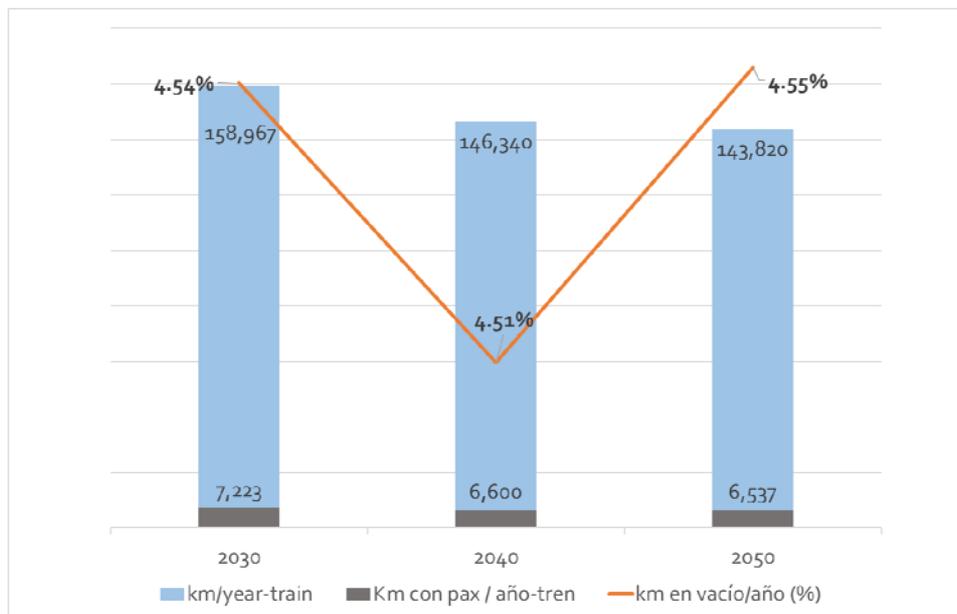


- La flota recorrerá una gran cantidad de km, alcanzando más de 3 millones de km anuales. Esto se debe a la longitud de la línea (40,5 km) y a los bajos intervalos de servicio requeridos. Estas cifras tan elevadas requerirán mayores trabajos de mantenimiento que en los sistemas habituales de tren ligero.

Cada tren de la flota recorrerá entre 158.967 km (2030) y 143.820 km (2050). Alrededor del 4,5% de los km recorridos serán en vacío, alrededor de 7.200 en 2030, 6.600 en 2040 y 6.537 en 2050, debido a entradas y salidas de cocheras y maniobras de inversión de marcha.

Estas cifras se resumen en la siguiente gráfica:

*Figura 38: km recorridos por la flota y porcentaje de km en vacío*



Este Trabajo de Fin de Máster aporta una visión conjunta de la elaboración de un plan de explotación de una línea ferroviaria, con la particularidad de la presencia de tramos urbanos e interurbanos en la traza, característica que diferencia el sistema analizado de las líneas de tren ligero habituales.

Los resultados obtenidos en este plan de operación constituirían los inputs necesarios para otras disciplinas dentro de un proyecto completo de una línea ferroviaria para llevar a cabo los diseños y dimensionamientos de todos los subsistemas asociados (electrificación, señalización, comunicaciones, arquitectura, etc.)

El presente Trabajo también aporta la realización de un estudio de mercado del estado del arte actual en el mundo del Material Rodante tranviario en el mundo, así como la influencia de las características de dicho material rodante en la explotación.

El plan de explotación aporta un cálculo inicial de necesidades de material rodante y de personal necesario para la operación, así como de kilómetros recorridos por la flota y el total de plazas ofertadas por el sistema, sirviendo todo esto como base para el cálculo de los costes de explotación de la infraestructura durante la vida útil de la misma, uno de los datos de partida para la definición de planes de inversiones, análisis de rentabilidad, dimensionamiento de áreas de mantenimiento de material rodante e instalaciones fijas, diseño de las áreas administrativas del depósito, áreas operativas de la línea (CTC), etc.

