



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)**  
**MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS FERROVIARIOS**

**PROYECTO FIN DE MÁSTER**

**OPERACIÓN DE FERROCARRILES**  
**METROPOLITANOS AUTOMÁTICOS GoA4**

Madrid, Julio de 2016

**Autor: Carlos García Matey**

**Co-director: Aurelio Rojo Garrido**

**Director: Fernando Rodríguez Méndez**



## AGRADECIMIENTOS

A mis directores de proyecto, D. Fernando Rodríguez Méndez y D. Aurelio Rojo Garrido, por su inestimable guía y apoyo.

A todos mis compañeros y profesores de la Universidad Pontificia de Comillas, por todo lo que he aprendido junto a ellos.

A mi mejor profesor de educación secundaria, D. José Téllez, por asentar las bases de mi educación.

A mis compañeros de Metro de Madrid, por todo lo que me han transmitido y enseñado.

A mi familia y en especial a mis padres, Gloria y José Manuel, por su comprensión, cariño, ánimo y apoyo incondicional.

A mi pareja, Clara, por su inestimable ayuda, apoyo, comprensión y cariño a lo largo de todos estos años y durante la realización de este proyecto.



## FICHA TÉCNICA

Título: “OPERACIÓN DE FERROCARRILES METROPOLITANOS AUTOMÁTICOS GOA4”

Autor: García Matey, Carlos.

Director: Rodríguez Méndez, Fernando.

Co-director: Rojo Garrido, Aurelio

Programa cursado y curso académico: Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios 2015/16.

### Resumen:

El proyecto está dividido en dos partes. En la primera parte se realiza una **descripción general** de las líneas metropolitanas automáticas (grados de operación automática, líneas existentes en la actualidad y previstas en el futuro, beneficios y retos de la automatización, etc.) que permite adquirir una visión global de estos sistemas.

En la segunda parte del proyecto, se diseña y **planifica la operación** de una línea automática a partir de la demanda prevista, las características del material móvil, de los sistemas de control y de la infraestructura. Se procura en todo momento maximizar la eficiencia (reducción de coches\*km, incrementar el aprovechamiento, reducción del material móvil necesario, ahorro energético, etc.).

Además, se describe el perfil del personal necesario para operar la línea y se dimensionan los elementos de venta y peaje siempre teniendo en cuenta que la línea ha de funcionar como un sistema.

A lo largo del estudio realizado surgen diversas dificultades que impiden satisfacer las necesidades de la demanda prevista. Se buscan **soluciones** y se proponen una serie de medidas que permiten alcanzar los niveles de servicio requeridos, aumentando la capacidad de maniobra de las estaciones de cabecera hasta los 42 trenes/h (se necesitan 40 trenes/h y solo se tenía capacidad para 37 trenes/hora), reduciendo el tiempo de parada en las estaciones en las que se prevé un elevado número de pasajeros subidos y bajados (más de 30.000 pasajeros/h en el sentido más cargado) y aumentar la eficiencia de la operación estableciendo bucles que permiten un mejor aprovechamiento del material rodante.

## MEMORIA DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER:

### Descripción:

En los últimos años se ha incrementado de manera exponencial el número de líneas que operan de forma automática en los ferrocarriles metropolitanos. Debido a la relevancia que este tipo de líneas está adquiriendo y su tendencia prevista, se ha decidido que el tema del presente Trabajo de Fin de Máster este dedicado a estudiar las características que definen a las líneas automáticas de ferrocarriles metropolitanos y su operación.

### Objetivos:

Adquirir una **visión global** de los ferrocarriles metropolitanos automáticos y de su operación, analizando los orígenes, elementos clave, requerimientos, ventajas y retos de este tipo de explotaciones.

Una vez se entiendan los conceptos fundamentales que definen a este tipo de ferrocarriles, se realizará un caso práctico en el que se ejemplificará **como diseñar y planificar la operación** de una línea automática.

Se pretende aportar la información más relevante existente en la actualidad, razonamientos y ejemplos prácticos suficientes que permiten ayudar a determinar cuándo es **más eficiente** disponer de una línea automática que de una línea convencional.

### Aportaciones previstas del Trabajo:

A través del proyecto de fin de máster se pretende adquirir una visión general de los ferrocarriles metropolitanos automáticos que permita ayudar a determinar en qué casos puede ser más beneficioso disponer de una línea automática que de una línea convencional.

La estructura del estudio a realizar y las medidas que se adopten pueden ser empleadas como modelo de referencia para diseñar y planificar de forma eficiente otras líneas metropolitanas. Debido a las similitudes existentes entre las líneas automáticas y las líneas convencionales se considera útil para ambos tipos de líneas.

## Planificación de tareas:

Descripción general de la automatización en ferrocarriles metropolitanos:

- La automatización en los ferrocarriles metropolitanos. Orígenes y tendencias.
- Elementos clave para la automatización de ferrocarriles metropolitanos.
- Beneficios y retos de la automatización de ferrocarriles metropolitanos.
- Breve descripción de las líneas automáticas existentes en la actualidad.

Planificación de la operación de una línea automática:

- Descripción general de la línea automática a operar: esquema de la línea, principales características, infraestructura, material móvil.
- Análisis de la demanda prevista: previsión del número de utilizaciones diarias, entradas y salidas por cada estación, intensidad de viajeros por hora en cada tramo, tipificación de hora punta y hora valle, medios de evaluación de la utilización real para ajuste de la oferta de servicio.
- Oferta de servicio: tiempo de recorrido, número de trenes necesarios, niveles de servicio a ofertar, velocidad de explotación, producción ferroviaria, consumo energético, capacidad de transporte, establecimiento de bucles,
- Personal de operación necesario: funciones básicas del personal de línea y del PCC.
- Títulos de transporte: dimensionamiento del sistema de venta y peaje

CRONOGRAMA DEL TRABAJO DE FIN DE MÁSTER: OPERACIÓN DE FERROCARRILES METROPOLITANOS AUTOMÁTICOS GoA4

Actividades/Semana	Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio				Julio	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Que es la automatización de ferrocarriles metropolitanos	■	■																				
Elementos clave para la automatización de ferrocarriles metropolitanos.		■	■																			
Beneficios y retos de la automatización de ferrocarriles metropolitanos.			■	■																		
Breve descripción de las líneas automáticas existentes en la actualidad.				■	■	■																
Descripción general de la línea automática a operar					■	■	■	■	■	■	■	■										
Análisis de la demanda prevista									■	■	■	■	■	■	■	■						
Oferta de Servicio													■	■	■	■	■	■	■	■		
Personal de Operación																						
Títulos de Transporte																						



## **Desarrollo:**

1	LA AUTOMATIZACIÓN EN LOS FERROCARRILES METROPOLITANOS: .....	8
2	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA LÍNEA: .....	10
2.1	Características de un Sistema de Metro Automático: .....	11
2.2	Características Operacionales: .....	12
2.3	Infraestructura: .....	15
2.4	Material Móvil:.....	18
2.4.1	Principales Características.....	18
2.4.2	Tracción.....	19
2.4.3	Resistencia al Avance. ....	22
2.4.4	Prestaciones del Material Rodante para la explotación. ....	24
3	DEMANDA:.....	29
4	OFERTA DE SERVICIO:.....	34
4.1	Tiempo de recorrido entre estaciones: .....	36
4.2	Tiempo de parada en estaciones: .....	38
4.3	Tiempo de maniobra en estaciones terminales o de cabecera. ....	42
4.4	Round Trip Time (RTT) .....	43
4.5	Producción ferroviaria .....	45
4.6	Consumo de energía .....	46
4.6.1	Tracción.....	46
4.6.2	Servicios auxiliares .....	47
4.6.3	Consumo total.....	48
4.7	Estudio de capacidad .....	51
4.7.1	Intervalo de seguimiento .....	51
4.7.2	Intervalo en cabeceras. ....	53
4.8	Estudio para el establecimiento de bucles.....	59
5	PERSONAL DE OPERACIÓN.....	77
5.1	Personal de línea:.....	77
5.2	Personal del Puesto Central:.....	80
6	DIMENSIONAMIENTO de los elementos de VENTA Y PEAJE.....	82
6.1	Dimensionamiento de puestos de venta manual y máquinas automáticas: .....	82
6.2	Dimensionamiento de la batería de torniquetes:.....	84



7	CONCLUSIONES .....	89
8	APORTACIONES .....	93
9	ANEXOS .....	94
9.1	ANEXO 1: DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA AUTOMATIZACIÓN EN FERROCARRILES METROPOLITANOS .....	94
9.1.1	Grados de operación automática (GoA) .....	94
9.1.2	Líneas automáticas existentes en la actualidad .....	96
9.1.3	Elementos clave para la automatización de ferrocarriles metropolitanos .....	103
9.1.4	Beneficios y retos de la automatización de ferrocarriles metropolitanos. ....	106
9.2	ANEXO 2: INFRAESTRUCTURA .....	107
9.2.1	Aparatos de vía: .....	107
9.2.2	Ubicación de las estaciones: .....	110
9.2.3	Cuadro de gradientes máximos .....	110
9.3	ANEXO 3: MATERIAL RODANTE: .....	111
9.3.1	Resistencias al avance del tren .....	111
9.3.2	Datos del tren .....	114
9.4	ANEXO 4: DEMANDA .....	115
9.4.1	Demanda captada (subidos /hora) .....	115
9.4.2	Carga máxima (pphps) .....	121
9.5	ANEXO 5: OFERTA DE SERVICIO: .....	127
9.5.1	Velocidades máximas por sentido .....	127
9.5.2	Estudio de bucles: .....	128
9.5.3	Análisis de maniobras de inversión de marcha en cabecera .....	130
9.5.4	Cálculo del ahorro obtenido por el establecimiento del bucle .....	139
9.6	ANEXO 6: PERSONAL DE OPERACIÓN .....	142
9.6.1	Personal del PCC .....	142
9.6.2	Oficina Técnica de Operación .....	149
9.7	ANEXO 7: ÍNDICE DE FIGURAS .....	153
9.8	ANEXO 8: ABREVIATURAS y TERMINOLOGÍA .....	156
10	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA .....	157

## 1 LA AUTOMATIZACIÓN EN LOS FERROCARRILES METROPOLITANOS:

Los primeros ferrocarriles metropolitanos surgieron a finales del siglo XIX como solución a la congestión del tráfico existente en los centros urbanos de las grandes ciudades. Estos sistemas de transporte masivo de pasajeros tienen una alta capacidad, frecuencia, fiabilidad y eficacia que los ha convertido en la columna vertebral que soporta la actividad económica y social de las poblaciones a las que sirven.

La mayoría de los ferrocarriles metropolitanos basan sus sistemas de explotación en líneas o recorridos con gran densidad de población que implican una distancia entre estaciones reducida (500-2.000 metros). Para poder tener tiempos de recorrido bajos (velocidades comerciales altas) es necesario disponer de un material móvil con grandes aceleraciones y deceleraciones, del orden de  $1,2 \text{ m/s}^2$ , y un elevado número de puertas que permitan una rápida entrada y salida de pasajeros.

Las explotaciones metropolitanas tienen criterios de explotación conceptualmente diferentes a los de los ferrocarriles interurbanos, puesto que los trenes se ven obligados a circular con intervalos temporales y kilométricos reducidos, lo cual exige un escrupuloso control del tráfico y unos sistemas de señalización y conducción extremadamente fiables y versátiles, para permitir grandes capacidades de transporte de forma segura en las líneas servidas.

Previamente a la automatización completa se dispuso de líneas ATO (GoA2) en las que el conductor permanecía en cabina y se limitaba a dar la orden de salida al tren y al mando de puertas. En 1967 se implantó el primer servicio con viajeros en ATO, en la línea 11 del Metro de París. En la década de los 70 otras explotaciones como Metro de Madrid y el BART (Bay Area Rapid Transit) de San Francisco incorporaron esta tecnología.

La automatización completa sin conductor comenzó en la década de los 80 en la ciudad francesa de Lille (con vehículos automáticos ligeros de rodadura neumática y pequeño gálibo) y en la ciudad japonesa de Kobe. Desde entonces un elevado número de administraciones llevan años explotando líneas sin conductor sin problemas graves ni accidentes.

En la actualidad cuando se proyecta una nueva línea metropolitana se estudia en profundidad la posibilidad de automatización. Además, en numerosas líneas ya existentes se estudia la viabilidad de su automatización con el fin de obtener mejores indicadores y solucionar sus problemas de saturación.

La mayoría de las líneas automáticas existentes han sido concebidas desde su diseño inicial para funcionar en dicho modo. Sin embargo, también se han convertido con éxito líneas

convencionales a líneas automáticas como es el caso de la línea 1 del metro de París y de la línea U2 del metro de Núremberg.



Figura 1: Líneas UTO proyectadas para el año 2025 [1].

En la norma UNE-EN 62290-1 se definen los diferentes grados de automatización que surgen al repartir la responsabilidad para determinadas funciones básicas de la explotación del tren entre el personal de explotación y el sistema.

La norma define el grado de automatización 4 (GoA4) de explotación del tren sin tripulación de la siguiente forma: *“En comparación con el GoA3, en este grado de automatización se necesitan medidas adicionales ya que no hay personal de explotación a bordo del tren. La segura salida del tren de la estación, cierre de puertas incluido, se tiene que realizar de manera automática. De manera más específica, el sistema soporta la detección y gestión de condiciones de peligro y situaciones de emergencia, como por ejemplo, la evacuación de viajeros. Algunas condiciones de peligro y situaciones de emergencia, pueden requerir la intervención de personal, como por ejemplo, en un descarrilamiento o ante la detección de humo o fuego.”*

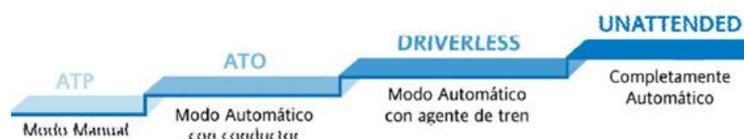


Figura 2: Modos de operación según el grado de automatización [1].

En el anexo 1 se puede consultar información adicional acerca de las líneas automáticas.

## 2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA LÍNEA:

Es una línea de doble vía con circulación a derechas y una longitud aproximada de 27 kilómetros, de los cuales 26.118 metros corresponden a la distancia entre estaciones terminales.

El esquema funcional de la línea ha de ofrecer una gran versatilidad a la operación, permitiendo el establecimiento de servicios parciales que atiendan a los tramos de mayor demanda en caso de situaciones degradadas. Además ha de posibilitar la operación por bucles inicialmente previstos de las estaciones E-8 a E-21 durante la hora punta de la mañana y de E-5 a E-21 durante el resto de franjas horarias:

A continuación se muestra una primera versión del esquema funcional de la línea:

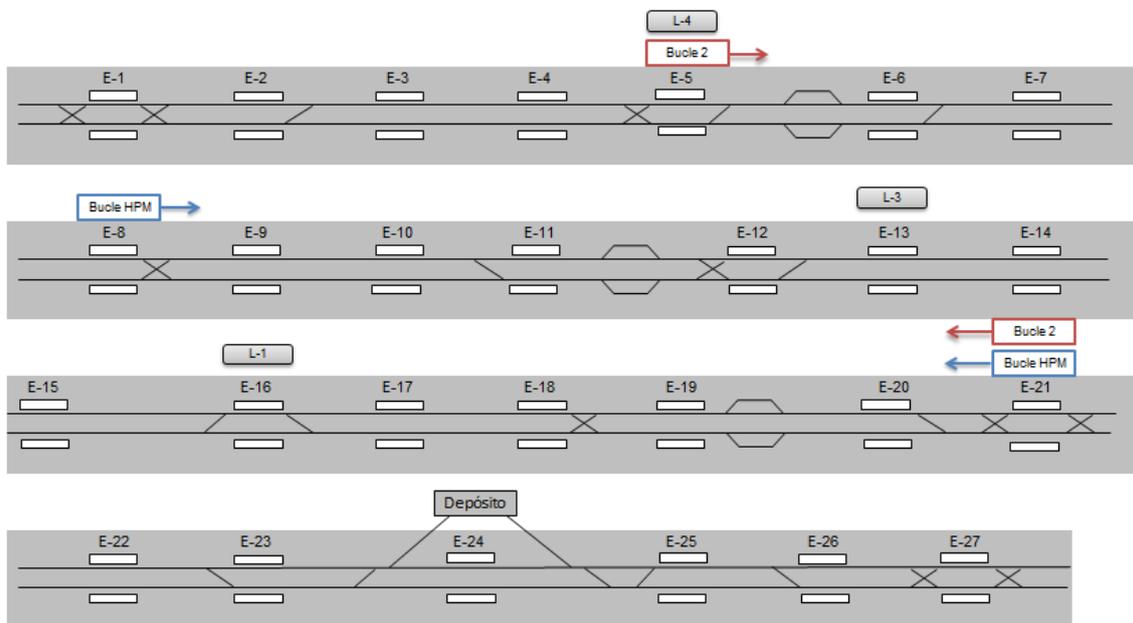


Figura 3: Versión inicial del esquema funcional de la línea.

En las estaciones intermedias los aparatos de vía se han distribuido en función de la demanda prevista y de manera que no queden más de dos interestaciones seguidas sin aparato de vía.

Se dispone de 6 terceras vías cada aproximadamente 5 kilómetros, situadas en recta y con pendiente de 0 ‰ que proporcionan flexibilidad y agilidad en la operación al permitir una rápida retirada y reposición de trenes (por avería, por cambios en la demanda, etc.). La longitud de las terceras vía es suficiente para estacionar dos trenes de 7 coches y dejar libres los aparatos de vía de acceso a la misma. Esto es especialmente útil cuando en situaciones degradadas es necesario remolcar una unidad tren averiada con otra unidad tren útil ya que permite encerrar ambas unidades en la tercera vía y agiliza la normalización de la circulación por vía principal.

La línea cuenta con 27 estaciones subterráneas separadas una distancia media de un kilómetro, de las cuales 2 son terminales, 22 de paso y 3 de conexión con otras líneas de metro. Estas conexiones se producen en las estaciones 5, 13 y 16.

Se dispone de un depósito al que se puede acceder por los dos túneles de acceso situados en las interestaciones de la E- 24 por vía 2. El radio mínimo en depósito es de 90 metros y la pendiente máxima de 35 ‰.

En las interestaciones se dispone de pasarelas de emergencia paralelas a la vía que permiten una fácil evacuación de los pasajeros que se encuentren en el interior de los trenes ante cualquier posible incidencia. Dichas pasarelas están a la misma altura que las puertas del vehículo. La evacuación es guiada por el PCC a través de la interfonía del tren y por un sistema dinámico LED instalado en el paramento del túnel que guía a los pasajeros por el recorrido de evacuación más adecuado. La evacuación puede ser realizada por las salidas de emergencia situadas en el punto medio de cada interestación o por las estaciones.

Por motivos de redundancia la línea está equipada con 2 Puestos Centrales de Operación: un PCO-N ubicado en el depósito (para operación normal) y un PCO-E ubicado en la estación 5 (para operación de emergencia).

## ***2.1 CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA DE METRO AUTOMÁTICO:***

Es un sistema de metro pesado subterráneo equipado con tecnología CBTC sin señalización semafórica, con un grado de automatización GoA4 que dispone de trenes automatizados sin conductor a bordo y rodadura de acero, frenado regenerativo, vías banalizadas totalmente reservadas, sistema centralizado de mando y control de la línea (ATP, ATO, ATS) y estaciones con puertas de andén (mampara de altura completa formada por puertas corredizas en dos partes automáticas y flanqueadas a ambos lados por puertas de emergencia).

La conducción automática permite homogeneizar los tiempos de recorrido entre estaciones regularizar los tiempos de parada y reducir tiempos de maniobra en cabecera.

La marcha automática permite realizar las siguientes operaciones sin la presencia de personal a bordo:

- Salida de las estaciones terminales según el horario teórico o según lo imponga el Puesto Central
- Parada automatizada de precisión, posicionando el tren con sus puertas en correspondencia con las puertas de los andenes

- Apertura y cierre simultáneos de las puertas en las estaciones (puertas del tren y puertas de andenes)
- Inversión automática en las estaciones terminales
- Ingreso automático de los trenes en línea
- Extracción automática de trenes de la línea, para la transferencia al depósito
- Gestión automática de la circulación entre vía principal y patio
- Acoplamiento automático entre trenes (requiere autorización del PCC).

El sistema también permite tanto en la línea como en el depósito, la marcha del tren en ambas direcciones y en las condiciones del servicio prestado (servicio banalizado), para la gestión óptima de cualquier situación de emergencia o un fallo que implica la falta de disponibilidad de uno o más tramos de la línea. La marcha automática es solo posible en las zonas del depósito adecuadamente equipadas, dedicadas al estacionamiento y al lavado. En las otras zonas del depósito y en el taller la marcha es con conductor. La transición de manual a automático y viceversa, necesita ser autorizada por el sistema ATP.

El sistema permite ser gestionado de forma automática o de manera remota (Puesto Central) tanto en condiciones normales de operación como en situaciones imprevistas.

La flexibilidad operativa de un sistema automatizado le permite atender mejor en términos de servicio y sin costos adicionales de personal, respondiendo rápidamente a los cambios de flujo de pasajeros que pueden estar vinculados a hechos concretos y puntuales que afectan a la ciudad.

## **2.2 CARACTERÍSTICAS OPERACIONALES:**

Desde el punto de vista de circulación, cabe destacar las siguientes características de la línea:

- La línea tiene una pendiente prácticamente constante ascendente en el sentido 1. La pendiente máxima es de 35 ‰ para el túnel y de 0‰ en estaciones y vías de estacionamiento. Entre el extremo de las estaciones y el inicio de la pendiente más cercana existe una distancia mínima de 50 metros.
- Las interestaciones tienen una longitud aproximada de 1 Km.
- La velocidad operacional máxima de los trenes en la vía principal es de 80 km/h
- La vía tiene ancho estándar de 1435 mm.
- El ancho de entrevía es de 3,8 metros en recta y de 4 metros en curva.
- Catenaria rígida a 1.500 V DC.

- Carril U.I.C. de 60 kg/ml en barra larga soldada (barras largas de 18 metros. Una vez en vía se conforman las barras largas soldadas definitivas mediante soldadura aluminotérmica), inclinación 1/20, Placa de hormigón y sujeciones de tipo directo.
- Aparatos de vía: aparatos de radio  $R=500$  m y  $Tg=1:12$ , que permiten una velocidad de 65 km/h por la vía desviada. En los sacos de maniobras se dispone de Bretelles de radio  $R=170$  m y  $Tg=1:8$  (0.125), que permiten una velocidad de 38 km/h por la vía desviada. Para más detalles acerca de los aparatos de vía consultar el anexo.

A continuación se muestran algunos de los parámetros más significativos de la línea:

PARÁMETROS EN PLANTA	VALORES
Ancho de vía	1.435 mm
Ancho entrevía en recta	3,80 m
Ancho entrevía en curva	4 m
Radio mínimo en línea	280 m
Radio mínimo en depósito	90 m
Longitud mínima andén en estación	135 m

PARÁMETROS EN ALZADO	VALORES
Pendiente longitudinal máxima en interestación	3,5 ‰
Pendiente longitudinal máxima estación	0 ‰
Pendiente longitudinal máxima vías de estacionamiento	0 ‰
Acuerdo mínimo	3.000 m
Longitud mínima acuerdo vertical	20 m
Peralte máximo	150 mm

PARÁMETROS FUNCIONALES	VALORES
Velocidad máxima operación	80 km/h
Velocidad comercial de la línea	> 30 km/h
Aceleración no compensada vía	0,65 m/s <sup>2</sup>

Figura 4: Parámetros más significativos de la línea

En la página siguiente se muestra el perfil longitudinal de la línea. Con el fin de ver mejor las rampas-pendientes de la línea el eje vertical tiene una relación de 50:1 con respecto al horizontal. Viendo el perfil se observa que:

- Las estaciones 1 y 2 están bajo la cota 0.
- Entre las estaciones 13 y 14 se produce un cambio de pendiente que genera un punto bajo donde será necesario disponer de bombeo para el drenaje
- La interestación más larga es de 1896 metros y se ubica entre las estaciones 19 y 20.

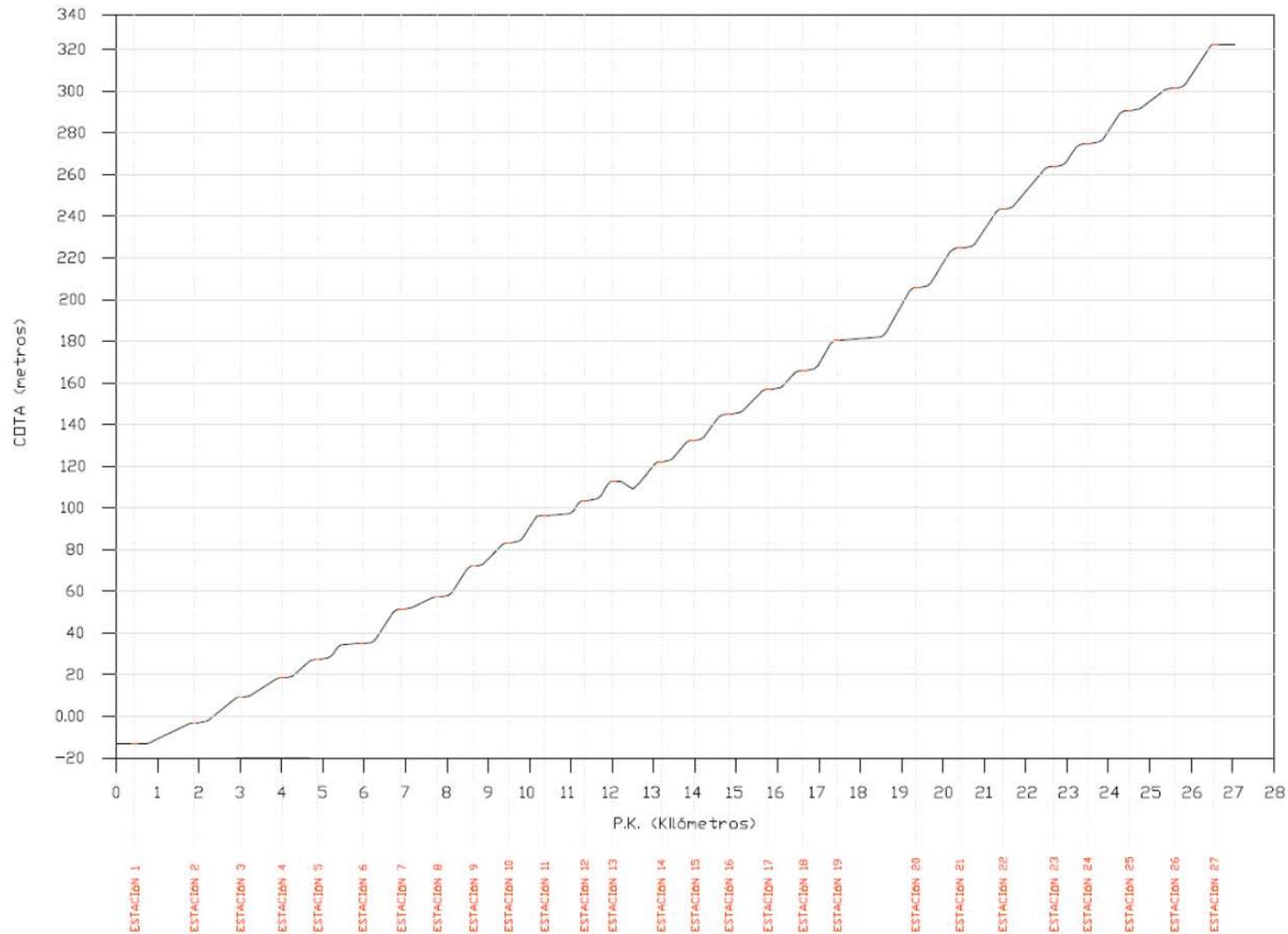


Figura 5: Perfil longitudinal

### 2.3 INFRAESTRUCTURA:

Los trazados de los ferrocarriles metropolitanos se caracterizan por tener numerosas curvas de radio relativamente reducido, pocas alineaciones rectas y numerosas estaciones separadas entre sí alrededor de un kilómetro (se suele estimar que cada estación sirve a una zona de 600 metros de radio). Debido a estas características del trazado los metros suelen tener velocidades máximas de alrededor de 80 km/h, donde lo más relevante es disponer de aceleraciones y deceleraciones elevadas del orden de  $1,2 \text{ m/s}^2$ , al no existir distancia suficiente para permitir desarrollar al tren una velocidad máxima elevada.

Cuando el tren entra en curva aparece una aceleración centrífuga ( $a_c = V^2/R$ ). Como la velocidad máxima de operación de la línea es de 80 km/h y el radio mínimo en curva es de 280 metros el viajero sufriría una aceleración de  $1,8 \text{ m/s}^2$ , lo cual supone una falta de confort inadmisibile para el viajero (para que el pasajero tenga un grado de confort adecuado la máxima aceleración no compensada en caja de viajero no debe sobrepasar  $1,2 \text{ m/s}^2$ ) y un trabajo excesivo de la pestaña exterior sobre la cabeza del carril exterior.

Nivel de confort	Aceleración máxima para el pasajero	
	Sentado	De pie
Muy bueno	$1,0 \text{ m/s}^2$	$0,85 \text{ m/s}^2$
Bueno	$1,2 \text{ m/s}^2$	$1,0 \text{ m/s}^2$
Aceptable	$1,4 \text{ m/s}^2$	$1,2 \text{ m/s}^2$

Figura 6: Valores de aceleración máxima [10]

El empleo de peraltes permite limitar los esfuerzos transversales, homogeneizar los desgastes y conseguir una mayor comodidad para el viajero. Para que la velocidad de aparición de la aceleración centrífuga sea gradual se emplean curvas de transición (clotoides) a lo largo de las cuales se realiza la variación de peralte requerida. Estas curvas de transición tendrán la longitud necesaria para permitir que la suspensión del vehículo se adapte a la nueva situación y un alabeo compatible geoméricamente con el paso de las circulaciones.

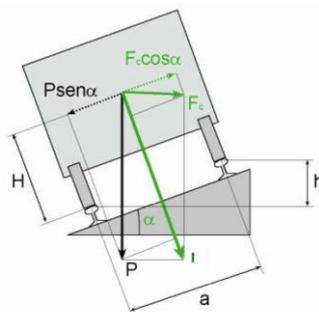


Figura 7: Peralte teórico

$$F_c * \cos(\alpha) = m * g * \sin(\alpha)$$

En el caso de que las fuerzas no estén en equilibrio:

$$F = F_c * \cos(\alpha) - m * g * \sin(\alpha)$$

Como el ángulo  $\alpha$  es muy pequeño se puede hacer la siguiente simplificación:

$$\sin(\alpha) \simeq \tan(\alpha) = \frac{h}{a}$$

$$\cos(\alpha) \simeq 1$$

Resultando:

$$m * \alpha_{nc} = \frac{m * v^2}{R} - \frac{m * g * h}{a} ; \frac{v^2}{R} - \frac{g * h}{a} \leq \alpha_{nc} = \frac{\alpha_v}{1 + s}$$

Donde:

$F_c$ : Fuerza centrífuga

$v$ : Velocidad (m/s)

$R$ : Radio de la curva (m)

$g$ : Aceleración de la gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$h$ : Peralte (m)

$a$ : Ancho de vía entre ejes de carriles (1,435 + 0,072 = 1,507 m)

$\alpha_{nc}$ : Aceleración no compensada en vía ( $\alpha_{nc\max} = 0,65 \text{ m/s}^2$ )

$s$ : Coeficiente souplesse (0,44)

$\alpha_v$ : Aceleración no compensada viajero ( $\alpha_{v\max} = \alpha_{nc\max} (1+s) = 0,94 < 1 \text{ m/s}^2$ )

Para que el tren no descarrile la resultante de la fuerza centrífuga y el peso ha de caer siempre entre las ruedas para que el momento de vuelco sea resistido por la reacción de la rueda exterior a dicho vuelco. Por lo tanto, para determinar el peralte máximo se considera un tren parado (es el caso más desfavorable ya que es el momento en el que la resultante de la fuerza centrífuga y el peso cae lo más alejada del eje de la vía).

Como al arrancar un tren parado la velocidad es nula y no hay aceleraciones aleatorias que dependan de la calidad de la vía se pueden admitir valores de  $\alpha_{nc}$  superiores. Para el cálculo se admite un valor de aceleración no compensada en vía ( $\alpha_{nc}$ ) de  $1 \text{ m/s}^2$ .

$$\frac{V^2}{R} - \frac{g * h}{a} \leq \alpha_{nc} = \frac{\alpha_v}{1 + s}; \quad \frac{g * h_{max}}{a} \leq \alpha_{nc}; \quad h_{max} \leq \frac{\alpha_{nc} * a}{g} = \frac{1 * 1,507}{9,81} = 0,154 \text{ m}$$

Por lo tanto el **peralte máximo** ( $h_{max}$ ) de la línea queda fijado en **150 mm**.

Como la velocidad máxima de operación es de **80 km/h**, el peralte máximo es de 150 mm y la máxima aceleración sin compensar es de **0,65 m/s<sup>2</sup>**, existe un radio mínimo a partir del cual el valor de la  $\alpha_{nc}$  resulta no admisible para esos valores de peralte y velocidad.

$$\frac{V^2}{R} - \frac{g * h}{a} \leq \alpha_{nc}; \quad R = \frac{v^2}{\alpha_{nc} + \frac{g * h_{max}}{a}} = 304 \text{ metros}$$

Para poder circular a 80km/h la curva habrá de tener un radio igual o mayor a 304 metros. Para todas las curvas de radio inferior se tendrá que reducir la velocidad. A modo de ejemplo, se calcula cual es la velocidad máxima de paso para una curva de radio 280 metros (el radio mínimo previsto en la línea):

$$\frac{V^2}{R} - \frac{g * h}{a} \leq \alpha_{nc}; \quad V_{max} = \sqrt{R * \left( \alpha_{nc} + \frac{g * h_{max}}{a} \right)} = 21,3 \text{ m/s}$$

La velocidad máxima al paso por esta curva es de 21,3 m/s (76,8 km/h).

#### Acuerdos verticales:

Cuando el perfil longitudinal tiene pendientes de inclinación diferente y su cambio es superior a 2,5 ‰ es necesario emplear acuerdos verticales que realicen progresivamente el cambio de inclinación de manera que se eviten posibles golpes en las cajas de los vehículos y descargas de sus ejes. Los acuerdos son realizados mediante una parábola cuyo radio de curvatura en el vértice es denominado  $K_v$ . Para un adecuado confort del pasajero este radio se fija con la condición de que la aceleración centrífuga vertical no supere valores de entre el 1% y el 4% de  $g$

( $V^2/R_v < 0,04g$ ). Por lo tanto resultan radios de miles de metros ( $R > V^2/0,4$ ). Para esta línea el radio mínimo vertical es de **3000 metros**. La longitud del acuerdo vertical será  $L = R_v \cdot (i_1 - i_2)$ . En el diseño de la línea se procura evitar que los acuerdos verticales y horizontales coincidan en el mismo punto. De la misma forma se evita colocar aparatos de vía en dichos acuerdos.

Para elegir el valor de la rampa máxima hay que tener en cuenta la adherencia rueda-carril, la potencia de los vehículos y la posibilidad de arranque y frenado. Para esta línea la máxima inclinación es de **35 milésimas**. En estaciones y vías de estacionamiento será de 0 milésimas.

## 2.4 MATERIAL MÓVIL:

### 2.4.1 Principales Características.

Se trata de un tren tipo de piso continuo de 6 coches (107 metros de longitud y 2,85 metros de ancho) con una capacidad total para 1.200 pasajeros (6 pasajeros/m<sup>2</sup>). La mayoría de las plazas se destinan para viajeros de pie y cuentan con una media de 25 asientos por coche (índice de confort del 12,5%). Es un tren de tracción distribuida con 8 bogies motores y 4 bogies remolques, la configuración de tracción es BoBo-22-BoBo-BoBo-22-BoBo. El tren tiene 24 ejes de los cuales 16 son motorizados (66% de motorización).

Las principales características en cuanto a masa del material móvil son:



Configuración Básica		M1	R1	S1	S2	R2	M2	
Peso CCO (Tara)	204062	Kg	35764	30907	35360	35360	30907	35764
CCI (CCO + todos los pasaj. sentados)	215682	Kg	37444	32937	37460	37460	32937	37444
CC1 (CCI+6pasaj/m2)	293105	Kg	50376	46062	50115	50115	46062	50.376
CC2 (CCI + 8pasaj/m2)	318912	Kg	54686	50437	54333	54333	50437	54686
CC3 (CCI + 10pasaj/m2)	344720	Kg	58997	54812	58551	58551	54812	58997

Figura 8: Masa del material móvil [20].

Los trenes están equipados con un sistema de conducción totalmente automática GoA4 que permite optimizar las marchas y controlar el tren desde el puesto central. Para situaciones degradadas que requieran la presencia de personal, los trenes disponen de un panel oculto de

conducción manual y de un modo de operación que permite circular sin la protección del ATP en el que la responsabilidad de la seguridad de la marcha del tren queda en manos del conductor. En este modo la velocidad máxima queda limitada a 30 km/h. La velocidad máxima de operación en condiciones normales de explotación es de 80km/h. Disponen de 48 puertas laterales (24 por cada costado) de 1,9 metros y 1,4 metros de alto y ancho libre de paso respectivamente.

Debido a la proximidad de las estaciones y al característico perfil longitudinal de la línea es necesario que los trenes dispongan de elevadas aceleraciones y deceleraciones que permitan ofrecer una velocidad comercial mínima de 30 km/h. La aceleración máxima (a plena carga con 6 pasajeros/m<sup>2</sup>) es de 1,2 m/s<sup>2</sup> y la deceleración mínima en frenado eléctrico regenerativo de 1m/s<sup>2</sup>. En emergencia la desaceleración máxima será de entre 1,3 y 1,5 m/s<sup>2</sup>.

#### 2.4.2 Tracción.

Cada uno de los coches motores dispone de 4 motores eléctricos de 198 kW (uno en cada eje motor) por lo que la potencia total de un coche motor es de 792 kW y la potencia total del tren es de 3.168 kW. Se considera que la potencia útil en llanta es del 90%. El esfuerzo tractor del tren es inversamente proporcional a la velocidad y su valor será:

$$F = \frac{P * \eta}{v} = \frac{3.168.000 * 0,9}{v}$$

Donde:

F: Fuerza de tracción (N).

P: Potencia (W).

$\eta$ : Rendimiento (adimensional).

v: Velocidad (m/s).

El esfuerzo máximo de tracción va asociado a la máxima adherencia para la velocidad de régimen uniforme (tramo horizontal de la curva de F-V).

La masa del tren cargado es de 293.105 kg. Considerando un coeficiente de masas giratorias ( $\gamma$ ) del 8% la masa equivalente al arrancar es de 316.553 kg. Por lo tanto la aceleración de arranque con el tren a plena carga (6 pasajeros/m<sup>2</sup>) es la siguiente:

$$a = \frac{F_{adh}}{m * (1 + \gamma)} = \frac{385.000}{316.553} = 1,2 \text{ m/s}^2$$

Este valor es inferior al límite de jerk de 1,3 m/s<sup>2</sup>.

La adherencia relaciona el esfuerzo de tracción disponible en la caja de bornes de los motores con el esfuerzo adherente que se puede transmitir al carril sin que se produzca deslizamiento. Para calcular la máxima adherencia disponible en el contacto rueda-carril es necesario conocer el límite de adherencia del tren.

$$F_{adh} = m_{adh} * g * \mu_v$$

Donde:

$F_{adh}$ : Esfuerzo tractor disponible por adherencia (N).

$m_{adh}$ : Masa de los ejes motores del tren (kg).

$g$ : Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>).

$\mu_v$ : Coeficiente de adherencia de los ejes motores a la velocidad v (adimensional).

Se calcula el peso de los ejes motores del tren, denominado peso adherente:

Tren cargado (6 pasj/m <sup>2</sup> )	Masa por eje (kg)	Ejes motores	Masa adherente (kg)	Peso adherente (daN)
Coche M1	12.594	4	50.376	49.419
Coche S1	12.529	4	50.115	49.163
Coche S2	12.529	4	50.115	49.163
Coche M2	12.594	4	50.376	49.419
<b>TOTAL</b>		<b>16</b>	<b>200.982</b>	<b>197.163</b>

Figura 9: Masa adherente

A plena carga (6 pasajeros/m<sup>2</sup>) el peso adherente es de 197.163 daN. Si se acepta un coeficiente de rozamiento rueda-carril de 0,3 con el tren parado el esfuerzo tractor en llantas es el siguiente:

$$F_{adh} = m_{adh} * g * \mu_v = P_{adh} * \mu_v = 197.163 * 0.3 = 59.149 \text{ daN}$$

Como el límite de adherencia es muy superior a la limitación de esfuerzo máximo (38.500 daN) del tren, no hay limitación por adherencia para el arranque en seco.

El coeficiente de adherencia  $\mu_v$  disminuye con la velocidad y es la relación entre la fuerza horizontal máxima que puede transmitir un eje motriz sin que la rueda patine y la masa que soporta dicho eje. Ha sido estimado empíricamente y puede ser calculado mediante las siguientes expresiones:

Renfe:

$$\mu_v = \mu_0 * \left( 0,2115 + \frac{33}{v \left( \frac{km}{h} \right) + 42} \right)$$

Curtius –Kniffler (seco):

$$\mu_v = \left( 0,161 + \frac{7,5}{v \left( \frac{km}{h} \right) + 44} \right)$$

Simplificada:

$$\mu_v = \mu_0 * \left( \frac{1}{1 + 0,01 * v \left( \frac{km}{h} \right)} \right)$$

Donde:

$\mu_v$ : Coeficiente de adherencia a la velocidad  $v$  (adimensional).

$\mu_0$ : Coeficiente de adherencia a velocidad nula (adimensional). Se estima un valor de 0,3 en seco.

$v$ : Velocidad (km/h).

La fuerza de tracción que el tren puede hacer depende de su potencia total, de su límite de adherencia y de la limitación establecida en el control del tren. En la siguiente grafica se muestra cómo evolucionan con la velocidad estos tres parámetros:

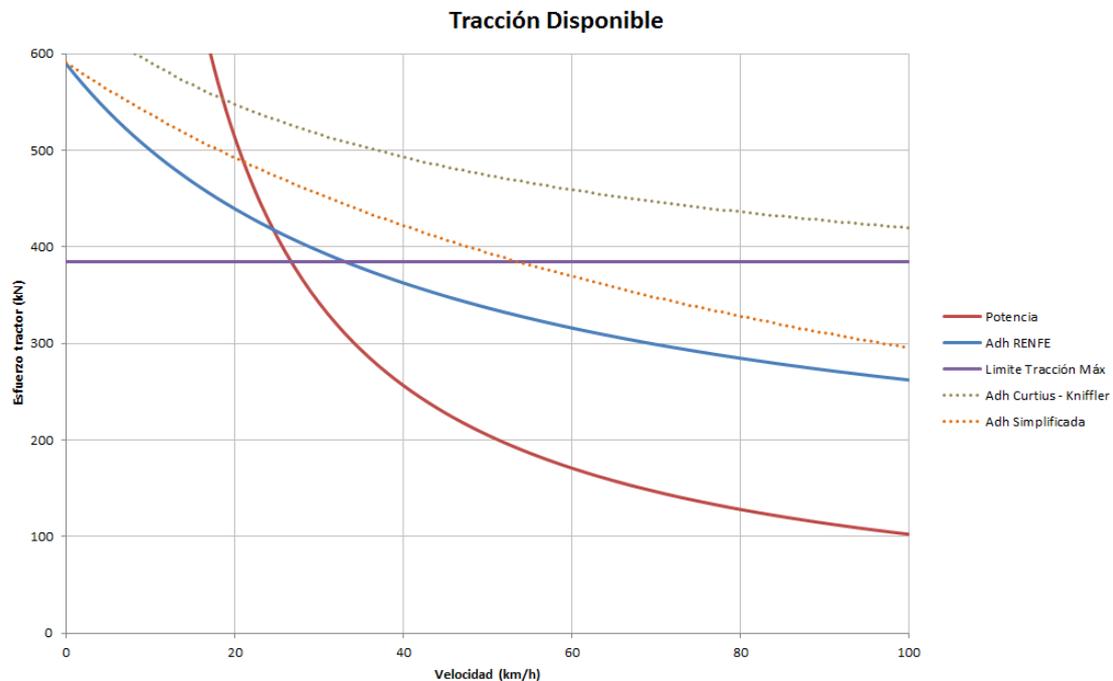


Figura 10: Curvas tracción-adherencia

El esfuerzo de tracción disponible en llanta está limitado mediante el control del tren a un valor máximo de 385 kN y permanece en este valor hasta los 27 km/h. A partir de esta velocidad la tracción queda limitada por la potencia del tren (curva roja).

La fuerza efectiva que el tren puede utilizar para acelerar es la diferencia entre el esfuerzo de tracción disponible en llanta y las resistencias al avance.

### 2.4.3 Resistencia al Avance.

La resistencia total del tren se calcula a través de la siguiente formula:

$$F_r = a + b * v + T_f * c * v^2 + m_t * i + m_t * \frac{600}{R}$$

$$F_r = 316,4 + 2,43 * v + 0,23 * v^2 + 293 * \left( i + \frac{600}{R} \right)$$

Donde:

$F_r$ : Resistencia al avance [daN]

$a$ : Suma de las resistencias debidas a la rodadura (llanta/carril y cajas de grasa) [daN/t].

$b$ : Resistencia debida al rozamiento de las pestañas, oscilaciones y choques [daN/(km/h)].

$c$ : Resistencia aerodinámica [daN/(km/h<sup>2</sup>)]. El fabricante suministra un valor de  $c$  de 1,57 N/(km/h)<sup>2</sup>. El valor de este parámetro es elevado para este tren y es superior a la media. Se le aplica un factor túnel adicional de 1,5.

$v$ : Velocidad [km/h].

$T_f$ : Coeficiente de obstrucción o factor túnel. En el interior de los túneles la resistencia aerodinámica al avance aumenta como consecuencia de la mayor fricción del aire contra la pared exterior del tren. [Adimensional]. Para el cálculo se estima su valor en 1,5.

$m_t$ : Masa del tren cargado a 6 pasajeros/m<sup>2</sup> [t].

$i$ : Inclinación local [mm/m].

$R$ : Radio de la curva [m].

El método de obtención de la fórmula puede ser consultado en el anexo 3.

En el caso de que el tren acelere o frene mediante los motores hay que considerar la masa ficticia del tren debida a las masas rotativas. Si además el tren se encuentra parado habrá que considerar la resistencia al arranque.

A continuación se comparan los valores de diferentes resistencias a las que es sometido el tren a plena carga (293 t) y a una velocidad de 30 km/h (velocidad comercial considerada). En los casos en rampa se suma la resistencia debida a la gravedad a las resistencias al avance horizontal y en recta. Se observa que la resistencia al avance en rampa debida a la fuerza de gravedad es la más importante. Esta resistencia tiene una relevancia especial en la línea considerada debido al perfil longitudinal que presenta.

	Rampa 35 ‰	Rampa 25 ‰	Rampa 15 ‰	Curva R 280 m	Recta horizontal
Resistencia (daN)	10.050	7.180	4.310	628	601

Figura 11: Resistencias a plena carga y 30 km/h

#### 2.4.4 Prestaciones del Material Rodante para la explotación.

Partiendo de las curvas de Tracción- Velocidad, y resistencia al avance, se va a proceder a determinar las prestaciones disponibles del material rodante tanto en condiciones normales como en modos de operación degradada.

En el siguiente gráfico se muestra el esfuerzo de tractor que el tren es capaz de realizar en función de la velocidad y la potencia disponible. Para el cálculo se ha considerado que los motores del tren disponen de una potencia total de 3.168 kW y un rendimiento del 90%.

Para el cálculo de la resistencia al avance se han considerado la resistencia en rampa y la resistencia al avance en recta con un factor túnel de 1,5. La resistencia en curva puede ser considerada como parte de la resistencia en rampa (rampa ficticia). La resistencia en rampa es con diferencia la más significativa de todas y como se ha mencionado es especialmente relevante para esta línea debido al perfil longitudinal que presenta. No se ha considerado ni la resistencia al arranque ni el coeficiente de inercia. En caso de que el vehículo arrancara desde una velocidad nula habría que añadir la resistencia correspondiente. El valor exacto de estas resistencias puede ser obtenido consultando la información que se muestra en el anexo 3.

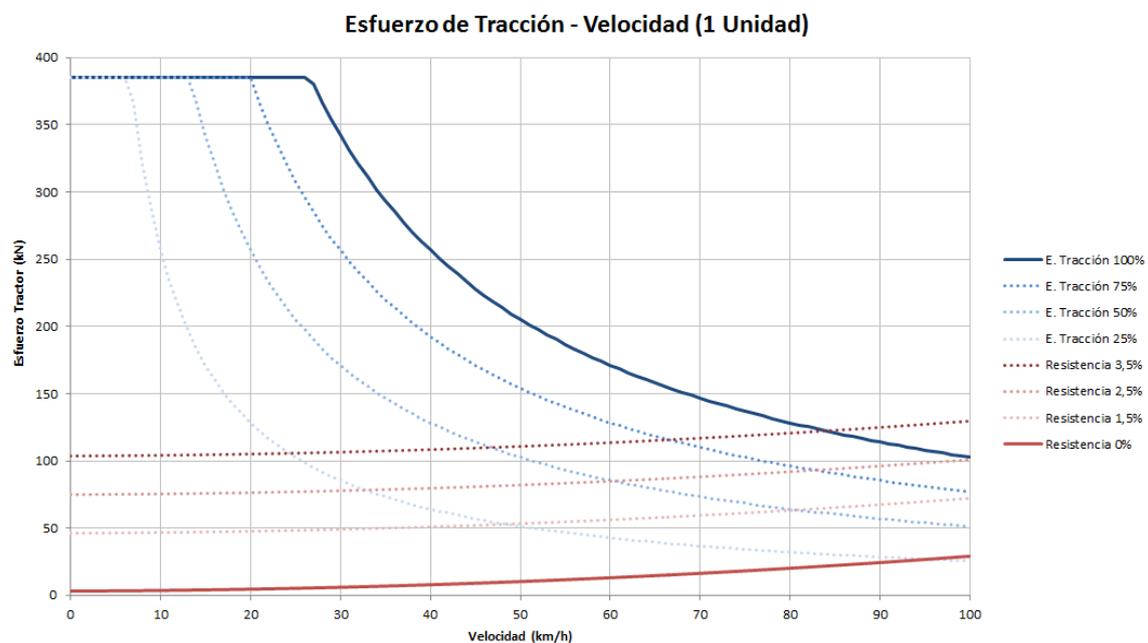


Figura 12: Prestaciones del material rodante

Por tanto, las velocidades máximas de operación que el tren podría llegar a alcanzar son:

	Tracción 100%	Tracción 75%	Tracción 50%	Tracción 25%
Rampa 35 ‰	max	66 km/h	47 km/h	24 km/h
Rampa 25 ‰	max	max	60 km/h	32 km/h
Rampa 15 ‰	max	max	max	49 km/h
Horizontal	max	max	max	max

Figura 13: Velocidades máximas material rodante

La velocidad máxima de operación de la línea es de 80 km/h. El tren puede alcanzar esta velocidad incluso con rampas de 35 milésimas (en la figura 14 se indican el tiempo y la distancia requeridos).

El esfuerzo de tracción disponible ( $F_{tracción} - F_{resistencia}$ ) varía con la velocidad por lo que la aceleración no es constante. Para conocer el tiempo y la distancia que el tren necesita para acelerar en cada caso se emplea la segunda ley de Newton:

$$F = m * a; \quad a = \frac{F}{m} = \frac{\partial v}{\partial t};$$

$$\int \partial t = \int \frac{m_t * \gamma}{F_t - F_r} * \partial v;$$

Para calcular el espacio recorrido:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{\partial v}{\partial t}; \quad \partial t = \frac{\partial v}{a};$$

$$v = \frac{\partial s}{\partial t}; \quad \partial t = \frac{\partial s}{v};$$

Igualando las expresiones:

$$\partial t = \frac{\partial v}{a}; \quad \partial t = \frac{\partial s}{v};$$

$$\frac{\partial v}{a} = \frac{\partial s}{v}; \quad \partial s = \frac{v}{a} * \partial v;$$

Sustituyendo la aceleración por la expresión obtenida mediante la segunda ley de Newton:

$$\partial s = \frac{v}{a} * \partial v; \quad \partial s = \frac{m_t * \gamma}{F_t - F_r} * v * \partial v;$$

Integrando:

$$s = \int \frac{m_t * \gamma}{F_t - F_r} * v * \partial v;$$

Donde:

$F_t$ : Fuerza de tracción [kN].

$F_r$ : Resistencia al avance [kN].

$v$ : Velocidad [m/s].

$s$ : Espacio recorrido [m].

$a$ : Aceleración [m/s<sup>2</sup>].

$m_t$ : Masa del tren cargado a 6 pasajeros/m<sup>2</sup> [t].

$\gamma$ : Coeficiente de masas giratorias [adimensional].

Mediante las expresiones anteriores se calculan el tiempo y la distancia que el tren requiere para alcanzar una velocidad de 80 km/h:

	Tracción 100%		
	t (s)	s (m)	a (m/s <sup>2</sup> )
Rampa 35 ‰	116	2054	0,2
Rampa 25 ‰	60	935	0,4
Rampa 15 ‰	44	653	0,5
Horizontal	33	462	0,7

Figura 14: Tiempo y distancia para alcanzar una velocidad de 80 km/h

En la figura 13 se concluyó que el tren tiene esfuerzo de tracción suficiente para afrontar rampas de 35 ‰ sin que su velocidad máxima de operación se vea comprometida.

Se ha realizado un ejercicio teórico de cálculo del tiempo y espacio que necesitaría un tren para alcanzar la velocidad máxima operacional en rampa máxima. Los resultados obtenidos indican que el tren necesitaría aproximadamente 2 minutos y 2.000 metros para alcanzar la velocidad máxima de operación.

De la misma forma se calculan el tiempo y la distancia que el tren requiere para alcanzar una velocidad de 30 km/h para diferentes escenarios de tracción disponible.

	Tracción 100%			Tracción 75%			Tracción 50%			Tracción 25%		
	t (s)	s (m)	a (m/s <sup>2</sup> )	t (s)	s (m)	a (m/s <sup>2</sup> )	t (s)	s (m)	a (m/s <sup>2</sup> )	t (s)	s (m)	a (m/s <sup>2</sup> )
Rampa 35 ‰	10	42	0,9	11	51	0,8	17	92	0,5	115	703	0,06
Rampa 25 ‰	9	38	1,0	10	45	0,9	14	72	0,6	61	412	0,14
Rampa 15 ‰	8	34	1,1	9	40	1,0	12	60	0,7	28	165	0,30
Horizontal	7	30	1,2	8	35	1,1	10	48	0,9	17	95	0,48

Figura 15: Tiempo y distancia para alcanzar una velocidad de 30 km/h

Se considera que la aceleración mínima recomendable con el 50% de la tracción disponible es 0.15 m/s<sup>2</sup> en la rampa pésima. El tren cumple con este requisito.

Los valores de aceleración mostrados en las tablas anteriores corresponden a la aceleración media. Para el caso de tracción al 25% y rampa de 35‰ la velocidad máxima del tren es de 24 km/h tal y como se calculó con anterioridad.

En el caso de que una unidad no dispusiese de tracción (0% tracción) y tuviese que ser remolcada por otra unidad (100% tracción) la masa del tren y las resistencias al avance se verían incrementadas siendo el esfuerzo de tracción disponible el siguiente:

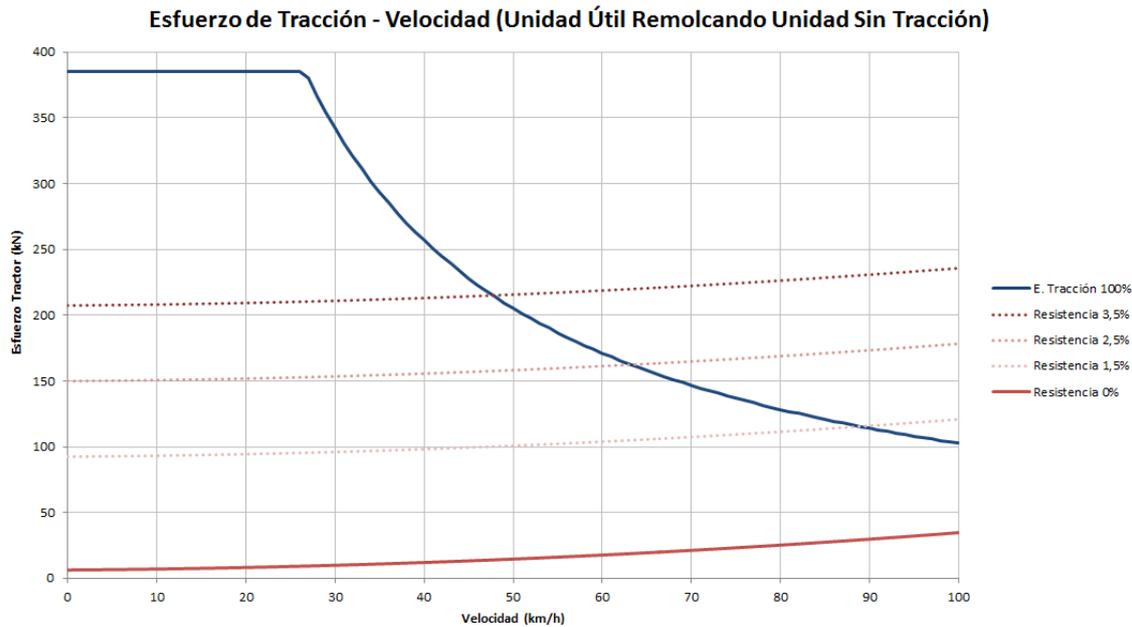


Figura 16: Prestaciones del material rodante (unidad remolcada)

En algunos casos el remolque del tren permitirá circular bajo la protección del ATP, sin embargo en otras ocasiones será necesario circular en un modo de conducción especial que anula el sistema ATP y limita la velocidad a 30 km/h. A continuación se muestran el tiempo y la distancia requeridos para alcanzar la citada velocidad:

	t (s)	s (m)	a (m/s <sup>2</sup> )
Rampa 35 ‰	31	135	0,3
Rampa 25 ‰	23	100	0,4
Rampa 15 ‰	18	80	0,5
Horizontal	14	61	0,6

Figura 17: Tiempo y distancia para alcanzar una velocidad de 30 km/h (unidad remolcada)

Se concluye que la unidad tiene velocidades y aceleraciones aceptables cuando dispone de al menos el 50% de su tracción o va remolcada por otra unidad, para alcanzar una velocidad de 30 km/h. Considerando que aproximadamente cada 5 km existe un lugar de encierre (vías apartadero o deposito) el tren ha de recorrer 2,5 km en el caso más desfavorable para poder salir de la línea, lo que a una velocidad de 30 km/h supone un tiempo de desplazamiento aceptable de alrededor de 5 minutos.

En el anexo 3 se muestra información detallada del material móvil.

### 3 DEMANDA:

Para la estimación de la demanda se consideran la fase inicial correspondiente al año 2020 y la fase final correspondiente al año 2050.

Se determina que el horario de servicio será de 6:00 a 23:00 teniendo tres franjas horarias. La hora punta de la mañana (HPM) comprendida entre las 7:00 y las 9:00. La hora punta de la tarde (HPT) comprendida entre las 18:00 y las 20:00. El resto de horas de servicio corresponden a horas valle (HV). Se define que el sentido 1 es el que va desde la estación 1 a la estación 27 (sentido de subida según el perfil longitudinal) y el sentido 2 va desde la estación 27 a la estación 1 (sentido de bajada según el perfil longitudinal).

Las estaciones 5, 13 y 16 son las más relevantes de la línea al ser puntos de conexión con otras líneas de metro o autobús.

La estación 16 conecta con otra línea de metro existente que cuenta con una importante demanda. Para el año 2020 tiene el mayor número de movimientos (subidos-bajados) de toda la línea alcanzándose valores de 33.413 movimientos por hora. Este valor aumenta hasta los 50.170 movimientos para el año 2050.

La estación 13 es un punto de parada importante del sistema de autobuses de la ciudad y para 2050 se considera que también conectará con otra línea de metro, convirtiéndose a partir de ese momento en la estación con mayor número de movimientos (subidos-bajados), alcanzando valores de 54.036 movimientos en el año 2050, valor ligeramente superior al de la estación 16.

La estación 5 tiene una demanda moderada y es el punto de enlace con otra línea de metro conecta con el aeropuerto de la ciudad. Es la tercera estación en importancia.

A continuación se muestra la demanda captada (subidos/hora) en los dos sentidos para las fases inicial y final:

	Año 2.020	Año 2.050
HPM	63.443	111.329
HPT	44.801	92.554
HV	28.480	57.676
Diaria	586.728	1.157.554
Anual	207.693.936	411.352.304

Figura 18: Demanda años 2020 y 2050

Se ha considerado que los días laborables (lunes-sábado) tienen HPM y HPT mientras que los domingos y los festivos solo tienen HV.

Se considera que en el año existen 250 días útiles, 52 sábados, 52 domingos y 11 festivos.

Los cálculos de demanda diaria y anual realizados se obtienen de la siguiente forma:

- Demanda días laborables =  $2 * HPM + 2 * HPT + 13 * HV$
- Demanda domingos y festivos =  $17 * HV$
- Demanda anual:  $302 * Demanda\ diaria + 63 * Demanda\ domingos\ y\ festivos$

De los cálculos anteriores se concluye que la demanda estimada inicialmente es importante y prácticamente se duplica en un periodo de 30 años lo que supone un crecimiento medio anual del 2,3%.

Para el cálculo de la tasa de crecimiento media anual acumulativa ( $r$ ) se ha usado la siguiente fórmula:

$$r = \left[ \left( \frac{x_f}{x_o} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] * 100$$

Siendo:

$r$ : Tasa de crecimiento media anual acumulativa

$x_f$ : Valor final

$x_o$ : Valor inicial

$n$ : Número de años

La demanda captada (subidos/hora) estimada para cada franja horaria y año considerados puede ser consultada en el anexo 4.

A continuación se muestra el cuadro de cargas máximas (pasajeros por hora por sentido en la interestación más cargada) previstas por franja horaria y año:

	Año 2.020	Año 2.050
HPM	27.257	47.883
HPT	16.517	34.484
HV	10.378	18.808

Figura 19: Cargas máximas años 2020 y 2050

Las mayores **cargas máximas** se producen durante la HPM. Este es el dato que determina el **dimensionamiento** de la oferta de servicio y de la flota de trenes.

Se prevé que las intensidades máximas se producirán en el tramo central de la línea entre la estación 13 y la estación 16.

Del análisis de las intensidades en las diferentes franjas horarias se concluye que:

- HPM: se prevén intensidades superiores al resto del día, teniendo el **sentido 2** una carga máxima dos veces mayor que la del sentido contrario
- HPT: la intensidad máxima se produce en el sentido 1.
- HV: la carga máxima es similar en ambos sentidos.

La carga máxima (pphps) estimada para cada franja horaria y año considerados puede ser consultada en el anexo 4.

Las líneas automáticas permiten ajustar la oferta de servicio a la demanda existente en cada momento de una forma más precisa y eficiente que una línea convencional al no estar constreñida por la necesidad de personal de conducción.

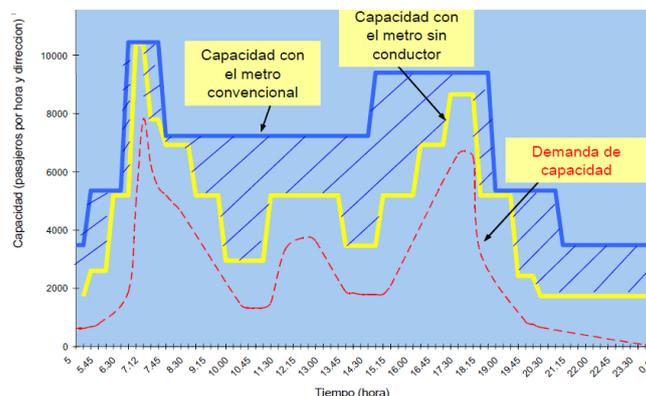


Figura 20: Adaptabilidad oferta-demanda UTO [9].

La planificación de la oferta de servicio se realiza con los datos de la demanda prevista. Además, se dispondrá de una aplicación capaz de mostrar información gráfica en tiempo real del grado de ocupación de los trenes y de los andenes en función de la demanda real (obtenida del sistema de peaje) y la circulación en tiempo real de los trenes (obtenida del CTC). A través de esta herramienta se podrá por tanto determinar en tiempo real cuándo es necesario aumentar/disminuir la oferta en función de incrementos/decrementos puntuales de la demanda.



Figura 21: Aplicación grado ocupación en tiempo real

Esta aplicación en tiempo real permite desarrollar diferentes funcionalidades como por ejemplo:

- Alarmas de previsión de densidad en trenes : el sistema indicará los trenes que según la situación actual de la línea superarán el umbral de viajeros/m<sup>2</sup> previamente definido en una estación a la que tiene previsto llegar, permitiendo tomar decisiones con antelación a que esta situación ocurra. En la línea considerada se pueden inyectar trenes desde las terceras vías en caso de recibir una alarma de densidad, lo que ofrece la posibilidad de evitar este tipo de sobrecargas puntuales.

Tren	Estación	Hora	Viajeros	C/m <sup>2</sup>
N13	Gran Vía II	9:11:20	599	4,1/68
N14	Tirso de Molina II	9:11:22	571	3,8/64
N13	Tribunal II	9:13:35	569	3,8/64
N16	Atocha Renfe II	9:14:29	761	5,6/93
N13	Bilbao II	9:15:09	552	3,7/61
N16	Atocha II	9:15:48	763	5,6/93
N16	Antón Martín II	9:17:33	769	5,6/94
N16	Tirso de Molina II	9:19:11	777	5,7/95
N16	Sol II	9:21:04	692	4,9/82
N16	Gran Vía II	9:22:23	668	4,7/79
N16	Tribunal II	9:23:54	657	4,6/77
N16	Bilbao II	9:25:28	625	4,3/72
N16	Iglesia II	9:28:42	562	3,8/63
N23	Atocha Renfe II	9:36:48	653	4,6/76
N23	Atocha II	9:38:07	657	4,6/77
N23	Antón Martín II	9:39:52	664	4,7/78
N23	Tirso de Molina II	9:41:30	672	4,8/79

Figura 22: Alarma aplicación grado ocupación en tiempo real [14].

- Alarmas de ocupación de viajeros: el sistema muestra los trenes que han superado el umbral de carga definido.

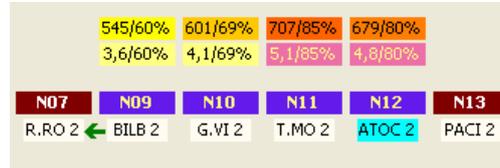


Figura 23: Alarma aplicación grado ocupación en tiempo real [14].

- Detección automática de entrada masiva por los pasos de entrada: si se detecta que una barrera están entrando más de un cierto valor de viajeros/hora, el sistema de control de estaciones dará una alarma. Lo mismo con la detección de salida masiva.
- Conociendo el estado de los pasos (disponible/no disponible) y el número de entradas/salidas se pueden detectar limitaciones de paso anormales impuestas por el estado de las instalaciones.

#### 4 OFERTA DE SERVICIO:

Una vez analizados los datos de la demanda prevista se calcula la capacidad de transporte requerida. Se considera que existirá un único periodo durante todo el año no habiendo variación entre el servicio prestado en verano y el resto del año. Se diferencia entre días laborables (de lunes a sábado), domingos y festivos. Las franjas horarias consideradas son la HPM (de 7:00 a 9:00) la HPT (18:00 a 20:00) y HV. Los domingos y festivos todas las horas serán consideradas como horas valle (HV). El horario de servicio será de 6:00 a 23:00.

Las franjas horarias críticas para el dimensionamiento son la HPM de 2020 y la HPM de 2050:

Tramo	Carga Sentido 1	Carga Sentido 2	Tramo	Carga Sentido 1	Carga Sentido 2
Estación 1 - Estación 2	1.052	640	Estación 1 - Estación 2	2.083	897
Estación 2 - Estación 3	1.797	2.578	Estación 2 - Estación 3	3.360	4.541
Estación 3 - Estación 4	2.869	6.026	Estación 3 - Estación 4	5.721	8.344
Estación 4 - Estación 5	3.791	7.872	Estación 4 - Estación 5	7.222	10.766
Estación 5 - Estación 6	9.097	11.252	Estación 5 - Estación 6	16.581	19.755
Estación 6 - Estación 7	9.135	11.351	Estación 6 - Estación 7	16.625	19.846
Estación 7 - Estación 8	10.286	15.927	Estación 7 - Estación 8	17.531	24.864
Estación 8 - Estación 9	10.698	20.144	Estación 8 - Estación 9	18.118	28.212
Estación 9 - Estación 10	10.993	21.920	Estación 9 - Estación 10	18.355	30.143
Estación 10 - Estación 11	11.861	22.458	Estación 10 - Estación 11	19.467	30.612
Estación 11 - Estación 12	12.391	23.454	Estación 11 - Estación 12	21.100	31.990
Estación 12 - Estación 13	12.016	23.534	Estación 12 - Estación 13	20.950	31.902
Estación 13 - Estación 14	12.439	25.215	Estación 13 - Estación 14	21.037	47.883
Estación 14 - Estación 15	12.051	26.425	Estación 14 - Estación 15	20.056	46.763
Estación 15 - Estación 16	12.044	27.257	Estación 15 - Estación 16	19.595	46.767
Estación 16 - Estación 17	11.356	19.200	Estación 16 - Estación 17	14.894	24.312
Estación 17 - Estación 18	11.446	18.412	Estación 17 - Estación 18	14.722	23.614
Estación 18 - Estación 19	11.515	18.313	Estación 18 - Estación 19	14.472	22.387
Estación 19 - Estación 20	11.569	18.086	Estación 19 - Estación 20	14.422	21.914
Estación 20 - Estación 21	11.377	16.222	Estación 20 - Estación 21	13.921	19.639
Estación 21 - Estación 22	7.884	12.210	Estación 21 - Estación 22	8.951	13.493
Estación 22 - Estación 23	7.354	9.795	Estación 22 - Estación 23	8.207	11.423
Estación 23 - Estación 24	5.517	8.102	Estación 23 - Estación 24	6.046	9.388
Estación 24 - Estación 25	3.859	8.372	Estación 24 - Estación 25	4.633	9.147
Estación 25 - Estación 26	3.314	7.296	Estación 25 - Estación 26	3.911	7.811
Estación 26 - Estación 27	1.538	1.930	Estación 26 - Estación 27	1.714	2.011
<b>CARGA MÁXIMA</b>	<b>12.439</b>	<b>27.257</b>	<b>CARGA MÁXIMA</b>	<b>21.100</b>	<b>47.883</b>

Figura 24: Cargas máximas previstas para HPM 2020 (izquierda) y HPM 2050 (derecha).

Para determinar la oferta se calcula el número de viajes/hora necesarios para que la densidad de viajeros no supere los 6 pasajeros/m<sup>2</sup> en la interestación mas cargada.

A modo de ejemplo se muestra el cálculo realizado para la HPM de 2020:

- Carga máxima: 27.257 pasajeros por hora en el sentido 1.
- Capacidad tren: 1200 pasajeros (considerando 6 pasajeros/m<sup>2</sup>).
- Viajes/hora necesarios = 22,7 (carga máxima / capacidad tren)
- Intervalo requerido = 2,6 minutos [60 / (viajes/hora necesarios)]
- El intervalo ofertado se reduce al intervalo más próximo en múltiplos de 30 segundos (en este caso a 150 segundos, es decir, 2,5 minutos).

	Mínimo Requerido	Ofertado
Carga horaria (pax/dir)	27.257	28.800
Viajes/h necesarios	22,7	24
Headway requerido (min)	2,6	2,5

Figura 25: Cálculo nivel de servicio para HPM 2020

Repetiendo el cálculo para las diferentes franjas horarias y años considerados se obtiene:

Año	Franja horaria	Parámetro	Requerido	Ofertado	% Ocupación
2020	HPM	Capacidad de transporte (pphs)	27.257	28.800	95%
		Circulaciones por hora y sentido (viajes/h)	22,7	24,0	
		Headway (min)	2,6	2,5	
	HPT	Capacidad de transporte (pphs)	16.517	18.000	92%
		Circulaciones por hora y sentido (viajes/h)	13,8	15,0	
		Headway (min)	4,4	4,0	
	HV	Capacidad de transporte (pphs)	10.378	14.400	72%
		Circulaciones por hora y sentido (viajes/h)	8,6	12,0	
		Headway (min)	6,9	5,0	
2050	HPM	Capacidad de transporte (pphs)	47.883	48.000	100%
		Circulaciones por hora y sentido (viajes/h)	39,9	40,0	
		Headway (min)	1,5	1,5	
	HPT	Capacidad de transporte (pphs)	34.484	36.000	96%
		Circulaciones por hora y sentido (viajes/h)	28,7	30,0	
		Headway (min)	2,1	2,0	
	HV	Capacidad de transporte (pphs)	18.808	20.571	91%
		Circulaciones por hora y sentido (viajes/h)	15,7	17,1	
		Headway (min)	3,8	3,5	

Figura 26: Niveles de servicio requeridos y ofertados

Para calcular el número de trenes necesarios para dar esta oferta de servicio es necesario conocer el tiempo que un tren tarda en dar una vuelta completa a la línea (Round Trip Time o RTT).

El RTT es la suma de los siguientes tiempos:

- Tiempo de recorrido entre estaciones.
- Tiempo de parada en estaciones.
- Tiempo de maniobra en estaciones terminales o de cabecera.

#### 4.1 TIEMPO DE RECORRIDO ENTRE ESTACIONES:

El tiempo de recorrido puede ser estimado a través de diversos métodos:

- Método matemático:
  - En una primera aproximación se pueden emplear las ecuaciones del MRUA, suponiendo una aceleración y deceleración constantes.
  - Para una estimación más precisa, los tiempos y distancias necesarios en las aceleraciones son calculados mediante las siguientes ecuaciones:

$$t = \int \frac{m_c * \gamma}{F_t - F_r} * \partial v; s = \int \frac{m_c * \gamma}{F_t - F_r} * v * \partial v;$$

- Método de simulación (software):

Considerando las características de la infraestructura (posición de las estaciones, perfil vertical y horizontal de la línea) y del material rodante se realiza la simulación mediante una aplicación software que calcula de forma continua las ecuaciones diferenciales del movimiento, mediante el que se obtienen las velocidades máximas de circulación, los peraltes requeridos, los tiempos de recorrido para cada interestación y el rango de consumo energético del tren.

- Método empírico (datos estadísticos):

En líneas en operación es posible usar datos estadísticos.

El tráfico ferroviario es el resultado de la compleja interacción entre la infraestructura, los sistemas de seguridad, la señalización y el material rodante, combinados con una serie de factores estocásticos tales como, por ejemplo, los tiempos de parada en las estaciones.

Para la obtención del tiempo de recorrido se ha seguido el método de simulación, considerando que el material rodante va a plena carga (6 viajeros/m<sup>2</sup>), una aceleración de salida de 1,1 m/s<sup>2</sup> y una deceleración media de freno para la parada en estación de 0,9 m/s<sup>2</sup>. Tras construir el modelo de la infraestructura e introducir los datos de entrada del material rodante se calculan las velocidades máximas con las que simular la circulación de los trenes, considerando una aceleración no compensada máxima de 0,65 m/s<sup>2</sup>, un peralte máximo de 0,150 m y un ancho de vía entre ejes de carriles de 1,507 m (1,435 + 0,072 = 1,507 m). Estas velocidades pueden ser consultadas en el anexo 5.

Al tiempo de recorrido entre estaciones obtenido en la simulación (T1) es necesario aplicarle unos márgenes que permitan dar robustez a la operación de la línea, por lo que para obtener el tiempo a utilizar se ha seguido el siguiente método:

- T1: Marcha de base. Tiempo obtenido de la simulación.
- T2: Se calcula el 5% de T1
- T3: Se añaden 5 segundos por cada mil metros.
- T4: Marcha tipo. Se obtiene sumando a T1 los tiempos T2 y T3.

Sentido 1						Sentido 2					
Interestación	Distancia (m)	T1	T2	T3	T4	Interestación	Distancia (m)	T1	T2	T3	T4
Estación 1 - Estación 2	1.445,21	92,3	4,6	7,2	104,2	Estación 1 - Estación 2	1.445,21	85,4	4,3	7,2	96,9
Estación 2 - Estación 3	1.117,35	72,0	3,6	5,6	81,2	Estación 2 - Estación 3	1.117,35	69,2	3,5	5,6	78,2
Estación 3 - Estación 4	1.000,61	64,4	3,2	5,0	72,6	Estación 3 - Estación 4	1.000,61	64,0	3,2	5,0	72,2
Estación 4 - Estación 5	867,70	59,8	3,0	4,3	67,1	Estación 4 - Estación 5	867,70	58,5	2,9	4,3	65,8
Estación 5 - Estación 6	1.081,83	68,2	3,4	5,4	77,0	Estación 5 - Estación 6	1.081,83	67,8	3,4	5,4	76,6
Estación 6 - Estación 7	941,37	62,7	3,1	4,7	70,5	Estación 6 - Estación 7	941,37	62,6	3,1	4,7	70,4
Estación 7 - Estación 8	873,20	63,5	3,2	4,4	71,1	Estación 7 - Estación 8	873,20	61,5	3,1	4,4	69,0
Estación 8 - Estación 9	873,23	58,6	2,9	4,4	65,9	Estación 8 - Estación 9	873,23	58,5	2,9	4,4	65,8
Estación 9 - Estación 10	843,97	58,9	2,9	4,2	66,0	Estación 9 - Estación 10	843,97	57,9	2,9	4,2	65,0
Estación 10 - Estación 11	872,28	59,0	3,0	4,4	66,4	Estación 10 - Estación 11	872,28	58,3	2,9	4,4	65,6
Estación 11 - Estación 12	933,64	62,2	3,1	4,7	70,0	Estación 11 - Estación 12	933,64	61,4	3,1	4,7	69,2
Estación 12 - Estación 13	707,77	51,2	2,6	3,5	57,3	Estación 12 - Estación 13	707,77	51,1	2,6	3,5	57,2
Estación 13 - Estación 14	1.180,16	75,4	3,8	5,9	85,1	Estación 13 - Estación 14	1.180,16	75,0	3,7	5,9	84,6
Estación 14 - Estación 15	790,45	55,7	2,8	4,0	62,4	Estación 14 - Estación 15	790,45	55,3	2,8	4,0	62,0
Estación 15 - Estación 16	840,94	59,0	2,9	4,2	66,1	Estación 15 - Estación 16	840,94	57,0	2,9	4,2	64,1
Estación 16 - Estación 17	949,23	64,1	3,2	4,7	72,0	Estación 16 - Estación 17	949,23	63,0	3,2	4,7	70,9
Estación 17 - Estación 18	851,84	60,2	3,0	4,3	67,5	Estación 17 - Estación 18	851,84	58,1	2,9	4,3	65,2
Estación 18 - Estación 19	828,67	56,8	2,8	4,1	63,7	Estación 18 - Estación 19	828,67	56,7	2,8	4,1	63,6
Estación 19 - Estación 20	1.896,36	105,2	5,3	9,5	119,9	Estación 19 - Estación 20	1.896,36	102,8	5,1	9,5	117,4
Estación 20 - Estación 21	1.059,49	66,7	3,3	5,3	75,3	Estación 20 - Estación 21	1.059,49	66,7	3,3	5,3	75,3
Estación 21 - Estación 22	1.049,36	67,2	3,4	5,2	75,8	Estación 21 - Estación 22	1.049,36	66,0	3,3	5,2	74,5
Estación 22 - Estación 23	1.237,25	74,5	3,7	6,2	84,4	Estación 22 - Estación 23	1.237,25	74,0	3,7	6,2	83,9
Estación 23 - Estación 24	805,79	57,5	2,9	4,0	64,4	Estación 23 - Estación 24	805,79	55,7	2,8	4,0	62,5
Estación 24 - Estación 25	1.014,99	65,6	3,3	5,1	74,0	Estación 24 - Estación 25	1.014,99	64,9	3,2	5,1	73,2
Estación 25 - Estación 26	1.095,52	69,2	3,5	5,5	78,1	Estación 25 - Estación 26	1.095,52	68,6	3,4	5,5	77,5
Estación 26 - Estación 27	960,01	65,2	3,3	4,8	73,3	Estación 26 - Estación 27	960,01	65,1	3,3	4,8	73,2
<b>TOTAL</b>	<b>26.118,22</b>	<b>1715,0</b>	<b>85,8</b>	<b>130,6</b>	<b>1932</b>	<b>TOTAL</b>	<b>26.118,22</b>	<b>1685,112</b>	<b>84,3</b>	<b>130,6</b>	<b>1900</b>

Figura 27: Tiempo de recorrido entre estaciones

Se observa que el tiempo de recorrido entre estaciones del sentido 1 (subida según el perfil longitudinal) es 32 segundos superior al tiempo del sentido 2 (bajada).

El margen operacional entre el T1 y el T4 es aproximadamente del 12,5% en ambos sentidos.

#### 4.2 TIEMPO DE PARADA EN ESTACIONES:

El tiempo de parada es un **factor determinante** para determinar cuál es el intervalo mínimo y por tanto la capacidad máxima de una línea ferroviaria metropolitana con bajos intervalos. El tiempo de parada puede ser a su vez descompuesto en tres tiempos:

- Tiempo empleado en abrir y cerrar las puertas y el tiempo transcurrido desde el cierre de puertas a la salida del tren. Es importante minimizar tanto el tiempo que transcurre desde que el tren para en la estación hasta que abre las puertas como el tiempo que transcurre desde que se cierran las puertas y el cierre es verificado por el sistema hasta que el tren sale de la estación.
- Tiempo de subida y bajada de pasajeros: depende del volumen de demanda en la estación, número y ancho de las puertas del tren y andén, densidad de pasajeros en el tren y el andén y la aglomeración que se produce en la puerta entre los pasajeros que suben y los que bajan. Aunque las puertas de 1,4 metros de ancho se consideran de doble flujo frecuentemente funcionan con un único flujo por lo que se va a considerar que por cada puerta pueden subir o bajar 1,5 personas. Para aumentar la eficiencia y la capacidad de la línea se pueden utilizar puertas de cuádruple flujo (2,4 metros de ancho) como las que se están probando en Tokio por la JR East o disponer de un mayor número de puertas por costado (en detrimento de plazas sentadas) como los nuevos trenes empleados en Londres (disponen de 6 puertas por costado). Cuanto mayor sea el espacio para salir-entrar del tren menor será el tiempo de parada y menor efecto tendrá el malfuncionamiento de una puerta. Además es conveniente disponer de personal que controle los flujos de entrada y salida en los andenes de aquellas estaciones que así lo requieran. Otra opción muy interesante es disponer de tres andenes (dos andenes laterales y un andén central) de manera que se segreguen los flujos de subida y de bajada de pasajeros y se utilicen las puertas de ambos costados.
- Tiempo que las puertas permanecen abiertas una vez que no suben-bajan pasajeros. Es importante minimizar este tiempo, especialmente cuando la línea está operando al límite de su capacidad. Para conseguir una mayor eficiencia en la operación de la línea (un menor tiempo de parada permite una mayor velocidad comercial) los operadores del



PCO o el personal de línea pueden proceder a mandar una orden de cierre de puertas en casos específicos.

Las líneas UTO permiten tiempos de parada más reducidos y homogéneos al disponer de puertas de andén y de conducción totalmente automática. En las líneas convencionales el personal de conducción aumenta el tiempo de parada debido al desfase que transcurre desde que la señal autoriza la salida de la estación hasta que el conductor reacciona e inicia la marcha. Además, los tiempos de parada son más heterogéneos al quedar en función del criterio del personal el momento más adecuado para el cierre de puertas.

Para estimar el tiempo de parada en líneas en operación que disponen de suficientes datos es una práctica habitual calcular el tiempo de parada medio y sumarle dos desviaciones estándar de manera que se disponga de un margen que de robustez a la operación planificada [11].

Para la estimación de los tiempos de parada de la línea en estudio se han tenido en cuenta los siguientes criterios:

- Nº puertas por costado: 24 (1,4 metros de ancho)
- Tiempo de subida-bajada: 1 persona/segundo (24 pasajeros pueden subir-bajar al tren por segundo). Determinar correctamente este tiempo es crítico para el cálculo de los tiempos de parada y por tanto del tiempo de recorrido de la línea. Sin embargo, es un parámetro estocástico que varía considerablemente en las diferentes explotaciones. Se realiza una estimación con las consideraciones indicadas y una vez comience la explotación se han precisar mediante datos estadísticos estos tiempos.
- Tiempo de apertura de puertas: 3 s
- Tiempo de cierre de puertas, verificación del cierre e inicio de la marcha: 5 s
- El tiempo mínimo de parada considerado es de 20 segundos. Una vez comience la explotación se podrá determinar la conveniencia de una posible reducción de este tiempo.
- Se considera que los viajeros que van a bajar del tren se distribuyen a lo largo de todo el tren, así como que los viajeros que van a subir al tren se distribuyen a lo largo de todo el andén.
- Número de circulaciones por sentido en hora punta en cada uno de los escenarios considerados:

Año	2020	2050
Capacidad ofertada (pphs)	28.800	48.000
Trenes por hora y sentido	24	40
Headway (minutos)	2,5	1,5

Figura 28: Niveles de servicio ofertados HPM

Teniendo en cuenta estas consideraciones se calcula el tiempo que los pasajeros tardarían en subir y bajar en cada estación en función de los datos de demanda.

El método de cálculo es el siguiente:

$$T_{parada} = T_{parada\ suben} + T_{parada\ bajan} = T_{ap} + T_{cp} + 2 * \left( \frac{P_h}{V_h * P_{st}} \right)$$

$$T_{parada\ suben} = T_{ap} + \frac{P_h}{V_h * P_{st}}$$

$$T_{parada\ bajan} = T_{cp} + \frac{P_h}{V_h * P_{st}}$$

Siendo:

$T_{ap}$ : Tiempo necesario para la apertura de las puertas del tren y el andén (segundos).

$T_{cp}$ : Tiempo necesario para el cierre de las puertas del tren y el andén (segundos).

$P_h$ : Número de pasajeros que suben-bajan al tren por hora en una estación determinada.

$V_h$ : Numero de viajes que se realizan por hora.

$P_{st}$ : Número de pasajeros por segundo que pueden subir-bajar del tren.

El tiempo de parada obtenido es redondeado al múltiplo de 5 superior con el fin de dotar de robustez a los tiempos de parada calculados. Una vez transcurridos los tiempos prefijados las puertas del tren y del andén se cerrarán automáticamente bajo la protección del ATP. En caso de detectar un obstáculo se realizaran tres intentos más automáticos de cierre. En caso de no tener éxito el cierre habrá de ser realizado remotamente por personal del PCO o localmente por el personal de la línea.

A continuación se muestran los tiempos de parada calculados para la HPM de 2050:

HPM Año 2050 Sentido 1 ↓								HPM Año 2050 Sentido 2 ↑							
Estación	Suben	T. subida (s)	Bajan	T. bajada (s)	T. Parada estimado (s)	T. Parada Malla (s)	Margen T. parada (s)	Estación	Suben	T. subida (s)	Bajan	T. bajada (s)	T. Parada estimado (s)	T. Parada malla (s)	Margen T. parada (s)
Estación 1	2.083	5,2	0	5,0	11	20	9	Estación 1	0	3,0	897	5,9	9	20	11
Estación 2	1.277	4,3	0	5,0	10	20	10	Estación 2	0	3,0	3.644	8,8	12	20	8
Estación 3	2.361	5,5	0	5,0	11	20	9	Estación 3	0	3,0	3.803	9,0	12	20	8
Estación 4	1.504	4,6	3	5,0	10	20	10	Estación 4	2	3,0	2.424	7,5	11	20	9
Estación 5	11.222	14,7	1.863	6,9	22	25	3	Estación 5	738	3,8	9.727	15,1	19	20	1
Estación 6	48	3,1	4	5,0	9	20	11	Estación 6	27	3,0	118	5,1	9	20	11
Estación 7	1.133	4,2	227	5,2	10	20	10	Estación 7	183	3,2	5.201	10,4	14	20	6
Estación 8	879	3,9	292	5,3	10	20	10	Estación 8	199	3,2	3.547	8,7	12	20	8
Estación 9	443	3,5	206	5,2	9	20	11	Estación 9	126	3,1	2.057	7,1	11	20	9
Estación 10	1.112	4,2	0	5,0	10	20	10	Estación 10	52	3,1	521	5,5	9	20	11
Estación 11	1.896	5,0	263	5,3	11	20	9	Estación 11	333	3,3	1.711	6,8	11	20	9
Estación 12	217	3,2	367	5,4	9	20	11	Estación 12	441	3,5	353	5,4	9	20	11
Estación 13	11.138	14,6	11.051	16,5	32	35	3	Estación 13	7.933	11,3	23.914	29,9	42	45	3
Estación 14	206	3,2	1.187	6,2	10	20	10	Estación 14	1.649	4,7	529	5,6	11	20	9
Estación 15	160	3,2	621	5,6	9	20	11	Estación 15	745	3,8	749	5,8	10	20	10
Estación 16	6.145	9,4	10.846	16,3	26	30	4	Estación 16	27.817	32,0	5.362	10,6	43	45	2
Estación 17	212	3,2	384	5,4	9	20	11	Estación 17	1.174	4,2	476	5,5	10	20	10
Estación 18	848	3,9	1.098	6,1	11	20	9	Estación 18	1.989	5,1	762	5,8	11	20	9
Estación 19	466	3,5	516	5,5	10	20	10	Estación 19	838	3,9	365	5,4	10	20	10
Estación 20	228	3,2	729	5,8	9	20	11	Estación 20	2.496	5,6	221	5,2	11	20	9
Estación 21	152	3,2	5.122	10,3	14	20	6	Estación 21	6.484	9,8	338	5,4	16	20	4
Estación 22	158	3,2	902	5,9	10	20	10	Estación 22	2.150	5,2	80	5,1	11	20	9
Estación 23	67	3,1	2.228	7,3	11	20	9	Estación 23	2.287	5,4	252	5,3	11	20	9
Estación 24	74	3,1	1.487	6,5	10	20	10	Estación 24	490	3,5	249	5,3	9	20	11
Estación 25	0	3,0	722	5,8	9	20	11	Estación 25	1.336	4,4	0	5,0	10	20	10
Estación 26	0	3,0	2.197	7,3	11	20	9	Estación 26	5.800	9,0	0	5,0	15	20	5
Estación 27	0	3,0	1.714	6,8	10	20	10	Estación 27	2.011	5,1	0	5,0	11	20	9
TOTAL	44.029	127	44.029	181	323	570	247	TOTAL	67.300	151	67.300	205	369	590	221

Figura 29: Tiempos de parada HPM 2050

Se obtienen las siguientes conclusiones:

- El tiempo de parada total de la malla será 20 segundos superior en el sentido 2 que en el sentido 1 (durante la HPM el sentido 2 es el más cargado).
- Las estaciones 13 y 16 son las que cuentan con mayores tiempos de parada. En el sentido 2 el tiempo de parada estimado en estas estaciones es superior a 40 segundos por lo que se buscarán soluciones que reduzcan el tiempo de parada de manera que el intervalo mínimo de 90 segundos no se vea comprometido.
- Debido al redondeo del tiempo de parada estimado existe un margen de tiempo de parada superior a 3 minutos por cada sentido.