### 13. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Transit Cooperative Research Program, “Track Design Handbook for Light Rail Transit, 2<sup>nd</sup> Ed.”, Transportation Research Board, Washington DC, 2012.
- [2] V. R. Vuchic, “Urban Transit. Operations, Planning and Economics”, John Wiley & Sons, 2005.
- [3] V. R. Vuchic, “Urban Transit. Systems and Technology”, John Wiley & Sons, 2007.
- [3] I. A. Hansen and J. Pachel, “Railway Timetabling & Operations”, Eurailpress, 2008.
- [4] UIC ficha 451-1 “Timetable recovery margins to guarantee timekeeping – Recovery margins”, 2000.
- [5] M. Melis Maynar y F. J. González Fernández, “Ferrocarriles Metropolitanos. Tranvías, metros ligeros y metros convencionales”, Colegio de ICCP, 2002.
- [6] [www.stadlerrail.com](http://www.stadlerrail.com)
- [7] [www.alstom.com](http://www.alstom.com)

## ANEXO I. ESTUDIO DE DEMANDA

Los siguientes datos de demanda se han utilizado como dato de partida para los cálculos realizados en este documento. Describen los pasajeros subidos y bajados por estación para los horizontes estudiados (2030, 2040 y 2050) en ambas direcciones para las horas punta de mañana y tarde.

### Año 2030

Tabla I. 1 Pasajeros subidos y bajados por estación. Ida. Año 2030

HP de mañana - 2030				HP de tarde - 2030			
Estación	Subidos	Bajados	Continúan	Estación	Subidos	Bajados	Continúan
1	1,629	0	0	1	3,236	0	0
2	163	0	1,792	2	534	5	3,765
3	66	9	1,849	3	194	51	3,908
4	215	100	1,964	4	355	183	4,079
5	170	78	2,057	5	171	365	3,885
6	154	316	1,896	6	375	584	3,677
7	155	117	1,935	7	234	328	3,583
8	130	112	1,953	8	170	522	3,231
9	156	81	2,028	9	210	430	3,010
10	353	161	2,220	10	470	496	2,984
11	350	73	2,497	11	313	162	3,136
12	339	411	2,425	12	391	575	2,952
13	132	344	2,213	13	153	692	2,413
14	54	91	2,176	14	55	92	2,376
15	36	381	1,831	15	43	298	2,121
16	27	57	1,801	16	25	109	2,037
17	14	249	1,566	17	20	228	1,829
18	27	542	1,050	18	19	572	1,276
19	9	215	844	19	6	302	980
20	0	844	0	20	0	980	0
<b>Total</b>	<b>4,181</b>	<b>4,181</b>		<b>Total</b>	<b>6,973</b>	<b>6,973</b>	

Tabla I. 2 Pasajeros subidos y bajados por estación. Vuelta. Año 2030

HP de mañana - 2030				HP de tarde - 2030			
Estación	Subidos	Bajados	Continua n	Estación	Subidos	Bajados	Continuan
20	682	0	0	20	898	0	0
19	138	5	815	19	231	4	1,126
18	294	27	1,082	18	469	10	1,584
17	129	27	1,184	17	193	30	1,747
16	62	27	1,219	16	52	19	1,780
15	107	33	1,293	15	215	34	1,961
14	57	36	1,315	14	69	82	1,948
13	492	155	1,652	13	381	192	2,137
12	720	125	2,247	12	617	117	2,637
11	199	123	2,323	11	184	223	2,598
10	355	81	2,597	10	282	191	2,689
9	535	45	3,088	9	173	108	2,754
8	438	62	3,463	8	207	92	2,870
7	28	168	3,323	7	112	161	2,821
6	806	249	3,880	6	663	238	3,246
5	378	203	4,054	5	96	202	3,139
4	498	153	4,400	4	182	791	2,529
3	9	163	4,245	3	27	118	2,439
2	0	787	3,458	2	2	427	2,013
1	0	3,458	0	1	0	2,013	0
<b>Total</b>	<b>5,927</b>	<b>5,927</b>		<b>Total</b>	<b>5,052</b>	<b>5,052</b>	