Como es lógico los tiempos de parada son mayores en las estaciones de mayor demanda, especialmente en las estaciones 13 y 16 del sentido 2. Estas estaciones se encuentran ubicadas en la parte central de la línea y además de contar con un elevado número de subidas y bajadas presentan las mayores cargas máximas (tal y como se muestra en la figura 24 la carga máxima se produce en el sentido 2 en el tramo comprendido entre las estaciones 13 y 16). Esto implica

que la ocupación de los trenes en estos tramos será muy elevada lo cual puede dificultar la subida-bajada de pasajeros e incrementar los tiempos de parada estimados.

El número de viajeros subidos-bajados y las intensidades máximas de pasajeros para la HPM del año 2050 son los siguientes:

Estación	Suben Sentido 1	Bajan Sentido 1	Total Movimientos Sentido 1	Suben Sentido 2	Bajan Sentido 2	Total Movimientos Sentido 2	Total Moviemntos Estación
Estación 1	2.083	0	2.083	0	897	897	2.980
Estación 2	1.277	0	1.277	0	3.644	3.644	4.921
Estación 3	2.361	0	2.361	0	3.803	3.803	6.164
Estación 4	1.504	3	1.507	2	2.424	2.426	3.933
Estación 5	11.222	1.863	13.085	738	9.727	10.465	23.550
Estación 6	48	4	52	27	118	145	197
Estación 7	1.133	227	1.360	183	5.201	5.384	6.744
Estación 8	879	292	1.171	199	3.547	3.746	4.917
Estación 9	443	206	649	126	2.057	2.183	2.832
Estación 10	1.112	0	1.112	52	521	573	1.685
Estación 11	1.896	263	2.159	333	1.711	2.044	4.203
Estación 12	217	367	584	441	353	794	1.378
Estación 13	11.138	11.051	22.189	7.933	23.914	31.847	54.036
Estación 14	206	1.187	1.393	1.649	529	2.178	3.571
Estación 15	160	621	781	745	749	1.494	2.275
Estación 16	6.145	10.846	16.991	27.817	5.362	33.179	50.170
Estación 17	212	384	596	1.174	476	1.650	2.246
Estación 18	848	1.098	1.946	1.989	762	2.751	4.697
Estación 19	466	516	982	838	365	1.203	2.185
Estación 20	228	729	957	2.496	221	2.717	3.674
Estación 21	152	5.122	5.274	6.484	338	6.822	12.096
Estación 22	158	902	1.060	2.150	80	2.230	3.290
Estación 23	67	2.228	2.295	2.287	252	2.539	4.834
Estación 24	74	1.487	1.561	490	249	739	2.300
Estación 25	0	722	722	1.336	0	1.336	2.058
Estación 26	0	2.197	2.197	5.800	0	5.800	7.997
Estación 27	0	1.714	1.714	2.011	0	2.011	3.725
<b>TOTAL</b>	<b>44.029</b>	<b>44.029</b>	<b>88.058</b>	<b>67.300</b>	<b>67.300</b>	<b>134.600</b>	<b>222.658</b>

Tramo	Carga Sentido 1	Carga Sentido 2
Estación 1 - Estación 2	2.083	897
Estación 2 - Estación 3	3.360	4.541
Estación 3 - Estación 4	5.721	8.344
Estación 4 - Estación 5	7.222	10.766
Estación 5 - Estación 6	16.581	19.755
Estación 6 - Estación 7	16.625	19.846
Estación 7 - Estación 8	17.531	24.864
Estación 8 - Estación 9	18.118	28.212
Estación 9 - Estación 10	18.355	30.143
Estación 10 - Estación 11	19.467	30.612
Estación 11 - Estación 12	21.100	31.990
Estación 12 - Estación 13	20.950	31.902
Estación 13 - Estación 14	21.037	<b>47.883</b>
Estación 14 - Estación 15	20.056	46.763
Estación 15 - Estación 16	19.595	46.767
Estación 16 - Estación 17	14.894	24.312
Estación 17 - Estación 18	14.722	23.614
Estación 18 - Estación 19	14.472	22.387
Estación 19 - Estación 20	14.422	21.914
Estación 20 - Estación 21	13.921	19.639
Estación 21 - Estación 22	8.951	13.493
Estación 22 - Estación 23	8.207	11.423
Estación 23 - Estación 24	6.046	9.388
Estación 24 - Estación 25	4.633	9.147
Estación 25 - Estación 26	3.911	7.811
Estación 26 - Estación 27	1.714	2.011
<b>CARGA MÁXIMA</b>	<b>21.100</b>	<b>47.883</b>

Figura 30: Pasajeros subidos-bajados y carga máxima para HPM 2050

#### 4.3 TIEMPO DE MANIOBRA EN ESTACIONES TERMINALES O DE CABECERA.

Las maniobras en las estaciones terminales condicionan la capacidad de transporte de la línea. En estas estaciones es habitual invertir la marcha mediante alguna de las siguientes formas:

- Servicio por un andén (maniobra por delante de la estación)
- Servicio alternativo (maniobra por bretelle ubicada delante de la estación, requiere disponer de andén central y de un tren parado en el andén, origina intervalos irregulares).
- Servicio por dos andenes (maniobra por detrás de la estación terminal):
  - por fondo de saco 1
  - por fondo de saco 2
  - vuelta alternativa por fondo de saco

A continuación se muestran los resultados del estudio realizado para cada una de estas maniobras (el detalle del cálculo de cada maniobra puede ser consultado en el anexo 5):

Tipo de maniobra	Cuello de botella (s)	Tiempo de maniobra (s)	Capacidad máxima (trenes/h)	Capacidad recomendada (80%)
Por un andén	128	0	28	22
Por dos andenes	97	95	37	29
Alternativo con dos andenes laterales (inversión por fondo de saco)	99 (70-99)	95-99	36	29
Alternativo con andén central (inversión por delante)	103 (88-103)	0	34	27

Figura 31: Maniobras de inversión de marcha

Para el cálculo del RTT, y por tanto para el dimensionamiento de la flota necesaria, se estima un tiempo de maniobra por fondo de saco en cada estación de cabecera de **2 minutos**.

De las maniobras consideradas la más rápida (97 segundos) es dar servicio por dos andenes utilizando un único fondo de saco. Tiene una capacidad máxima de 37 trenes/hora y un tiempo de maniobra de 95 segundos.

Dar servicio utilizando alternativamente los dos fondos de saco es ligeramente más desfavorable (2 segundos más lento) por lo que se descarta el uso de esta maniobra.

Las maniobras más eficientes (tiempo de maniobra cero) son dar servicio por un andén y dar servicio alternativo con andén central. Tienen una capacidad máxima de 28 trenes/hora y 34 trenes/hora respectivamente y permiten un RTT más reducido lo que a su vez hace que el número de trenes necesario sea menor.

#### 4.4 ROUND TRIP TIME (RTT)

El tiempo que un tren necesita para dar una vuelta completa (RTT) es la suma de los tiempos de recorrido entre estaciones, los tiempos de parada y los tiempos de maniobra de inversión de marcha:

	Sentido 1	Sentido 2
T4 (s)	1.932	1.900
T. Parada (s)	570	590
T. Maniobra (s)	120	120
TOTAL (s)	2622	2610

Figura 32: Tiempos de semi-recorrido por sentido

La diferencia de tiempos de semi-recorrido entre ambos sentidos es muy pequeña (12 segundos) debido a que el mayor tiempo de parada existente en el sentido más cargado (sentido 2) se ve compensado con el mayor tiempo de recorrido entre estaciones del sentido 1 (sentido de subida).

Al ser un carrusel de trenes se considera que los tiempos de semi-recorrido de ambos sentidos han de ser iguales. Con este fin se incrementa el tiempo de semi-recorrido menor aumentando el tiempo de recorrido entre estaciones, de manera que la velocidad sea igual en ambos sentidos.

Esta estrategia tiene el atractivo de ofrecer un servicio regular, sin esperas excesivas del tren en el andén y con un menor consumo energético. Por lo tanto el RTT es de 5.244 segundos (2.622 \* 2), es decir, 87,4 minutos.

Para los casos en los que la maniobra de inversión de marcha no se realiza entrando al saco (servicio alternativo con andén central y servicio por un andén) el RTT es menor ya que el tiempo de maniobra es cero (en el caso estudiado supondría un ahorro de 4 minutos en el RTT).

Sabiendo la distancia total recorrida por el tren en una vuelta completa y el RTT se pueden calcular la velocidad comercial (no considera los tiempos de maniobra en las estaciones terminales ni los tiempos de parada en cabecera) y la velocidad de explotación:

	Maniobra de inversión de marcha	
	Por Fondo de saco	Por entrada estación (por un andén y alternativo)
Distancia recorrida (km)	53,236	52,236
RTT (minutos)	87,4	83,4
V. explotación (km/h)	36,5	37,6
V. comercial (km/h)	38,9	40,1

Figura 33: Comparativa de velocidades en función de la maniobra de inversión

A continuación se muestra la oferta de servicio necesaria para satisfacer la demanda en la que se indica el porcentaje de ocupación, el tiempo de recorrido y el número de trenes de operación necesarios (RTT/intervalo ofertado) y la flota total (se añade un 10% a la flota de operación para cubrir las necesidades derivadas del mantenimiento y la flota operacional de reserva).

Se ha tenido en cuenta que la densidad de viajeros nos supere los 6 pasajeros/m<sup>2</sup> y que el intervalo no sea superior a 5 minutos.

Año	Franja horaria	Parámetro	Requerido	Ofertado	% Ocupación	Servicio por dos andenes			Servicio alternativo con andén central			
						RTT (minutos)	Flota Operación	Flota Total	RTT (minutos)	Flota Operación	Flota Total	Ahorro flota total
2020	HPM	Capacidad de transporte (pphs)	27.257	28.800	95%	87,4	35	39	83,4	34	38	1
		Circulaciones por hora y sentido (viajes/h)	22,7	24,0								
		Headway (min)	2,6	2,5								
	HPT	Capacidad de transporte (pphs)	16.517	18.000	92%							
		Circulaciones por hora y sentido (viajes/h)	13,8	15,0								
		Headway (min)	4,4	4,0								
	HV	Capacidad de transporte (pphs)	10.378	14.400	72%							
		Circulaciones por hora y sentido (viajes/h)	8,6	12,0								
		Headway (min)	6,9	5,0								
2050	HPM	Capacidad de transporte (pphs)	47.883	48.000	100%	87,4	59	65	83,4	56	62	3
		Circulaciones por hora y sentido (viajes/h)	39,9	40,0								
		Headway (min)	1,5	1,5								
	HPT	Capacidad de transporte (pphs)	34.484	36.000	96%							
		Circulaciones por hora y sentido (viajes/h)	28,7	30,0								
		Headway (min)	2,1	2,0								
	HV	Capacidad de transporte (pphs)	18.808	20.571	91%							
		Circulaciones por hora y sentido (viajes/h)	15,7	17,1								
		Headway (min)	3,8	3,5								

Figura 34: RTT y flota necesaria por año y franja horaria

En caso de disponerse de andenes centrales se puede dar servicio alternativo en las cabeceras, lo que supone un ahorro estimado en el RTT de 240 segundos y por tanto un ligero ahorro de flota. Para el año 2020 se necesitaría un tren menos y para el año 2050 tres trenes menos.

Para el dimensionamiento del depósito ha de considerarse que debe disponer de una capacidad final para alrededor de 65 trenes.

#### 4.5 PRODUCCIÓN FERROVIARIA

Conociendo el número de circulaciones ofertadas por cada franja horaria y año considerado y la longitud de la línea en explotación se calcula el número de kilómetros recorridos con viajeros a lo largo del año.

Además se realizan una serie de movimientos sin viajeros (tren explorador, posicionamiento para apertura de servicio, etc.) que hay que tener en cuenta. Para el cálculo se estima que estos movimientos suponen un 5% de los kilómetros realizados con viajeros.

- Producción ferroviaria para el año 2020:

	Días	Circulaciones / Sentido	Circulaciones / Día	Total
Laborables	302	234	468	141.336
Domingos y Festivos	63	204	408	25.704
TOTAL CIRCULACIONES / AÑO				167.040
Longitud itinerario (km)				26.118
Kilómetros con viajeros/año				4.362.751
Kilómetros sin viajeros/año (5%)				218.138
TOTAL KM/AÑO				4.580.888

Figura 35: Producción año 2020

Como la flota total para el año 2020 es de 39 trenes, cada uno realizaría una media de 117.459 km.

- Producción ferroviaria para el año 2050:

	Días	Circulaciones / Sentido	Circulaciones / Día	Total
Laborables	302	362	725	218.829
Domingos y Festivos	63	291	581	36.628
TOTAL CIRCULACIONES / AÑO				255.457
Longitud itinerario (km)				26.118
Kilómetros con viajeros/año				6.672.036
Kilómetros sin viajeros/año (5%)				333.602
TOTAL KM/AÑO				7.005.638

Figura 36: Producción año 2050

Como la flota total para el año 2050 es de 65 trenes cada uno realizaría una media de 107.779 km.

Hay que tener en cuenta que durante la operación en muchas ocasiones los encierres de material están condicionados por la programación que se realiza para su mantenimiento desde el departamento correspondiente. Es decir, hay que hacer coincidir los trenes que se encierran con la programación de trenes concretos demandada por mantenimiento. El UTO simplifica este proceso ya que en las líneas convencionales además es necesario ajustarlo con los turnos del personal de conducción y sus lugares de finalización de servicio.

En la planificación de la producción ferroviaria de los trenes se tendrá en cuenta este hecho y se programaran desfases de kilometraje entre unidades para obtener ventanas de mantenimiento.

## 4.6 CONSUMO DE ENERGÍA

### 4.6.1 Tracción

El consumo energético para la tracción es obtenido mediante simulación teniendo en cuenta un nivel de ocupación medio de 3 pasajeros por metro cuadrado, una velocidad máxima de operación de 80 km/h, un consumo de servicios auxiliares de 270 kW y una longitud de la línea de 26.618 m.

A continuación se muestra el consumo medio energético de tracción:

	Sentido 1	Sentido 2
Energía consumida (kWh/tren*km)	36,3	23,6
Energía regenerada (kWh/tren*km)	9,1	13,3
Consumo medio (kWh/tren*km)	18,7	
Consumo medio (kWh/coche*km)	3,1	

Figura 37: Consumo medio energético de tracción [20]

Como la línea discurre casi de manera constante por una pendiente el consumo en el sentido de subida (36,29 kWh/t\*km) es mayor que en la bajada (23,6 kWh/t\*km). Sin embargo, la pendiente favorece la disminución del consumo energético aprovechando la energía regenerada durante el proceso de frenado de los trenes que bajan para la alimentación de los trenes que suben, obteniéndose un consumo medio de 18,7kWh/tren\*km (3,1 kWh/coche\*km) que permite estimar el coste económico de la energía destinada a la tracción:

	Total km/año	Consumo medio (kWh/tren*km)	Consumo total (GWh)	Coste kWh (€/kWh)	Coste energía consumida (€)	Término fijo de potencia (€)	Coste total (€)
Año 2020	4.580.888	18,7	85,7	0,1040	8.908.911 €	1.336.337 €	10.245.248 €
Año 2050	7.005.638	18,7	131	0,1884	24.679.013 €	3.701.852 €	28.380.865 €

Figura 38: Consumo energético de tracción

Se ha considerado que el término fijo de potencia supone un coste equivalente al 15% del coste de la energía consumida. El coste del kWh para el año 2020 se ha estimado según el coste medio indicado en el documento “Plan de ahorro energético de Metro de Madrid [16]”.

Para el coste del kWh del año 2050 se ha considerado un incremento anual del 2% sobre el coste del kWh estimado para el año 2020.

#### 4.6.2 Servicios auxiliares

El consumo de energía para auxiliares se estima en un 30% del consumo calculado para la tracción:

	Consumo total (GWh)	Coste kWh (€/kWh)	Coste energía consumida (€)	Término fijo de potencia (€)	Coste total (€)
Año 2020	25,7	0,1040	2.672.673 €	400.901 €	3.073.574 €
Año 2050	39,3	0,1884	7.403.704 €	1.110.556 €	8.514.260 €

Figura 39: Consumo energético de auxiliares

### 4.6.3 Consumo total

El consumo total es la suma del consumo de energía para la tracción más el consumo de auxiliares:

	Consumo total (GWh)	Coste kWh (€/kWh)	Coste energía consumida (€)	Termino fijo de potencia (€)	Coste total (€)
Año 2020	111,4	0,1040	11.581.584 €	1.737.238 €	13.318.822 €
Año 2050	170,3	0,1884	32.082.717 €	4.812.408 €	36.895.125 €

Figura 40: Consumo energético total

A la vista de los resultados obtenidos se concluye que el consumo energético es una de las partidas más relevantes del presupuesto de explotación de un ferrocarril metropolitano por lo que es conveniente conocer sus particularidades.

La alimentación de la línea se realiza a 1500 V en corriente continua (DC). La alimentación en DC hace que los costes de primera implantación sean más elevados que los de un sistema en corriente alterna (AC). Esto se debe principalmente a que en DC se producen mayores caídas de tensión que hacen necesario un número mucho mayor de subestaciones eléctricas (S/E) que en AC, en un orden de magnitud de una S/E cada 3 km en DC y de una S/E cada 50 km en AC. En DC las tensiones son menores lo cual implica mayores intensidades de trabajo a igualdad de potencia que en AC y se requiere por lo tanto mayores secciones en los cables.

Los ferrocarriles metropolitanos suelen alimentarse en corriente continua y con menores tensiones (hasta 1.500 V) que los ferrocarriles convencionales, debido a limitaciones de aislamientos y a condicionantes históricos.

Para determinar las necesidades de potencia y la distancia optima entre subestaciones hay que tener en cuenta las características del material móvil, de la línea aérea y de la vía, el perfil de la línea (gradientes, curvas, etc.) y los niveles de servicio a prestar (intervalos, velocidades máximas, etc.).

Además es necesario determinar la configuración a emplear para conectar las subestaciones al tramo de catenaria que alimentan:

- En T: el tramo de catenaria alimentado por la S/E esta asilado del contiguo mediante un aislador de línea aérea y por un seccionador motorizado o manual normalmente abierto.
- En  $\pi$ : En esta configuración el seccionador se encuentra normalmente cerrado, lo que implica que los dos positivos se encuentren en paralelo y cada S/E aporte energía según

lo próxima que se encuentre al tren que esta traccionando en el tramo entre ambas, lo cual implica en mejor reparto de cargas y una menor caída de tensión en zonas extremas.

La energía es recibida por la línea metropolitana en estudio en las subestaciones de alta tensión a 60 kV en las que es transformada a 20kV, desde donde se alimenta a las subestaciones transformadoras rectificadoras que la transforman y rectifican a 1500 V DC para el suministro al sistema de tracción eléctrica.

Una vez que la energía ha sufrido las transformaciones necesarias para llegar al tren de una forma adecuada su consumo es empleado en vencer las resistencias al avance, en el consumo de auxiliares y en transformarse en energía cinética y potencial.

Donde realmente se pueden producir pérdidas energéticas considerables es en el frenado no regenerativo del tren, que quema en resistencias y transforma en calor la energía que tanto cuesta transformar y transportar desde su generación al vehículo.

Por tanto es necesario maximizar la recuperación de energía en el frenado, haciendo que los motores de tracción actúen como generadores transformando parte de la energía cinética del tren en energía eléctrica que es devuelta a la red y puede ser consumida por otro tren que este demandando energía en ese momento en el mismo sector de catenaria que el tren que frena.

Mediante el frenado regenerativo se pueden recuperar cantidades importantes de la energía tomada de la red. El resto de la energía no recuperada se pierde en las resistencias durante el frenado. Para maximizar la recuperación de energía es necesario tener un elevado número de circulaciones, elevadas tensiones de trabajo (a mayor tensión, mayor distancia y menos pérdidas. Es más fácil que se pueda recuperar energía) y amplios sectores de tracción.

Hay que considerar que las distancias entre estaciones en un ferrocarril metropolitano son pequeñas lo que implica numerosos arranques y frenados. Para maximizar la recuperación de energía es muy conveniente el empleo de un horario sincronizado que coordine el arranque de los vehículos con el frenado de otros mientras que estos se encuentran en el mismo sector de tracción.

Para la conseguir una operación eficiente de la línea es necesario considerar las siguientes medidas de eficiencia energética:

- Optimización del consumo de tracción y aumento de la regeneración

- Optimización de las curvas de tracción del material rodante adoptando curvas óptimas en cuanto a rendimiento y consumo asociado, modificando el régimen cinemático, y compensando el posible ligero aumento en el RTT ocasionado mediante los avanzados sistemas de regulación implantados para la explotación GOA4. Unos segundos de aumento en el RTT pueden suponer ahorros del 20% en el consumo energético.
- Instalación de compensaciones de línea y carriles para conseguir una mayor regeneración de la energía. Las compensaciones se realizan con cables aislados que unen tanto las catenarias de ambas vías (compensaciones de positivo) como los carriles de ambas vías (compensaciones entre negativos). Además del aumento del aprovechamiento de la energía regenerada, las compensaciones de línea y carriles:
  - Consiguen mejores repartos de corrientes. Así, en el caso de que haya varios trenes en un mismo sector, estas compensaciones favorecen que haya un reparto más uniforme en la distribución de corrientes y evita sobrecargas de la línea.
  - Al aumentar la sección efectiva, reducen las pérdidas en la línea (puesto que baja la resistencia efectiva de la línea).
- Operación eficiente de la línea en horas valle mediante el empleo de un sistema de conducción económica que maximice el ahorro energético mediante la aplicación de órdenes de deriva, velocidad de remotor y parábolas de freno reducidas, gestionando los tiempos de recorrido y de parada en estación.
- Empleo de subestaciones eléctricas reversibles.
- Empleo de alumbrado tipo LED en todo el material rodante e instalaciones (estaciones, depósito, oficinas etc.).
- Optimizar el funcionamiento de los equipos de climatización manteniendo un nivel térmico aceptable.
- Desconexión total o parcial de los trenes en talleres y sin servicio.
- Diseño eficiente de los trenes y del trazado, considerando el funcionamiento conjunto de ambos y no solo el de cada uno de forma independiente.
- Reducción de la masa y de las masas rotativas del material móvil.
- Mejorar el rendimiento de los servicios auxiliares de los trenes.
- Diseño de horarios sincronizados para la optimización energética.
- Minimizar recorridos en vacío (sin pasajeros).

## 4.7 ESTUDIO DE CAPACIDAD

El intervalo de paso de trenes para satisfacer la demanda de la HPM del año 2050 debe ser de 90 segundos. Para ello se dispone de la tecnología más moderna de seguimiento de trenes (CBTC y UTO). En un sistema CBTC la seguridad (distancia de frenado de emergencia) reside en el modo de parametrizar la curva de frenado de emergencia calculada por el tren (al igual que en un sistema de distancia objetivo) y el cantonamiento de la vía no tiene ninguna influencia sobre el intervalo. Sin embargo, la capacidad máxima de la línea también queda condicionada por las prestaciones del material rodante y por el trazado de la línea. Por lo tanto es necesario validar si la capacidad de transporte de la línea es suficiente para alcanzar los objetivos marcados y en caso contrario identificar las restricciones que lo impiden para encontrar una solución. Para ello es necesario analizar el intervalo de seguimiento y el intervalo en cabeceras.

### 4.7.1 Intervalo de seguimiento

El estudio del intervalo de seguimiento consiste en determinar si dos trenes consecutivos entre cada dos estaciones pueden circular con una separación de al menos 90 segundos, considerando los tiempos calculados de recorrido entre estaciones y de parada.

El intervalo mínimo dinámico es el tiempo mínimo de separación entre dos trenes consecutivos sin que el tren perseguidor se vea perturbado por la marcha del primero, con tiempos de parada nulos. Depende de las prestaciones del sistema de señalización. Para el estudio se considera un intervalo mínimo dinámico de 50 segundos en todas las interestaciones.

El intervalo mínimo de seguimiento es la suma del intervalo mínimo dinámico más el tiempo de parada en estación.

El intervalo operativo es el intervalo objetivo a alcanzar (90 segundos).

El margen es la diferencia de tiempo entre el intervalo operativo y el intervalo mínimo de seguimiento. Si la diferencia es positiva se cumple con el intervalo objetivo y si la diferencia es negativa el tiempo empleado es superior al objetivo y es necesario buscar una solución.

Sentido 2						
Interestación	Distancia (m)	Tiempo de parada en estación destino (s)	Intervalo mínimo dinámico (s)	Intervalo mínimo de seguimiento (s)	Intervalo operativo (s)	Margen (s)
Estación 1 - Estación 2	1.445,21	20	50	70	90	20,0
Estación 2 - Estación 3	1.117,35	20	50	70	90	20,0
Estación 3 - Estación 4	1.000,61	20	50	70	90	20,0
Estación 4 - Estación 5	867,70	20	50	70	90	20,0
Estación 5 - Estación 6	1.081,83	20	50	70	90	20,0
Estación 6 - Estación 7	941,37	20	50	70	90	20,0
Estación 7 - Estación 8	873,20	20	50	70	90	20,0
Estación 8 - Estación 9	873,23	20	50	70	90	20,0
Estación 9 - Estación 10	843,97	20	50	70	90	20,0
Estación 10 - Estación 11	872,28	20	50	70	90	20,0
Estación 11 - Estación 12	933,64	20	50	70	90	20,0
Estación 12 - Estación 13	707,77	45	50	95	90	-5,0
Estación 13 - Estación 14	1.180,16	20	50	70	90	20,0
Estación 14 - Estación 15	790,45	20	50	70	90	20,0
Estación 15 - Estación 16	840,94	45	50	95	90	-5,0
Estación 16 - Estación 17	949,23	20	50	70	90	20,0
Estación 17 - Estación 18	851,84	20	50	70	90	20,0
Estación 18 - Estación 19	828,67	20	50	70	90	20,0
Estación 19 - Estación 20	1.896,36	20	50	70	90	20,0
Estación 20 - Estación 21	1.059,49	20	50	70	90	20,0
Estación 21 - Estación 22	1.049,36	20	50	70	90	20,0
Estación 22 - Estación 23	1.237,25	20	50	70	90	20,0
Estación 23 - Estación 24	805,79	20	50	70	90	20,0
Estación 24 - Estación 25	1.014,99	20	50	70	90	20,0
Estación 25 - Estación 26	1.095,52	20	50	70	90	20,0
Estación 26 - Estación 27	960,01	20	50	70	90	20,0

Figura 41: Estudio capacidad intervalo mínimo de seguimiento

Se observan dos intervalos mínimos de seguimiento superiores a 90 segundos que son ocasionados por los elevados tiempos de parada estimados para las estaciones 13 y 16.

Una posible solución para mejorar la eficiencia y no comprometer la capacidad de la línea es mejorar el intervalo de seguimiento de estas dos estaciones reduciendo el tiempo de parada necesario dotando de **tres andenes** (un andén central y dos andenes laterales) a estas estaciones, de manera que se disponga de 48 puertas (en lugar de 24) para la subida-bajada de viajeros. Además es conveniente disponer de personal auxiliar que gestione con agilidad y eficacia los flujos de viajeros. Con estas dos medidas los intervalos mínimos de seguimiento cumplirán con el intervalo operativo de la línea.

Otras posibles medidas que reducirían el tiempo de subida y bajada de pasajeros y por tanto mejorarían el intervalo mínimo de seguimiento son las mencionadas con anterioridad en el apartado de tiempos de parada.

#### 4.7.2 Intervalo en cabeceras.

Analizando la capacidad de cada maniobra con el número de trenes/hora ofertados para cada franja horaria y año considerado se obtiene el siguiente resultado (ver detalles de cálculo en el anexo 5):

Tipo de maniobra	Cuello de botella (s)	Tiempo de maniobra (s)	Capacidad máxima (trenes/h)	Capacidad recomendada (80%)	Trenes/hora año 2020			Trenes/hora año 2050		
					HPM	HPT	HV	HPM	HPT	HV
Por dos andenes	97	95	37	29	24	15	12	40	30	17,1
Alternativo con dos andenes laterales (inversión por fondo de saco)	99 (70-99)	95-99	36	29	24	15	12	40	30	17,1
Alternativo con andén central (inversión por delante)	103 (88-103)	0	34	27	24	15	12	40	30	17,1
Por un andén	128	0	28	22	24	15	12	40	30	17,1

Figura 42: Comparativa capacidad de maniobra en cabecera- niveles de servicio

Se marcan con fondo verde los casos en los que la capacidad de la maniobra es adecuada para el nivel de servicio previsto en la franja horaria y año considerado, en naranja cuando se supera el 80% de la capacidad de la maniobra y en rojo cuando la capacidad es insuficiente.

Se observa que bajo las condiciones actuales la capacidad de maniobra en las estaciones terminales es insuficiente para cubrir la oferta de servicio prevista para la HPM del año 2050 ya que la terminal a su máxima capacidad es capaz de permitir 37 trenes/hora y se necesita ofertar 40 trenes/h.

Se procede a buscar una solución que permita aumentar la capacidad de la cabecera hasta el valor requerido.

Al aumentar la frecuencia se somete a la cabecera al límite de su capacidad, lo que hace que la bretelle del saco no pueda moverse hasta que la unidad perseguidora se detiene en la estación, al estar el aparato de vía incluido en su distancia de seguridad de frenado, lo cual ralentiza la maniobra.

Se procede a estudiar el **desplazamiento de la bretelle** del fondo de saco hasta una distancia tal que permita maniobrar el aparato de vía con independencia de la posición de la unidad perseguidora. Para determinar la separación necesaria se calcula la distancia de frenado requerida para una velocidad de 45 km/h y una deceleración de  $1\text{m/s}^2$  (aunque en emergencia la desaceleración máxima es de entre 1,3 y  $1,5\text{m/s}^2$  se usa el valor de la deceleración mínima en frenado eléctrico regenerativo servicio de  $1\text{m/s}^2$ ). Se toma como punto de inicio de la frenada el piñón de salida al saco de A2. El resultado es de 78 metros. Además se añaden 10 metros

adicionales desde el punto de parada calculado al inicio del aparato de vía del saco por lo que la distancia de separación necesaria entre el piñón de salida al saco y el inicio de la bretelle se estima en 88 metros.

Teniendo en cuenta que la longitud de la bretelle del saco es de 52 metros, que se añaden otros 10 metros adicionales entre el punto de parada de la maniobra y el inicio del aparato y los 107 metros de longitud del tren la distancia total recorrida para realizar la maniobra es de 257 metros.

Entre el tren que realiza la maniobra y el final del saco queda una distancia de 123 metros que se considera insuficiente para el estacionamiento de trenes mientras se realiza la maniobra por el fondo de saco ya que supondría una limitación de velocidad. Se podrían estacionar trenes en el saco fuera de las horas punta en las que la maniobra de inversión se realice por delante de la estación (servicio por un andén o servicio alternativo con andén central).

Para desplazar la bretelle y dejar el saco útil se podría prolongar el saco o reducir la velocidad de entrada en la estación y acercar la bretelle en consecuencia. Es necesario considerar que los trenes de 7 coches tendrían una longitud de 125 metros.

Para disminuir el tiempo de maniobra se puede aumentar la velocidad de paso por la vía directa. En la distancia recorrida por el tren desde el fondo de saco hasta el punto de parada en la estación se podría alcanzar una velocidad de hasta 60 km/h. Se estudia la reducción de tiempo que se conseguiría por franjas de 10 km/h y se concluye que la velocidad óptima es de 40 km/h.

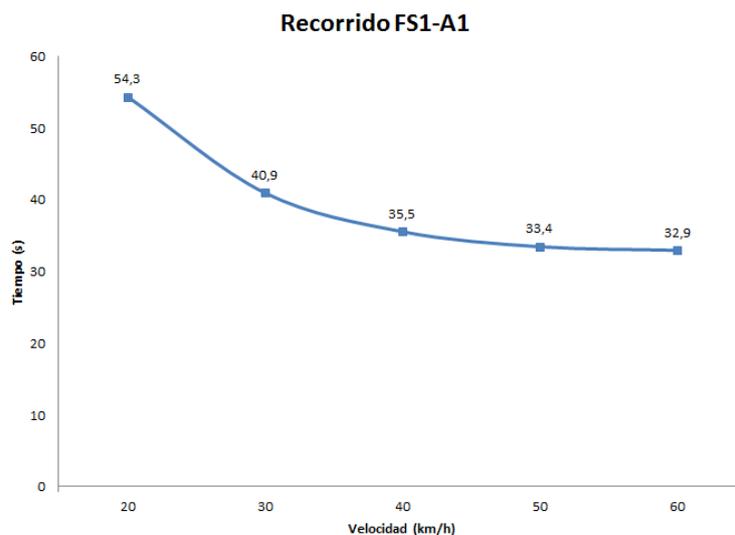
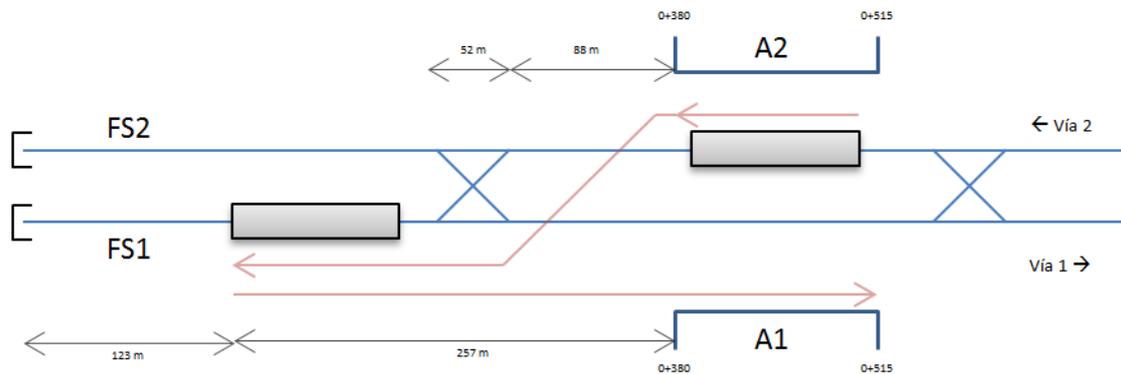


Figura 43: Tiempo de recorrido FS1-A1 en función de la velocidad máxima

Se procede a realizar el estudio para el escenario con 6 coches considerando una aceleración y deceleración media de  $1 \text{ m/s}^2$ , una velocidad máxima de 30 km/h por vía desviada y de 40 km/h por la vía directa del aparato. Los intervalos obtenidos se redondean al número entero superior (hay que tener en cuenta que la aceleración no es constante y disminuye con la velocidad, por lo que los tiempos serán ligeramente más desfavorables que los obtenidos mediante las ecuaciones del MRUA).

Inversión de marcha por un único fondo de saco (FS1):



Evento	Descripción	Tiempo parcial (s)	I. Salida A2 (s)	T. maniobra (s)
a	Tiempo de salida UT1 de A2 y llegada a FS1	40,9	40,9	40,9
b	Tiempo que tarda en llegar la UT perseguidora (UT2) a A2	9,1	50,0	
c	Tiempo de parada UT2 en A2	20	70,0	
d	Tiempo de espera de UT2 en A2 hasta UT1 libera bretelle	6,7	76,7	
e	Tiempo maniobra aguja bretelle a directa y establecer itinerario	9		49,9
f	Tiempo inversión de marcha UT1 en FS1	6		55,9
g	Tiempo desde salida de UT1 en FS1 hasta que libera la bretelle	20,8		76,7
h	Tiempo de la UT1 desde que libera la bretelle hasta llegar a A1	14,7		91,4
i	Tiempo maniobra aguja bretelle a desviada y establecer itinerario	9	85,7	

Figura 44: Maniobra de inversión por FS1 (bretelle desplazada 88 m)

Se obtienen las siguientes conclusiones:

- Intervalo de salida-salida (cuello de botella): 86 s
- Intervalo de maniobra: 92 s
- Capacidad máxima:  $3600/86 = 41$  trenes/hora
- Capacidad UIC [24] (80% del valor de capacidad máxima): 33 trenes/hora

Mediante esta maniobra se pueden ofrecer intervalos de 86 segundos alcanzándose los niveles de servicio previstos para la HPM del año 2050 (40 trenes/hora), apurando la capacidad máxima de maniobra de la cabecera. Con un tiempo de parada de 20 segundos en A2 el tren que está en

la estación tiene que esperar 15,7 segundos adicionales (6,7 segundos hasta que el tren precedente libera la bertelle del saco y 9 segundos más hasta que se le hace la maniobra para entrar al saco).

Para evitar que el tren que llega a A2 tenga que esperar 6,7 segundos a que el precedente libere la bretelle se podrían utilizar los dos fondos de saco alternativamente para hacer la maniobra. A continuación se analiza en detalle esta posibilidad. El primer tren (UT1) realiza la maniobra por FS1 al igual que en el caso anterior. Para que UT2 no tenga que esperar 6,7 segundos a que UT1 libere la bretelle y se le haga la maniobra al desvío para entrar en FS1 se hace la maniobra por FS2 en cuanto transcurren los 20 de segundos previstos de tiempo de parada. Por la vía directa a FS2 se considera una velocidad máxima de 40 km/h.

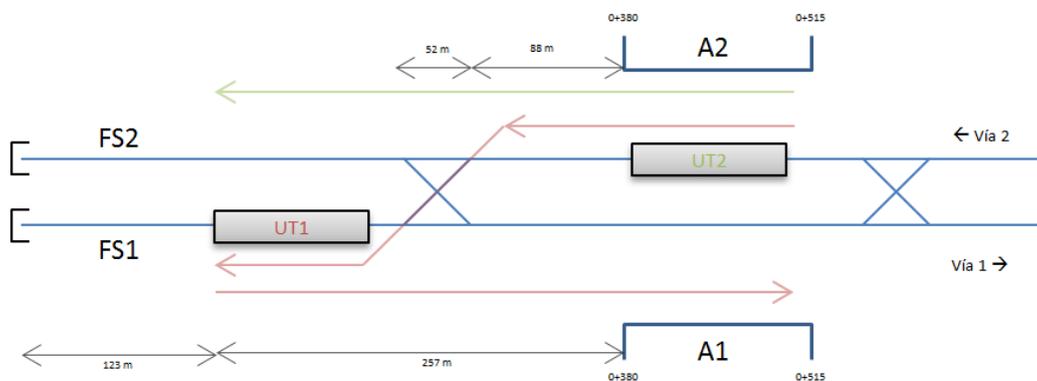


Figura 45: Maniobra de inversión alternativa por FS1 y FS2. Paso 1 (bretelle desplazada).

UT3 llega a A2 y ha de esperar a que UT2 libere la bretelle y se le haga la maniobra a FS1, caso similar al de realizar la maniobra por un solo fondo de saco. Sin embargo en este caso tiene que esperar 1,8 segundos menos (4,9 segundos hasta que el tren precedente libera la bertelle del saco y 9 segundos más hasta que se le hace la maniobra para entrar al saco).

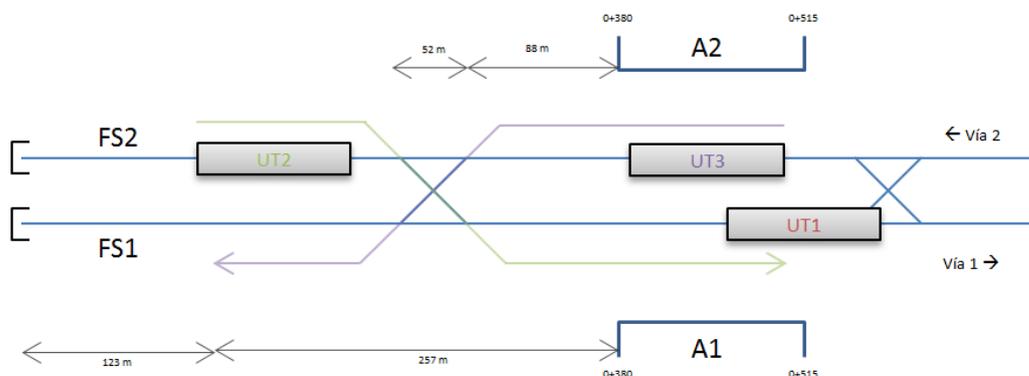


Figura 46: Maniobra de inversión alternativa por FS1 y FS2. Paso 2 (bretelle desplazada).

UT3 llega a A2 y se repite el ciclo:

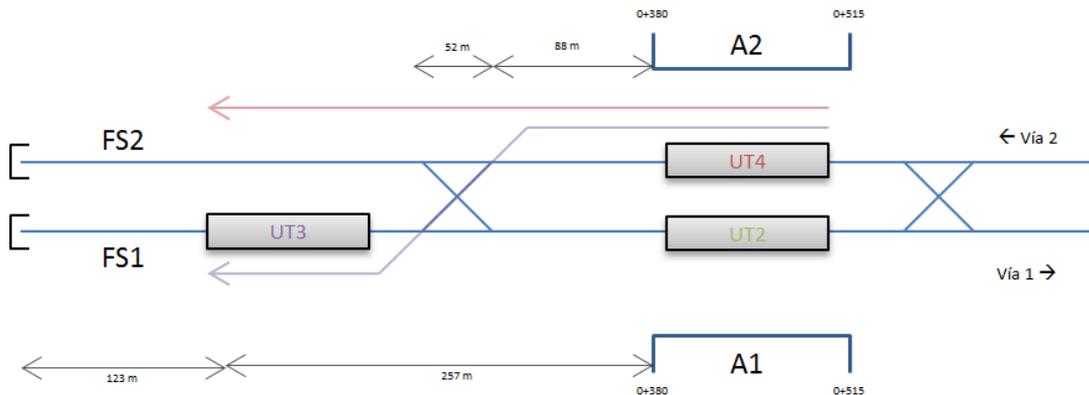


Figura 47: Maniobra de inversión alternativa por FS1 y FS2. Paso 3 (bretelle desplazada).

Evento	Descripción	Tiempo parcial (s)	UT1		UT2		UT3		UT4	
			T. maniobra (s)	I. Salida A2 (s)	T. maniobra (s)	I. Salida A2 (s)	T. maniobra (s)	I. Salida A2 (s)	T. maniobra (s)	I. Salida A2 (s)
a	Tiempo desde salida UT1 de A2 a llegada a FS1	40,9	40,9							
b	Tiempo maniobra aguja bretelle a recta y establecer itinerario	9	49,9							
c	Tiempo cambio de cabina de mando UT1 en FS1	6	55,9							
d	Tiempo desde salida de UT1 en FS1 hasta que libera bretelle (por directa)	20,8	76,7							
e	Tiempo de la UT1 desde que libera la bretelle hasta llegar a A1 (por directa)	14,7	91,4							
f	Tiempo que tarda en llegar la UT perseguidora (UT2) a A2	50		50						
g	Tiempo de parada de UT2 en A2 hasta la salida de A2	20		70						
h	Tiempo desde salida UT2 de A2 hasta llegada a FS2	35,5			35,5					
i	Tiempo maniobra aguja bretelle a desviada a A1 y establecer itinerario	9			44,5					
j	Tiempo cambio de cabina de mando UT2 en FS2	6			50,5					
k	Tiempo desde salida de UT2 en FS2 hasta que libera bretelle (por desviada)	24,4			74,9					
l	Tiempo de la UT2 desde liberar la bretelle a llegar a A1 (por desviada)	16,4			91,3					
m	Tiempo que tarda en llegar la UT perseguidora (UT3) a A2	50				50				
n	Tiempo de parada de UT3 en A2	20				70				
ñ	Tiempo de espera desde que UT3 puede salir hasta que UT2 libera bretelle	4,9				74,9				
o	Tiempo maniobra aguja bretelle a desviada FS1 y establecer itinerario	9				83,9				
p	Tiempo desde salida UT3 de A2 hasta la llegada a FS1	40,9				40,9				
q	Tiempo maniobra aguja bretelle a recta y establecer itinerario	9				49,9				
r	Tiempo cambio de cabina de mando UT3 en FS1	6				55,9				
s	Tiempo desde salida de UT3 en FS1 hasta que libera bretelle (por directa)	20,8				76,7				
t	Tiempo de la UT3 desde que libera la bretelle hasta llegar a A1 (por directa)	14,7				91,4	50			
u	Tiempo que tarda en llegar la UT perseguidora (UT4) a A2	50						50		
v	Tiempo de parada de UT4 en A2 hasta la salida de A2	20							70	
w	Tiempo desde salida UT4 de A2 hasta llegada a FS2	35,5								35,5
x	Tiempo maniobra aguja bretelle a desviada a A1 y establecer itinerario	9								44,5
y	Tiempo cambio de cabina de mando UT4 en FS2	6								50,5
z	Tiempo desde salida de UT4 en FS2 hasta que libera bretelle (por desviada)	24,4								74,9
aa	Tiempo de la UT4 desde liberar la bretelle a llegar a A1 (por desviada)	16,4								91,3
										91,3

Figura 48: Maniobra de inversión alternativa por FS1 y FS2 (bretelle desplazada)

El tren que usa el FS2 para invertir la marcha emplea un tiempo de 74,9 segundos (eventos v, w, x, y) hasta que libera la bretelle y 9 segundos hasta que hace la maniobra al aparato para permitir que el tren siguiente pueda entrar en FS1, lo que da lugar al intervalo de 83,9 segundos. En este caso, con un tiempo de parada de 20 segundos en A2 el tren que está en la estación tiene que esperar 13,9 segundos adicionales (4,9 segundos hasta que el tren precedente libera la bretelle del saco y 9 segundos más hasta que se le hace la maniobra para entrar al saco), es decir, 1,8 segundos menos que con la maniobra por un solo fondo de saco.

Se obtienen las siguientes conclusiones:

- Intervalo de salida-salida (cuello de botella): 84 s (70-84 s)
- Intervalo de maniobra: 92 s
- Capacidad máxima: 42 trenes/hora
- Capacidad UIC [24] (80% del valor de capacidad máxima): 34 trenes/hora

Mediante esta maniobra se pueden ofrecer intervalos alternativos de 70 y 84 segundos, siendo el intervalo de **84 segundos** el que limita la capacidad de la cabecera. Se mejora en 2 segundos con respecto a la maniobra por un solo fondo de saco y se obtiene **un tren/hora más** de capacidad máxima.

Esta maniobra es la que mayor capacidad permite de todas las maniobras estudiadas por lo que es la más adecuada para cuando la línea esté funcionando al límite de su capacidad.

Tipo de maniobra	Cuello de botella (s)	Tiempo de maniobra (s)	Capacidad máxima (trenes/h)	Capacidad recomendada (80%)	Trenes/hora año 2020			Trenes/hora año 2050		
					HPM	HPT	HV	HPM	HPT	HV
Por dos andenes alternativamente (bretelle desplazada 88 metros)	84 (70-84)	92	42	34	24	15	12	40	30	17,1
Por dos andenes (bretelle desplazada 88 metros)	86	92	41	33	24	15	12	40	30	17,1
Por dos andenes	97	95	37	29	24	15	12	40	30	17,1
Alternativo con andén central (inversión por delante)	103 (88-103)	0	34	27	24	15	12	40	30	17,1
Por un andén	128	0	28	22	24	15	12	40	30	17,1

Figura 49: Capacidad de maniobra en cabecera- niveles de servicio (con bretelle desplazada).

### Conclusiones:

La maniobra por un andén tiene una capacidad máxima de 28 trenes/hora (22 trenes/hora para disponer de un margen adecuado) por lo que para todas las franjas horarias de 2020 se podría utilizar esta maniobra (durante la HPM se dispondría de un margen de 4 trenes/hora por lo que podría ser necesario dar servicio por dos andenes). Esta maniobra es la más eficiente al permitir invertir la marcha sin aumentar el RTT y por tanto reducir los coches\*km realizados y el número de trenes necesarios (para 2020 se ahorrarían más de 500.000 coches\*km y un tren).

Por encima de los 28 trenes/hora es necesario realizar otro tipo de maniobra. Para dar continuidad a la estrategia de invertir la marcha por delante de la estación se necesitarían cabeceras con andén central para dar servicio alternativo. Sin embargo esta configuración no



tiene una capacidad suficiente para los niveles de servicio de la HPM del año 2050 por lo que el incremento del coste en obra civil que supone esta maniobra podría no estar justificado. Durante el tiempo que se realizase esta maniobra se ahorraría en coches\*km, consumo de energía y material móvil. Sin embargo, el ahorro de material móvil sería temporal al tener que verse incrementado para realizar la maniobra por el fondo de saco una vez agotada la capacidad. Fuera de la HPM se podría seguir dando un servicio más eficiente (reducción de coches\*km) dando un servicio alternativo con andén central por lo que sería necesario estudiar en profundidad los costes de obra civil y los ahorros obtenidos a lo largo de toda la explotación de la línea asociados a esta maniobra.

En la búsqueda de una solución que permitiera aumentar la capacidad en las cabeceras se ha considerado desplazar la bretelle del saco con el fin de poder moverla con independencia de la posición del tren de A2.

Se ha considerado que ha de estar separada una distancia mínima que permitiera frenar a un tren que ha rebasado la estación y comienza a frenar en el piñón de salida de A2 con sentido hacia el saco a una velocidad de 45 km/h con una deceleración de  $1 \text{ m/s}^2$  (aunque en emergencia la desaceleración máxima es de entre 1,3 y  $1,5 \text{ m/s}^2$ ). El resultado del cálculo es una distancia de 78 metros a la cual se le añaden 10 metros adicionales para separar la bretelle del punto de parada lo que supone una distancia de 88 metros entre la bretelle y el piñón de la estación.

Con el fin de maximizar la capacidad de la maniobra además se ha considerado una velocidad máxima de paso de 40 km/h por vía directa y de 30 km/h por vía desviada. El equipo de señalización de la futura línea deberá validar los resultados obtenidos y la fiabilidad del sistema planteado.

Mediante el empleo de estas medidas y dando servicio alternativamente por ambos fondos de saco se incrementa la capacidad de maniobra en 5 trenes/hora (antes de desplazar la bretelle la capacidad máxima era de 37 trenes/hora y se obtenía dando servicio por dos andenes) alcanzándose una capacidad máxima de 42 trenes/hora, lo que permite satisfacer el nivel de servicio de la HPM de 2050 (40 trenes/hora) con un pequeño margen (2 trenes/hora).

#### **4.8 ESTUDIO PARA EL ESTABLECIMIENTO DE BUCLES.**

Es habitual que las explotaciones ferroviarias metropolitanas se enfrenten al hecho de tener que dimensionar su flota para absorber la HPM existiendo grandes diferencias entre las necesidades de flota para esta franja horaria y el resto del día lo cual genera ineficiencias significativas.

Como se ha visto en el estudio de demanda las intensidades máximas se alcanzan en el tramo central de la línea. Con el fin de optimizar la operación se procede a considerar la viabilidad del empleo de bucles mediante el estudio de las densidades que tienen lugar en cada tramo para la HPM de 2020.

La operación con bucles permite un mejor aprovechamiento del material rodante, un menor recorrido de kilómetros anuales y un incremento del índice de ocupación de vehículos en la zona inicialmente menos cargada. Sin embargo, tiene la desventaja de aumentar el tiempo de espera en andén de los viajeros del tramo menos cargado.

La densidad (pasajeros/m<sup>2</sup>) queda definida por el número de pasajeros/hora que viajan en un tramo y el número de trenes/hora que se están ofertando en dicho tramo. Para el cálculo se considera que cada tren dispone de 150 plazas sentadas y 1050 plazas de pie (a una densidad de 6 pasajeros/m<sup>2</sup>). En el caso de que las plazas sentadas ofertadas sean superiores al número de pasajeros que viajan (quedan plazas sentadas disponibles) la densidad se considera cero.

El sentido 2 es el que mayor carga presenta (los viajeros bajan según el perfil longitudinal) llegando a alcanzar densidades de 5,6 pasajeros/m<sup>2</sup> en la interestación 15-16 (tramo central de la línea).

Tramo	Carga Sentido 1	Carga Sentido 2
Estación 1 - Estación 2	1.052	640
Estación 2 - Estación 3	1.797	2.578
Estación 3 - Estación 4	2.869	6.026
Estación 4 - Estación 5	3.791	7.872
Estación 5 - Estación 6	9.097	11.252
Estación 6 - Estación 7	9.135	11.351
Estación 7 - Estación 8	10.286	15.927
Estación 8 - Estación 9	10.698	20.144
Estación 9 - Estación 10	10.993	21.920
Estación 10 - Estación 11	11.861	22.458
Estación 11 - Estación 12	12.391	23.454
Estación 12 - Estación 13	12.016	23.534
Estación 13 - Estación 14	12.439	25.215
Estación 14 - Estación 15	12.051	26.425
Estación 15 - Estación 16	12.044	27.257
Estación 16 - Estación 17	11.356	19.200
Estación 17 - Estación 18	11.446	18.412
Estación 18 - Estación 19	11.515	18.313
Estación 19 - Estación 20	11.569	18.086
Estación 20 - Estación 21	11.377	16.222
Estación 21 - Estación 22	7.884	12.210
Estación 22 - Estación 23	7.354	9.795
Estación 23 - Estación 24	5.517	8.102
Estación 24 - Estación 25	3.859	8.372
Estación 25 - Estación 26	3.314	7.296
Estación 26 - Estación 27	1.538	1.930
<b>CARGA MÁXIMA</b>	12.439	27.257

Figura 50: Intensidades máximas de carga HPM 2020



Para el estudio del establecimiento de bucles se va a considerar como únicas opciones viables aquellas que implican que el pasajero que tiene que bajar del tren a causa del bucle pueda continuar su viaje sin tener que cambiar de andén. El bucle considerado implica que 1 de cada 2 trenes recorre la línea completa. En una primera aproximación la intención es establecer un bucle los días laborables durante la HPM entre las estaciones 8 y 21. Fuera de esta franja el bucle se daría entre las estaciones 5 y 21 de forma continua durante todos los días.

En la oferta de servicio se calculó el intervalo de servicio necesario para que la densidad en la interestación mas cargada no superase los 6 pasajeros/m<sup>2</sup>. Para comprobar que el bucle es viable se realiza un cálculo similar.

Teniendo en cuenta que el intervalo fuera del bucle sería de 5 minutos (12 viajes/hora) se podrían admitir cargas máximas en las interestaciones de fuera del bucle de 14.400 pasajeros/hora y sentido, que es el resultado de multiplicar la capacidad del tren a 6 pasajeros/m<sup>2</sup> (1.200 pasajeros) por los 12 viajes/hora.

Como la carga en el sentido 2 en la interestación E7 – E8 es de 15.927 pasajeros/h y este valor es superior a los 14.400 pasajeros/h se superaría la densidad de 6 pasajeros/m<sup>2</sup>. Se podría dar el bucle entre E-7 y E-21. Aunque este bucle es más corto se considera interesante estudiar la posibilidad de trasladar el bucle de la HPM a la E-5 debido que tiene las siguientes ventajas:

- Permite dar un mejor servicio a los viajeros que hacen correspondencia en E-5 con la línea que conecta con el aeropuerto de la ciudad.
- Permite dar el mismo bucle para todas las franjas horarias y tipos de día evitándose así posibles confusiones a los pasajeros.
- Hace más factible la implantación de vías de inversión de marcha en las estaciones de final de bucle al ser estas las mismas para todas las franjas horarias y tipos de día.
- Los tiempos de parada de los trenes que cargan los viajeros desalojados son más homogéneos con los del resto de la línea.

En el anexo 5 se pueden consultar diferentes alternativas para la realización del bucle.

Se comprueba si para la HPM del año 2050 se podría seguir dando el bucle entre E-5 y E-21 con el fin de sacar el máximo partido a las vías de inversión de marcha. Teniendo en cuenta que el intervalo fuera del bucle sería de 3 minutos (20 viajes/hora) la carga máxima admisible por interestación sería de 24.000 pasajeros/hora y sentido, que es el resultado de multiplicar la capacidad del tren de 1.200 pasajeros (a 6 pasajeros/m<sup>2</sup>) por los 20 viajes/hora.

Tramo	Carga Sentido 1	Carga Sentido 2
Estación 1 - Estación 2	2.083	897
Estación 2 - Estación 3	3.360	4.541
Estación 3 - Estación 4	5.721	8.344
Estación 4 - Estación 5	7.222	10.766
Estación 5 - Estación 6	16.581	19.755
Estación 6 - Estación 7	16.625	19.846
Estación 7 - Estación 8	17.531	24.864
Estación 8 - Estación 9	18.118	28.212
Estación 9 - Estación 10	18.355	30.143
Estación 10 - Estación 11	19.467	30.612
Estación 11 - Estación 12	21.100	31.990
Estación 12 - Estación 13	20.950	31.902
Estación 13 - Estación 14	21.037	47.883
Estación 14 - Estación 15	20.056	46.763
Estación 15 - Estación 16	19.595	46.767
Estación 16 - Estación 17	14.894	24.812
Estación 17 - Estación 18	14.722	23.614
Estación 18 - Estación 19	14.472	22.387
Estación 19 - Estación 20	14.422	21.914
Estación 20 - Estación 21	13.921	19.639
Estación 21 - Estación 22	8.951	13.493
Estación 22 - Estación 23	8.207	11.423
Estación 23 - Estación 24	6.046	9.388
Estación 24 - Estación 25	4.633	9.147
Estación 25 - Estación 26	3.911	7.811
Estación 26 - Estación 27	1.714	2.011
<b>CARGA MÁXIMA</b>	<b>21.100</b>	<b>47.883</b>

Figura 51: Intensidades máximas de carga HPM 2050

La intensidad máxima de carga fuera del bucle se produce en el sentido 2 en la interestación E21 – E22 y tiene un valor de 13.493 pasajeros/h. Como este valor es inferior a los 24.000 pasajeros/h se puede dar el bucle sin superar la densidad de 6 pasajeros/m<sup>2</sup>. Al igual que en el caso de la HPM 2020 el bucle tampoco es posible desde la E-8 (28.212 pasajeros/hora > 24.000 pasajeros/hora) siendo solo posible a partir de E-6.

Se continúa con el estudio del bucle E5 –E21 de la HPM de 2020:

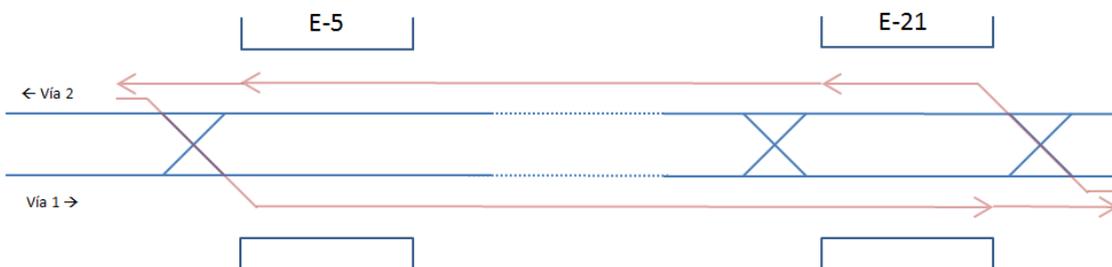


Figura 52: Esquema itinerario bucle E5-E21

Tramo	Sin bucle						Con bucle de E-5 a E-21 (por detrás)					
	Pasajeros/tren		% Ocupación plazas para pasajeros de pie		Pasajeros/m <sup>2</sup>		Pasajeros/tren		% Ocupación plazas para pasajeros de pie		Pasajeros/m <sup>2</sup>	
	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2
Estación 1 - Estación 2	44	27	0%	0%	0,0	0,0	88	53	0%	0%	0,0	0,0
Estación 2 - Estación 3	75	107	0%	0%	0,0	0,0	150	215	0%	6%	0,0	0,4
Estación 3 - Estación 4	120	251	0%	10%	0,0	0,6	239	502	8%	34%	0,5	2,0
Estación 4 - Estación 5	158	328	1%	17%	0,0	1,0	316	656	16%	48%	0,9	2,9
Estación 5 - Estación 6	379	469	22%	30%	1,3	1,8	379	469	22%	30%	1,3	1,8
Estación 6 - Estación 7	381	473	22%	31%	1,3	1,8	381	473	22%	31%	1,3	1,8
Estación 7 - Estación 8	429	664	27%	49%	1,6	2,9	429	664	27%	49%	1,6	2,9
Estación 8 - Estación 9	446	839	28%	66%	1,7	3,9	446	839	28%	66%	1,7	3,9
Estación 9 - Estación 10	458	913	29%	73%	1,8	4,4	458	913	29%	73%	1,8	4,4
Estación 10 - Estación 11	494	936	33%	75%	2,0	4,5	494	936	33%	75%	2,0	4,5
Estación 11 - Estación 12	516	977	35%	79%	2,1	4,7	516	977	35%	79%	2,1	4,7
Estación 12 - Estación 13	501	981	33%	79%	2,0	4,7	501	981	33%	79%	2,0	4,7
Estación 13 - Estación 14	518	1051	35%	86%	2,1	5,1	518	1051	35%	86%	2,1	5,1
Estación 14 - Estación 15	502	1101	34%	91%	2,0	5,4	502	1101	34%	91%	2,0	5,4
Estación 15 - Estación 16	502	1136	34%	94%	2,0	5,6	502	1136	34%	94%	2,0	5,6
Estación 16 - Estación 17	473	800	31%	62%	1,8	3,7	473	800	31%	62%	1,8	3,7
Estación 17 - Estación 18	477	767	31%	59%	1,9	3,5	477	767	31%	59%	1,9	3,5
Estación 18 - Estación 19	480	763	31%	58%	1,9	3,5	480	763	31%	58%	1,9	3,5
Estación 19 - Estación 20	482	754	32%	57%	1,9	3,4	482	754	32%	57%	1,9	3,4
Estación 20 - Estación 21	474	676	31%	50%	1,9	3,0	474	676	31%	50%	1,9	3,0
Estación 21 - Estación 22	329	509	17%	34%	1,0	2,1	657	1018	48%	83%	2,9	5,0
Estación 22 - Estación 23	306	408	15%	25%	0,9	1,5	613	816	44%	63%	2,6	3,8
Estación 23 - Estación 24	230	338	8%	18%	0,5	1,1	460	675	30%	50%	1,8	3,0
Estación 24 - Estación 25	161	349	1%	19%	0,1	1,1	322	698	16%	52%	1,0	3,1
Estación 25 - Estación 26	138	304	0%	15%	0,0	0,9	276	608	12%	44%	0,7	2,6
Estación 26 - Estación 27	64	80	0%	0%	0,0	0,0	128	161	0%	1%	0,0	0,1
CARGA MÁXIMA	518	1.136	35%	94%	2,1	5,6	657	1.136	48%	94%	2,9	5,6

Figura 53: Intensidades máximas de carga HPM 2020 sin bucle y con bucle E5 – E21.

Mediante este bucle se obtiene una densidad de ocupación más uniforme durante toda la línea y se permite reducir el número de trenes necesarios para dar servicio, lo cual aumenta significativamente la eficiencia de la operación.

Debido a las altas frecuencias previstas en la línea y con el fin de no perturbar la circulación se considera que la mejor opción para dar los bucles en las estaciones intermedias es disponer de vías interiores de inversión de marcha en las estaciones 5 y 21. Se considera que dichas estaciones disponen de andenes centrales. Para determinar si el bucle es beneficioso en términos económicos será necesario estudiar si el aumento del coste de la obra civil que implica la construcción de estas vías de inversión de marcha queda compensado con el ahorro de material móvil, coches\*km y consumo de energía.

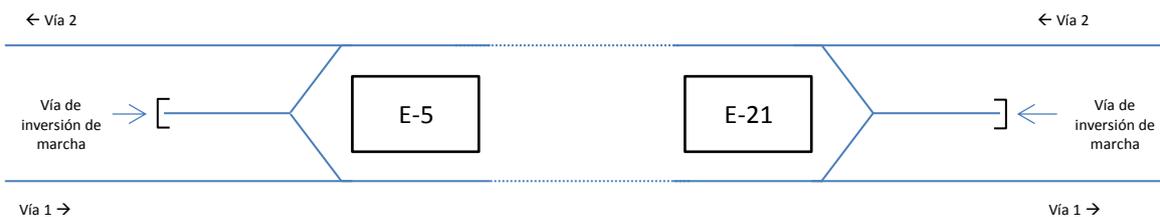


Figura 54: Esquema vías de inversión de marcha

A continuación se va a realizar un estudio más detallado de la maniobra:

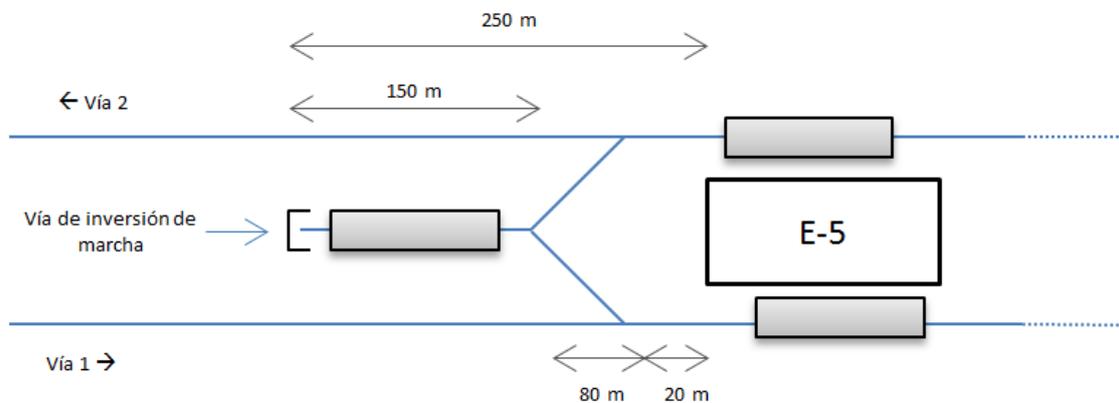


Figura 55: Detalle configuración vía de inversión de marcha

Las vías de inversión de marcha aumentan considerablemente la robustez de la operación con bucles y reducen los intervalos al permitir apartar el tren sin perturbar la circulación por la vía principal.

Una vez que el tren que va a realizar el bucle llega a E-5 por vía 2 se posiciona en la estación y permite la bajada de viajeros. Simultáneamente a la parada se realiza la maniobra del desvío que permite la entrada a la vía de inversión de marcha, sin que se perjudique la circulación por la vía contraria.

El tren que recorre la línea completa entra en la estación con la maniobra hecha al desvío hacia la vía de inversión contando con una separación de al menos 100 metros desde el piñón de salida hasta el tren que está en la vía de inversión como distancia de seguridad (a 45 km/h se considera una distancia de frenado de 84 metros). Simultáneamente a la parada en la estación se realiza la maniobra a la recta. Se considera que esta maniobra no se puede realizar antes porque limitaría la velocidad de entrada del tren que recorre la línea completa al estar muy próximo a la estación cuando el tren de bucle libera el aparato de vía.

A continuación se muestra el cálculo del intervalo de la maniobra por vía 2, considerándose que los trenes tienen tiempos de parada de 35 segundos al tener que desalojar viajeros (trenes de bucle) y tener que cargar los viajeros desalojados para continuar la marcha (trenes de línea completa).

Evento	Descripción	Tiempo parcial (s)	I. Salida A2 (s)
a	<b>Tiempo desde salida UT1 de A2 hacia vía 2 hasta liberación desvío</b>	22	22
b	Tiempo que tarda en llegar la UT perseguidora (UT2) a A2	28	50
c	Tiempo de parada UT2 en A2	35	85
d	Tiempo maniobra aguja desvío a desviada y establecer itinerario	9	
e	<b>Tiempo desde salida UT2 de A2 hacia vía inversión hasta liberación desvío</b>	26	111
f	Tiempo que tarda en llegar la UT perseguidora (UT3) a A2	24	135
g	Tiempo de parada UT3 en A2	35	170
h	Tiempo maniobra aguja desvío a directa y establecer itinerario	9	

Figura 56: Intervalo vía de inversión de marcha

El nudo podría ofrecer intervalos mínimos de 85 segundos por vía 2.

Una vez el tren ha invertido la marcha se le puede reincorporar a la línea por vía 1, haciendo la maniobra que permite salir al tren de la vía de inversión mientras el tren precedente está cargando viajeros en E-5 por vía 1, de manera que en cuanto este tren abandone la estación el tren del bucle situado en la vía de inversión puede salir a la línea y esperar en E-5 mientras admite pasajeros hasta que sea el momento de su salida.

Para el cálculo del intervalo por vía 1 se considera que el tren tiene que recorrer 264 metros desde la vía de inversión de marcha hasta posicionarse en la estación a una velocidad de 35 km/h.

Mediante las ecuaciones del MRUA se concluye que el tren necesita un tiempo de 37 segundos para desplazarse desde la vía de inversión de marcha hasta la estación. Una vez el tren se ha estacionado en la estación por vía 1 se hace la maniobra a la recta del aparato que le permitió la salida de la vía de inversión de marcha, quedando la ruta por vía principal preparada para la llegada del siguiente tren que recorre la línea completa. En el caso más desfavorable de suponer tiempos de parada de 35 segundos el nudo podría ofrecer intervalos mínimos de 72 segundos (37 segundos de la maniobra + 35 segundos de tiempo de parada).

Se concluye por tanto que la vía de inversión de marcha permite realizar el bucle y cumplir con los niveles de servicio con una robustez adecuada. El cálculo realizado para E-5 se considera extensible a E-21 al ser la disposición de las vías de inversión de marcha simétricas y los tiempos de parada similares.

A continuación se hace un estudio del posible aumento de los tiempos de parada debidos al bucle. El bucle puede producir dos tipos de incrementos de tiempos de parada:

- El intervalo aumenta al doble en las estaciones que quedan fuera del bucle por lo que los trenes llevan una mayor ocupación y aumentan por tanto su tiempo de parada (en la tabla se marcan con fondo verde aquellos tiempos que se ven beneficiados por el bucle y con fondo blanco los tiempos resultantes de un intervalo dos veces superior al del bucle).
- En las estaciones de final de bucle se puede incrementar el número de pasajeros bajados en dicha estación por no poder continuar su viaje. Estos pasajeros bajados necesitan continuar su trayecto en el sentido en el que viajan por lo que se sumaran a los pasajeros que suben en esa estación en su mismo sentido (en la tabla aparecen subrayados). Se marcan con un asterisco (\*) los tiempos asociados a los trenes que realizan el bucle. Se considera que la mitad de los bajadas/hora que se prevén en las estaciones posteriores al bucle bajan en la estación de final de bucle para continuar la marcha en el tren siguiente (se considera que la otra mitad coge el tren que recorre la línea completa y no necesita bajar debido al bucle). La realidad será que una parte de estos viajeros optaran por esperar al tren que les lleva directamente a su estación de destino en la estación de origen, aunque esto les suponga un mayor tiempo de espera.

Se hace por tanto necesario estudiar cómo afectan estos incrementos a la operación. A modo de ejemplo se analiza cómo queda afectado el sentido 1 por el bucle.

En la estación 5 se oferta un intervalo de 2,5 minutos al estar incluida en el bucle:

- Los pasajeros que suben (5.674 pasajeros/h) se reparten en 24 trenes/h entre los trenes del bucle y los que hacen el recorrido completo.
- La bajada de pasajeros se reparte en 12 trenes/h ya que únicamente es aportada por los trenes que hacen el recorrido completo debido a que los del bucle vienen sin pasajeros de la vía de inversión de marcha. Es decir, los trenes pasan cada 2,5 minutos en el sentido 1 por la estación 5 pero solamente cada 5 minutos bajan viajeros en dicha estación en el sentido indicado.



Figura 57: Subidas y bajadas posibles en E-5 por el sentido 1.

En la estación 21 los trenes pasan con un intervalo de 2,5 minutos al estar incluida en el bucle, sin embargo hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- En los trenes del bucle no se sube nadie ya que desalojan viajeros en E-21 para realizar la maniobra de inversión de marcha. Los trenes que recorren la línea completa se cargan con los subidos/h previstos para E-21 más los pasajeros/h que tuvieron que bajar en E-21 por tener como destino las estaciones posteriores al bucle. Todos ellos se reparten en 12 trenes/h.
- La bajada/h prevista en E-21 (bajan para salir de la estación) se reparte en 24 trenes/h. Para las bajadas/h de todas las estaciones posteriores al bucle (en el sentido estudiado) se considera que se reparten en dos mitades, la primera va en el tren desde su origen hasta su destino, por lo que no necesita bajar en E-21 y la segunda mitad necesita bajar en E-21 para coger el siguiente tren que recorre la línea completa por lo que se reparte en 12 trenes/h. Es posible que parte de esta segunda mitad decida no coger el tren del bucle y esperar al tren que recorre la línea completa para no tener que bajar en E-21 pero para el cálculo de los tiempos de parada se hace esta consideración por ser el caso más desfavorable.



Figura 58: Subidas y bajadas posibles en E-21 por el sentido 1.

Estas subidas y bajadas afectan a los tiempos de parada pero no a la densidad de los trenes que hacen el recorrido completo para el tramo fuera del bucle. Dentro del bucle la densidad de todos los trenes podría ser no homogénea debido a las decisiones de tomar el tren que hace el bucle o no de los pasajeros que van a estaciones situadas fuera del mismo.

A continuación se muestran los tiempos de parada que resultan de las consideraciones mencionadas:

HPM Año 2020 Sentido 1 (con bucle E-5 a E21) ↓								HPM Año 2020 Sentido 2 (con bucle E-5 a E21) ↑							
Estación	Suben	T. subida (s)	Bajan	T. bajada (s)	T. Parada estimado (s)	T. Parada Malla (s)	Margen T. parada (s)	Estación	Suben	T. subida (s)	Bajan	T. bajada (s)	T. Parada estimado (s)	T. Parada malla (s)	Margen T. parada (s)
Estación 1	1.052	6,7	0	5,0	12	20	8	Estación 1	0	3,0	640	7,2	11	20	9
Estación 2	745	5,6	0	5,0	11	20	9	Estación 2	0	3,0	1.938	11,7	15	20	5
Estación 3	1.072	6,7	0	5,0	12	20	8	Estación 3	0	3,0	3.448	17,0	20	20	0
Estación 4	922	6,2	0	5,0	12	20	8	Estación 4	0	3,0	1.846	11,4	15	20	5
Estación 5	5.674	12,9	368	6,3	20	20	0	Estación 5	4.212	17,6	3.656	11,3	29	30	1
Estación 5*	5.674	12,9	0	5,0	18	20	2	Estación 5*	0	3,0	7.592	25,0	29	30	1
Estación 6	38	3,1	0	5,0	9	20	11	Estación 6	0	3,0	99	5,2	9	20	11
Estación 7	1.193	5,1	43	5,1	11	20	9	Estación 7	12	3,0	4.588	13,0	16	20	4
Estación 8	612	4,1	199	5,3	10	20	10	Estación 8	43	3,1	4.260	12,4	16	20	4
Estación 9	315	3,5	20	5,0	9	20	11	Estación 9	16	3,0	1.792	8,1	12	20	8
Estación 10	869	4,5	1	5,0	10	20	10	Estación 10	0	3,0	538	5,9	9	20	11
Estación 11	843	4,5	313	5,5	11	20	9	Estación 11	302	3,5	1.300	7,3	11	20	9
Estación 12	256	3,4	631	6,1	10	20	10	Estación 12	474	3,8	552	6,0	10	20	10
Estación 13	1.156	4,2	733	5,8	10	20	10	Estación 13	375	3,4	5	5,0	9	20	11
Estación 14	422	3,7	810	6,4	11	20	9	Estación 14	415	3,7	1.625	7,8	12	20	8
Estación 15	186	3,3	193	5,3	9	20	11	Estación 15	313	3,5	1.145	7,0	11	20	9
Estación 16	5.663	8,9	6.351	11,6	21	25	4	Estación 16	14.728	18,3	6.671	11,9	31	35	4
Estación 17	262	3,5	172	5,3	9	20	11	Estación 17	1.268	5,2	480	5,8	12	20	8
Estación 18	768	4,3	699	6,2	11	20	9	Estación 18	1.264	5,2	1.165	7,0	13	20	7
Estación 19	428	3,7	374	5,6	10	20	10	Estación 19	594	4,0	367	5,6	10	20	10
Estación 20	276	3,5	468	5,8	10	20	10	Estación 20	2.173	6,8	309	5,5	13	20	7
Estación 21*	0	3,0	7.996	26,2	30	30	0	Estación 21*	4.354	10,6	0	5,0	16	20	4
Estación 21	4.503	18,6	3.795	11,6	31	35	4	Estación 21	4.354	10,6	342	6,2	17	20	3
Estación 22	168	3,6	698	7,4	12	20	8	Estación 22	2.474	11,6	59	5,2	17	20	3
Estación 23	126	3,4	1.963	11,8	16	20	4	Estación 23	1.951	9,8	258	5,9	16	20	4
Estación 24	118	3,4	1.776	11,2	15	20	5	Estación 24	358	4,2	628	7,2	12	20	8
Estación 25	106	3,4	651	7,3	11	20	9	Estación 25	1.185	7,1	109	5,4	13	20	7
Estación 26	0	3,0	1.776	11,2	15	20	5	Estación 26	5.366	21,6	0	5,0	27	30	3
Estación 27	0	3,0	1.538	10,3	14	20	6	Estación 27	1.930	9,7	0	5,0	15	20	5
TOTAL	27.773	140	23.572	186	342	560	218	TOTAL	43.807	177	37.820	212	401	575	174
TOTAL*	18.961	79	19.003	120	209	355	146	TOTAL*	26.331	86	32.488	144	239	365	126

Figura 59: Recalculo tiempos de parada con bucles

Se ha considerado que las estaciones 13 y 16 disponen de tres andenes y que esto supone una reducción del tiempo de subida-bajada de pasajeros del 40%.

Con los tiempos de parada obtenidos se procede a calcular el RTT del servicio con bucles. En primer lugar para los trenes que realizan el recorrido completo:

HPM 2020 Sentido 1 (Trenes línea completa) ↓							HPM 2020 Sentido 2 (Trenes línea completa) ↑						
Estación	Distancia (m)	T1	T2	T3	T4	Tiempo de parada	Estación	Distancia (m)	T1	T2	T3	T4	Tiempo de parada
Saco 1	250	-	-	-	60	-	Saco 1	250	-	-	-	60	-
Estación 1	1.445	92,3	4,6	7,2	104,2	20	Estación 1	1.445	85,4	4,3	7,2	96,9	20
Estación 2	1.117	72,0	3,6	5,6	81,2	20	Estación 2	1.117	69,2	3,5	5,6	78,2	20
Estación 3	1.001	64,4	3,2	5,0	72,6	20	Estación 3	1.001	64,0	3,2	5,0	72,2	20
Estación 4	868	59,8	3,0	4,3	67,1	20	Estación 4	868	58,5	2,9	4,3	65,8	20
Estación 5	1.082	68,2	3,4	5,4	77,0	20	Estación 5	1.082	67,8	3,4	5,4	76,6	30
Estación 6	941	62,7	3,1	4,7	70,5	20	Estación 6	941	62,6	3,1	4,7	70,4	20
Estación 7	873	63,5	3,2	4,4	71,1	20	Estación 7	873	61,5	3,1	4,4	69,0	20
Estación 8	873	58,6	2,9	4,4	65,9	20	Estación 8	873	58,5	2,9	4,4	65,8	20
Estación 9	844	58,9	2,9	4,2	66,0	20	Estación 9	844	57,9	2,9	4,2	65,0	20
Estación 10	872	59,0	3,0	4,4	66,4	20	Estación 10	872	58,3	2,9	4,4	65,6	20
Estación 11	934	62,2	3,1	4,7	70,0	20	Estación 11	934	61,4	3,1	4,7	69,2	20
Estación 12	708	51,2	2,6	3,5	57,3	20	Estación 12	708	51,1	2,6	3,5	57,2	20
Estación 13	1.180	75,4	3,8	5,9	85,1	20	Estación 13	1.180	75,0	3,7	5,9	84,6	20
Estación 14	790	55,7	2,8	4,0	62,4	20	Estación 14	790	55,3	2,8	4,0	62,0	20
Estación 15	841	59,0	2,9	4,2	66,1	20	Estación 15	841	57,0	2,9	4,2	64,1	20
Estación 16	949	64,1	3,2	4,7	72,0	25	Estación 16	949	63,0	3,2	4,7	70,9	35
Estación 17	852	60,2	3,0	4,3	67,5	20	Estación 17	852	58,1	2,9	4,3	65,2	20
Estación 18	829	56,8	2,8	4,1	63,7	20	Estación 18	829	56,7	2,8	4,1	63,6	20
Estación 19	1.896	105,2	5,3	9,5	119,9	20	Estación 19	1.896	102,8	5,1	9,5	117,4	20
Estación 20	1.059	66,7	3,3	5,3	75,3	20	Estación 20	1.059	66,7	3,3	5,3	75,3	20
Estación 21	1.049	67,2	3,4	5,2	75,8	35	Estación 21	1.049	66,0	3,3	5,2	74,5	20
Estación 22	1.237	74,5	3,7	6,2	84,4	20	Estación 22	1.237	74,0	3,7	6,2	83,9	20
Estación 23	806	57,5	2,9	4,0	64,4	20	Estación 23	806	55,7	2,8	4,0	62,5	20
Estación 24	1.015	65,6	3,3	5,1	74,0	20	Estación 24	1.015	64,9	3,2	5,1	73,2	20
Estación 25	1.096	69,2	3,5	5,5	78,1	20	Estación 25	1.096	68,6	3,4	5,5	77,5	20
Estación 26	960	65,2	3,3	4,8	73,3	20	Estación 26	960	65,1	3,3	4,8	73,2	30
Estación 27	250	-	-	-	60	20	Estación 27	250	-	-	-	60	20
Saco 2	-	-	-	-	-	-	Saco 2	-	-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>26.618</b>	<b>0:28:35</b>	<b>0:01:26</b>	<b>0:02:11</b>	<b>0:34:11</b>	<b>0:09:20</b>	<b>TOTAL</b>	<b>26.618</b>	<b>0:28:05</b>	<b>0:01:24</b>	<b>0:02:11</b>	<b>0:33:40</b>	<b>0:09:35</b>
					<b>0:43:31</b>								<b>0:43:15</b>

Figura 60: RTT trenes línea completa (con bucles)

Al ser un carrusel de trenes se considera que los tiempos de semi-recorrido de ambos sentidos han de ser iguales. Con este fin se incrementará el tiempo de semi-recorrido menor aumentando el tiempo de recorrido entre estaciones, de manera que la velocidad sea igual en ambos sentidos. Esta estrategia tiene el atractivo de ofrecer un servicio regular, sin esperas excesivas del tren en el andén y con un menor consumo energético.

RTT	1:27:03
Headway (min)	5
Número de trenes	18
Velocidad explotación (km/h)	36,7

Figura 61: Resultados trenes línea completa (con bucles)

Y el RTT de los trenes que realizan el bucle:

HPM 2020 Sentido 1 (Trenes bucle) ↓							HPM 2020 Sentido 2 (Trenes bucle) ↑						
Estación	Distancia (m)	T1	T2	T3	T4	Tiempo de parada	Estación	Distancia (m)	T1	T2	T3	T4	Tiempo de parada
Saco inversión de marcha 1	250	-	-	-	60	-	Saco inversión de marcha 1	250	-	-	-	60	-
Estación 5	1.082	68,2	3,4	5,4	77,0	20	Estación 5	1.082	67,8	3,4	5,4	76,6	30
Estación 6	941	62,7	3,1	4,7	70,5	20	Estación 6	941	62,6	3,1	4,7	70,4	20
Estación 7	873	63,5	3,2	4,4	71,1	20	Estación 7	873	61,5	3,1	4,4	69,0	20
Estación 8	873	58,6	2,9	4,4	65,9	20	Estación 8	873	58,5	2,9	4,4	65,8	20
Estación 9	844	58,9	2,9	4,2	66,0	20	Estación 9	844	57,9	2,9	4,2	65,0	20
Estación 10	872	59,0	3,0	4,4	66,4	20	Estación 10	872	58,3	2,9	4,4	65,6	20
Estación 11	934	62,2	3,1	4,7	70,0	20	Estación 11	934	61,4	3,1	4,7	69,2	20
Estación 12	708	51,2	2,6	3,5	57,3	20	Estación 12	708	51,1	2,6	3,5	57,2	20
Estación 13	1.180	75,4	3,8	5,9	85,1	20	Estación 13	1.180	75,0	3,7	5,9	84,6	20
Estación 14	790	55,7	2,8	4,0	62,4	20	Estación 14	790	55,3	2,8	4,0	62,0	20
Estación 15	841	59,0	2,9	4,2	66,1	20	Estación 15	841	57,0	2,9	4,2	64,1	20
Estación 16	949	64,1	3,2	4,7	72,0	25	Estación 16	949	63,0	3,2	4,7	70,9	35
Estación 17	852	60,2	3,0	4,3	67,5	20	Estación 17	852	58,1	2,9	4,3	65,2	20
Estación 18	829	56,8	2,8	4,1	63,7	20	Estación 18	829	56,7	2,8	4,1	63,6	20
Estación 19	1.896	105,2	5,3	9,5	119,9	20	Estación 19	1.896	102,8	5,1	9,5	117,4	20
Estación 20	1.059	66,7	3,3	5,3	75,3	20	Estación 20	1.059	66,7	3,3	5,3	75,3	20
Estación 21	1.049	67,2	3,4	5,2	75,8	30	Estación 21	1.049	66,0	3,3	5,2	74,5	20
Saco inversión de marcha 2	250	-	-	-	60	-	Saco inversión de marcha 2	250	-	-	-	60	-
<b>TOTAL</b>	<b>17.074</b>	<b>0:18:15</b>	<b>0:00:55</b>	<b>0:01:23</b>	<b>0:22:32</b>	<b>0:05:55</b>	<b>TOTAL</b>	<b>17.074</b>	<b>0:18:00</b>	<b>0:00:54</b>	<b>0:01:23</b>	<b>0:22:17</b>	<b>0:06:05</b>
						<b>0:28:27</b>							<b>0:28:22</b>

Figura 62: RTT trenes bucle E5-E21

Al igual que en los casos anteriores se incrementan los tiempos de semirecorrido del sentido menor hasta igualarse con los del sentido mayor.

RTT	0:56:54
Headway (min)	5
Número de trenes	12
Velocidad explotación (km/h)	36,0

Figura 63: Resultados trenes bucle E5-E21

Los trenes que recorren la línea completa van a un intervalo de 5 minutos entre sí, al igual que los trenes del bucle. Como los trenes del bucle se desfasan 2,5 minutos con los de la línea completa, en el bucle se oferta en un intervalo de 2,5 minutos.

Para la generación de la malla horaria es necesario considerar que tanto el RTT del bucle como el de fuera del bucle tienen que ser múltiplos de 5 (los trenes van a un intervalo de 5 minutos) por lo que habría que aumentar o reducir (si es posible) el RTT hasta alcanzar dicho múltiplo. A modo de ejemplo, para el bucle se aumentaría el RTT a 60 minutos (se seguirían necesitando 12 trenes) al no ser a priori factible su reducción a 55 minutos (se necesitarían 11 trenes). El RTT de la línea completa aumentaría hasta los 90 minutos (se seguirían necesitando 18 trenes).

Los incrementos de tiempo mencionados se pueden distribuir en los tiempos de parada, en el tiempo de recorrido entre estaciones y en el tiempo de maniobra de inversión de marcha. Como

es lógico estos aumentos del RTT van en contra de la eficiencia de la operación y suponen una disminución de la velocidad de explotación (bajaría a 35,5 km/h para los trenes que recorren la línea completa y a 34,2 km/h para los trenes del bucle).

En la elaboración de la malla horaria se ha de procurar que los trenes que realizan el bucle dispongan de tiempo suficiente para realizar la inversión de marcha sin comprometer el intervalo ofertado. Para conseguirlo, una opción interesante es hacer coincidir los trenes de bucle (loop) por ambas vías en las estaciones E-5 y E-21.

Para el ejemplo de E-5, a la salida de la estación, el tren situado en vía 1 recorre la línea con pasajeros y el tren de vía 2 se dirige sin pasajeros a la vía de inversión de marcha (emplea 37 segundos en posicionarse en la vía de inversión de marcha desde el andén de la estación).

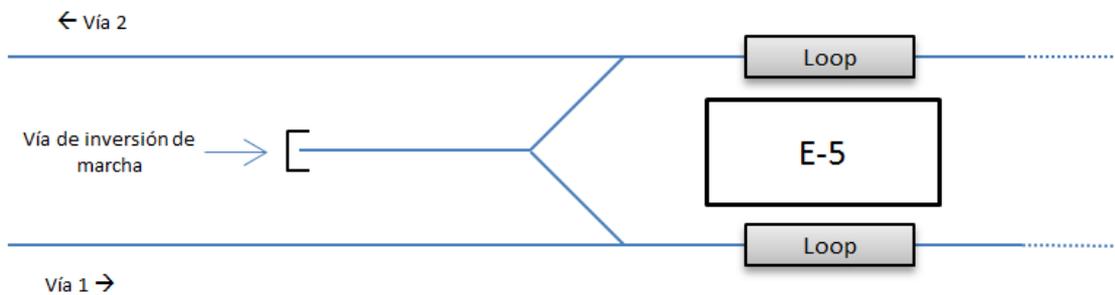


Figura 64: Trenes de bucle coinciden en estación de final de bucle

De la misma forma se hacen coincidir los trenes que recorren la línea completa en E-5. Una vez que el tren que recorre la línea completa por vía 1 se ha posicionado en la estación, se puede proceder a realizar la maniobra de los desvíos (9 segundos), realizar el cambio de la cabina de mando y establecer el itinerario (6 segundos) que permiten al tren de bucle la salida a vía 1 (únicamente requeriría los 37 segundos del recorrido). Cuando el tren de bucle se posiciona en la estación por vía 1 coincide con otro tren de bucle que llega a la estación por vía 2, repitiéndose el ciclo.