Tabla I. 3 Pasajeros subidos y bajados por estación. Ida. Año 2040

HP de mañana - 2040				HP de tarde - 2040			
Estación	Subidos	Bajados	Continúan	Estación	Subidos	Bajados	Continúan
1	1,891	0	0	1	3,756	0	0
2	189	0	2,080	2	619	6	4,369
3	76	10	2,146	3	225	59	4,535
4	249	115	2,280	4	412	213	4,734
5	198	90	2,387	5	198	423	4,509
6	179	366	2,200	6	435	677	4,267
7	180	135	2,245	7	272	380	4,158
8	151	130	2,266	8	197	606	3,749
9	181	94	2,354	9	244	500	3,494
10	410	187	2,577	10	545	575	3,464
11	406	85	2,898	11	363	188	3,639
12	393	478	2,814	12	454	667	3,426
13	153	399	2,568	13	178	803	2,801
14	63	106	2,526	14	64	107	2,758
15	42	442	2,125	15	50	346	2,461
16	31	67	2,090	16	29	126	2,364
17	16	289	1,817	17	23	265	2,122
18	31	629	1,219	18	22	664	1,481
19	10	250	980	19	7	350	1,137
20	0	980	0	20	0	1,137	0
<b>Total</b>	<b>4,852</b>	<b>4,852</b>		<b>Total</b>	<b>8,093</b>	<b>8,093</b>	

Tabla I. 4 Pasajeros subidos y bajados por estación. Vuelta. Año 2040

HP de mañana - 2040				HP de tarde - 2040			
Estación	Subidos	Bajados	Continuan	Estación	Subidos	Bajados	Continuan
20	792	0	0	20	1,043	0	0
19	160	5	946	19	269	5	1,306
18	341	31	1,256	18	544	12	1,838
17	150	31	1,374	17	224	35	2,027
16	72	31	1,415	16	60	22	2,066
15	125	39	1,501	15	249	39	2,276
14	66	42	1,526	14	80	95	2,261
13	571	179	1,917	13	442	222	2,480
12	835	145	2,608	12	716	136	3,060
11	231	143	2,696	11	214	259	3,015
10	412	94	3,014	10	327	221	3,121
9	621	52	3,584	9	201	125	3,197
8	508	72	4,019	8	241	107	3,330
7	32	195	3,856	7	130	186	3,274
6	935	288	4,503	6	769	277	3,767
5	438	236	4,705	5	111	235	3,643
4	578	177	5,106	4	211	918	2,936
3	10	190	4,926	3	32	137	2,830
2	0	914	4,013	2	2	496	2,336
1	0	4,013	0	1	0	2,336	0
<b>Total</b>	<b>6,878</b>	<b>6,878</b>		<b>Total</b>	<b>5,863</b>	<b>5,863</b>	

Tabla I. 5 Pasajeros subidos y bajados por estación. Ida. Año 2050

HP de mañana – 2050				HP de tarde - 2050			
Estación	Subidos	Bajados	Continúan	Estación	Subidos	Bajados	Continúan
1	2,194	0	0	1	4,359	0	0
2	220	0	2,414	2	719	7	5,071
3	88	12	2,490	3	261	69	5,263
4	289	134	2,646	4	478	247	5,494
5	229	105	2,771	5	230	491	5,233
6	208	425	2,553	6	505	786	4,952
7	209	157	2,606	7	316	441	4,826
8	176	151	2,630	8	229	704	4,351
9	210	109	2,731	9	283	580	4,054
10	476	217	2,990	10	633	667	4,020
11	472	99	3,363	11	421	218	4,223
12	456	554	3,266	12	527	774	3,976
13	178	463	2,981	13	206	932	3,250
14	73	123	2,931	14	74	124	3,200
15	49	513	2,466	15	57	401	2,856
16	36	77	2,425	16	34	147	2,744
17	18	335	2,109	17	27	308	2,463
18	37	730	1,415	18	26	770	1,719
19	12	290	1,137	19	8	407	1,320
20	0	1,137	0	20	0	1,320	0
<b>Total</b>	<b>5,631</b>	<b>5,631</b>		<b>Total</b>	<b>9,392</b>	<b>9,392</b>	