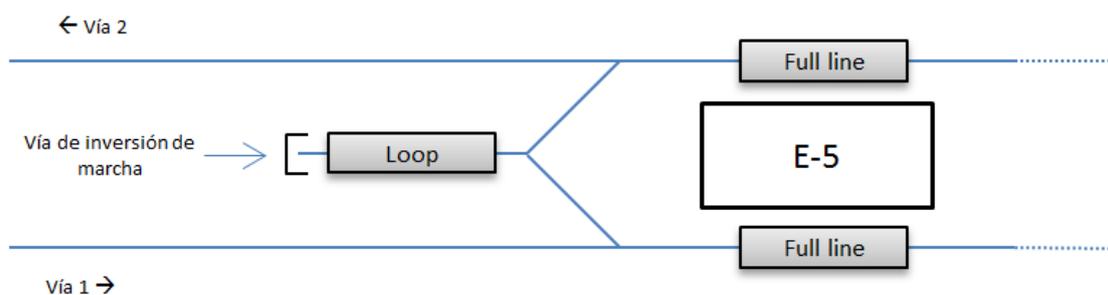


Figura 65: Trenes de línea completa coinciden en estación de final de bucle

En la figura 66 se puede observar la malla horaria con bucle en E-5. La llegada simultánea de dos trenes que recorren la línea completa (trenes en color azul) ha sido marcada con un círculo rojo y la llegada simultánea de dos trenes de bucle ha sido marcada con un círculo de color amarillo.

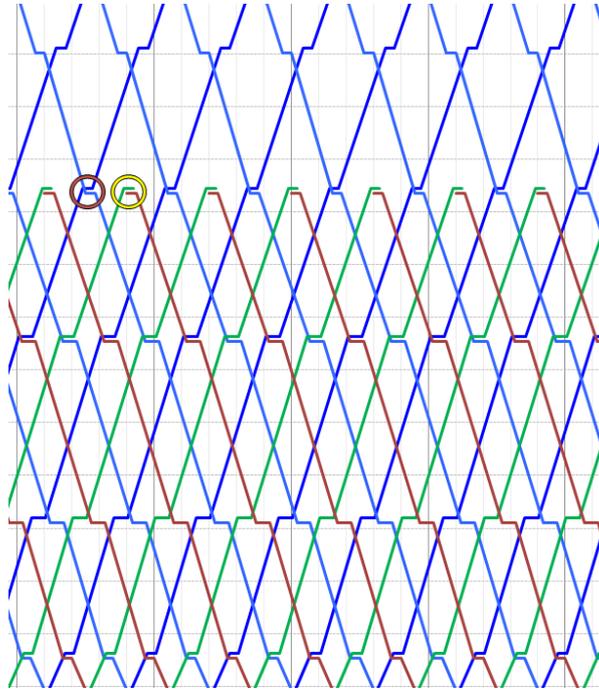


Figura 66: Malla horaria con bucle

En la malla horaria se aprecia como los trenes que recorren el bucle en sentido ascendente (color verde) coinciden en E-5 con los trenes de bucle de sentido descendente (color marrón) que proceden de la vía de inversión de marcha. El tren ascendente (color verde) desaparece de la malla lo que significa que entra a la vía de inversión de marcha.

Posteriormente se hacen coincidir en E-5 el tren ascendente (color azul oscuro) y el tren descendente (color azul) que recorren la línea completa.

El tren de bucle de la vía de inversión de marcha aparece un ciclo después para reincorporarse al sentido descendente (color marrón).

## Conclusiones

Mediante la aplicación de este bucle se obtiene una densidad de ocupación más uniforme durante toda la línea y se permite reducir el número de trenes, el consumo de energía y los coches\*km necesarios para dar servicio, lo cual aumenta significativamente la eficiencia de la operación.

Tramo	Sin bucle		Con bucle de E-5 a E-21	
	Pasajeros/m <sup>2</sup>		Pasajeros/m <sup>2</sup>	
	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2
Estación 1 - Estación 2	0,0	0,0	0,0	0,0
Estación 2 - Estación 3	0,0	0,0	0,0	0,4
Estación 3 - Estación 4	0,0	0,6	0,5	2,0
Estación 4 - Estación 5	0,0	1,0	0,9	2,9
Estación 5 - Estación 6	1,3	1,8	1,3	1,8
Estación 6 - Estación 7	1,3	1,8	1,3	1,8
Estación 7 - Estación 8	1,6	2,9	1,6	2,9
Estación 8 - Estación 9	1,7	3,9	1,7	3,9
Estación 9 - Estación 10	1,8	4,4	1,8	4,4
Estación 10 - Estación 11	2,0	4,5	2,0	4,5
Estación 11 - Estación 12	2,1	4,7	2,1	4,7
Estación 12 - Estación 13	2,0	4,7	2,0	4,7
Estación 13 - Estación 14	2,1	5,1	2,1	5,1
Estación 14 - Estación 15	2,0	5,4	2,0	5,4
Estación 15 - Estación 16	2,0	5,6	2,0	5,6
Estación 16 - Estación 17	1,8	3,7	1,8	3,7
Estación 17 - Estación 18	1,9	3,5	1,9	3,5
Estación 18 - Estación 19	1,9	3,5	1,9	3,5
Estación 19 - Estación 20	1,9	3,4	1,9	3,4
Estación 20 - Estación 21	1,9	3,0	1,9	3,0
Estación 21 - Estación 22	1,0	2,1	2,9	5,0
Estación 22 - Estación 23	0,9	1,5	2,6	3,8
Estación 23 - Estación 24	0,5	1,1	1,8	3,0
Estación 24 - Estación 25	0,1	1,1	1,0	3,1
Estación 25 - Estación 26	0,0	0,9	0,7	2,6
Estación 26 - Estación 27	0,0	0,0	0,0	0,1
CARGA MÁXIMA	2,1	5,6	2,9	5,6

Figura 67: Intensidades de carga HPM 2020 sin bucle y con bucle E5 – E21

De los resultados obtenidos se concluye que dando servicio con el bucle entre E-5 y E-21 para la HPM del año 2020 son necesarios 30 trenes (18 trenes recorren la línea completa y 12 trenes recorren el bucle) frente a los 35 trenes que se necesitan sin él.

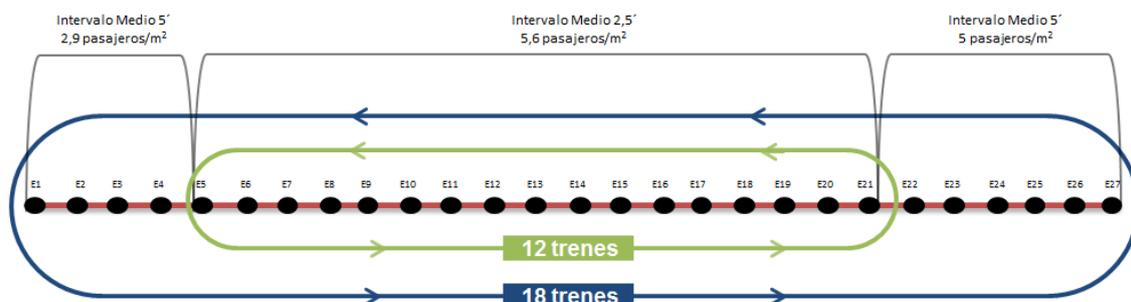


Figura 68: Servicio ofrecido en HPM 2020 con bucle E5-E21

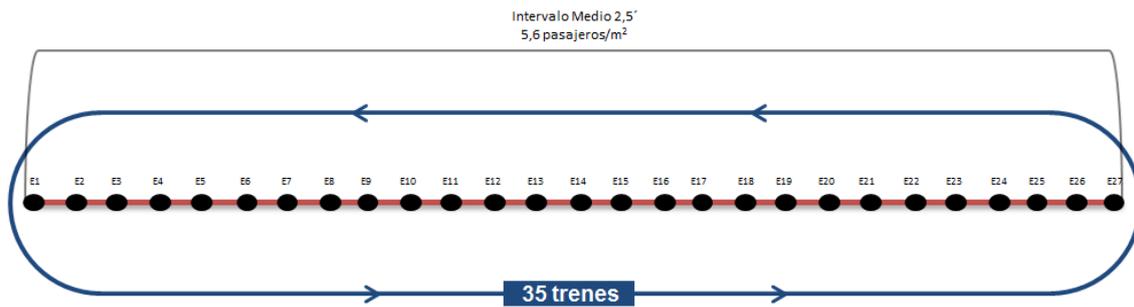


Figura 69: Servicio ofrecido en HPM 2020 sin bucle

El uso del bucle permite disminuir la flota de operación necesaria en 5 trenes (6 trenes considerando la flota total) haciendo más homogéneas las necesidades de material para todas las franjas horarias aumentándose así la eficiencia de la explotación. Sin embargo, se genera cierta incomodidad y confusión a los pasajeros.

Repetiendo los cálculos anteriores para la HPM de 2050 se obtiene que dando servicio con el bucle entre E-5 y E-21 son necesarios 49 trenes (30 trenes recorren la línea completa y 19 trenes recorren el bucle) frente a los 59 trenes que se necesitan sin él. El uso del bucle permitiría por tanto reducir la flota de operación necesaria en 10 trenes para el 2050 (11 trenes considerando la flota total). Estimando el coste de cada tren en 10 millones de euros se obtendría un ahorro de material móvil de **110 millones de euros**.

Además de reducir la flota necesaria el bucle permite ahorrar un número significativo de coches\*km. Se estima que durante los 30 primeros años de operación se realizarían 183 millones de coches\*km menos (considerando una composición de 6 coches). Los detalles de los cálculos realizados se muestran en el anexo 5.

Para poder estimar económicamente el ahorro obtenido se considera un coste de 1,8 € por coche\*km (coste por coche\*km obtenido por el metro de Santiago de Chile en el año 2.015 [15]). Se estima un incremento del 1% anual del coste del coche\*km durante los 30 años de operación. El resultado es un ahorro estimado de **388 millones de euros**.

El establecimiento del bucle permite una reducción de coches\*km y de material móvil que originan un ahorro total estimado de **498 millones de euros**. Hay que tener en cuenta que el coste del coche\*km empleado para realizar la estimación corresponde a una explotación convencional. En las líneas UTO los costes por coche\*km son menores por lo que el ahorro podría ser inferior (en París se calcula que los costes de operación del UTO son la mitad que los de los metros convencionales [9]). Por otro lado hay que considerar que el perfil longitudinal de la línea implica un consumo energético elevado que puede incrementar el coste del coche\*km.



Para que la construcción de las vías de inversión de marcha sea rentable sus costes de implantación han de ser menores que los ahorros obtenidos mediante la reducción de material móvil y de coches\*km.

Teniendo en consideración el estudio realizado y que el sentido 2 es el más cargado durante la HPM se hacen las siguientes modificaciones en el esquema funcional:

- Las estaciones de correspondencia 13 y 16 disponen de tres andenes (dos andenes laterales y un andén central) con el fin de que el elevado número de pasajeros subidos y bajados no limite la capacidad de la línea.
- Las estaciones 5 y 21 pueden disponer de vías de inversión de marcha con el fin de dar un bucle único durante todas las franjas horarias y tipos de día. Se considera que disponen de andén central. Es necesario valorar económicamente si el ahorro en coches\*km y material móvil compensa los costes de construcción de estas vías.
- Para que las estaciones terminales tengan una capacidad suficiente que permita alcanzar los niveles de servicio previstos para la HPM de 2050 (40 trenes/hora) se ha estudiado la opción de desplazar la bretelle 88 metros hacia el saco, lo cual permite hasta 42 trenes/hora dando servicio alternativo por ambos fondos de saco.
- Se eliminan los aparatos de vía de E-12 y se protege E-13 con dos diagonales.
- Se cambia de piñón la diagonal de E-11 quedando más próxima a la ubicación de las terceras vías.
- Todas las diagonales que están “de punta” (a izquierdas) se ponen “de talón” (a derechas) al considerarse esta configuración más adecuada para un ferrocarril metropolitano. Solo permanece de punta la diagonal de la interestación de E-23 con E-24, de manera que se permita una conexión rápida de los trenes de vía 1 con el deposito en el sentido habitual de circulación.
- Se pone una bretelle a la entrada de E-5 (existía diagonal).
- Se sustituye la bretelle de E-8 por una diagonal (de talón).
- Se elimina la bretelle de E-18 y se pone una diagonal en E-19 junto a la ubicación de las terceras vías.
- Se elimina la diagonal en E-20.
- Se desplaza la diagonal del piñón de E-23 al piñón de E-22.
- Se elimina la diagonal en E-25.
- Se desplaza la diagonal de E-26 a E-25.

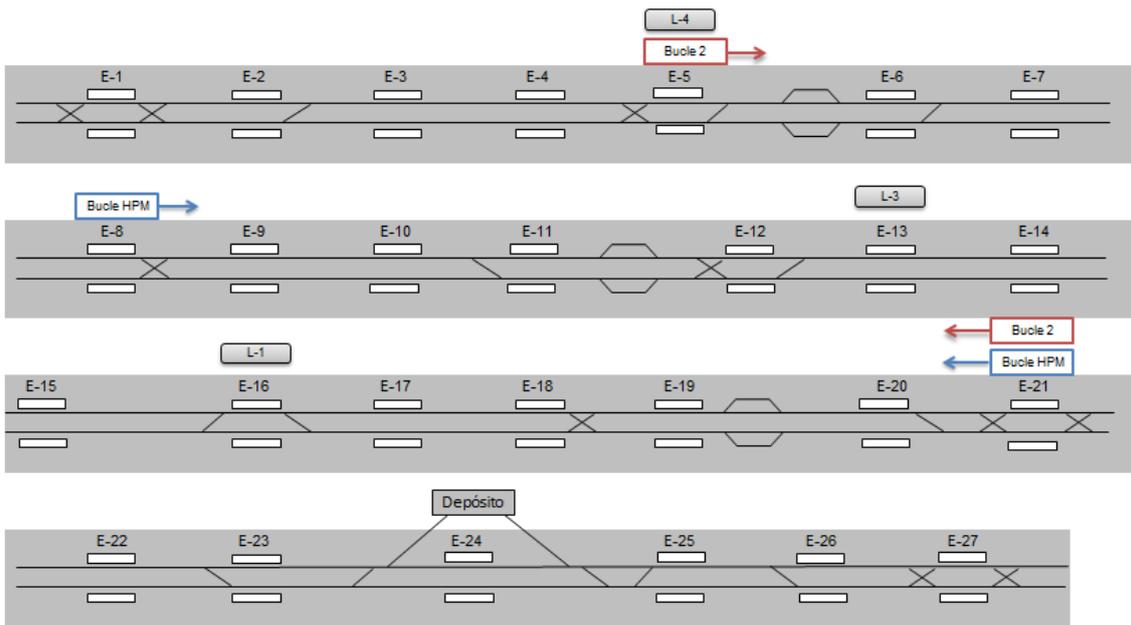


Figura 70: Esquema funcional inicial

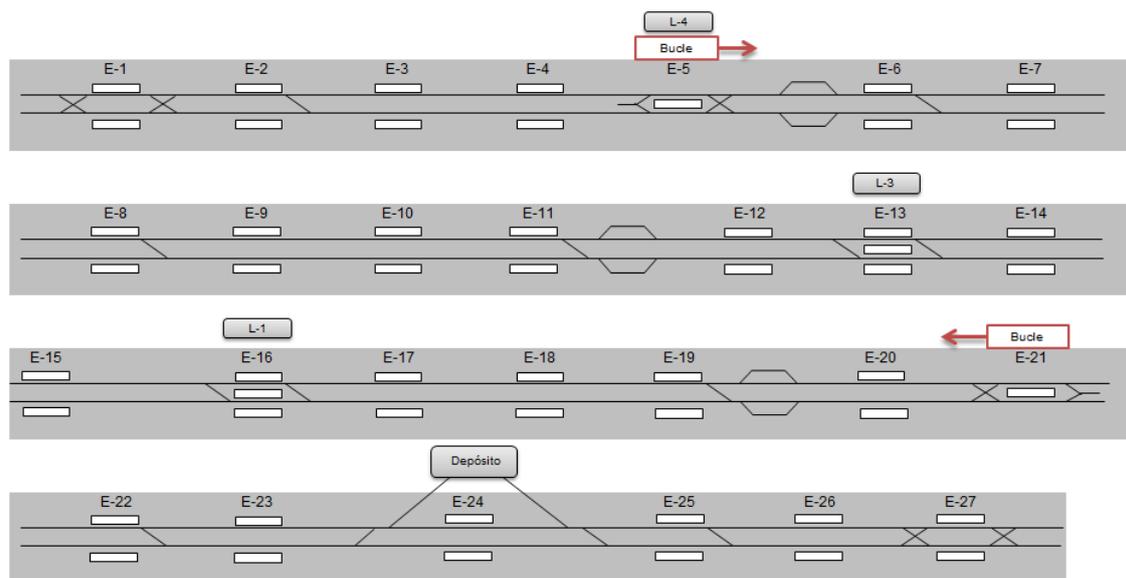


Figura 71: Esquema funcional final

De esta manera se responde a la gestión de los modos degradados de operación en combinación con los flujos de viajeros subidos y bajados de la línea y se permite una robusta operación con bucles.

## 5 PERSONAL DE OPERACIÓN

Disponer de una correcta organización y un personal adecuado es fundamental para alcanzar los máximos niveles de calidad asociados a una línea UTO. La calidad del transporte depende de la percepción de las personas que utilizan el servicio tienen de diversos aspectos como la limpieza en trenes y estaciones, la velocidad, la sensación de confianza y seguridad, la cantidad y calidad de la información disponible y la fiabilidad. Todos estos aspectos requieren en mayor o menor medida del factor humano para permanecer en los valores deseados.

La estructura organizativa del personal de operación es la siguiente:

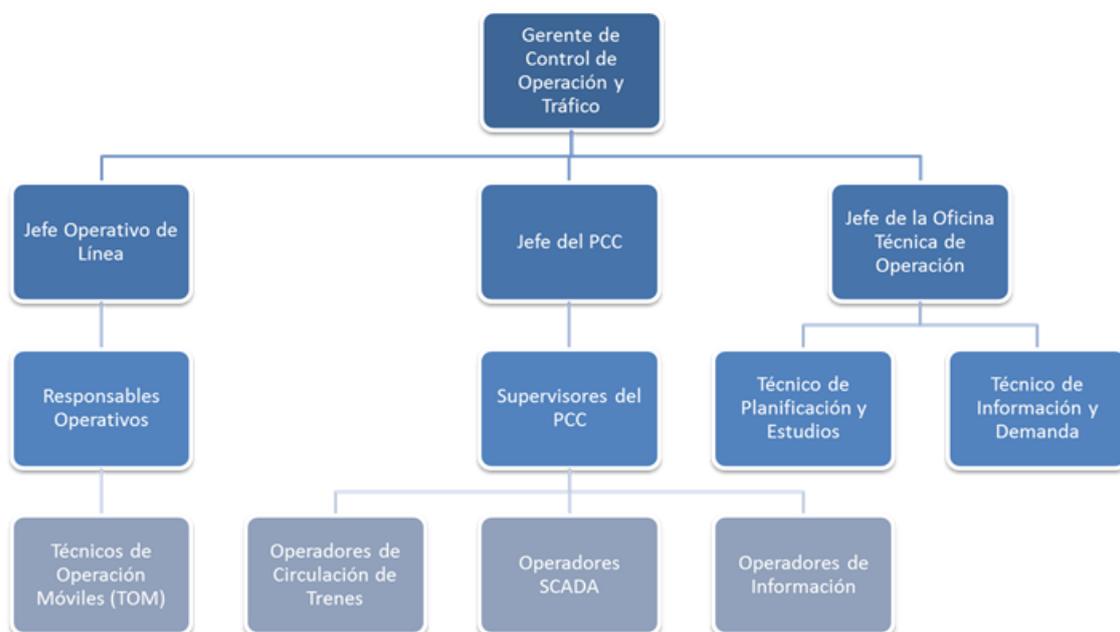


Figura 72: Estructura organizativa del personal de operación

### 5.1 PERSONAL DE LÍNEA:

En una línea convencional el personal tiene una visión limitada a su cometido específico, trabajando en lugares muy concretos (cabina de conducción, taquilla, etc.) disponiendo de poca autonomía para la toma de decisiones y de una limitada responsabilidad, desarrollando su trabajo de forma individual la mayor parte del tiempo.

Por el contrario, en las líneas automáticas el personal disfruta de una visión más general debido a que su multifuncionalidad implica cometidos más amplios, tienen movilidad funcional a lo largo de la línea, disponen de mayor autonomía y responsabilidad y trabajan en equipo de forma



habitual. Además, el proceso de automatización implica que todas las tareas rutinarias y relativas a la seguridad han sido automatizadas (incrementándose la seguridad al reducirse el factor de riesgo humano) y no requieren de personal en la línea para su actividad normal, por lo que se incrementa la importancia del tiempo de respuesta en el caso de que se produzca una incidencia.

El personal de una línea automática ha de tener una mayor capacitación técnica y una mayor orientación a la atención al viajero, por lo que en el caso de las líneas automáticas se hace necesario realizar una potente selección inicial, que permita disponer de personal con una formación técnica base, a la que se añadirá una **formación** adicional realizada regularmente y adecuados ejercicios prácticos sobre cómo actuar en caso de modos degradados y emergencia que permitan al personal tener una rápida respuesta ante las pocas incidencias que se produzcan. Esta formación es particularmente importante para el personal del Puesto de Control Central (PCC), que es el auténtico cerebro de decisión y acción de la línea automática.

El personal de línea ha de tener una buena capacitación técnica y orientación a la atención al viajero, por lo que su perfil corresponde al de un técnico con habilidades sociales e inquietud por aprender. Habrá de tener buenas habilidades técnico - operativas (educación técnica, analítico, resolución de problemas, ser riguroso en la aplicación de procedimientos) y sociales (comunicación, toma de decisiones, trabajo en equipo).

En este tipo de líneas se rompe con la compartimentación existente en las líneas convencionales de personal de trenes y personal de estaciones y con la separación de categorías del personal de la línea en función de si realiza tareas exclusivamente de operación, mantenimiento o atención al cliente, de forma que se pueden unificar en una **única categoría** laboral todas las funciones necesarias para prestar un buen servicio (el 40% de las líneas automáticas tiene una única categoría, siendo esta la practica más común en las líneas europeas). Esta categoría única tiene una formación y responsabilidad que corresponde a la que tendría un mando intermedio de una línea convencional por lo que habitualmente se usan nombres similares al de “Técnico de Operación Móvil” para designar a este personal de línea itinerante. La diversidad de funciones, visión general, toma de decisiones, autonomía, responsabilidad y comunicación con el cliente asociadas a este tipo de categoría favorecen el desarrollo profesional de estos trabajadores y les proporciona una experiencia muy útil para desarrollar futuras posiciones en otros estamentos superiores de la compañía. Además, el desarrollo profesional implica mayores niveles de satisfacción y motivación, menor absentismo y mayor sentimiento de pertenencia lo que redundará en un mejor servicio y por tanto en una mayor satisfacción del cliente y en una mejor imagen de la compañía.



Debido a la alta fiabilidad del sistema combinada con el uso de modos remotos desde el PCC apenas se producen incidentes en los que se demande la presencia de Técnicos de Operación Móviles (agentes itinerantes de la línea), lo que hace conveniente diferenciar las funciones que realizan en condiciones de operación normal y en condiciones de operación degradada:

- Funciones en condiciones normales de operación:
  - Operativo: Supervisar el correcto funcionamiento de la línea e identificar posibles mejoras.
  - Técnico: Realización de inspecciones y mantenimientos preventivos. Puede ser muy interesante tener en cuenta criterios de Total Productive Maintenance (TPM) o Mantenimiento Productivo Total, el cual se centra en la eliminación de pérdidas ocasionadas o relacionadas con paros, calidad y costes en los procesos de producción. En contra del enfoque tradicional del mantenimiento, en el que unas personas se encargan de “producir” y otras de “reparar” cuando hay averías, el TPM aboga por la implicación continua de toda la plantilla en el cuidado, limpieza y mantenimiento preventivos, logrando de esta forma que no se lleguen a producir averías, accidentes o defectos.
  - Cliente: Atención e información.
  
- Funciones en caso de incidencia:
  - Operativo: Colaborar con el PCC y tomar decisiones para minimizar la incidencia
  - Técnico: Llevar a cabo acciones de recuperación en coordinación con el PCC y los especialistas de mantenimiento (es muy conveniente disponer de personal experto del fabricante del material móvil). Las acciones de recuperación pueden requerir la conducción manual de trenes.
  - Cliente: Informar de la repercusión de la incidencia con mensajes claros, inequívocos y tranquilizadores, teniendo en consideración las necesidades del viajero.



## 5.2 PERSONAL DEL PUESTO CENTRAL:

El Puesto de Control Central (PCC) es el centro estratégico desde donde se gestiona, controla y supervisa permanentemente el servicio que se presta a los pasajeros, de acuerdo a la oferta definida, y a los procedimientos y niveles de calidad establecidos, en coordinación con el resto de áreas organizativas y por medio de los sistemas y recursos tecnológicos disponibles.

Se proporcionan instalaciones apropiadas para que los operadores centrales observen de manera efectiva la condición del sistema y obtengan un estado detallado de cualquier equipo y/o tren. En el caso de fallos y/o anomalías, será posible adoptar acciones apropiadas por medio de comandos remotos, llamar para obtener soporte local, y entonces implementar todas las acciones operativas necesarias de mitigación y contingencia.

En un sistema completamente automatizado sin conductor, el Centro de Control (bajo el control de los operadores centrales) es el “cerebro” del metro y el único centro de decisiones. Los operadores centrales gestionan con rapidez operaciones diarias y de contingencia, situaciones de emergencia y actividades de mantenimiento

Las actividades principales que tienen que realizarse en el PCC se enumeran a continuación:

- Gestión y regulación automática del tráfico a lo largo de toda la vía principal y depósito.
- Gestión de estación de Alimentación, Tracción Eléctrica y equipos de Depósito.
- Proporcionar soporte a través de instalaciones de comunicaciones (altavoz, teléfono, panel local) tanto a pasajeros como a personal. Además, cooperar con sistemas externos en lo que se refiere a problemas relacionados con la seguridad y coordinarse con los vigilantes para proporcionar primeros auxilios a los pasajeros.
- Gestión de diagnósticos y alarmas del sistema.

La línea UTO está preparada para ser gestionada de manera automática o de manera remota (PCC) tanto en condiciones normales de operación como en situaciones anómalas. El PCC es el auténtico cerebro de decisión y acción en tiempo real y adquiere una relevancia todavía mayor a la que ya tiene en una línea convencional. Desde el Puesto Central de Operaciones (PCC) se lleva a cabo el control automatizado de la gestión del mantenimiento y de la operación centralizada del sistema ferroviario.

El PCC es imprescindible para actuar de forma coordinada, rigurosa y procedimentada ante cualquier incidencia o situación degradada que se presente, y que a pesar de los altos índices de fiabilidad de los sistemas usados se acabaran dando con menor o mayor frecuencia. Es



fundamental que los procedimientos de actuación elaborados sean amplios y claros, minimizándose así los riesgos humanos en caso de incidencias y situaciones degradadas. En estos casos los mecanismos de información previstos son fundamentales y han de proveer mensajes claros, inequívocos y tranquilizadores. Desde el PCC se puede asegurar la explotación y la gestión de incidencias de forma remota mediante el uso de telecontroles, videovigilancia y telemandos. El personal del PCC asegura tanto las funciones de explotación como las de atención a las personas que viajan dentro de los trenes. Disponen de información suficiente para conocer el estado global del sistema, lo que les facilita la toma de decisiones para reorganizar el servicio de forma rápida y eficiente. La gran cantidad de medios disponibles para los operadores del PCC les permite asumir una responsabilidad más amplia y diversa de lo que es posible en una línea convencional.

En las líneas automáticas la oferta de servicio puede ser ajustada a la demanda con una mayor flexibilidad que en una línea convencional al no tener este tipo de líneas limitaciones impuestas por el personal. Dimensionar y gestionar esas variaciones de servicio requiere una gran capacitación, además de disponer de sistemas de gestión del tráfico y sistemas de gestión del personal adecuados.

El PCC tiene tres tipos de operadores:

- Operadores de SCADA: controlan las instalaciones de las estaciones y los depósitos, además de la tracción eléctrica.
- Operadores de Información de Pasajeros y Seguridad: se encargan de monitorear pasajeros, proporcionar soporte a través de anuncios y de la comunicación tanto con pasajeros como con vigilantes. Para ello se dispone de pantallas de información para pasajeros tanto en los vehículos de pasajeros como en las estaciones y de interfonos situados en puntos clave. Que los pasajeros dispongan rápidamente de una información adecuada es crítico para una línea UTO, especialmente en condiciones degradadas o de emergencia.
- Operadores de trenes: son responsables del control de la circulación de los trenes y de que estos se ajusten al horario. En caso de cualquier fallo el operador podrá ver la alarma relacionada con el fallo e iniciar una acción correctiva. Los trenes están supervisados continuamente por estos operadores independientemente de si están en modo automático o manual (el modo manual se usa en condiciones degradadas o de emergencia).

## **6 DIMENSIONAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DE VENTA Y PEAJE**

Un componente crítico en el movimiento de las personas es el tiempo empleado en ir y volver de sus actividades cotidianas, como trabajo, centros de estudio, centros comerciales y lúdicos. A la hora de diseñar el sistema de venta-peaje es conveniente considerar que lo más importante para las personas que usan el medio de transporte es el **tiempo total invertido puerta-puerta** de origen a destino, y no únicamente el tiempo que el sistema de transporte emplea para moverse desde el punto de origen al de destino. Teniendo este concepto en consideración, es conveniente diseñar sistemas que permitan una cómoda y rápida entrada y salida del sistema de transporte, lo cual es especialmente relevante en ferrocarriles metropolitanos subterráneos, al tenerse que emplear más tiempo para la llegada al vehículo que en los sistemas en superficie. Para ello el **sistema venta-peaje** a utilizar será **rápido, fácil de utilizar e intermodal**. El título de transporte será la tarjeta sin contacto, el teléfono móvil y la tarjeta bancaria.

Los criterios de diseño más importantes han de ser los de la seguridad y la accesibilidad (que el usuario pueda acceder al andén con el mínimo esfuerzo). La accesibilidad y el servicio de trenes ofrecido son dos de los factores que más influencia tienen en la calidad del transporte percibida por el viajero.

Para el dimensionamiento de los elementos de venta y peaje se la metodología de cálculo expuesta en el documento “Station planning standards and guidelines 2012 edition” del metro de Londres [12] y utilizándose algunos parámetros propios como tiempo de operación en máquina automática y taquilla.

### ***6.1 DIMENSIONAMIENTO DE PUESTOS DE VENTA MANUAL Y MÁQUINAS AUTOMÁTICAS:***

Con los datos de entrada de la demanda del año 2050, se realizan los cálculos del número de máquinas automáticas y taquillas teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se ha de asegurar que el 95% de los pasajeros que necesitan adquirir un título de transporte no esperan más de **3 minutos** para hacerlo.
- **33%** de los pasajeros que entran necesitan comprar un título de transporte.
- **69%** de las operaciones se realizan en Máquina Automática
- **31%** de las operaciones se realizan en Taquilla
- **20”** operación en Máquina Automática
- **40”** operación en Taquilla

El número de máquinas automáticas necesarias se calcula multiplicando el flujo de entrada horaria por 0,95 y por el tiempo que se emplea por operación en maquina automática. Este producto es dividido por el número de periodos de 3 minutos que hay en una hora (20) y el número de segundos que hay en 3 minutos (180):

$$M = \left( \frac{f_e * 0,95 * V_m}{20 * 180} \right)$$

El número de taquillas necesarias se calcula de forma análoga, sustituyendo el tiempo que se emplea por operación en maquina automática por el de la taquilla:

$$T = \left( \frac{f_e * 0,95 * V_t}{20 * 180} \right)$$

Siendo:

$f_e$ : Flujo de entrada en una hora (pasajeros/hora).

$V_m$ : Tiempo de venta por operación en maquina automática (segundos/operación).

$V_t$ : Tiempo de venta por operación en taquilla (segundos/operación).

$M$ : Número de máquinas automáticas.

$T$ : Número de taquillas.

Como se ha visto en el apartado de demanda existen estaciones con flujos muy elevados de pasajeros. Esto hace que en el cálculo de los elementos de venta para estas estaciones de como resultado un número importante de taquillas y maquinas.

La taquilla tiene una función de venta asistida (necesidad de información, devolución de cambio, compra de tarjeta, etc.), además de tener mayor el tiempo por operación por lo que se considera un máximo de 4 taquillas por estación (en los casos donde el número de taquillas es superior a 4 se complementa con máquinas automáticas en la misma cantidad que taquillas suprimidas). Se añade una maquina automática adicional de reserva por mantenimiento.

A continuación se muestra el dimensionamiento realizado para los elementos de venta:

Estación	Taquillas	Máquinas automáticas
E-1	3	4
E-2	2	3
E-3	4	8
E-4	2	3
E-5	4	25
E-6	1	2
E-7	3	4
E-8	2	3
E-9	1	2
E-10	2	3
E-11	3	4
E-12	2	3
E-13	4	63
E-14	3	4
E-15	1	3
E-16	4	75
E-17	2	3
E-18	4	5
E-19	2	3
E-20	3	5
E-21	4	13
E-22	3	4
E-23	4	5
E-24	1	2
E-25	2	3
E-26	4	11
E-27	3	5
<b>Total</b>	<b>73</b>	<b>268</b>

Figura 73: Dimensionamiento elementos de venta

Además es necesario tener prevista una longitud de al menos cuatro metros para albergar las posibles colas generadas en el proceso de compra del título de transporte en taquillas y máquinas automáticas, con el fin de que estas colas no interfieran con el tránsito normal de viajeros.

## 6.2 DIMENSIONAMIENTO DE LA BATERÍA DE TORNIQUETES:

El número total de torniquetes será:

$$P_t = P_e + P_s + X = \left( \frac{f_e}{c * 5} \right) + \left( \frac{f_s * 1,25 * l}{15 * c * 2} \right) + X$$

Siendo:

$P_t$ : Número de total de torniquetes de la batería

$P_e$ : Número de torniquetes de entrada (se redondea el número entero superior)

$f_e$ : Flujo de entrada en 5 minutos

$c$ : Capacidad del torniquete ( $n^\circ$  pasos/minuto). Se consideran 30 pasos/minuto para el cálculo.

$P_s$ : Número de torniquetes de salida (se redondea el número entero superior)

$f_s$ : Flujo de salida en 15 minutos (se redondea el número entero superior)

$I$ : Intervalo mínimo entre trenes considerado (minutos). Se considera un intervalo de 2 minutos.

$X$ : Torniquetes extra de reserva (hasta 10 torniquetes sin contar  $X$  se añade 1 torniquete extra. Para más de 10 torniquetes se añaden 2 torniquetes extra)

Se disponen de los datos de los flujos horarios de demanda para el año 2050 según lo indicado en el anexo 4. Los flujos de entrada de 5 minutos y de salida de 15 minutos son obtenidos aplicando los siguientes coeficientes:

	De 1 hora a 15 minutos	De 15 minutos a 5 minutos
HPM	0,27	0,4
HPT	0,26	

Figura 74: Coeficientes para pasar la hora pico a los 15 y 5 minutos pico [12]

Se considera que los pasos de pantalla móvil empleados tienen una capacidad de paso ( $c$ ) de 30 pasajeros por minuto incluyendo la validación.

Para el cálculo de los equipos de salida se toma una sola frecuencia entre trenes de 2 minutos. En todos los casos en los que baje la frecuencia de trenes, repercutiría en un menor número de equipos de pasos necesarios para la salida.

A continuación y a modo de ejemplo se muestran los detalles del cálculo realizado para la estación 5.

Se analiza la demanda prevista para la HPM y HPT del año 2050:

HPM Sentido 1		HPM Sentido 2		TOTAL HPM		HPT Sentido 1		HPT Sentido 2		TOTAL HPT	
Sube	Baja	Sube	Baja	HPM Sube	HPM Baja	Sube	Baja	Sube	Baja	HPT Sube	HPT Baja
11.222	1.863	738	9.727	<b>11.960</b>	<b>11.590</b>	9.092	430	1.235	10.454	10.327	10.884

Figura 75: Subidos y bajados en hora punta para 2050

Se coge el máximo valor del par de valores HPM sube y HPT sube (en este caso 11.960 > 10.327). Se usan los coeficientes de la figura 74 para convertir el flujo horario a un flujo de 5 minutos y se calcula el número de pasos de entrada redondeando el entero superior.

$$P_e = \frac{f_e}{c * 5} = \frac{11.960 * 0,27 * 0,4}{30 * 5} = 9$$

Se coge el máximo valor del par de valores HPM baja y HPT baja (en este caso 11.590 > 10.884) y se calcula el número de pasos de salida redondeando el entero superior. Se considera un intervalo de servicio de 2 minutos.

$$P_s = \left( \frac{f_s * 1,25 * I}{15 * c * 2} \right) = \left( \frac{11.590 * 0,27 * 1,25 * 2}{15 * 30 * 2} \right) = 9$$

Como el resultado de sumar el número de torniquetes de entrada ( $P_e$ ) más el número de torniquetes de salida ( $P_s$ ) es superior a 10 torniquetes se añaden 2 torniquetes de reserva ( $X$ ) a la batería lo que da un total de 20 torniquetes.

Repetiendo el cálculo para todas las estaciones se obtiene:

Estación	Número de torniquetes
E-1	4
E-2	5
E-3	7
E-4	5
E-5	20
E-6	3
E-7	8
E-8	5
E-9	4
E-10	3
E-11	4
E-12	3
E-13	47
E-14	5
E-15	3
E-16	37
E-17	3
E-18	6
E-19	3
E-20	4
E-21	11
E-22	4
E-23	6
E-24	4
E-25	3
E-26	10
E-27	6
<b>Total</b>	<b>223</b>

Figura 76: Dimensionamiento de la batería de torniquetes

Las estaciones con mayor número de torniquetes son las estaciones que tienen correspondencia con otras líneas (E-5, E-13 y E-16).

Según lo indicado en el punto 3.3 del documento “Station planning standards and guidelines\_2012 edition” de LU, las baterías de torniquetes bidireccionales han de disponer de al menos dos PMR (wide aisle gates). Tres PMR para baterías de hasta dieciocho torniquetes y cuatro PMR para el resto de casos.

Las baterías de torniquetes dispondrán de dispositivos luminosos que indiquen el modo de operación y el estatus de cada torniquete, ayudando a los pasajeros a establecer su ruta más eficiente y favoreciéndose de esta forma el flujo de los mismos.

Como se ha indicado con anterioridad la seguridad ha de ser uno de los criterios más importantes en el diseño. Según la NFPA 130 todos los pasajeros han de poder abandonar el andén en un tiempo inferior a 4 minutos y han de poder alcanzar un punto seguro en menos de 6 minutos.



Todas las estaciones garantizarán una correcta evacuación mediante el uso de elementos que permitan la libre salida en caso de emergencia (se estima que una “puerta de emergencia” de salida de 1,5 metros de ancho situada en la batería de torniquetes permite el paso de 125 personas/min, según lo indicado en manual “TCRP REPORT 100 – Transit Capacity and Quality of Service” [11]) es especialmente relevante para algunas estaciones del tramo central de la línea, en las que se prevén altas cargas en los trenes que pasan por la estación pero no grandes flujos de pasajeros de entrada y salida por dicha estación, en condiciones normales de servicio por lo que disponen de pocos torniquetes y han de permitir evacuar por puertas de emergencia.

Además es necesario considerar que la capacidad de salida del andén es suficiente como para asegurar que el andén se vacía de pasajeros que salen antes de que el siguiente tren llegue a la estación.

$$\text{Capacidad salida andén (pasajeros/minuto)} \geq \frac{\text{Pasajeros/tren}}{\text{Intervalo (minutos)}}$$

Al resultado anterior se le suele añadir un factor de seguridad de un 20% a un 30%.

## 7 CONCLUSIONES

Tras planificar la operación de la línea se concluye que las altas prestaciones ofrecidas por las líneas UTO permiten un menor coste de explotación, menor tiempo de recorrido, mayor velocidad comercial, fiabilidad, disponibilidad, seguridad y flexibilidad de la oferta a lo largo de toda la vida útil del proyecto que deben compensar el mayor coste inicial del sistema. En el metro de París se estima que los costes de operación (por vehículo) para el UTO son la mitad que los de los metros convencionales [9]. Para líneas convencionales que quieran mejorar con el UTO se estima que en general el periodo de amortización de la inversión puede ser de aproximadamente 10 años [9].

Para poder satisfacer la demanda prevista y maximizar la eficiencia de la operación, además de disponer de la tecnología más moderna de seguimiento de trenes (CBTC y UTO) es necesario realizar las siguientes modificaciones sobre el esquema inicial de la línea:

### 1. **Reducir el tiempo de parada en las estaciones 13 y 16:**

Debido al elevado número de pasajeros que suben y bajan (más de 30.000 pasajeros por hora en el sentido más cargado durante la HPM 2050) en E-13 y E-16 se considera necesario disponer de **tres andenes** (2 andenes laterales y un andén central) que permitan segregar los flujos de subida y de bajada de pasajeros y reducir los tiempos de parada previstos a valores aceptables con el fin de no comprometer la capacidad máxima de la línea y poder ofertar un intervalo mínimo de 90 segundos.

Estos andenes permiten usar las puertas de ambos costados del tren para la subida y la bajada de pasajeros disponiéndose de 48 puertas en lugar de 24. Cuanto mayor sea el espacio para salir y entrar menor será el tiempo de parada y menor efecto tendrá el malfuncionamiento de una puerta.

Además puede ser conveniente disponer de personal auxiliar que gestione con agilidad y eficacia los flujos de viajeros. Es importante minimizar el tiempo que las puertas permanecen abiertas una vez que no suben-bajan pasajeros, especialmente cuando la línea está operando al límite de su capacidad.

Para conseguir una mayor eficiencia en la operación de la línea (un menor tiempo de parada permite una mayor velocidad comercial) los operadores del PCO o el personal de línea pueden proceder a mandar una orden de cierre de puertas en casos específicos.

## 2. Incrementar de la capacidad máxima de maniobra en cabecera:

Tras estudiar diferentes maniobras de inversión de marcha en las estaciones terminales se concluye que su capacidad es insuficiente para cubrir la oferta de servicio prevista para la HPM del año 2050 ya que la terminal a su máxima capacidad es capaz de permitir 37 trenes/hora y se necesita ofertar 40 trenes/h.

Con el bucle la capacidad de maniobra necesaria en las estaciones terminales se reduce a la mitad. Sin embargo, se considera muy conveniente que las cabeceras dispongan de capacidad de maniobra suficiente para poder dar servicio en el caso de que el bucle no sea posible.

Tipo de maniobra	Cuello de botella (s)	Tiempo de maniobra (s)	Capacidad máxima (trenes/h)	Capacidad recomendada (80%)	Trenes/hora año 2020			Trenes/hora año 2050		
					HPM	HPT	HV	HPM	HPT	HV
Por dos andenes	97	95	37	29	24	15	12	40	30	17,1
Alternativo con dos andenes laterales (inversión por fondo de saco)	99 (70-99)	95-99	36	29	24	15	12	40	30	17,1
Alternativo con andén central (inversión por delante)	103 (88-103)	0	34	27	24	15	12	40	30	17,1
Por un andén	128	0	28	22	24	15	12	40	30	17,1

Figura 77: Comparativa capacidad de maniobra en cabecera- niveles de servicio

Al aumentar la frecuencia se somete a la cabecera al límite de su capacidad, lo que hace que la bretelle del saco no pueda moverse hasta que la unidad perseguidora se detiene en la estación al estar el aparato de vía incluido en su distancia de seguridad de frenado, lo cual ralentiza la maniobra.

Se procede a estudiar el **desplazamiento de la bretelle** del fondo de saco hasta una distancia tal que permita maniobrar el aparato de vía con independencia de la posición de la unidad perseguidora.

Para determinar la separación entre la bretelle y el piñón de la estación se calcula la distancia de frenado necesaria para una velocidad de 45 km/h y una deceleración de  $1\text{m/s}^2$  (aunque en emergencia la desaceleración máxima es de entre 1,3 y  $1,5\text{ m/s}^2$  se usa el valor de la deceleración mínima en frenado eléctrico regenerativo servicio de  $1\text{m/s}^2$ ). Se toma como punto de inicio de la frenada el piñón de salida al saco de A2. El resultado es de 78 metros. Se añaden 10 metros adicionales desde el punto de parada calculado al inicio del aparato de vía del saco por lo que la distancia de separación necesaria entre el piñón de salida al saco y el inicio de la bretelle se estima en **88 metros**.

Con la bretelle en su posición original el tren emplea 33,5 segundos en alcanzar el saco y ha de esperar 16,5 segundos hasta que su perseguidor se posicione y pare en la estación para poder invertir la marcha. Con la bretelle desplazada se emplean 7,4 segundos más en alcanzar el punto de parada del saco pero no es necesario esperar para invertir la marcha por lo que se ahorra tiempo.

Con esta configuración se alcanza una capacidad máxima de 41 trenes/hora dando servicio por un solo fondo de saco y de **42 trenes/hora** dando servicio alternativo por ambos fondos de saco.

La capacidad de maniobra es incrementada 5 trenes/hora con la bretelle desplazada (la capacidad máxima se obtenía dando servicio por dos andenes y era de 37 trenes/hora).

Tipo de maniobra	Cuello de botella (s)	Tiempo de maniobra (s)	Capacidad máxima (trenes/h)	Capacidad recomendada (80%)	Trenes/hora año 2020			Trenes/hora año 2050		
					HPM	HPT	HV	HPM	HPT	HV
Por dos andenes alternativamente (bretelle desplazada 88 metros)	84 (70-84)	92	42	34	24	15	12	40	30	17,1
Por dos andenes (bretelle desplazada 88 metros)	86	92	41	33	24	15	12	40	30	17,1
Por dos andenes	97	95	37	29	24	15	12	40	30	17,1
Alternativo con andén central (inversión por delante)	103 (88-103)	0	34	27	24	15	12	40	30	17,1
Por un andén	128	0	28	22	24	15	12	40	30	17,1

Figura 78: Capacidad de maniobra en cabecera- niveles de servicio (con bretelle desplazada)

Siempre que la capacidad de maniobra lo permita es conveniente realizar la maniobra de inversión de marcha por la entrada de la estación (servicio por un andén o servicio alternativo con andén central) ya que de esta forma se invierte la marcha sin aumentar el RTT y por tanto se reducen los coches\*km realizados, el consumo de energía y el material móvil necesario.

### 3. Establecer un bucle único con vías de inversión de marcha entre E-5 y E-21:

Mediante el empleo de bucles se obtiene una densidad de ocupación más uniforme durante toda la línea y se permite reducir el número de trenes necesarios para dar servicio, lo cual aumenta significativamente la eficiencia de la operación.

En la configuración inicial de la línea se preveía la operación por bucles entre las estaciones de E-8 a E-21 durante la HPM y de E-5 a E-21 durante el resto de franjas horarias.



En el estudio para el establecimiento de bucles se demuestra que para no sobrepasar la densidad máxima considerada de 6 pasajeros/m<sup>2</sup>, durante la HPM de 2020 sería necesario desplazar el bucle a E-7 y durante la HPM de 2050 a E-6.

Debido a las altas frecuencias previstas en la línea y con el fin de no perturbar la circulación se considera que la mejor opción para dar los bucles en las estaciones intermedias es disponer de vías interiores de inversión de marcha.

Como fuera de la HPM estaba previsto dar el bucle desde E-5 y durante la HPM no se puede dar desde E-8 se considera que la mejor ubicación para las vías de inversión de marcha es en las estaciones 5 y 21.

Para determinar si el bucle es beneficioso en términos económicos será necesario estudiar si el aumento del coste de la obra civil que implica la construcción de estas vías de inversión de marcha queda compensado con el ahorro de material móvil (el empleo del bucle permite una reducción de 11 trenes en la flota total), consumo de energía y reducción de coches\*km.

Se ha estimado que el establecimiento del bucle permite un ahorro de **498 millones de euros** en el período comprendido entre los años 2020 y 2050.



## 8 APORTACIONES

A través del proyecto de fin de máster se adquiere una visión general de los ferrocarriles metropolitanos automáticos que permite determinar en qué casos es más beneficioso disponer de una línea automática que de una línea convencional.

Mediante el diseño y planificación de la operación de la línea automática se detectan diversos elementos que impiden alcanzar los niveles de servicio necesarios para satisfacer la demanda (capacidad de maniobra insuficiente en cabeceras, imposibilidad del establecimiento de los bucles previstos, etc.). Se buscan soluciones que permitan ofertar el servicio requerido y maximizar la eficiencia de la operación realizando algunas modificaciones en el esquema inicial de la línea automática (se modifica la ubicación de algunos aparatos de vía, se emplean de vías de inversión de marcha para el establecimiento de bucles, etc.).

La estructura del estudio realizado y las medidas adoptadas pueden ser empleadas para diseñar y planificar de forma eficiente otras líneas metropolitanas. Debido a las similitudes existentes entre las líneas automáticas y las líneas convencionales se considera que puede ser empleado para ambos tipos de líneas.

## 9 ANEXOS

### 9.1 ANEXO 1: DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA AUTOMATIZACIÓN EN FERROCARRILES METROPOLITANOS

#### 9.1.1 Grados de operación automática (GoA)

En el proceso de automatización la responsabilidad de la gestión de la operación del tren pasa del conductor al sistema de control del tren. El grado de automatización (GoA) define que responsabilidades (para las funciones básicas de la operación del tren) corresponden al personal de operaciones y que responsabilidades corresponden al sistema.

Funciones básicas para la explotación del tren		Explotación del tren en conducción marcha a la vista	Explotación no automática del tren	Explotación semiautomática del tren	Explotación del tren sin maquinista	Explotación del tren sin tripulación
		GOA0	GOA1	GOA2	GOA3	GOA4
Garantizar el movimiento seguro de los trenes	Garantizar la seguridad de los itinerarios	x (mando y control de los cambios de agujas por parte del sistema)	sistema	sistema	sistema	sistema
	Garantizar la separación segura entre trenes	x	sistema	sistema	sistema	sistema
	Garantizar la velocidad segura de los trenes	x	x (supervisado parcialmente por el sistema)	sistema	sistema	sistema
Conducción de un tren	Controlar la aceleración y el frenado	x	x	sistema	sistema	sistema
Supervisar la vía	Evitar la colisión con obstáculos	x	x	x	sistema	sistema
	Evitar la colisión con personas en la vía	x	x	x	sistema	sistema
Supervisar el embarque y desembarque de viajeros	Controlar las puertas del tren	x	x	x	x	sistema
	Evitar daños a personas entre coches o entre el andén y el tren	x	x	x	x	sistema
	Garantizar las condiciones seguras de puesta en marcha del tren	x	x	x	x	sistema
Explotación de un tren	Poner el tren en explotación o poner el tren fuera de servicio	x	x	x	x	sistema
	Supervisión del estado del tren	x	x	x	x	sistema
Garantizar detección y gestión de las situaciones de emergencia	Detectar humo/fuego y detectar descarrilamientos, detectar la pérdida de integridad del tren, gestionar las situaciones de emergencia notificadas por los viajeros (aviso/evacuación, supervisión)	x	x	x	x	sistema y/o miembros del personal del CRC

NOTA x = responsabilidad del personal de explotación (puede llevarlo a cabo el sistema UGTMS) sistema = debe llevarlo a cabo el sistema UGTMS

Figura 79: Grados de automatización según UNE-EN 62290-1 [22]



### **GoA0: Explotación del tren en conducción marcha a la vista (manual)**

*“En este grado de automatización el maquinista es totalmente responsable y no es necesario ningún sistema que supervise sus actividades. No obstante, algunos cambios de aguja y vías únicas pueden estar supervisados por el sistema de manera parcial”*

### **GoA1: Explotación no automática del tren (señalización en cabina)**

*“En este grado de automatización el maquinista está en la cabina al frente del tren observando la vía y deteniendo el tren en caso de que se observe una situación peligrosa. El maquinista ordena la aceleración y el frenado cumpliendo con las señales de vía o con las de cabina. El sistema supervisa las actividades del maquinista. La supervisión se puede realizar en lugares específicos, puede realizarse de manera semicontinua o continua, en particular con respecto a señales y velocidad. El personal de explotación es responsable de la salida segura del tren de la estación, el cierre de puertas incluido”*

### **GoA2: Explotación semiautomática del tren (STO)**

*“En este grado de automatización el maquinista está en la cabina al frente del tren observando la vía y deteniendo el tren en caso de que se observe una situación peligrosa. La aceleración y el frenado están automatizados y el sistema supervisa la velocidad de forma permanente. El personal de explotación es responsable de la salida segura del tren de la estación (la apertura y el cierre de puertas se puede realizar de manera automática”*

### **GoA3: Explotación del tren sin maquinista (DTO)**

*“En comparación con el GoA2, en este grado de automatización se necesitan medidas adicionales ya que no hay maquinista en la cabina al frente del tren, para observar la vía y detener el tren en caso de que se observe un situación peligrosa. En este grado de automatización, es necesario que vaya a bordo del tren personal de explotación. El personal de explotación puede ser responsable de la salida segura del tren de la estación, cierre de puertas incluido, o bien se puede realizar el proceso de forma automática”*

## GoA4: Explotación del tren sin maquinista (UTO)

“En comparación con el GoA3, en este grado de automatización se necesitan medidas adicionales ya que no hay personal de explotación a bordo del tren. La segura salida del tren de la estación, cierre de puertas incluido, se tiene que realizar de manera automática. De manera más específica, el sistema soporta la detección y gestión de condiciones de peligro y situaciones de emergencia, como por ejemplo, la evacuación de viajeros. Algunas condiciones de peligro y situaciones de emergencia, pueden requerir la intervención de personal, como por ejemplo, en un descarrilamiento o ante la detección de humo o fuego.”

### 9.1.2 Líneas automáticas existentes en la actualidad

El número de kilómetros en servicio de líneas automáticas está teniendo un crecimiento importante en los últimos años, y se espera que la tendencia de crecimiento en las próximas décadas sea incluso mayor que la actual:

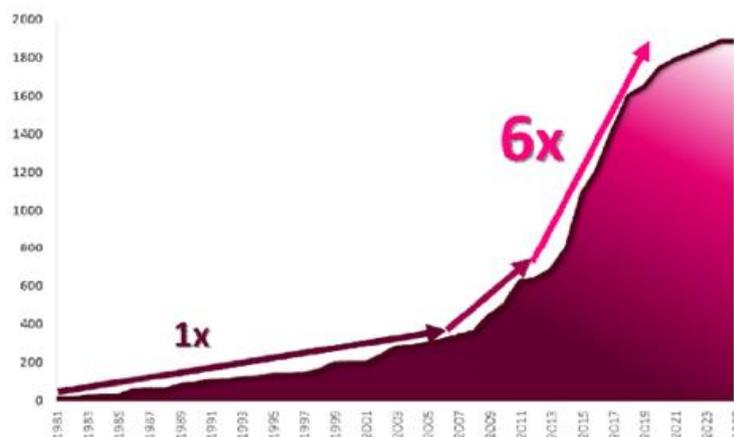


Figura 80: Número de kilómetros de metro automático [1].

Entre las diferentes administraciones de ferrocarriles metropolitanos que han decidido acometer la automatización integral de la circulación de sus unidades de metro (sistemas UTO) encontramos diferentes tipos como las líneas de pequeño gálibo y rodadura neumática (Lille, Toulouse, Turín, Lausanne), líneas de mayor gálibo y rodadura de acero (Vancouver, Kuala Lumpur, Barcelona), líneas de gran gálibo y rodadura neumática (Lyon y París) y líneas de gran gálibo y rodadura de acero (Copenhague, Singapur, Nuremberg y Londres).

A continuación se expone la evolución de las líneas automáticas desde su origen hasta las previsiones para 2025 según el estudio realizado por la UITP:

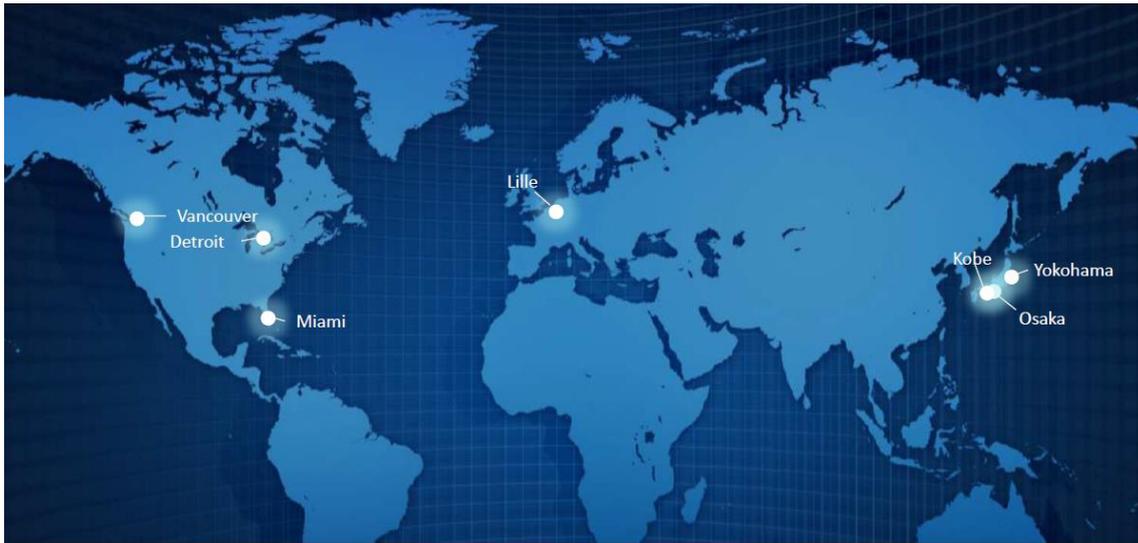


Figura 81: Distribución geográfica de las líneas automáticas (1980 – 1990) [1].



Figura 82: Distribución geográfica de las líneas automáticas (1990 – 2000) [1].



Figura 83: Distribución geográfica de las líneas automáticas (2000 – 2013) [1].



Figura 84: Distribución geográfica de las líneas automáticas prevista para 2025 [1].

En las figuras anteriores solamente se incluyen líneas UTO sin personal a bordo (GoA4 según IEC62267) que son líneas de transporte público (se descartan los people movers, etc.) y que disponen de trenes con una capacidad mínima de 100 pasajeros. Las líneas más significativas que no se mencionan en el estudio por no cumplir con los criterios anteriores son la línea 10 del Metro de Shanghai (tiene 30 km y fue diseñada como UTO pero en el momento del estudio se operaba de forma manual), Makkah (18 km, fue diseñada como UTO pero en el momento del estudio tampoco se operaba como tal) y Ryadh (12 km, no se considera un sistema de transporte público al servir únicamente al campus universitario).

A continuación se muestra la longitud de las líneas automáticas existentes en cada una de las 25 ciudades mostradas con anterioridad:

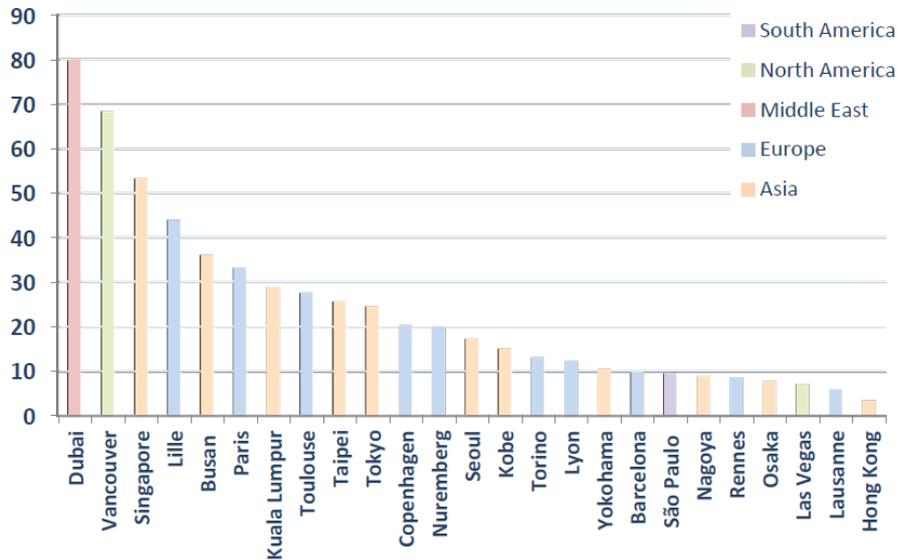


Figura 85: Km de metro automático por ciudad existentes en 2011 [1].

De las 25 ciudades mostradas en la figura anterior, 13 disponen de más de una línea automática (Barcelona, Busan, Copenhague, Dubái, Kobe, Lille, Núremberg, París, Singapur, Taipéi, Tokio, Toulouse y Vancouver). En la siguiente tabla se muestran las 10 líneas automáticas en operación de mayor longitud:

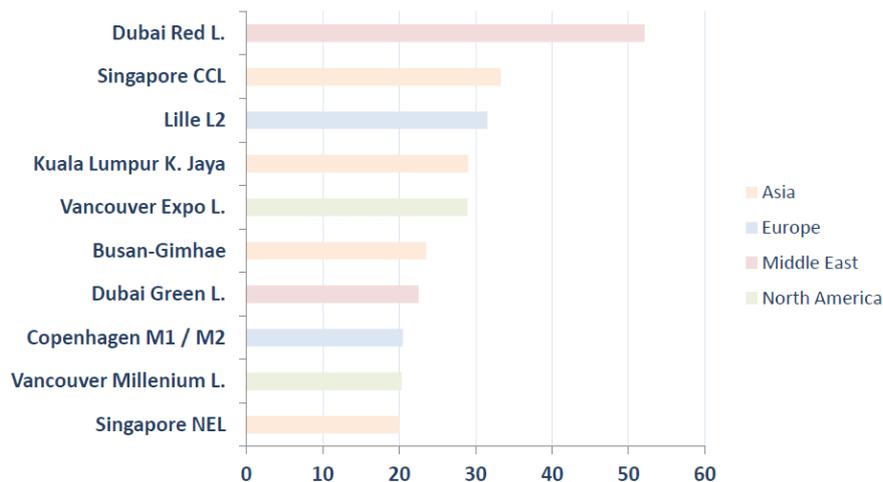


Figura 86: Líneas automáticas en operación de mayor longitud existentes en 2011 [1].

De todas las líneas automáticas existentes a la fecha de la elaboración del estudio cabe destacar las siguientes características:

- Capacidad de los trenes: Menores de 700 pasajeros/tren en el 76% de las líneas. Las líneas con trenes de alta capacidad (superiores a 700 pasajeros/tren) son minoría con el 24% restante:
- Sistemas de control de intrusión a la plataforma de vía: El 82% disponen de puertas de andén mientras que el resto dispone de sistemas de detección.
- Sistema de tracción: Aunque el 84% de las líneas disponen de tercer carril en los últimos años se ha incrementado la tendencia del uso de catenaria.

#### **9.1.2.1 EVOLUCION DE LAS LÍNEAS AUTOMÁTICAS**

A pesar de la percepción general es que la tecnología UTO es un desarrollo muy reciente la realidad es que es una tecnología suficientemente madura con más de 30 años de experiencia en operación.

En el año 1983 se puso en servicio el primer metro íntegramente automático, denominado VAL (vehículo automático ligero), en la ciudad de Lille con una línea de pequeño gálibo y rodadura neumática. Actualmente el metro de Lille dispone de dos líneas, la línea 1 cuenta con 13,5 km y 18 estaciones tuvo un coste de 564 millones de euros (41,7 M€/km), mientras que la línea 2 tiene 32 km y 41 estaciones tuvo un coste de 884 millones de euros (27M€/km). El trayecto discurre por túnel y en superficie, la distancia media entre estaciones es de aproximadamente 800 metros. Todas las estaciones disponen de puertas de andén. La velocidad máxima es de 80km/h. Los andenes disponen de paneles informativos que informan del tiempo que falta para la llegada del próximo tren. Todos los vestíbulos y andenes son accesibles para personas con movilidad reducida. Inicialmente se prestaba servicio mediante composiciones de dos coches, pudiendo pasarse a cuatro coches en el momento necesario. La ausencia de agentes visibles en la red generó una cierta percepción de inseguridad y se produjeron ciertos episodios de vandalismo y agresiones que hicieron descender la demanda un 10%. Para solventar esta situación se instalaron 1.200 cámaras de CCTV y se contrataron 400 agentes itinerantes. El metro de Lille circula con intervalos de 72 segundos tiene una capacidad de transporte de 8.000 personas por hora y sentido.

En 1985 se puso en servicio la primera línea del SkyTrain del metro de Vancouver, que es un metro automático de pequeño gálibo con ruedas de acero y con trazado en viaducto compuesto por dos líneas y 33 estaciones.



En 1991 se puso en servicio la línea D del metro de Lyon, siendo esta la primera línea de metro de gran gálibo en construirse como metro íntegramente automático. Fue inaugurada en conducción manual pasando a ser una línea íntegramente automática en 1992. Tiene 13 km y 15 estaciones, siendo la distancia media entre estaciones de 930 metros y la frecuencia mínima de 105 segundos. Es de las pocas explotaciones automáticas que no dispone de puertas de andén (al igual que Kuala Lumpur y Núremberg) teniendo instalados en su lugar un sistema de detección de caída de objetos mediante rayos infrarrojos que cortan la corriente de tracción en ese sector de la línea en caso de detectar la caída de un objeto mayor de 15 cm.

### *9.1.2.2 CONVERSIONES DE LÍNEAS CONVENCIONALES A LÍNEAS AUTOMÁTICAS*

La mayoría de las líneas automáticas existentes han sido concebidas desde su diseño inicial para funcionar en dicho modo. Sin embargo, también se han convertido con éxito líneas convencionales a líneas automáticas como es el caso de la línea U2 del metro de Núremberg (las primeras circulaciones compartidas entre trenes convencionales y automáticos tuvieron lugar en 2008) y la línea 1 del metro de París.

A finales de 2002 se comenzaron los primeros estudios de factibilidad para la conversión de línea convencional a automática de la **línea 1 del metro de París**. En 2007 se comenzaron los trabajos en la línea. Entre 2009 y 2011 se instalaron las puertas de andén.

En 2011 se completó la conversión de la línea, combinándose de forma transitoria la explotación con trenes con conductor, los cuales fueron desapareciendo paulatinamente hasta la completa automatización del servicio, demostrándose que es posible convertir líneas de gran capacidad sin interrumpir el servicio, abriéndose el camino para muchos más proyectos de automatización de líneas convencionales.

La citada línea 1 fue inaugurada en el año 1900, tiene una longitud de 16,6 km y considerándose un radio de 500 m sirve a 280.000 habitantes y 330.000 puestos de trabajo. Es la línea más antigua y con mayor demanda del metro de París con 725.000 pasajeros diarios (207 millones de pasajeros anuales).

Tras los beneficios observados en cuanto a calidad de servicio y flexibilidad de la oferta para cubrir demandas imprevistas, y la experiencia adquirida en la línea 14 la RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens), compañía arrendataria autónoma de los transportes



parisinos, decidió en 2003 de lanzar el ambicioso proyecto de automatizar la línea 1 del metro de París.

La línea 1 fue elegida debido a la dificultad existente para poder **ajustar la oferta a la demanda**, ya que la predicción de la misma era muy complicada debido a las características de la línea. Además debido a la antigüedad de sus instalaciones era necesario realizar una renovación de las mismas. La automatización completa de la línea permite al operador anticiparse a las variaciones de la demanda con respecto a la demanda prevista y ajustar la oferta en consecuencia de una forma casi instantánea.

Además, la ausencia de personal de conducción y el rendimiento del sistema permiten incrementar la velocidad comercial de la línea al reducir los tiempos de maniobra en cabecera y optimizar el cumplimiento de los perfiles de velocidad, reduciéndose el tiempo de viaje necesario para cada pasajero y optimizándose los consumos de energía.

El sistema escogido por la RATP está basado en CBTC (comunicaciones por radio y cantón virtual). Este sistema permite reducir los intervalos de la línea hasta valores de 85 segundos. La señalización lateral fue necesaria durante la fase de operación mixta y permanece operativa como respaldo a posibles modos degradados de operación.

Las puertas de andén son esenciales para prevenir la presencia no autorizada de personas en la plataforma de vía, lo cual causaba un número considerable de perturbaciones en la línea, por lo que para la línea 1 se han instalado puertas de andén de media altura en todos los andenes.

El proyecto de automatización de la línea 1 es económicamente viable y se prevé que el ROI sea alcanzado en 10 años.

Algunos números de la línea 1: 160 millones de viajeros/año, 16,5 km, 25 estaciones, 49 trenes de 6 coches, 772 pax/tren, 90 metros, 80 km/h, 954 PSDs, 1000 cámaras CCTV, 80 bases de radio y 700 balizas.

Está previsto que durante los próximos años tenga lugar la automatización de la línea 4 del metro de París, que con 12,1 kilómetros de longitud transporta a 700.000 viajeros diarios, siendo la segunda con mayor demanda tras la línea 1, basándose en la experiencia adquirida en la transformación de dicha línea. El proyecto tiene un coste estimado de 256 millones de euros.



### 9.1.3 Elementos clave para la automatización de ferrocarriles metropolitanos

Los progresos técnicos en los campos de la informática, la electrónica y las comunicaciones han hecho posible que el sistema de control de tren completo sea capaz de supervisar, operar y controlar el proceso de operación completamente. Esto se consigue mediante una combinación de elementos (algunos humanos, algunos mecánicos) ubicados en el tren, a lo largo de las vías, en estaciones, y en instalaciones centrales remotas. Estos elementos interactúan para formar un sistema de mando y control con cuatro operaciones principales:

- **Protección del tren:** Prevención de colisiones y descarrilamientos.
- **Operación del tren:** Control del movimiento del tren en la línea principal así como parada en estaciones y otras ubicaciones de parada.
- **Supervisión del tren:** Dirección del movimiento del tren en la línea principal en relación al horario o regulación de espaciamiento.
- **Comunicación:** intercambio de información entre elementos del sistema.

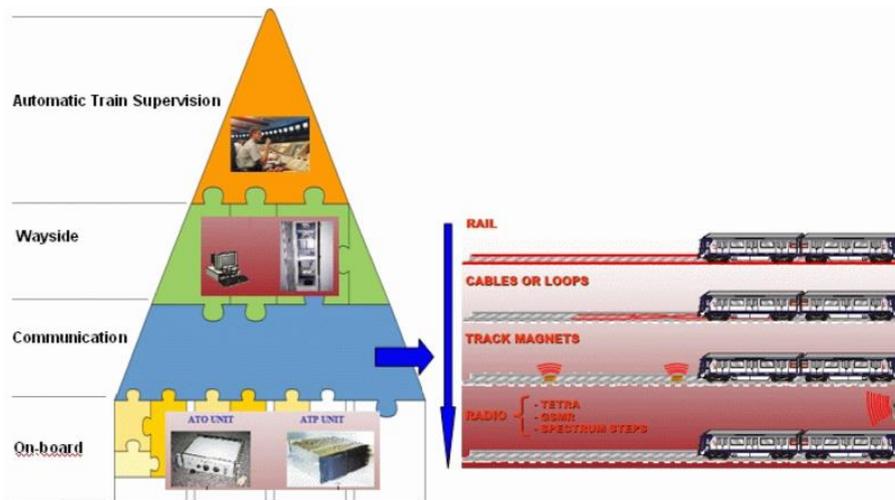
Cada una de las cuatro operaciones, en cierta medida, realiza su propia función independientemente de las otras tres. La interacción de las cuatro operaciones se coordina a través de las computadoras en el PCC con el fin de conseguir un sistema de control en tiempo real integrado.

Toda la funcionalidad del Sistema ATC (Automatic Train Control) consiste por tanto en tres funciones primarias:

- **Automatic Train Protection (ATP):** Es el sistema de protección automática del tren que controla todo el equipo que asume funciones relacionadas con la seguridad de la circulación de los trenes (safety). Evita que no se respete la señalización semafórica, las colisiones y que se supere la velocidad máxima aplicando freno de forma automática. Una línea equipada con ATP corresponde al menos a un GoA1.
- **Automatic Train Operation (ATO):** Es el sistema de conducción automática del tren que tiene como principal objetivo garantizar la óptima y confortable conducción de los trenes bajo las restricciones impuestas por el sistema de seguridad ATP.
- **Automatic Train Supervision (ATS):** Es el sistema de supervisión automática del tren que monitorea y visualiza la ubicación de todos los vehículos en circulación y ajusta automáticamente sin necesidad de la intervención de un operador los niveles de rendimiento de los trenes y los tiempos de espera en andenes para mantener el horario de trenes (o un espaciamiento constante). El sistema programa la inserción y retirada de

trenes según un horario y monitorea el movimiento y el rendimiento de cada tren en la línea.

En GoA4 los sistemas ATC trabajan dentro de un sistema global de señalización que comprende cuatro niveles: El sistema integral de supervisión y control (ATS), los equipos de campo o vía (wayside), el sistema de comunicaciones tren-tierra y el equipo embarcado en los trenes. Todo ello se muestra en la siguiente figura:



**Figura 87: Interdependencia sistema de campo y embarcados. Formas de transmisión tierra-tren [1].**

El puesto central supervisa la marcha global y proporciona funciones automáticas de supervisión del tren (ATS)

Las funciones ATP, ATO y ATC son llevadas a cabo tanto por equipos a bordo de los trenes, como por equipos instalados en la vía, y se comunican por medio del intercambio de datos.

- En la vía: proporcionando las funciones y señales de protección automática del tren (ATP) operación automática del tren (ATO), enclavamiento electrónico (IXL) y detección de vía libre.
- A bordo del tren: proporcionando las funciones de ATP, ATO y el interfaz hombre maquina (HMI) en las cabinas de conducción de los trenes.

La comunicación entre la vía y el tren puede llevarse a cabo mediante diversas formas y tecnologías tal y como se muestra en la figura 87. Gracias a los progresos de la Tecnología de la Información y la Comunicación (ICT) los equipos tradicionales como los bucles inductivos y las balizas están siendo sustituidos cada vez más por la comunicación por radio.



La más moderna tecnología de comunicación por radio usada en ferrocarriles metropolitanos es el Control del Tren Basado en la Comunicación (Communication Based Train Control, CBTC).

El CBTC se define como un *“Sistema de control automático de trenes basado en la localización continua del tren independientemente de los circuitos de vía, y equipado con un sistema de transmisión bidireccional continuo entre tren y tierra, así como procesadores tanto embarcados como en vía capaces de implementar funciones vitales”* según la IEEE Std 1474.1-1999, IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC). Performande and Functional Requirements.

La radio proporciona una comunicación con un ancho de banda más que suficiente para el ATP, ATO y ATS.

La radio elimina efectivamente la necesidad de circuitos de vía y bucles de transmisión, reduciendo así la cantidad de equipo en vía y su mantenimiento. Uno de los mayores beneficios que ofrece la radio, en comparación con los sistemas basados en cable, es su capacidad para crear una comunicación totalmente redundante con los trenes. Una comunicación intermitente es proporcionada por un equipo fijo (balizas), que transmite permanentemente los datos almacenados, haciendo con ello posible que los trenes determinen su localización y corrijan posibles errores como los ocasionados por deslizamientos o bloqueos. Esta comunicación intermitente permite la operación con cantones fijos y con supervisión continua y ofrece una funcionalidad ATO básica. Una comunicación continua es proporcionada por un sistema de radio de propagación libre, bucles inductivos o comunicación por la línea de alimentación eléctrica (PLC). Permite la operación por medio de cantones móviles o por cantones virtuales así como la funcionalidad ATO completa.

En un sistema que funcione según el principio de cantones móviles, la seguridad de los movimientos del tren, incluyendo el límite de la autorización de movimiento es gestionado por el equipo de lado de la vía, basándose en el estado de ocupación de la sección de vía.

Usando el mapa informatizado de la red que se encuentra a bordo del tren y las balizas de la vía, que se utilizan como puntos de referencia, el ten calcula su propia localización en el mapa basándose en su avance desde la última baliza cruzada. La información es entonces enviada al equipo del lado vía para que pueda hacer el seguimiento. La localización es por tanto independiente de la detección de la sección de vía libre. La funcionalidad de cantones móviles o cantones virtuales permite circular con intervalos entre trenes muy reducidos, mejorándose de esta manera la capacidad de transporte de una forma considerable.

#### 9.1.4 Beneficios y retos de la automatización de ferrocarriles metropolitanos.

Las líneas UTO tienen menores costes de operación que las líneas convencionales al reducirse el gasto de personal y al optimizarse el consumo energético.

Algunas administraciones optan por disponer de una línea automática nueva en primer lugar, para en base a esa experiencia automatizar una línea convencional. Por ejemplo, en el Metro de París se automatizó la línea 1 (a finales de 2011) después de haber realizado previamente una línea nueva automática (la línea 14 en 1998). Se calcula que en París los costes de operación del metro automático son la mitad que los de convencional.

En líneas nuevas implementar el UTO representa unos costes extra relativamente bajos en comparación con las ventajas obtenidas. Al tener una mayor fiabilidad se puede disponer de flotas más reducidas. En líneas convencionales que quieran mejorar con el UTO en paralelo a la mejora del material rodante y la señalización, el periodo de amortización se estima en unos 10 años [9].

A continuación se indican algunas ventajas adicionales de las líneas UTO:

- Mayor flexibilidad de la oferta de servicio a los cambios de demanda. La oferta no queda condicionada por los turnos del personal de conducción por lo que se puede responder con agilidad a picos de demanda.
- Mayor velocidad comercial y capacidad de transporte.
- Menor intervalo, tiempo de viaje y material móvil necesario.
- Mayor seguridad y eficiencia como resultado de la minimización del riesgo asociado al factor humano.
- Mayor fiabilidad y disponibilidad que en los sistemas convencionales que redundan en una mejor calidad del servicio y en menores costes de mantenimiento.
- Cambio del perfil del puesto de los puestos de trabajo (agente único): personal más técnico y orientado al cliente. El mayor desarrollo profesional fomenta mayores niveles de satisfacción y motivación, menor absentismo y mayor sentimiento de pertenencia lo que redundan en un mejor servicio y por tanto en una mayor satisfacción del cliente y en una mejor imagen de la compañía.
- Oportunidades de organización y optimización de costes
- Optimización del uso de la red
- Optimización de costes de personal y consumo de energía
- Reducida necesidad de personal de línea para la operación normal (Alto grado tecnológico)

- Reducción del consumo de energía

Los principales retos de las líneas automáticas están asociados con la resolución de emergencias con tren en interestación y sin personal a bordo y a superar el posible rechazo inicial que pudiera existir a viajar sin conductor.

## 9.2 ANEXO 2: INFRAESTRUCTURA

### 9.2.1 Aparatos de vía:

Los aparatos de vía son de radio  $R=500$  m y  $Tg=1:12$ , que permiten una velocidad por vía desviada de 65 km/h.

- Desvío simple: Está compuesta por un único desvío. Se disponen en los puntos de inicio y final de las terceras vías y en los puntos de inicio de las vías de acceso a cocheras. La longitud total del desvío es de 41,594 m.

A continuación se incluye un esquema de la geometría del desvío:

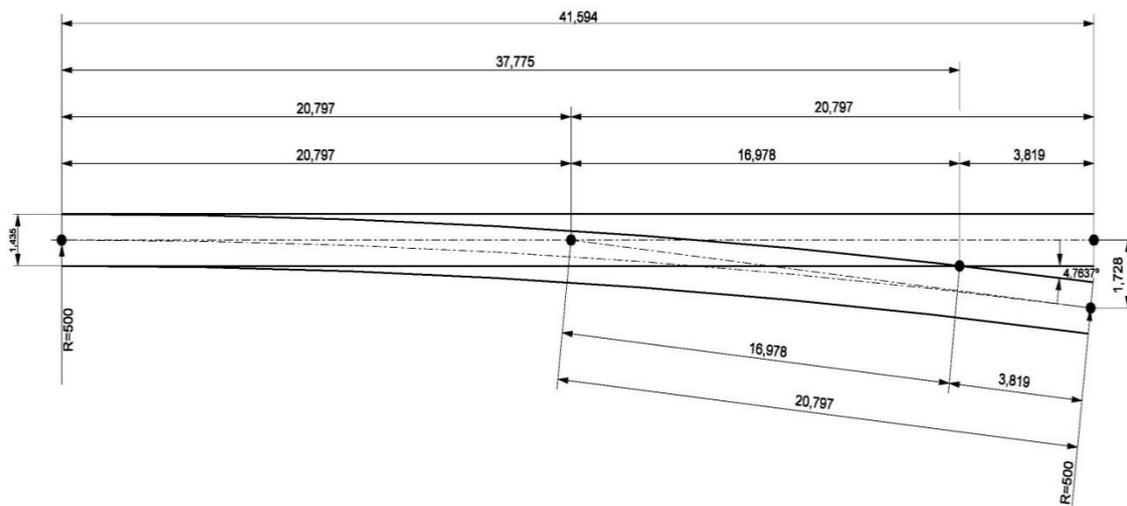


Figura 88: Geometría del desvío simple [20].

- Diagonal simple: Está compuesta por dos desvíos y sirve para el cambio de una vía a otra. La longitud total de la diagonal es de 87,195 m.

A continuación se incluye un esquema de la geometría de la diagonal simple:

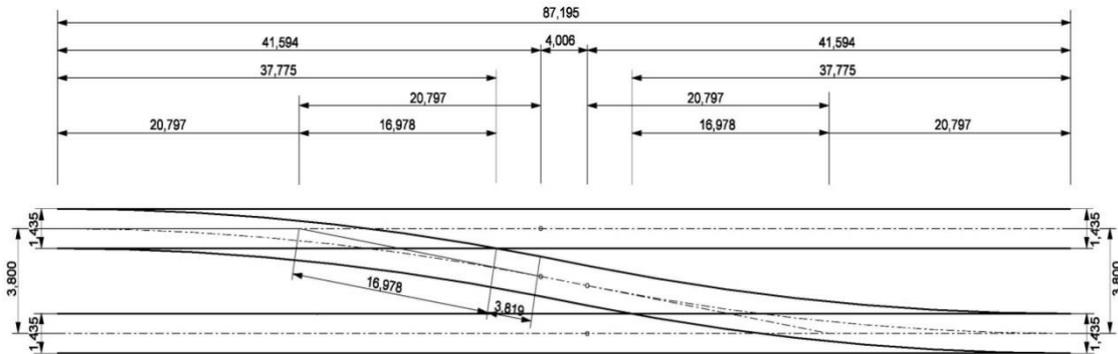


Figura 89: Geometría de la diagonal simple [20].

- Doble diagonal (Bretelles): Está compuesta por dos desvíos y sirve para el cambio desde cualquiera de las dos vías a la otra, reduciendo a la mitad la longitud que se necesitaría si dispusiesen dos diagonales simples consecutivas. La longitud total de la doble diagonal es de 87,195 m.

A continuación se incluye un esquema de la geometría de la diagonal doble:

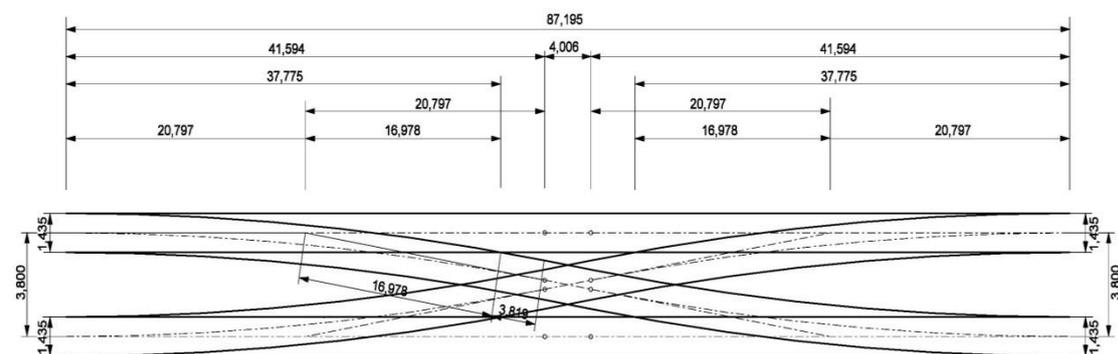


Figura 90: Geometría de la diagonal doble [20].

En las colas de maniobra se han dispuesto dobles diagonales de  $R=170$  m y  $Tg=1:8$  que permiten velocidad de paso por vía desviada de 38 km/h:

- Doble diagonal (Bretelles): Está compuesta por dos desvíos y sirve para el cambio desde cualquiera de las dos vías a la otra, reduciendo a la mitad la longitud que se necesitaría si dispusiesen dos diagonales simples consecutivas. La longitud total de la doble diagonal es de 51,568 m.

A continuación se incluye un esquema de la geometría de la diagonal doble de radio 170 y tg 1:18:

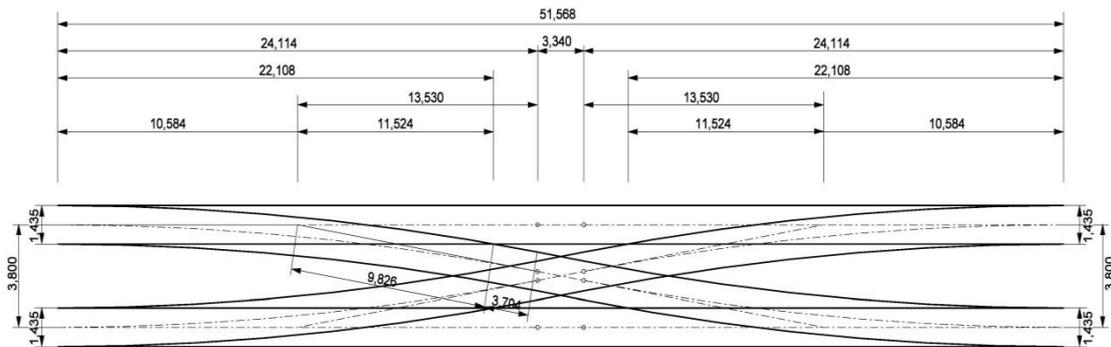


Figura 91: Geometría de la diagonal doble en sacos de maniobra [20].

### 9.2.2 Ubicación de las estaciones:

ESTACIONES	PK LÍNEA	DISTANCIA ENTRE ESTACIONES	LONG. ANDÉN (m)	TIPOLOGÍA ANDÉN
Estación 1	0+515		135	Lateral
Estación 2	1+960	1.445,21	135	Lateral
Estación 3	3+077	1.117,35	135	Lateral
Estación 4	4+078	1.000,61	135	Lateral
Estación 5	4+946	867,70	135	Central
Estación 6	6+028	1.081,83	135	Lateral
Estación 7	6+969	941,37	135	Lateral
Estación 8	7+842	873,20	135	Lateral
Estación 9	8+715	873,23	135	Lateral
Estación 10	9+559	843,97	135	Lateral
Estación 11	10+431	872,28	135	Lateral
Estación 12	11+365	933,64	135	Lateral
Estación 13	12+073	707,77	135	Tres andenes
Estación 14	13+253	1.180,16	135	Lateral
Estación 15	14+043	790,45	135	Lateral
Estación 16	14+884	840,94	135	Tres andenes
Estación 17	15+833	949,23	135	Lateral
Estación 18	16+685	851,84	135	Lateral
Estación 19	17+514	828,67	135	Lateral
Estación 20	19+410	1.896,36	135	Lateral
Estación 21	20+469	1.059,49	135	Central
Estación 22	21+518	1.049,36	135	Lateral
Estación 23	22+755	1.237,25	135	Lateral
Estación 24	23+561	805,79	135	Lateral
Estación 25	24+576	1.014,99	135	Lateral
Estación 26	25+672	1.095,52	135	Lateral
Estación 27	26+632	960,01	135	Lateral

Figura 92: Ubicación de las estaciones y tipos de andén [20].

### 9.2.3 Cuadro de gradientes máximos

MAXIMOS GRADIENTES VÍA PRINCIPAL				
TIPO	GRADIENTE	LONGITUD	P.K.i	P.K.f
Tramo de pendiente constante	i = 35 ‰	131,984	11+731,126	11+863,110
Tramo de pendiente constante	i = 35‰	300,197	16+976,472	17+276,669
Tramo de pendiente constante	i = 35 ‰	580,164	18+612,612	19+192,776

Figura 93: Cuadro de gradientes máximos [20].

### 9.3 ANEXO 3: MATERIAL RODANTE:

#### 9.3.1 Resistencias al avance del tren

##### 9.3.1.1 Resistencias al avance horizontal y en recta:

$$F_{ar} = a + b * v + T_f * c * v^2$$

Coeficientes constantes:

$F_{ar}$ : Resistencia al avance en recta [N]

$a$ : Suma de las resistencias debidas a la rodadura (llanta/carril y cajas de grasa) [N/t]

$b$ : Resistencia debida al rozamiento de las pestañas, oscilaciones y choques. [N/(km/h)\*t]

$c$ : Resistencia aerodinámica. [N/(km/h<sup>2</sup>)]

$v$ : Velocidad [km/h]

$T_f$ : Coeficiente de obstrucción o factor túnel. En el interior de los túneles la resistencia aerodinámica al avance aumenta como consecuencia de la mayor fricción del aire contra la pared exterior del tren. [Adimensional]. Para el cálculo se estima su valor en 1,5.

Los valores empíricos suministrados por el fabricante son:

A	Coeficiente	N/t	10,8
B	Coeficiente	N/(km/h)*t	0,083
C	Coeficiente	N/(km/h) <sup>2</sup>	1,57

Figura 94: Valores de resistencia al avance del tren [20].

$$F_{ar} = 10,8 * 293 + 0,083 * 293 * v + 1,5 * 1,57 * v^2 = 3164,4 + 24,3 * v + 2,3 * v^2$$

### 9.3.1.2 Resistencia debida a la gravedad:

Es la resistencia al avance debida a la fuerza de gravedad. Es la más importante de los ferrocarriles siendo positiva en las rampas y negativa en las pendientes. Esta resistencia es aproximadamente igual al valor de la rampa (o pendiente) en milésimas. Por ejemplo 20 daN/t en rampas de 20 milésimas.