Tabla I. 6 Pasajeros subidos y bajados por estación. Vuelta. Año 2050

HP de mañana - 2050				HP de tarde - 2050			
Estación	Subidos	Bajados	Continua n	Estación	Subidos	Bajados	Continuan
20	919	0	0	20	1,210	0	0
19	185	6	1,098	19	312	6	1,516
18	396	36	1,457	18	631	14	2,133
17	174	36	1,595	17	260	40	2,353
16	84	36	1,642	16	70	25	2,398
15	145	45	1,742	15	289	45	2,641
14	77	49	1,771	14	93	110	2,624
13	663	208	2,225	13	513	258	2,878
12	969	168	3,027	12	831	158	3,551
11	268	166	3,129	11	248	300	3,499
10	478	109	3,498	10	380	257	3,622
9	721	60	4,159	9	233	146	3,710
8	589	84	4,665	8	279	124	3,865
7	37	227	4,475	7	151	216	3,800
6	1,085	335	5,226	6	893	321	4,371
5	508	273	5,461	5	129	273	4,227
4	671	206	5,926	4	245	1,065	3,407
3	12	220	5,717	3	37	159	3,284
2	0	1,060	4,657	2	2	575	2,712
1	0	4,657	0	1	0	2,712	0
<b>Total</b>	<b>7,982</b>	<b>7,982</b>		<b>Total</b>	<b>6,805</b>	<b>6,805</b>	

## ANEXO II. CUADRO DE VELOCIDADES MÁXIMAS

Tabla II. 1 Cuadro de velocidades máximas. Ida

Inicio	Fin	V (km/h)
10+000	10+097	15
10+097	10+597	70
10+597	14+063	80
14+063	14+987	70
20+000	21+742	70
21+742	22+137	50
22+137	22+235	30
22+235	24+779	50
24+779	25+379	40
25+379	25+831	70
30+000	30+931	70
30+931	39+569	80
40+000	42+354	80
42+354	43+072	70
43+072	49+724	80
50+000	52+826	80
52+826	53+271	65
53+271	55+165	50
55+165	55+499	15
55+499	55+606	45
55+606	56+119	50
56+119	56+249	25
56+249	57+725	30
57+725	57+773	25
57+773	57+854	35
57+854	58+119	40
58+119	58+124	15
58+124	58+336	20
58+336	58+768	30
58+768	58+835	15
58+835	59+601	30
59+601	59+671	25
59+671	60+411	30

Tabla II. 2 Cuadro de velocidades máximas. Vuelta

Inicio	Fin	V (km/h)
10+000	10+097	15
10+097	10+595	70
10+595	14+064	80
14+064	14+986	70
20+000	21+937	70
21+937	22+136	50
22+136	22+234	30
22+234	24+781	50
24+781	24+918	40
24+918	25+508	30
25+508	25+838	70
30+000	30+867	70
30+867	39+567	80
40+000	42+359	80
42+359	43+072	70
43+072	49+719	80
50+000	52+830	80
52+830	53+204	65
53+204	53+842	50
53+842	54+720	60
54+720	55+172	30
55+172	55+294	15
55+294	55+620	35
55+620	56+135	50
56+135	56+184	25
56+184	56+314	15
56+314	56+819	50
56+819	57+169	35
57+169	57+669	30
57+669	57+794	25
57+794	58+169	30
58+169	58+356	20
58+356	58+709	30
58+709	58+847	15
58+847	59+209	40
59+209	59+530	30
59+530	59+764	25
59+764	60+416	30

## ANEXO III. MALLA DE OPERACIÓN

Se muestran a continuación los gráficos correspondientes a la malla de operación durante 24 horas de un día laborable