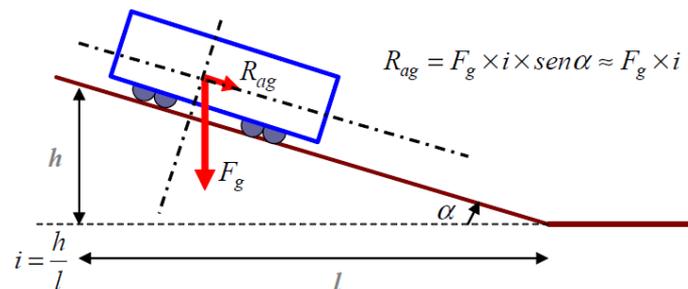


Figura 95: Resistencia longitudinal debida a la gravedad [6].

$$F_{ag} = m_{tren} * g * i * \frac{1}{10} \approx m_{tren} * i$$

Donde:

$F_{ag}$ : Resistencia al avance debida a la gravedad (daN)

$m_{tren}$ : Masa del tren (t)

$i$ : Inclinación local (mm/m)

### 9.3.1.3 Resistencia debida a la curva:

Debida al deslizamiento transversal que se produce para adaptar el eje a la vía y al frotamiento de las pestañas en la curva.

$$F_{ag} = m_{tren} * \frac{600}{R}$$



Donde:

$F_{ag}$ : Resistencia debida a la curva [daN]

$m_{tren}$ : Masa del tren [t]

$R$ : Radio de la curva [m]

#### 9.3.1.4 Resistencia en aceleración:

El tren tiene en su interior una cantidad de masas e inercias giratorias (ruedas, ejes, discos de freno, etc.) que debe poner en marcha al arrancar y al acelerar además de imprimir aceleración a su masa total. Esto implica que para el cálculo de las aceleración y el frenado del tren la masa que debe considerarse es la masa real del tren (incluyendo su carga) más una masa adicional que es la suma de las masas giratorias. Este valor es fijo para cada tren y puede venir dado como un coeficiente de masas giratorias  $\gamma$ .

$$M' = M * (1 + \gamma)$$

Siendo

$M'$ : Masa ficticia del tren [t].

$M$ : Masa del tren incluyendo su carga[t].

$\gamma$ : Coeficiente de masas giratorias. Para el cálculo se su valor es 8.

#### 9.3.1.5 Resistencia en aceleración:

En el arranque las resistencias deberían ser las anteriores para el caso de tren parado. Empíricamente se conoce que son mucho mayores. En el arranque de un tren es necesario añadir el esfuerzo para crear la aceleración que necesita, la cual da lugar a un esfuerzo apreciable por la enorme masa a mover. Para un ferrocarril metropolitano se consideran valores mínimos de aceleración de arranque de  $1,1 \text{ m/s}^2$ . La resistencia específica de un tren en horizontal y recta es de 7 daN/t, de los que 4 daN/t inician el movimiento del tren y lo mantienen a muy baja

velocidad y 3 daN/t corresponden a la fuerza mínima necesaria para arrancar el tren en un tiempo aceptable.

En rampa se presenta una mayor resistencia al arranque debido a la resistencia de la propia rampa y a que los enganches entre los vehículos están más tensados. La norma de RENFE para los siguientes valores para el arranque en rampa:

$i$ (mm/m)	$r_{a0r}$ (daN/t)
Hasta 15	7
15-20	8
21-25	9
26-29	10
30-33	11
34-37	12
38-41	13
42-45	14
Más de 45	15

Figura 96: Resistencia específica en el arranque en función de la rampa [6].

### 9.3.2 Datos del tren



Longitud del tren	107 m
Configuración del tren	M1-R1-S1-S2-R2-M2 M y S = coche motor; R= coche remolque
Configuración de los bogies	BoBo -22 –BoBo – BoBo – 22 – BoBo
Número de bogies motores por vehículo	8
Número de convertidores de tracción por tren	4
Número de motores de tracción por convertidor	4
Número de pantógrafos	2 (1 por cada coche motor M)
Potencia media convertidor auxiliares	270 kW

Figura 97: Datos del tren [20].

## 9.4 ANEXO 4: DEMANDA

### 9.4.1 *Demanda captada (subidos /hora)*

#### 9.4.1.1 HPM 2020 (7:00 a 9:00)

Estación	Suben Sentido 1	Bajan Sentido 1	Total Movimientos Sentido 1	Suben Sentido 2	Bajan Sentido 2	Total Movimientos Sentido 2	Total Movimientos Estación
Estación 1	1.052	0	1.052	0	640	640	1.692
Estación 2	745	0	745	0	1.938	1.938	2.683
Estación 3	1.072	0	1.072	0	3.448	3.448	4.520
Estación 4	922	0	922	0	1.846	1.846	2.768
Estación 5	5.674	368	6.042	276	3.656	3.932	9.974
Estación 6	38	0	38	0	99	99	137
Estación 7	1.193	42	1.235	12	4.588	4.600	5.835
Estación 8	612	200	812	43	4.260	4.303	5.115
Estación 9	315	20	335	16	1.792	1.808	2.143
Estación 10	869	1	870	0	538	538	1.408
Estación 11	843	313	1.156	304	1.300	1.604	2.760
Estación 12	256	631	887	472	552	1.024	1.911
Estación 13	1.156	733	1.889	375	2.056	2.431	4.320
Estación 14	422	810	1.232	415	1.625	2.040	3.272
Estación 15	186	193	379	313	1.145	1.458	1.837
Estación 16	5.663	6.351	12.014	14.728	6.671	21.399	33.413
Estación 17	262	172	434	1.268	480	1.748	2.182
Estación 18	768	699	1.467	1.264	1.165	2.429	3.896
Estación 19	428	374	802	594	367	961	1.763
Estación 20	276	468	744	2.173	309	2.482	3.226
Estación 21	302	3.795	4.097	4.354	342	4.696	8.793
Estación 22	168	698	866	2.474	59	2.533	3.399
Estación 23	126	1.963	2.089	1.951	258	2.209	4.298
Estación 24	118	1.776	1.894	358	628	986	2.880
Estación 25	106	651	757	1.185	109	1.294	2.051
Estación 26	0	1.776	1.776	5.366	0	5.366	7.142
Estación 27	0	1.538	1.538	1.930	0	1.930	3.468
<b>TOTAL</b>	<b>23.572</b>	<b>23.572</b>	<b>47.144</b>	<b>39.871</b>	<b>39.871</b>	<b>79.742</b>	<b>126.886</b>

Figura 98: Demanda captada HPM 2020.

La estación 16 es con diferencia la que mayor número de movimientos presenta. Las siguientes estaciones en importancia de movimientos son las estaciones 5, 21 y 26.

9.4.1.2 HPT 2020 (18:00 a 20:00)

Estación	Suben Sentido 1	Bajan Sentido 1	Total Movimientos Sentido 1	Suben Sentido 2	Bajan Sentido 2	Total Movimientos Sentido 2	Total Movimntos Estación
Estación 1	936	0	936	0	514	514	1.450
Estación 2	495	0	495	0	1.062	1.062	1.557
Estación 3	2.670	0	2.670	0	1.566	1.566	4.236
Estación 4	564	0	564	0	1.220	1.220	1.784
Estación 5	3.937	195	4.132	144	4.339	4.483	8.615
Estación 6	99	0	99	0	28	28	127
Estación 7	2.153	11	2.164	35	1.929	1.964	4.128
Estación 8	924	76	1.000	49	632	681	1.681
Estación 9	459	16	475	20	259	279	754
Estación 10	607	12	619	7	272	279	898
Estación 11	764	42	806	80	371	451	1.257
Estación 12	614	68	682	512	332	844	1.526
Estación 13	2.379	171	2.550	636	496	1.132	3.682
Estación 14	638	480	1.118	296	487	783	1.901
Estación 15	396	47	443	175	147	322	765
Estación 16	4.022	9.868	13.890	5.006	5.455	10.461	24.351
Estación 17	183	303	486	175	215	390	876
Estación 18	589	428	1.017	651	613	1.264	2.281
Estación 19	260	288	548	550	286	836	1.384
Estación 20	233	400	633	1.411	226	1.637	2.270
Estación 21	250	1.727	1.977	2.547	142	2.689	4.666
Estación 22	146	585	731	1.266	108	1.374	2.105
Estación 23	334	1.145	1.479	2.112	5	2.117	3.596
Estación 24	132	760	892	511	113	624	1.516
Estación 25	146	1.018	1.164	801	54	855	2.019
Estación 26	0	3.350	3.350	2.044	0	2.044	5.394
Estación 27	0	2.940	2.940	1.843	0	1.843	4.783
TOTAL	23.930	23.930	47.860	20.871	20.871	41.742	89.602

Figura 99: Demanda captada HPT 2020.

La estación 16 es con diferencia la que mayor número de movimientos presenta. La siguiente estación en importancia de movimientos es la estación 5.

### 9.4.1.3 HV 2020

Estación	Suben Sentido 1	Bajan Sentido 1	Total Movimientos Sentido 1	Suben Sentido 2	Bajan Sentido 2	Total Movimientos Sentido 2	Total Movimntos Estación
Estación 1	532	0	532	0	418	418	950
Estación 2	328	0	328	0	762	762	1.090
Estación 3	1.081	0	1.081	0	1.389	1.389	2.470
Estación 4	239	0	239	0	740	740	979
Estación 5	2.365	47	2.412	35	2.587	2.622	5.034
Estación 6	29	0	29	0	29	29	58
Estación 7	1.586	2	1.588	14	1.696	1.710	3.298
Estación 8	562	24	586	14	836	850	1.436
Estación 9	292	1	293	0	345	345	638
Estación 10	254	1	255	0	299	299	554
Estación 11	419	12	431	13	438	451	882
Estación 12	227	60	287	285	227	512	799
Estación 13	972	96	1.068	346	674	1.020	2.088
Estación 14	330	222	552	118	554	672	1.224
Estación 15	222	35	257	53	262	315	572
Estación 16	2.091	4.416	6.507	4.848	2.943	7.791	14.298
Estación 17	101	202	303	296	118	414	717
Estación 18	265	333	598	290	421	711	1.309
Estación 19	138	195	333	206	158	364	697
Estación 20	167	232	399	668	104	772	1.171
Estación 21	194	1.458	1.652	2.060	191	2.251	3.903
Estación 22	126	454	580	705	121	826	1.406
Estación 23	130	989	1.119	1.037	103	1.140	2.259
Estación 24	109	670	779	262	214	476	1.255
Estación 25	24	669	693	554	68	622	1.315
Estación 26	0	1.423	1.423	1.798	0	1.798	3.221
Estación 27	0	1.242	1.242	2.095	0	2.095	3.337
<b>TOTAL</b>	<b>12.783</b>	<b>12.783</b>	<b>25.566</b>	<b>15.697</b>	<b>15.697</b>	<b>31.394</b>	<b>56.960</b>

Figura 100: Demanda captada HV 2020.

La estación 16 es con diferencia la que mayor número de movimientos presenta. Las siguientes estaciones en importancia de movimientos son las estaciones 5 y 21.

9.4.1.4 HPM 2050 (7:00 a 9:00)

Estación	Suben Sentido 1	Bajan Sentido 1	Total Movimientos Sentido 1	Suben Sentido 2	Bajan Sentido 2	Total Movimientos Sentido 2	Total Moviemntos Estación
Estación 1	2.083	0	2.083	0	897	897	2.980
Estación 2	1.277	0	1.277	0	3.644	3.644	4.921
Estación 3	2.361	0	2.361	0	3.803	3.803	6.164
Estación 4	1.504	3	1.507	2	2.424	2.426	3.933
Estación 5	11.222	1.863	13.085	738	9.727	10.465	23.550
Estación 6	48	4	52	27	118	145	197
Estación 7	1.133	227	1.360	183	5.201	5.384	6.744
Estación 8	879	292	1.171	199	3.547	3.746	4.917
Estación 9	443	206	649	126	2.057	2.183	2.832
Estación 10	1.112	0	1.112	52	521	573	1.685
Estación 11	1.896	263	2.159	333	1.711	2.044	4.203
Estación 12	217	367	584	441	353	794	1.378
Estación 13	11.138	11.051	22.189	7.933	23.914	31.847	54.036
Estación 14	206	1.187	1.393	1.649	529	2.178	3.571
Estación 15	160	621	781	745	749	1.494	2.275
Estación 16	6.145	10.846	16.991	27.817	5.362	33.179	50.170
Estación 17	212	384	596	1.174	476	1.650	2.246
Estación 18	848	1.098	1.946	1.989	762	2.751	4.697
Estación 19	466	516	982	838	365	1.203	2.185
Estación 20	228	729	957	2.496	221	2.717	3.674
Estación 21	152	5.122	5.274	6.484	338	6.822	12.096
Estación 22	158	902	1.060	2.150	80	2.230	3.290
Estación 23	67	2.228	2.295	2.287	252	2.539	4.834
Estación 24	74	1.487	1.561	490	249	739	2.300
Estación 25	0	722	722	1.336	0	1.336	2.058
Estación 26	0	2.197	2.197	5.800	0	5.800	7.997
Estación 27	0	1.714	1.714	2.011	0	2.011	3.725
<b>TOTAL</b>	<b>44.029</b>	<b>44.029</b>	<b>88.058</b>	<b>67.300</b>	<b>67.300</b>	<b>134.600</b>	<b>222.658</b>

Figura 101: Demanda captada HPM 2050.

Las estaciones 13 y 16 son con diferencia las que mayor número de movimientos presentan. Las siguientes estaciones en importancia de movimientos son las estaciones 5 y 21.

9.4.1.5 HPT 2050 (18:00 a 20:00)

Estación	Suben Sentido 1	Bajan Sentido 1	Total Movimientos Sentido 1	Suben Sentido 2	Bajan Sentido 2	Total Movimientos Sentido 2	Total Movimntos Estación
Estación 1	1.758	0	1.758	0	1.018	1.018	2.776
Estación 2	1.003	0	1.003	0	2.761	2.761	3.764
Estación 3	4.293	0	4.293	0	2.708	2.708	7.001
Estación 4	854	0	854	0	2.605	2.605	3.459
Estación 5	9.092	430	9.522	1.235	10.454	11.689	21.211
Estación 6	140	14	154	8	65	73	227
Estación 7	2.250	94	2.344	244	1.724	1.968	4.312
Estación 8	1.078	102	1.180	224	789	1.013	2.193
Estación 9	670	86	756	127	373	500	1.256
Estación 10	684	0	684	43	348	391	1.075
Estación 11	1.666	77	1.743	128	1.088	1.216	2.959
Estación 12	548	28	576	544	174	718	1.294
Estación 13	18.669	7.390	26.059	9.813	10.956	20.769	46.828
Estación 14	378	604	982	752	307	1.059	2.041
Estación 15	365	284	649	538	150	688	1.337
Estación 16	3.561	21.413	24.974	10.599	6.530	17.129	42.103
Estación 17	207	754	961	235	225	460	1.421
Estación 18	628	1.033	1.661	1.204	537	1.741	3.402
Estación 19	288	470	758	811	300	1.111	1.869
Estación 20	186	765	951	1.989	235	2.224	3.175
Estación 21	132	3.310	3.442	4.517	127	4.644	8.086
Estación 22	158	798	956	1.289	74	1.363	2.319
Estación 23	257	1.461	1.718	2.608	38	2.646	4.364
Estación 24	72	622	694	651	31	682	1.376
Estación 25	0	1.201	1.201	852	0	852	2.053
Estación 26	0	4.298	4.298	2.622	0	2.622	6.920
Estación 27	0	3.703	3.703	2.584	0	2.584	6.287
<b>TOTAL</b>	<b>48.937</b>	<b>48.937</b>	<b>97.874</b>	<b>43.617</b>	<b>43.617</b>	<b>87.234</b>	<b>185.108</b>

Figura 102: Demanda captada HPT 2050.

Las estaciones 13 y 16 son con diferencia las que mayor número de movimientos presentan. Las siguientes estaciones en importancia de movimientos son las estaciones 5 y 21.

#### 9.4.1.6 HV 2050

Estación	Suben Sentido 1	Bajan Sentido 1	Total Movimientos Sentido 1	Suben Sentido 2	Bajan Sentido 2	Total Movimientos Sentido 2	Total Movimntos Estación
Estación 1	948	0	948	0	793	793	1.741
Estación 2	533	0	533	0	1.851	1.851	2.384
Estación 3	1.633	0	1.633	0	1.645	1.645	3.278
Estación 4	380	0	380	0	1.363	1.363	1.743
Estación 5	5.433	347	5.780	465	6.142	6.607	12.387
Estación 6	48	6	54	5	46	51	105
Estación 7	1.844	203	2.047	199	1.854	2.053	4.100
Estación 8	734	113	847	71	1.000	1.071	1.918
Estación 9	409	65	474	51	483	534	1.008
Estación 10	344	1	345	7	418	425	770
Estación 11	966	33	999	36	931	967	1.966
Estación 12	203	29	232	387	182	569	801
Estación 13	10.237	4.107	14.344	5.490	8.611	14.101	28.445
Estación 14	159	738	897	428	234	662	1.559
Estación 15	151	226	377	237	211	448	825
Estación 16	2.179	10.330	12.509	8.677	3.156	11.833	24.342
Estación 17	119	343	462	529	138	667	1.129
Estación 18	297	679	976	541	373	914	1.890
Estación 19	169	307	476	302	175	477	953
Estación 20	141	401	542	926	100	1.026	1.568
Estación 21	78	2.333	2.411	3.188	240	3.428	5.839
Estación 22	134	675	809	653	132	785	1.594
Estación 23	92	1.280	1.372	1.327	124	1.451	2.823
Estación 24	118	538	656	407	125	532	1.188
Estación 25	0	785	785	654	0	654	1.439
Estación 26	0	1.999	1.999	2.405	0	2.405	4.404
Estación 27	0	1.811	1.811	3.342	0	3.342	5.153
<b>TOTAL</b>	<b>27.349</b>	<b>27.349</b>	<b>54.698</b>	<b>30.327</b>	<b>30.327</b>	<b>60.654</b>	<b>115.352</b>

Figura 103: Demanda captada HV 2050.

Las estaciones 13 y 16 son con diferencia las que mayor número de movimientos presentan. Las siguientes estaciones en importancia de movimientos son las estaciones 5 y 21.

## 9.4.2 Carga máxima (pphps)

### 9.4.2.1 HPM 2020 (7:00 a 9:00)

Tramo	Carga Sentido 1	Carga Sentido 2
Estación 1 - Estación 2	1.052	640
Estación 2 - Estación 3	1.797	2.578
Estación 3 - Estación 4	2.869	6.026
Estación 4 - Estación 5	3.791	7.872
Estación 5 - Estación 6	9.097	11.252
Estación 6 - Estación 7	9.135	11.351
Estación 7 - Estación 8	10.286	15.927
Estación 8 - Estación 9	10.698	20.144
Estación 9 - Estación 10	10.993	21.920
Estación 10 - Estación 11	11.861	22.458
Estación 11 - Estación 12	12.391	23.454
Estación 12 - Estación 13	12.016	23.534
Estación 13 - Estación 14	12.439	25.215
Estación 14 - Estación 15	12.051	26.425
Estación 15 - Estación 16	12.044	27.257
Estación 16 - Estación 17	11.356	19.200
Estación 17 - Estación 18	11.446	18.412
Estación 18 - Estación 19	11.515	18.313
Estación 19 - Estación 20	11.569	18.086
Estación 20 - Estación 21	11.377	16.222
Estación 21 - Estación 22	7.884	12.210
Estación 22 - Estación 23	7.354	9.795
Estación 23 - Estación 24	5.517	8.102
Estación 24 - Estación 25	3.859	8.372
Estación 25 - Estación 26	3.314	7.296
Estación 26 - Estación 27	1.538	1.930
<b>CARGA MÁXIMA</b>	<b>12.439</b>	<b>27.257</b>

Figura 104: Intensidades de carga (pphps) HPM 2020.

La demanda en el sentido 2 (sentido de bajada según el perfil longitudinal) es más de dos veces superior a la del sentido 1. La subida de pasajeros que tiene lugar en la estación 16 da lugar a la carga máxima. La diferencia del nivel de carga observada en cada sentido invita a estudiar si sería conveniente realizar bucles en el tramo central y más cargado de la línea.

9.4.2.2 HPT 2020 (18:00 a 20:00)

Tramo	Carga Sentido 1	Carga Sentido 2
Estación 1 - Estación 2	936	514
Estación 2 - Estación 3	1.431	1.576
Estación 3 - Estación 4	4.101	3.142
Estación 4 - Estación 5	4.665	4.362
Estación 5 - Estación 6	8.407	8.557
Estación 6 - Estación 7	8.506	8.585
Estación 7 - Estación 8	10.648	10.479
Estación 8 - Estación 9	11.496	11.062
Estación 9 - Estación 10	11.939	11.301
Estación 10 - Estación 11	12.534	11.566
Estación 11 - Estación 12	13.256	11.857
Estación 12 - Estación 13	13.802	11.677
Estación 13 - Estación 14	16.010	11.537
Estación 14 - Estación 15	16.168	11.728
Estación 15 - Estación 16	<b>16.517</b>	11.700
Estación 16 - Estación 17	10.671	12.149
Estación 17 - Estación 18	10.551	12.189
Estación 18 - Estación 19	10.712	12.151
Estación 19 - Estación 20	10.684	11.887
Estación 20 - Estación 21	10.517	10.702
Estación 21 - Estación 22	9.040	8.297
Estación 22 - Estación 23	8.601	7.139
Estación 23 - Estación 24	7.790	5.032
Estación 24 - Estación 25	7.162	4.634
Estación 25 - Estación 26	6.290	3.887
Estación 26 - Estación 27	2.940	1.843
<b>CARGA MÁXIMA</b>	<b>16.517</b>	<b>12.189</b>

Figura 105: Intensidades de carga (pphs) HPT 2020.

La carga máxima se produce en el sentido 1 (sentido ascendente según el perfil longitudinal). El tramo comprendido entre las estaciones 13 y 16 es el más cargado debido a que la estación 13 es un punto estratégico para el sistema de autobuses de la ciudad y en la estación 16 se conecta con otra línea de metro.

9.4.2.3 HV 2020

Tramo	Carga Sentido 1	Carga Sentido 2
Estación 1 - Estación 2	532	418
Estación 2 - Estación 3	860	1.180
Estación 3 - Estación 4	1.941	2.569
Estación 4 - Estación 5	2.180	3.309
Estación 5 - Estación 6	4.498	5.861
Estación 6 - Estación 7	4.527	5.890
Estación 7 - Estación 8	6.111	7.572
Estación 8 - Estación 9	6.649	8.394
Estación 9 - Estación 10	6.940	8.739
Estación 10 - Estación 11	7.193	9.038
Estación 11 - Estación 12	7.600	9.463
Estación 12 - Estación 13	7.767	9.405
Estación 13 - Estación 14	8.643	9.733
Estación 14 - Estación 15	8.751	10.169
Estación 15 - Estación 16	8.938	<b>10.378</b>
Estación 16 - Estación 17	6.613	8.473
Estación 17 - Estación 18	6.512	8.295
Estación 18 - Estación 19	6.444	8.426
Estación 19 - Estación 20	6.387	8.378
Estación 20 - Estación 21	6.322	7.814
Estación 21 - Estación 22	5.058	5.945
Estación 22 - Estación 23	4.730	5.361
Estación 23 - Estación 24	3.871	4.427
Estación 24 - Estación 25	3.310	4.379
Estación 25 - Estación 26	2.665	3.893
Estación 26 - Estación 27	1.242	2.095
<b>CARGA MÁXIMA</b>	8.938	10.378

Figura 106: Intensidades de carga (pphps) HV 2020.

La demanda es similar en ambos sentidos siendo ligeramente superior en el sentido 2.

9.4.2.4 HPM 2050 (7:00 a 9:00)

Tramo	Carga Sentido 1	Carga Sentido 2
Estación 1 - Estación 2	2.083	897
Estación 2 - Estación 3	3.360	4.541
Estación 3 - Estación 4	5.721	8.344
Estación 4 - Estación 5	7.222	10.766
Estación 5 - Estación 6	16.581	19.755
Estación 6 - Estación 7	16.625	19.846
Estación 7 - Estación 8	17.531	24.864
Estación 8 - Estación 9	18.118	28.212
Estación 9 - Estación 10	18.355	30.143
Estación 10 - Estación 11	19.467	30.612
Estación 11 - Estación 12	21.100	31.990
Estación 12 - Estación 13	20.950	31.902
Estación 13 - Estación 14	21.037	47.883
Estación 14 - Estación 15	20.056	46.763
Estación 15 - Estación 16	19.595	46.767
Estación 16 - Estación 17	14.894	24.312
Estación 17 - Estación 18	14.722	23.614
Estación 18 - Estación 19	14.472	22.387
Estación 19 - Estación 20	14.422	21.914
Estación 20 - Estación 21	13.921	19.639
Estación 21 - Estación 22	8.951	13.493
Estación 22 - Estación 23	8.207	11.423
Estación 23 - Estación 24	6.046	9.388
Estación 24 - Estación 25	4.633	9.147
Estación 25 - Estación 26	3.911	7.811
Estación 26 - Estación 27	1.714	2.011
<b>CARGA MÁXIMA</b>	<b>21.100</b>	<b>47.883</b>

Figura 107: Intensidades de carga (pphs) HPM 2050.

La demanda en el sentido 2 (sentido de bajada según el perfil longitudinal) es más de dos veces superior a la del sentido 1, al igual que ocurría en la demanda prevista para el año 2020. Para este año se prevé que la estación 13 conecte con otra línea de metro lo que acentúa el aumento de carga en el tramo central. Una vez superada la estación 13 la carga disminuye significativamente debido al alto número de pasajeros que bajan en dicha estación.

9.4.2.5 HPT 2050 (18:00 a 20:00)

Tramo	Carga Sentido 1	Carga Sentido 2
Estación 1 - Estación 2	1.758	1.018
Estación 2 - Estación 3	2.761	3.779
Estación 3 - Estación 4	7.054	6.487
Estación 4 - Estación 5	7.908	9.092
Estación 5 - Estación 6	16.570	18.311
Estación 6 - Estación 7	16.696	18.368
Estación 7 - Estación 8	18.852	19.848
Estación 8 - Estación 9	19.828	20.413
Estación 9 - Estación 10	20.412	20.659
Estación 10 - Estación 11	21.096	20.964
Estación 11 - Estación 12	22.685	21.924
Estación 12 - Estación 13	23.205	21.554
Estación 13 - Estación 14	34.484	22.697
Estación 14 - Estación 15	34.258	22.252
Estación 15 - Estación 16	34.339	21.864
Estación 16 - Estación 17	16.487	17.795
Estación 17 - Estación 18	15.940	17.785
Estación 18 - Estación 19	15.535	17.118
Estación 19 - Estación 20	15.353	16.607
Estación 20 - Estación 21	14.774	14.853
Estación 21 - Estación 22	11.596	10.463
Estación 22 - Estación 23	10.956	9.248
Estación 23 - Estación 24	9.752	6.678
Estación 24 - Estación 25	9.202	6.058
Estación 25 - Estación 26	8.001	5.206
Estación 26 - Estación 27	3.703	2.584
<b>CARGA MÁXIMA</b>	<b>34.484</b>	<b>22.697</b>

Figura 108: Intensidades de carga (pphs) HPT 2050.

La carga máxima se produce en el sentido 1 (sentido ascendente según el perfil longitudinal) al igual que ocurría en el año 2020. El tramo comprendido entre las estaciones 13 y 16 es el más cargado debido a que la estación 13 es un punto estratégico para el sistema de autobuses de la ciudad y además dispone de una nueva línea de metro en el año 2050. Una vez superada la estación 16 la carga disminuye significativamente debido al alto número de pasajeros que bajan en dicha estación.

9.4.2.6 HV 2050

Tramo	Carga Sentido 1	Carga Sentido 2
Estación 1 - Estación 2	948	793
Estación 2 - Estación 3	1.481	2.644
Estación 3 - Estación 4	3.114	4.289
Estación 4 - Estación 5	3.494	5.652
Estación 5 - Estación 6	8.580	11.329
Estación 6 - Estación 7	8.622	11.370
Estación 7 - Estación 8	10.263	13.025
Estación 8 - Estación 9	10.884	13.954
Estación 9 - Estación 10	11.228	14.386
Estación 10 - Estación 11	11.571	14.797
Estación 11 - Estación 12	12.504	15.692
Estación 12 - Estación 13	12.678	15.487
Estación 13 - Estación 14	<b>18.808</b>	18.608
Estación 14 - Estación 15	18.229	18.414
Estación 15 - Estación 16	18.154	18.388
Estación 16 - Estación 17	10.003	12.867
Estación 17 - Estación 18	9.779	12.476
Estación 18 - Estación 19	9.397	12.308
Estación 19 - Estación 20	9.259	12.181
Estación 20 - Estación 21	8.999	11.355
Estación 21 - Estación 22	6.744	8.407
Estación 22 - Estación 23	6.203	7.886
Estación 23 - Estación 24	5.015	6.683
Estación 24 - Estación 25	4.595	6.401
Estación 25 - Estación 26	3.810	5.747
Estación 26 - Estación 27	1.811	3.342
<b>CARGA MÁXIMA</b>	<b>18.808</b>	<b>18.608</b>

Figura 109: Intensidades de carga (pphps) HV 2050.

La demanda es similar en ambos sentidos. Al igual que ocurre en el resto de franjas horarias los tramos centrales son los más cargados.

## 9.5 ANEXO 5: OFERTA DE SERVICIO:

### 9.5.1 Velocidades máximas por sentido

Tras construir el modelo de la infraestructura e introducir los datos de entrada del material rodante se calculan las velocidades máximas con las que simular la circulación de los trenes, considerando una aceleración no compensada máxima de  $0,65 \text{ m/s}^2$ , un peralte máximo de  $0,150 \text{ m}$  y un ancho de vía entre ejes de carriles de  $1,507 \text{ m}$  ( $1,435 + 0,072 = 1,507 \text{ m}$ ).

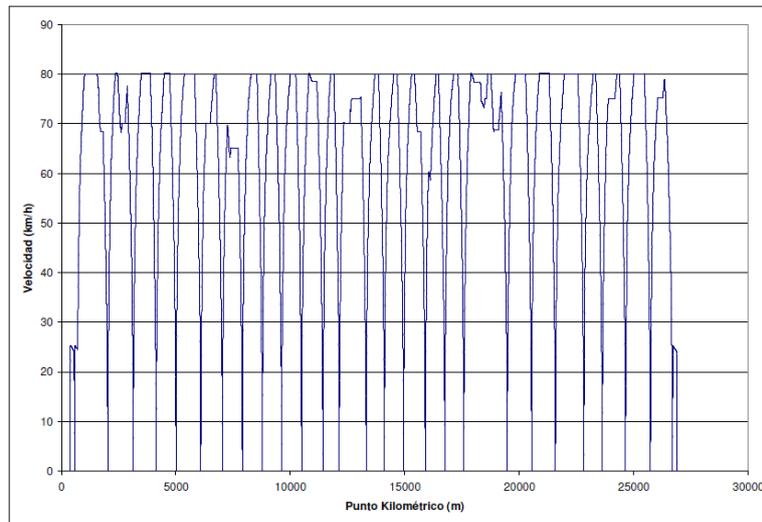


Figura 110: Velocidades máximas sentido 1 [20].

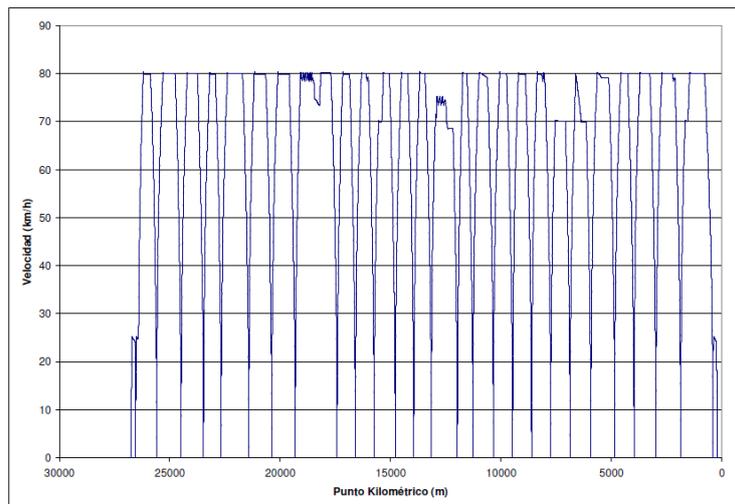


Figura 111: Velocidades máximas sentido 2 [20].

### 9.5.2 Estudio de bucles:

A continuación se compara la densidad de viajeros por tramos de la operación sin bucle y con bucle (realizándose el desalajo y la inversión de marcha en las estaciones 8 y 21).

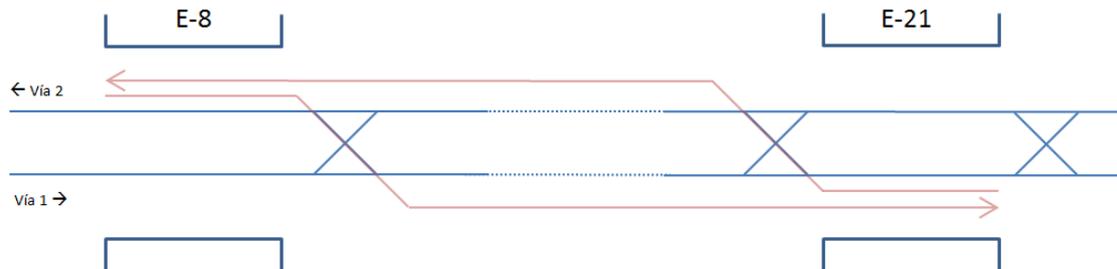


Figura 112: Recorrido bucle E8 – E21

Tramo	Sin bucle						Con bucle de E-8 a E-21					
	Pasajeros/tren		% Ocupación plazas para pasajeros de pie		Pasajeros/m <sup>2</sup>		Pasajeros/tren		% Ocupación		Pasajeros/m <sup>2</sup>	
	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2
Estación 1 - Estación 2	44	27	0%	0%	0,0	0,0	88	53	0%	0%	0,0	0,0
Estación 2 - Estación 3	75	107	0%	0%	0,0	0,0	150	215	0%	6%	0,0	0,4
Estación 3 - Estación 4	120	251	0%	10%	0,0	0,6	239	502	8%	34%	0,5	2,0
Estación 4 - Estación 5	158	328	1%	17%	0,0	1,0	316	656	16%	48%	0,9	2,9
Estación 5 - Estación 6	379	469	22%	30%	1,3	1,8	758	938	58%	75%	3,5	4,5
Estación 6 - Estación 7	381	473	22%	31%	1,3	1,8	761	946	58%	76%	3,5	4,5
Estación 7 - Estación 8	429	664	27%	49%	1,6	2,9	857	1327	67%	112%	4,0	6,7
Estación 8 - Estación 9	446	839	28%	66%	1,7	3,9	892	839	71%	66%	4,2	3,9
Estación 9 - Estación 10	458	913	29%	73%	1,8	4,4	458	913	29%	73%	1,8	4,4
Estación 10 - Estación 11	494	936	33%	75%	2,0	4,5	494	936	33%	75%	2,0	4,5
Estación 11 - Estación 12	516	977	35%	79%	2,1	4,7	516	977	35%	79%	2,1	4,7
Estación 12 - Estación 13	501	981	33%	79%	2,0	4,7	501	981	33%	79%	2,0	4,7
Estación 13 - Estación 14	518	1051	35%	86%	2,1	5,1	518	1051	35%	86%	2,1	5,1
Estación 14 - Estación 15	502	1101	34%	91%	2,0	5,4	502	1101	34%	91%	2,0	5,4
Estación 15 - Estación 16	502	1136	34%	94%	2,0	5,6	502	1136	34%	94%	2,0	5,6
Estación 16 - Estación 17	473	800	31%	62%	1,8	3,7	473	800	31%	62%	1,8	3,7
Estación 17 - Estación 18	477	767	31%	59%	1,9	3,5	477	767	31%	59%	1,9	3,5
Estación 18 - Estación 19	480	763	31%	58%	1,9	3,5	480	763	31%	58%	1,9	3,5
Estación 19 - Estación 20	482	754	32%	57%	1,9	3,4	482	754	32%	57%	1,9	3,4
Estación 20 - Estación 21	474	676	31%	50%	1,9	3,0	474	1352	31%	114%	1,9	6,9
Estación 21 - Estación 22	329	509	17%	34%	1,0	2,1	657	1018	48%	83%	2,9	5,0
Estación 22 - Estación 23	306	408	15%	25%	0,9	1,5	613	816	44%	63%	2,6	3,8
Estación 23 - Estación 24	230	338	8%	18%	0,5	1,1	460	675	30%	50%	1,8	3,0
Estación 24 - Estación 25	161	349	1%	19%	0,1	1,1	322	698	16%	52%	1,0	3,1
Estación 25 - Estación 26	138	304	0%	15%	0,0	0,9	276	608	12%	44%	0,7	2,6
Estación 26 - Estación 27	64	80	0%	0%	0,0	0,0	128	161	0%	1%	0,0	0,1
CARGA MÁXIMA	518	1.136	35%	94%	2,1	5,6	892	1.352	71%	114%	4,2	6,9

Figura 113: Densidades de carga para bucle E8 – E21

Este bucle da como resultado intensidades que superan los 6 pasajeros/m<sup>2</sup> por lo que se procede a realizar un segundo análisis. Debido al trazado se considera que no es conveniente ubicar un aparato de vía en la salida de la E-8 por vía 2. Por lo tanto se prolonga el bucle hasta la siguiente

estación E-7 donde se podría instalar un aparato de vía en caso de ser necesario. En la E-21 se estudia la opción de realizar la inversión de marcha por dos andenes (por detrás):

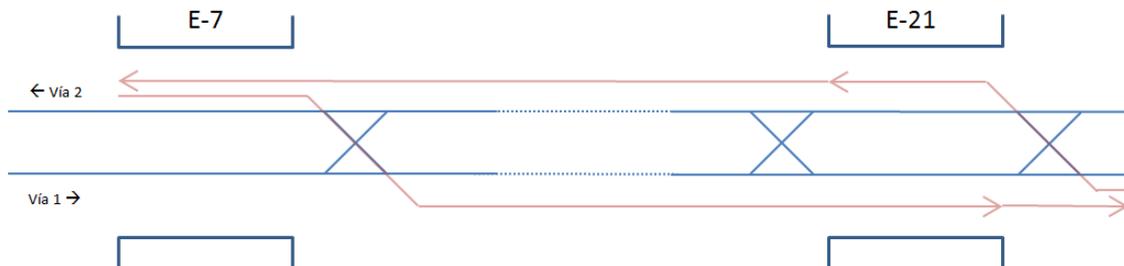


Figura 114: Recorrido bucle E7 – E21

Tramo	Sin bucle						Con bucle de E-7 (por delante) a E-21 (por detrás)					
	Pasajeros/tren		% Ocupacion plazas para pasajeros de pie		Pasajeros/m <sup>2</sup>		Pasajeros/tren		% Ocupacion plazas para pasajeros de pie		Pasajeros/m <sup>2</sup>	
	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2	Sentido 1	Sentido 2
Estación 1 - Estación 2	44	27	0%	0%	0,0	0,0	88	53	0%	0%	0,0	0,0
Estación 2 - Estación 3	75	107	0%	0%	0,0	0,0	150	215	0%	6%	0,0	0,4
Estación 3 - Estación 4	120	251	0%	10%	0,0	0,6	239	502	8%	34%	0,5	2,0
Estación 4 - Estación 5	158	328	1%	17%	0,0	1,0	316	656	16%	48%	0,9	2,9
Estación 5 - Estación 6	379	469	22%	30%	1,3	1,8	758	938	58%	75%	3,5	4,5
Estación 6 - Estación 7	381	473	22%	31%	1,3	1,8	761	946	58%	76%	3,5	4,5
Estación 7 - Estación 8	429	664	27%	49%	1,6	2,9	857	664	67%	49%	4,0	2,9
Estación 8 - Estación 9	446	839	28%	66%	1,7	3,9	446	839	28%	66%	1,7	3,9
Estación 9 - Estación 10	458	913	29%	73%	1,8	4,4	458	913	29%	73%	1,8	4,4
Estación 10 - Estación 11	494	936	33%	75%	2,0	4,5	494	936	33%	75%	2,0	4,5
Estación 11 - Estación 12	516	977	35%	79%	2,1	4,7	516	977	35%	79%	2,1	4,7
Estación 12 - Estación 13	501	981	33%	79%	2,0	4,7	501	981	33%	79%	2,0	4,7
Estación 13 - Estación 14	518	1051	35%	86%	2,1	5,1	518	1051	35%	86%	2,1	5,1
Estación 14 - Estación 15	502	1101	34%	91%	2,0	5,4	502	1101	34%	91%	2,0	5,4
Estación 15 - Estación 16	502	1136	34%	94%	2,0	5,6	502	1136	34%	94%	2,0	5,6
Estación 16 - Estación 17	473	800	31%	62%	1,8	3,7	473	800	31%	62%	1,8	3,7
Estación 17 - Estación 18	477	767	31%	59%	1,9	3,5	477	767	31%	59%	1,9	3,5
Estación 18 - Estación 19	480	763	31%	58%	1,9	3,5	480	763	31%	58%	1,9	3,5
Estación 19 - Estación 20	482	754	32%	57%	1,9	3,4	482	754	32%	57%	1,9	3,4
Estación 20 - Estación 21	474	676	31%	50%	1,9	3,0	474	676	31%	50%	1,9	3,0
Estación 21 - Estación 22	329	509	17%	34%	1,0	2,1	657	1018	48%	83%	2,9	5,0
Estación 22 - Estación 23	306	408	15%	25%	0,9	1,5	613	816	44%	63%	2,6	3,8
Estación 23 - Estación 24	230	338	8%	18%	0,5	1,1	460	675	30%	50%	1,8	3,0
Estación 24 - Estación 25	161	349	1%	19%	0,1	1,1	322	698	16%	52%	1,0	3,1
Estación 25 - Estación 26	138	304	0%	15%	0,0	0,9	276	608	12%	44%	0,7	2,6
Estación 26 - Estación 27	64	80	0%	0%	0,0	0,0	128	161	0%	1%	0,0	0,1
CARGA MÁXIMA	518	1.136	35%	94%	2,1	5,6	857	1.136	67%	94%	4,0	5,6

Figura 115: Densidades de carga para bucle E7 – E21

Este bucle cumple con el criterio de tener densidades máximas inferiores a 6 pasajeros/m<sup>2</sup>. Sin embargo se considera interesante estudiar la posibilidad de trasladar el bucle de la HPM a la E-5 dada su proximidad, de manera que se ofrezca el mismo bucle que para el resto de franjas horarias, evitándose así posibles confusiones a los pasajeros que de esta manera dispondrían siempre del mismo bucle. Además existen otros inconvenientes como son los aumentos



significativos de los tiempos de parada en la E-7. Prolongar el bucle hasta la E-5 permite dar un mejor servicio a los viajeros que hacen correspondencia en esta estación con la línea que conecta con el aeropuerto de la ciudad.

### 9.5.3 Análisis de maniobras de inversión de marcha en cabecera

A continuación se van a analizar diferentes opciones para realizar la maniobra de inversión de marcha con el fin de escoger aquella que mejor se adecue a las necesidades de la operación de la línea.

Para cada maniobra se analizan los siguientes tiempos:

- El **intervalo salida-salida** del andén de llegada a la cabecera. Este intervalo nos indica cada cuanto tiempo puede salir un tren de dicho andén por lo que si este tiempo es mayor que el intervalo con el que se está operando se producirían cuellos de botella en la vía que llega a la cabecera y sería necesario buscar una solución.
- El **tiempo de maniobra** (para vuelta por dos andenes) es el tiempo que emplea el tren desde su salida del A2 hasta llegar y parar en a A1. Este tiempo es indiferente para el cuello de botella y se utiliza para conocer cuál es el tiempo de recorrido total de la línea y por tanto poder calcular el número de trenes que se necesitan para el intervalo requerido. A menor intervalo de maniobra menor número de trenes se necesitan ya que el tiempo de recorrido será menor. En este tiempo es habitual incluir un margen de tiempo adicional para regulación, realizando la parada en A1.

Una vez obtenido el intervalo salida-salida se calcula cual es la capacidad del nudo (La UIC recomienda no sobrepasar el 80% de este valor).

Los aparatos de vía situados a la entrada de las estaciones permiten una velocidad de paso por vía desviada de 65 km/h, tienen un radio  $R = 500$  m,  $T_g = 1:12$  y una longitud de 87,2 metros:

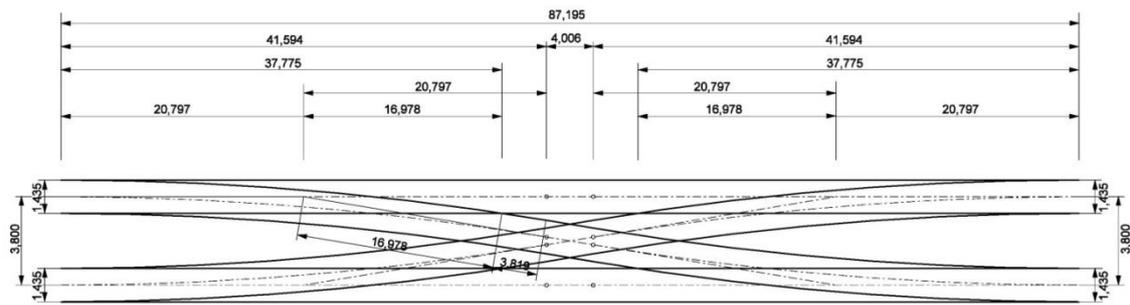


Figura 116: Geometría de la diagonal doble [20].

En los sacos maniobra la velocidad es baja (35 km/h) por lo que se usan aparatos con mayor tangente y menor longitud y radio con el fin de reducir el tiempo necesario para realizar las maniobras. Por este motivo las bretelles de los sacos permiten una velocidad de paso por vía desviada de 38 km/h, tienen un radio  $R=170$  m,  $Tg=1:8$  y una longitud de 51,6 metros:

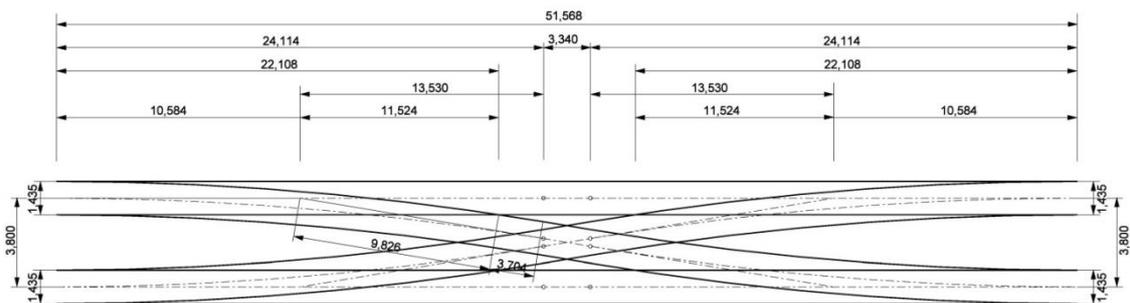


Figura 117: Geometría de la diagonal doble en sacos de maniobra [20].

Para los cálculos se tiene en cuenta que una vez que la unidad de transporte (UT) necesita 6 segundos para poder cambiar el sentido de su marcha una vez que tiene el itinerario establecido.

Es importante tener en cuenta que la distancia de separación entre los aparatos de vía y los piñones de la estación es crítica para la capacidad de transporte de la línea. Una estrategia habitual es colocar los aparatos de vía lo más cerca posible del piñón para la UT tenga que hacer el menor recorrido posible en la maniobra de inversión de marcha y por tanto sean menores el tiempo de la misma y el cuello de botella. Esta estrategia requiere un fondo de saco más corto lo que supone un ahorro económico. En una línea convencional los intervalos suelen ser mayores a los de una línea UTO por lo que esto no genera ningún problema. Sin embargo, en el caso de la línea UTO considerada se ofertan intervalos de 90 segundos que hace que los trenes vayan muy próximos unos de otros, apurando el límite de capacidad de la línea. Por este motivo, al llegar a



la cabecera se daría el caso de que mientras un tren está entrando en el saco el siguiente está aproximándose a la estación, de manera que cuando el primer tren ha parado en el saco y está listo para invertir la marcha el segundo tren está entrando en la estación y su distancia de seguridad de frenado impide mover la aguja hecha a la desviada debido a que cuenta con la longitud del aparato como distancia de frenado de seguridad. Esta es la razón por la que en algunas líneas con bajos intervalos se estudia la alternativa de alejar la bretelle del piñón de la estación una distancia suficiente que permita a los trenes entrar en el andén sin importar la posición del aparato (podría entrar incluso aunque estuviera moviéndose o sin comprobación) y sin que ello suponga limitación alguna de velocidad a la entrada de la cabecera. La distancia necesaria es del orden de 60 metros por lo que esta estrategia requiere un fondo de saco mayor.

El cálculo de la distancia necesaria depende de la velocidad a la que se aproxima el tren a la estación y de la parametrización del algoritmo del ATO que calcula continuamente la distancia de frenado necesaria y suele ser obtenida mediante simulación. Los cálculos se realizan con las ecuaciones del MRUA y se considera que la bretelle está situada lo más cerca posible a la estación (se sitúa a 27 metros del piñón de salida al saco). Se considera una separación de 14 metros desde el punto de parada de la UT en la estación hasta el piñón de salida. Se consideran unas aceleraciones y deceleraciones medias de  $1 \text{ m/s}^2$ , una velocidad máxima de salida de estación (para servicio por un andén y servicio con alternativo con andén central) de 50 km/h, y unas velocidades máximas en el saco de maniobra de 30 km/h por vía desviada y de 40 km/h por vía directa. Los intervalos obtenidos se redondean al número entero superior (hay que tener en cuenta que la aceleración no es constante y disminuye con la velocidad, por lo que los tiempos serán ligeramente más desfavorables que los obtenidos mediante las ecuaciones del MRUA).

#### ***9.5.3.1 Maniobra de inversión de marcha por un andén (salida a la recta)***

En esta maniobra se da servicio por un andén (los pasajeros bajan y suben desde el mismo andén). Tiene la ventaja de no incrementar el recorrido para realizar la inversión de marcha, tal y como sucede con la vuelta por dos andenes, por lo que el tiempo de recorrido será menor y se necesitará un número menor de trenes (operación más eficiente).

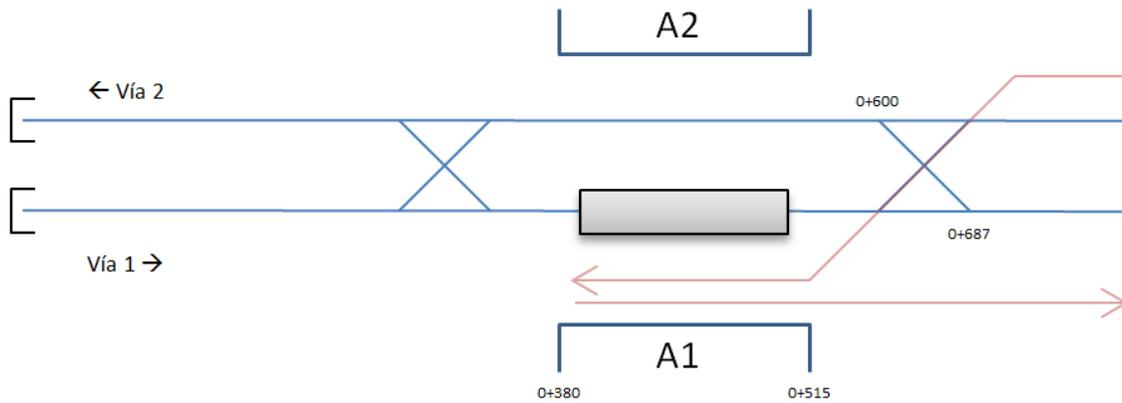


Figura 118: Maniobra de inversión de marcha por un andén

Sin embargo el intervalo que se puede dar con esta maniobra es mas elevado (menor capacidad de transporte) que con otras, debido a que desde que la UT para en la estación hasta que sale de la misma, libera la bretelle y se hace la maniobra se impide la llegada de otra UT que hasta ese momento solo puede autorizar el movimiento hasta un punto inmediatamente anterior a la bretelle.

Se considera que la realización de la maniobra por el andén 2 daría un intervalo similar al disponerse de una bretelle a la entrada que permite 65 km/h por la vía desviada por lo que no habría una diferencia significativa entre salir a la recta o salir por la vía desviada.

El cálculo del intervalo con esta maniobra es el siguiente:

Evento	Descripción	Tiempo parcial (s)	I. Salida A2 (s)	T. maniobra (s)
a	Tiempo desde salida UT1 de A1 a liberación bretelle	28,8	28,8	
b	Tiempo maniobra aguja bretelle a directa y establecer itinerario	9,0	37,8	
c	Tiempo que tarda en llegar la UT perseguidora (UT2) a A1	50,0	87,8	
d	Tiempo de parada UT2 en A1	40,0	127,8	
e	Tiempo maniobra aguja bretelle a desviada y establecer itinerario	9,0		
f	Tiempo cambio de cabina de mando UT2 en A1	6,0		

Figura 119: Cálculo de intervalo para maniobra de inversión de marcha por un andén

Se muestran en color azul claro el tiempo de los eventos que transcurren paralelamente en el tiempo. En un azul más oscuro el que afecta directamente para el cálculo del intervalo y en un azul más claro los que están relacionados pero no afectan al intervalo. Por ejemplo, mientras que el evento d (40 s) tiene lugar el evento e (9 s) y a continuación el evento f (6 s). Los eventos e y f no afectaran al tiempo del intervalo mientras su suma sea inferior al valor del evento d.

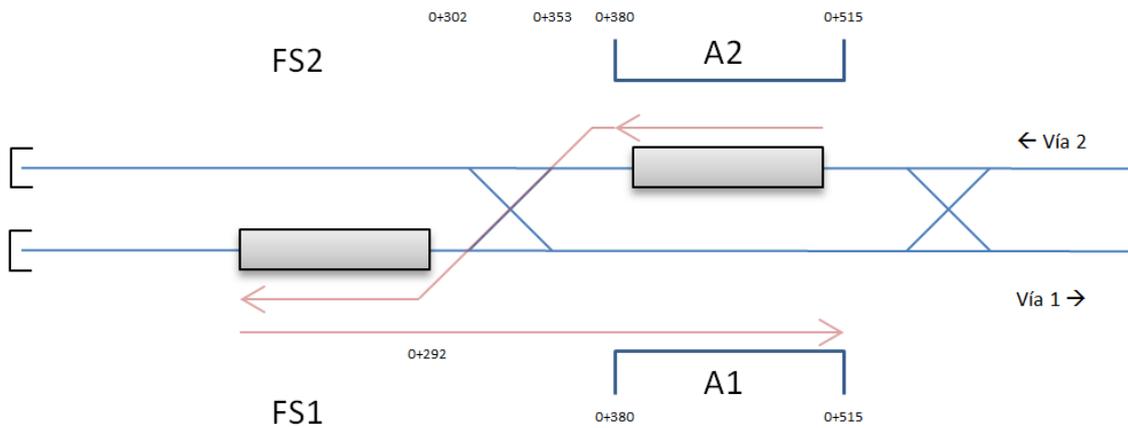
Se obtienen las siguientes conclusiones:

- Intervalo de salida-salida (cuello de botella): 128 s
- Intervalo de maniobra: 0 s (debido a que el tiempo de inversión de marcha está incluido en el tiempo de recorrido entre estaciones al darse la vuelta por delante).
- Capacidad máxima del nudo: 28 trenes/hora
- Capacidad UIC (80% del valor de capacidad máxima): 22 trenes/hora

### 9.5.3.2 Maniobra de inversión de marcha por dos andenes

En esta maniobra se da servicio por dos andenes (los pasajeros bajan por un andén y suben por el otro). Tiene la ventaja aumentar la capacidad de la línea al permitir intervalos menores. Sin embargo se incrementa el tiempo de recorrido (operación menos eficiente) debido al tiempo de maniobra necesario para cambiar de vía en el saco, invertir la marcha y posicionarse en la estación por el andén contrario.

El cálculo del intervalo con esta maniobra es el siguiente:



Evento	Descripción	Tiempo parcial (s)	I. Salida A2 (s)	T. maniobra (s)
a	Tiempo de salida UT1 de A2 y llegada a FS1	33,5	33,5	33,5
b	Tiempo que tarda en llegar la UT perseguidora (UT2) a A2	16,5	50,0	50,0
c	Tiempo de parada UT2 en A2	20,0		
d	Tiempo maniobra aguja bretelle a directa y establecer itinerario	9,0	59,0	59,0
e	Tiempo inversión de marcha UT1 en FS1	6,0	65,0	65,0
f	Tiempo desde salida de UT1 en FS1 hasta que libera bretelle	22,6	87,6	87,6
g	Tiempo de la UT1 desde que libera la bretelle hasta llegar a A1	7,4		95,0
h	Tiempo maniobra aguja bretelle a desviada y establecer itinerario	9,0	96,6	

Figura 120: Maniobra y cálculo de la maniobra de inversión de marcha por dos andenes.

Se considera que la bretelle no puede moverse después de la llegada de la UT a FS1 (evento a) hasta que la UT perseguidora no se estacione en A2 (evento b) debido a que la bretelle forma parte de la distancia de seguridad de frenado.

Se obtienen las siguientes conclusiones:

- Intervalo de salida-salida (cuello de botella): 97 s
- Intervalo de maniobra: 95 s
- Capacidad máxima del nudo: 37 trenes/hora
- Capacidad UIC (80% del valor de capacidad máxima): 29 trenes/hora

### 9.5.3.3 Maniobra de inversión de marcha con servicio alternativo por dos andenes (vuelta por detrás)

En esta maniobra se da servicio por dos andenes al igual que en la anterior. Sin embargo la inversión de marcha se realiza alternativamente por los dos fondos de saco en lugar de utilizarse solamente uno.

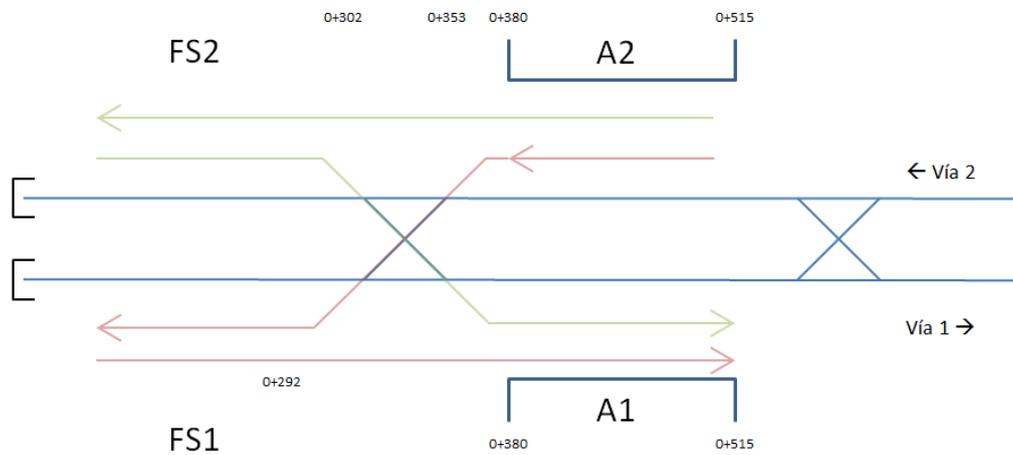


Figura 121: Maniobra de inversión de marcha servicio alternativo por dos andenes (vuelta por detrás)

El cálculo del intervalo con esta maniobra es el siguiente:

Evento	Descripción	Tiempo parcial (s)	I. Salida A2 (s)	T. maniobra (s)
a	<b>Tiempo desde salida UT1 de A2 a llegada a FS1</b>	33,5	33,5	33,5
b	Tiempo que tarda en llegar la UT perseguidora (UT2) a A2	16,5	50	50
c	Tiempo de parada de UT2 en A2	20	70	
d	Tiempo maniobra aguja bretelle a desviada y establecer itinerario	9		59
e	Tiempo cambio de cabina de mando UT1 en FS1	6		65
f	Tiempo desde salida de UT1 en FS1 hasta que llega a A1	30		95
g	<b>Tiempo desde salida UT2 de A2 hasta llegada a FS2</b>	30	100	125
h	Tiempo que tarda en llegar la UT perseguidora (UT3) a A2	20	120	145
i	Tiempo de parada de UT3 en A2	20		
j	Tiempo maniobra aguja bretelle a desviada y establecer itinerario	9	129	154
k	Tiempo cambio de cabina de mando UT2 en FS2	6	135	160
l	Tiempo desde salida de UT2 en FS2 hasta que libera bretelle	24,4	159,4	184,4
m	Tiempo de la UT2 desde liberar la bretelle a llegar a A1	9,1		193,5
n	Tiempo maniobra aguja bretelle a desviada y establecer itinerario	9	168,4	
ñ	<b>Tiempo desde salida UT3 de A2 a llegada a FS1</b>	33,5	201,9	227
o	Tiempo que tarda en llegar la UT perseguidora (UT4) a A2	16,5	218,4	243,5
p	Tiempo de parada de UT4 en A2	20	238,4	
q	Tiempo maniobra aguja bretelle a desviada y establecer itinerario	9		252,5
r	Tiempo cambio de cabina de mando UT3 en FS1	6		258,5
s	Tiempo desde salida de UT3 en FS1 hasta que llega a A1	30		288,5
t	<b>Tiempo desde salida UT4 de A2 hasta llegada a FS2</b>	30	268,4	318,5
u	Tiempo que tarda en llegar la UT perseguidora (UT5) a A2	20	288,4	338,5
v	Tiempo de parada de UT5 en A2	20		
w	Tiempo maniobra aguja bretelle a desviada y establecer itinerario	9	297,4	347,5
x	Tiempo cambio de cabina de mando UT4 en FS2	6	303,4	353,5
y	Tiempo desde salida de UT4 en FS2 hasta que libera bretelle	24,4	327,8	377,9
z	Tiempo de la UT4 desde liberar la bretelle a llegar a A1	9,1		387
aa	Tiempo maniobra aguja bretelle a desviada y establecer itinerario	9	336,8	
ab	<b>Tiempo desde salida UT5 de A2 hasta llegada a FS1</b>	33,5		

Figura 122: Cálculo de intervalo maniobra servicio alternativo por dos andenes.

Esta maniobra tiene un periodo de 168,4 segundos y un intervalo medio de 84,2 segundos que es el resultado de un intervalo de 98,4 segundos y otro intervalo de 70 segundos. Si se diera servicio con estos intervalos el tren que tiene un menor intervalo se cargaría menos de lo normal mientras que el de mayor intervalo se cargaría más. Por tanto se considera el valor de 98,4 segundos como intervalo.

Se obtienen las siguientes conclusiones:

- Intervalo de salida-salida (cuello de botella): 99 s (98,4 – 70 s).
- Intervalo de maniobra: 99 s (98,5 – 95 s).
- Capacidad máxima del nudo: 36 trenes/hora.
- Capacidad UIC (80% del valor de capacidad máxima): 29 trenes/hora.

En el caso de que se diera servicio con los intervalos de 70 segundos y 98,4 segundos el intervalo medio sería de 84,2 segundos, siendo por tanto la capacidad del nudo:

- Capacidad máxima del nudo:  $C=3600 \cdot N/I = 3600 \cdot 2/168,4 = 42$  trenes/hora
- Capacidad UIC (80% del valor de capacidad máxima): 34 trenes/hora

#### 9.5.3.4 Servicio alternativo con andén central

Para dar este servicio es necesario que la estación de cabecera disponga de andén central. Las maniobras son similares a las del punto anterior pero se realizan por delante de la estación lo que permite una operación más eficiente (tiempo de recorrido menor).

Se estima que la bretelle de entrada está separada 80 metros de la estación debido a la apertura necesaria del trazado (andén central).

La bretelle permite una velocidad de paso por vía desviada de 65 km/h. Como el aparato de vía tiene un radio de 500 metros, la aceleración no compensada en vía ( $\alpha_{nc} = V^2/R$ ) a 65 km/h sería de  $0,65 \text{ m/s}^2$  siendo la percibida por el viajero de  $0,94 \text{ m/s}^2$ .

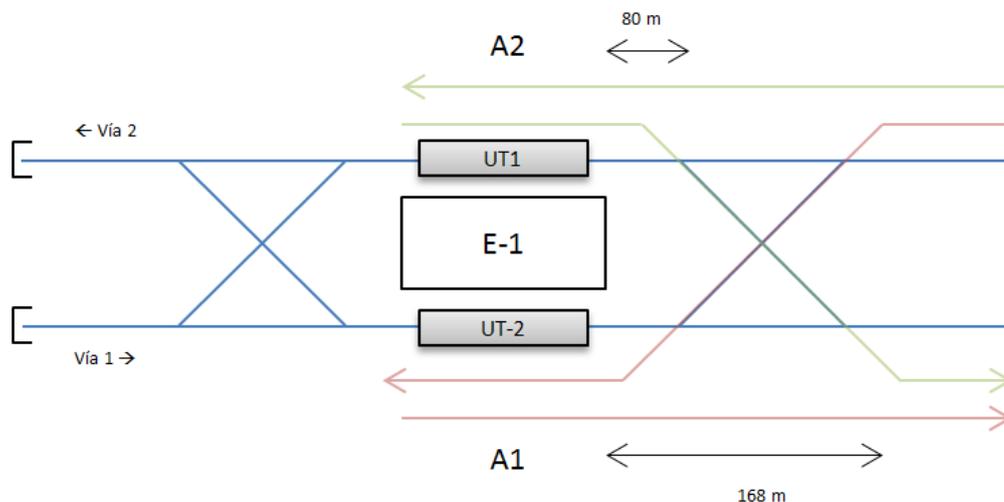


Figura 123: Maniobra de inversión de marcha servicio alternativo con andén central.

Una vez se ha estudiado la configuración de la cabecera se procede a realizar una estimación del intervalo que se podría dar. Aunque el aparato está diseñado para permitir el paso a velocidad máxima por la vía desviada con un confort adecuado para los cálculos se usa una velocidad máxima de paso por vía desviada de 50 km/h ( $\alpha_{nc} = 0,4 \text{ m/s}^2$ ). Se considera que siempre permanece al menos un tren en la estación, de forma que cuando una UT llega la que estaba parada en la estación realiza su salida.

Evento	Descripción	Tiempo parcial (s)	I. Salida A2	T. maniobra (s)
a	Tiempo desde salida UT1 de A2 a liberación bretelle	28,5	28,5	
b	Tiempo de parada UT2 en A1	20,0		
c	Tiempo maniobra aguja bretelle a directa y establecer itinerario	9,0	37,5	
d	Tiempo cambio de cabina de mando UT2 en A1	6,0		
e	Tiempo que tarda en llegar la UT perseguidora (UT3) hasta A2 y salida UT2 en A1	50,0	87,5	
f	Tiempo de parada UT3 en A2	20,0		
g	Tiempo desde salida UT2 de A1 a liberación bretelle	28,5	115,9	
h	Tiempo maniobra aguja bretelle a desviada para entrada A1 y establecer itinerario	9,0	124,9	
i	Tiempo que tarda en llegar la UT perseguidora (UT4) hasta A1	50,0	174,9	
j	Tiempo de parada UT4 en A1	20,0		
k	Tiempo maniobra aguja bretelle a desviada para salida A2 y establecer itinerario	9,0	183,9	
l	Tiempo cambio de cabina de mando UT3 en A2 y salida	6,0	189,9	
m	Tiempo desde salida UT3 de A2 a liberación bretelle	28,5	218,4	
n	Tiempo maniobra aguja bretelle a directa y establecer itinerario	9,0	227,4	
ñ	Tiempo cambio de cabina de mando UT4 en A1	6,0		
o	Tiempo que tarda en llegar la UT perseguidora (UT5) hasta A2 y salida UT4 en A1	50,0	277,4	
p	Tiempo de parada UT5 en A2	20,0		
q	Tiempo desde salida UT4 de A1 a liberación bretelle	28,5	305,9	
r	Tiempo maniobra aguja bretelle a desviada para entrada A1 y establecer itinerario	9,0	314,9	
s	Tiempo que tarda en llegar la UT perseguidora (UT6) hasta A1	50,0	364,9	
t	Tiempo de parada UT6 en A1	20,0		
u	Tiempo maniobra aguja bretelle a desviada para salida A2 y establecer itinerario	9,0	373,9	
v	Tiempo cambio de cabina de mando UT5 en A2 y salida	6,0	379,9	

Figura 124: Cálculo intervalo maniobra servicio alternativo con andén central.

Se obtienen las siguientes conclusiones:

- Intervalo de salida-salida (cuello de botella): 103 s (88 - 103 s).
- Intervalo de maniobra: 0 s
- Capacidad máxima del nudo:  $3600 / 103 = 34$  trenes/hora
- Capacidad UIC (80% del valor de capacidad máxima): 27 trenes/hora

### 9.5.3.5 Conclusiones

A continuación se muestra un cuadro resumen de las maniobras analizadas:

Tipo de maniobra	Cuello de botella (s)	Tiempo de maniobra (s)	Capacidad máxima (trenes/h)	Capacidad recomendada (80%)	Trenes/hora año 2020			Trenes/hora año 2050		
					HPM	HPT	HV	HPM	HPT	HV
Por dos andenes	97	95	37	29	24	15	12	40	30	17,1
Alternativo con dos andenes laterales (inversión por fondo de saco)	99 (70-99)	95-99	36	29	24	15	12	40	30	17,1
Alternativo con andén central (inversión por delante)	103 (88-103)	0	34	27	24	15	12	40	30	17,1
Por un andén	128	0	28	22	24	15	12	40	30	17,1

Figura 125: Comparativa capacidad de maniobra en cabecera- niveles de servicio

De las maniobras consideradas la más rápida (97 segundos) es dar servicio por dos andenes utilizando un único fondo de saco. Tiene una capacidad máxima de 37 trenes/hora. Dar servicio utilizando alternativamente los dos fondos de saco es ligeramente más desfavorable (2 segundos más lento) por lo que se descarta el uso de esta maniobra.

Las maniobras más eficientes (tiempo de maniobra cero) son dar servicio por un andén y dar servicio alternativo con andén central. Tienen una capacidad máxima de 28 trenes/hora y 34 trenes/hora respectivamente y permiten un RTT más reducido lo que a su vez hace que el número de trenes necesario sea menor.

En el punto “4.7.2 Intervalo en cabeceras”, se muestra el estudio realizado para aumentar la capacidad de maniobra de las estaciones de cabecera desplazando 88 metros la bretelle del saco. Los resultados son los siguientes:

Tipo de maniobra	Cuello de botella (s)	Tiempo de maniobra (s)	Capacidad máxima (trenes/h)	Capacidad recomendada (80%)	Trenes/hora año 2020			Trenes/hora año 2050		
					HPM	HPT	HV	HPM	HPT	HV
Por dos andenes alternativamente (bretelle desplazada 88 metros)	84 (70-84)	92	42	34	24	15	12	40	30	17,1
Por dos andenes (bretelle desplazada 88 metros)	86	92	41	33	24	15	12	40	30	17,1
Por dos andenes	97	95	37	29	24	15	12	40	30	17,1
Alternativo con andén central (inversión por delante)	103 (88-103)	0	34	27	24	15	12	40	30	17,1
Por un andén	128	0	28	22	24	15	12	40	30	17,1

Figura 126: Capacidad de maniobra en cabecera- niveles de servicio (con bretelle desplazada).

Se concluye que dando servicio alternativamente por ambos fondos de saco con la bretelle desplazada se consigue la máxima capacidad de la línea (42 trenes/hora) lo que permite satisfacer el nivel de servicio de la HPM de 2050 (40 trenes/hora) con un pequeño margen (2 trenes/hora). Con respecto al servicio por dos andenes sin desplazar la bretelle se aumenta la capacidad en 5 trenes/hora.

#### 9.5.4 Cálculo del ahorro obtenido por el establecimiento del bucle

Para determinar si el establecimiento del bucle mediante la construcción de vías de inversión de marcha es rentable es necesario estimar económicamente los ahorros obtenidos de flota y coches\*km.

Para el cálculo del número de trenes necesarios se divide RTT entre el intervalo ofertado. Se concluye que mediante el uso del bucle se obtiene un ahorro de 11 trenes en la flota total. Estimando el coste de cada tren en 10 millones de euros se conseguiría un ahorro de **110 millones** de euros en **material móvil**.

Para determinar el ahorro de trenes\*kilómetro asociado al bucle se calcula el total de kilómetros al año realizados por los trenes que recorren la línea completa y los trenes que recorren el bucle en el año 2020:

	Trenes que recorren la línea completa				Trenes que recorren el bucle				
	Días	Circulaciones / Sentido	Circulaciones / Día	Total	Días	Circulaciones / Sentido	Circulaciones / Día	Total	
Laborables	302	117	234	70.668	302	117	234	70.668	
Domingos y Festivos	63	102	204	12.852	63	102	204	12.852	
TOTAL CIRCULACIONES / AÑO				83.520	TOTAL CIRCULACIONES / AÑO				83.520
Longitud itinerario (km)				26.118	Longitud itinerario (km)				17.074
Kilómetros con viajeros/año				2.181.375	Kilómetros con viajeros/año				1.426.020
Kilómetros sin viajeros/año (5%)				109.069	Kilómetros sin viajeros/año (5%)				71.301
TOTAL KM/AÑO				2.290.444	TOTAL KM/AÑO				1.497.322

Figura 127: Producción año 2020 con bucle E5 – E21

Se obtiene un total de 3.787.766 trenes\*km para el año 2020 empleando el bucle. Como sin el bucle se realizarían 4.580.888 trenes\*km se obtiene una reducción de 793.123 trenes\*km.

Se repite el cálculo para el año 2050 obteniéndose los siguientes resultados:

	Trenes que recorren la línea completa				Trenes que recorren el bucle				
	Días	Circulaciones / Sentido	Circulaciones / Día	Total	Días	Circulaciones / Sentido	Circulaciones / Día	Total	
Laborables	302	181	363	109.583	302	181	363	109.583	
Domingos y Festivos	63	146	291	18.360	63	146	291	18.360	
TOTAL CIRCULACIONES / AÑO				127.943	TOTAL CIRCULACIONES / AÑO				127.943
Longitud itinerario (km)				26.118	Longitud itinerario (km)				17.074
Kilómetros con viajeros/año				3.341.612	Kilómetros con viajeros/año				2.184.496
Kilómetros sin viajeros/año (5%)				167.081	Kilómetros sin viajeros/año (5%)				109.225
TOTAL KM/AÑO				3.508.692	TOTAL KM/AÑO				2.293.721

Figura 128: Producción año 2050 con bucle E5 – E21

Se obtiene un total de 5.802.413 trenes\*km para el año 2050 empleando el bucle. Como sin el bucle se realizarían 7.005.638 trenes\*km se obtiene una reducción de 1.203.225 trenes\*km.

	Año 2020			Año 2050		
	Sin bucle	Con bucle	Ahorro	Sin bucle	Con bucle	Ahorro
trenes*km/año	4.580.888	3.787.766	793.123	7.005.638	5.802.413	1.203.225

Figura 129: Ahorro de trenes\*km obtenido por el bucle en los años 2020 y 2050

Para estimar el valor de cada año comprendido entre el 2020 y el 2050 se calcula de la tasa de crecimiento media anual acumulativa ( $r$ ) empleando la siguiente ecuación:

$$r = \left[ \left( \frac{x_f}{x_o} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] * 100$$

Siendo:

$r$ : Tasa de crecimiento media anual acumulativa

$x_f$ : Valor final

$x_o$ : Valor inicial

$n$ : Número de años

Se obtiene un ahorro total de 30.517.785 trenes\*km. Considerando una composición de 6 coches el ahorro es equivalente a 183.106.708 coches\*km.

Para poder estimar económicamente el ahorro obtenido se considera un coste de 1,8 € por coche\*km (coste por coche\*km obtenido por el metro de Santiago de Chile en el año 2.015 [15]). Se estima un incremento del 1% anual del coste del coche\*km durante los 30 años de operación. El resultado es un ahorro estimado de **388 millones de euros**.

El establecimiento del bucle permite una reducción de coches\*km y de material móvil que originan un ahorro total estimado de **498 millones de euros**. Hay que tener en cuenta que el coste del coche\*km empleado para realizar la estimación corresponde a una explotación convencional. En las líneas UTO los costes por coche\*km son menores por lo que el ahorro podría ser inferior (en París se calcula que los costes de operación del UTO son la mitad que los de los metros convencionales [9]). Por otro lado hay que considerar que el perfil longitudinal de la línea implica un consumo energético elevado que puede incrementar el coste del coche\*km.

El detalle del ahorro obtenido para cada año es el siguiente:

Año	Precio coche*km	Ahorro trenes*km	Ahorro coches*km	Ahorro €
2020	1,8	793.123	4.758.736	8.565.724
2021	1,82	804.218	4.825.309	8.772.412
2022	1,84	815.469	4.892.814	8.984.087
2023	1,85	826.877	4.961.263	9.200.869
2024	1,87	838.445	5.030.669	9.422.883
2025	1,89	850.175	5.101.047	9.650.253
2026	1,91	862.068	5.172.409	9.883.110
2027	1,93	874.128	5.244.770	10.121.586
2028	1,95	886.357	5.318.143	10.365.816
2029	1,97	898.757	5.392.542	10.615.939
2030	1,99	911.330	5.467.982	10.872.097
2031	2,01	924.080	5.544.478	11.134.437
2032	2,03	937.007	5.622.043	11.403.106
2033	2,05	950.116	5.700.694	11.678.259
2034	2,07	963.408	5.780.445	11.960.051
2035	2,09	976.885	5.861.312	12.248.642
2036	2,11	990.552	5.943.310	12.544.197
2037	2,13	1.004.409	6.026.455	12.846.883
2038	2,15	1.018.461	6.110.763	13.156.874
2039	2,17	1.032.709	6.196.251	13.474.344
2040	2,20	1.047.156	6.282.935	13.799.475
2041	2,22	1.061.805	6.370.832	14.132.451
2042	2,24	1.076.660	6.459.958	14.473.461
2043	2,26	1.091.722	6.550.331	14.822.700
2044	2,29	1.106.995	6.641.968	15.180.366
2045	2,31	1.122.481	6.734.887	15.546.662
2046	2,33	1.138.184	6.829.106	15.921.797
2047	2,35	1.154.107	6.924.643	16.305.984
2048	2,38	1.170.253	7.021.517	16.699.441
2049	2,40	1.186.624	7.119.746	17.102.392
2050	2,43	1.203.225	7.219.349	17.515.066
<b>TOTAL</b>		<b>30.517.785</b>	<b>183.106.708</b>	<b>388.401.364</b>

Figura 130: Ahorro estimado de coches\*km con bucle E5 – E21

## 9.6 ANEXO 6: PERSONAL DE OPERACIÓN

### 9.6.1 Personal del PCC

#### 9.6.1.1 Jefe del PCC

Puesto dependiente jerárquica y funcionalmente del Gerente de Control de Operaciones y Tráfico.

Dependen de él jerárquica y funcionalmente los Supervisores del PCC y categorías inferiores del PCC.



Sus funciones serán:

- Organizar la actividad del PCC y asegurar la gestión de la operación en tiempo real de acuerdo con las directrices del Gerente de Control de Operación y Tráfico.
- Garantizar el cumplimiento de los Planes y procesos en todos los ámbitos bajo su cobertura (Circulación, energía, estaciones e Información y realizar su adaptación a las nuevas condiciones de explotación cuando se requiera.
- Dirigir y supervisar las acciones para el cumplimiento de los parámetros de calidad en la explotación y proponer acciones correctoras en colaboración con los demás Responsables de la Operación.
- Analizar conjuntamente con el Jefe Operativo de Línea la resolución de las incidencias con el objetivo de agilizar su resolución de forma segura y minimizar el impacto de las mismas sobre la operación.
- Supervisión y control de la actividad de los recursos humanos y materiales asignados y realizar las planificaciones anuales en colaboración con el Supervisor del PCC y establecer y aprobar el plan y la prioridad de la formación.
- Control y aprobación de los informes diarios de la operación, así como supervisar la información elaborada.
- Establecer los procesos para el nombramiento del servicio, concesión de permisos, cambios, vacaciones, horas extras, etc. del personal a su cargo con las indicaciones de la Dirección.
- Transmitir y canalizar las directrices y la comunicación interna y participar activamente en la implantación de la política de comunicación interna de la Empresa
- Asegurar que las normas y procedimientos diseñados cumplen los criterios y guías establecidos y aprobar, dentro de sus competencias, la implantación de acciones dirigidas a definir y/o mejorar la calidad de las normas y procedimientos relacionados con la operación.
- Aportar los datos para los informes de calidad y otras informaciones que pueda solicitar la Dirección y/o la Entidad Concesionaria y que estén bajo su ámbito de responsabilidad.
- Trasmistir al Jefe Operativo de Línea las problemáticas asociadas a las Instalaciones o el Material Móvil, para la gestión de las mismas con los mantenedores.

- Colaborar con los diferentes departamentos en relación con las peticiones sobre el material móvil y las instalaciones y establecer las prioridades genéricas para la gestión por parte de los Supervisores del PCC.

### *9.6.1.2 Supervisor del PCC (Jefe de Sala del PCC)*

Puesto dependiente jerárquica y funcionalmente del Jefe del PCC. Dependen de él jerárquica y funcionalmente los Operadores del PCC. El Supervisor tendrá autoridad global en la sala de control y será responsable de la operación asignada, incluyendo toda la operación de la línea, ya sea en condición de operación normal, modo degradado o situación de emergencia.

El Supervisor coordinará las actividades del personal dentro de la sala de control, determinando la estrategia para manejar situaciones de emergencia, garantizando el respeto de los procedimientos y el mantenimiento continuo de la condición de seguridad operacional y de seguridad física para los pasajeros y el personal del sistema.

El Supervisor también actuará como interfaz ante organizaciones externas durante la gestión de incidentes y será responsable de designar los gestores de incidente del sitio y fijar otras actividades relevantes para la recuperación de la operación del servicio y actuar como la autoridad central para permitir cualquier actividad externa relevante para la operación del sistema de transporte.

El Supervisor gestionará los horarios de trabajo del personal, y coordinará las actividades de trabajo.

Sus funciones serán:

- Asegurar la calidad y seguridad de la prestación del servicio en su turno
- Programación, organización y control de la actividad de los recursos humanos y materiales asignados, con la supervisión del Jefe del PCC.
- Supervisión de la explotación de la línea, asegurando la regularidad / seguridad en la circulación de trenes.
- Coordinación de las acciones a realizar, tanto en trenes, estaciones, mantenimiento, energía, seguridad e información.
- Control y coordinación de la ejecución del plan de explotación y de la información al viajero.

- Coordinación de la resolución de incidencias en la operación.
- Supervisión y control del suministro de energía en coordinación con el departamento de energía y las compañías suministradoras y control de facturación.
- Coordinarse con el Jefe Operativo de línea y el Responsable de Seguridad (security), para el desarrollo del servicio, y para la organización de eventos especiales o gestión de incidentes relevantes.
- Coordinación del Plan de Emergencia.
- Control y coordinación de la ejecución del plan de Seguridad y sus procesos.
- Elaboración del informe diario de actividad e incidencias, así como toda aquella información asociada a la explotación tanto interna como solicitada por la entidad Concesionaria, para su elevación al Jefe del PCC.
- Coordinación con entidades externas en su ámbito.
- Coordinación con los demás operadores de transporte en la gestión de averías o incidencias, en los ámbitos que necesiten cobertura de apoyo.
- Coordinar la programación de los trabajos de mantenimiento de la línea y Organizar los trabajos en periodos nocturnos (fuera de servicio) con la colaboración del Operador de circulación de trenes.
- Gestión de incidencias. Solicitud de recursos externos para la atención de las incidencias que lo requieran.

#### ***9.6.1.3 Operador de Circulación de Trenes (TD)***

Puesto dependiente jerárquica y funcionalmente del Supervisor del PCC. Dependen de él funcionalmente el personal de la línea, en lo relativo a la circulación de trenes.

Operador de Circulación de Trenes (TD) será responsable del control de la circulación de los trenes y de que se ajusten al horario. Cooperará con el resto del personal en la sala de PCC para proporcionar un servicio integrado. Su papel principal será el monitoreo del movimiento de vehículos. En caso de cualquier fallo el operador podrá ver la alarma relacionada con el fallo e iniciar una acción correctiva o una solución temporal.

Sus funciones serán:

- Controlar la circulación de los trenes.

- Regulación y control de la circulación de trenes y vehículos de trabajo, vigilando el cumplimiento de los niveles de calidad del servicio.
- Adopción de las medidas adecuadas para cada incidencia en la circulación y colaboración en su resolución.
- Control de la ubicación y disponibilidad del material móvil.
- Registro de averías del material móvil y envío a los mantenedores, en coordinación con los Responsables operativos y el Jefe Operativo de Línea.
- Control de estados de las instalaciones relacionadas con la circulación.
- Autorización y control de los trabajos que se realicen en la plataforma de la vía en horas de servicio.
- Colaborar en la organización de los servicios nocturnos y realizar su autorización y control.

#### ***9.6.1.4 Operador de SCADA/Tracción***

Puesto dependiente jerárquica y funcionalmente del Supervisor del PCC. Dependen de él funcionalmente el personal de la línea, en lo relativo al control de instalaciones.

El operador de SCADA/Tracción será responsable del control de los sistemas de alimentación de tracción eléctrica, de los sistemas eléctricos y mecánicos instalados en estación y en túnel y de los sistemas del área del depósito.

Sus funciones serán:

- Control y gestión de la alimentación de energía eléctrica en alta tensión a la Red, así como su distribución a las diferentes subestaciones.
- Control de la distribución de alimentación de tracción y servicios auxiliares.
- Resolver las incidencias en la explotación que puedan originarse, tanto por falta de energía de las distribuidoras, como por incidencias propias.
- Ejecutar los cortes y reposiciones de tensión necesarios para la realización de trabajos.
- Controlar las instalaciones de estaciones.
- Telemando centralizado de instalaciones. Puesta en servicio de instalaciones, programación de horarios, detección de alarmas, etc.

- Control del estado de las instalaciones de estaciones y comunicación y seguimiento de la atención a las averías.
- Control de peaje en tiempo real.
- Control y autorización de los trabajos que se realicen en las estaciones.

#### *9.6.1.5 Operador de Información de Pasajeros y Seguridad (PS&I)*

Puesto dependiente jerárquica y funcionalmente del Supervisor del PCC. Dependen de él funcionalmente el personal de la línea, en lo relativo a las comunicaciones.

El Operador de Información de Pasajeros y Seguridad (PS&I) es la persona a cargo de monitorear pasajeros, proporcionar soporte a través de anuncios y la comunicación tanto con pasajeros como con vigilantes.

A través de CCTV, puede tener una visión global de los pasajeros dentro de las estaciones con especial atención a personas discapacitadas; en caso necesario se encargará de la gestión de multitudes en coordinación con el Controlador de Trenes (es decir, si fuera necesaria una permanencia extendida en estaciones específicas) y hasta la gestión de emergencias dentro de las estaciones y a bordo para garantizar que nunca se pone en peligro la seguridad de los pasajeros.

A través de elementos de Teléfono/Radio el operador de PS&I responderá a solicitudes de información y llamadas de emergencia desde los puntos de llamada, llamadas directas por parte del personal autorizado del metro, comunicaciones de radio en general procedentes del personal repartido a lo largo de la línea y en estaciones.

El Operador de Información de Pasajeros y Seguridad (PS&I) responderá las llamadas de radio procedentes del personal a bordo de los trenes, y demás personal, y trabajara en coordinación con los Técnicos de Operación móviles.

Sus funciones serán:

- Controlar las instalaciones de comunicaciones y la información facilitada al usuario o recibida de él.

- Telemando centralizado de las instalaciones de información al usuario (megafonía, teleindicadores, interfonía, etc.)
- Control del estado de las instalaciones de información al usuario y seguimiento de la atención a las averías.
- Atención centralizada a la interfonía.
- Atención y seguimiento a las Reclamaciones Oficiales por vía telefónica o web.
- Atención y seguimiento a las informaciones transmitidas a través de las Redes Sociales.
- Elaboración, emisión y gestión de mensajes de todo tipo (también los asociados con la circulación).
- Registro de incidencias e informaciones.

#### ***9.6.1.6 Operador O&M Soporte Técnico***

Puesto dependiente jerárquica y funcionalmente del Supervisor del PCC.

Este operador gestionará toda la información principal acerca del estado de los equipos del sistema durante el servicio, para dar apoyo a las actividades operacionales coordinadas por el Supervisor, incluyendo las alarmas principales e información de diagnóstico.

#### ***9.6.1.7 Oficial de Material Móvil***

Puesto dependiente funcionalmente del Supervisor del PCC pero jerárquicamente de mantenimiento de material móvil con un puesto en el PCC. Su misión es asistir técnicamente al Operador de Trenes ante incidencias en los primeros meses de la explotación y durante las fases de pruebas.

Sus funciones serán:

- Supervisión remota del estado de los trenes tanto en el patio taller como en la línea.
- Puesta en servicio remota de los trenes.
- Movimiento manual remoto de los trenes en caso necesario.
- Asistencia técnica e intervención remota en el tren en caso de avería del mismo, asesorando al personal involucrado en la incidencia sobre la mejor forma de proceder para mover el tren si no es posible de forma remota.



## 9.6.2 Oficina Técnica de Operación

### 9.6.2.1 *Jefe de la Oficina Técnica de Operación*

Puesto dependiente jerárquica y funcionalmente del Gerente de Control de Operaciones y Tráfico

Dependen de él jerárquica y funcionalmente el Técnico de Planificación y Estudios y el Técnico de Información y Demanda.

Sus funciones:

- Facilitar apoyo técnico a los demás departamentos de Operación, planificar y supervisar las actividades de programación y seguimiento de la oferta de servicio y el control y modelización de la demanda.
- Dirigir y controlar las actividades en lo relativo al apoyo técnico a los demás departamentos de Operación con el objetivo de cumplir la oferta de servicio y los objetivos estratégicos.
- Coordinar las actividades en lo relativo a la coordinación entre los departamentos de Operación y el resto de la Empresa para facilitar o establecer flujos de información.
- Dirigir la elaboración de la oferta de transporte y los planes de explotación con objeto de mejorar los niveles de operatividad y calidad de servicio
- Dirigir y controlar las actividades en lo relativo a la elaboración y seguimiento de la información operativa para cumplir la oferta de servicio y garantizar su calidad.
- Establecer y definir los sistemas de seguimiento de incidencias que permitan adoptar decisiones para minimizar el impacto sobre el cliente y cumplir los objetivos.
- Dirigir y controlar las actividades para el control de la demanda y modelización de la misma.
- Desarrollar los procesos informáticos que faciliten su gestión, en coordinación con el Área de Sistemas de Información.
- Atender las solicitudes de información de las Unidades organizativas de la Empresa y resolver personalmente las incidencias que se produzcan en su ámbito de actuación, sin recurrir a otras instancias.

- Mantener las relaciones con Organismos Oficiales y Entidades Externas, relacionadas con su ámbito de actuación y/o ámbito geográfico.

#### 9.6.2.2 *Técnico de Planificación y Estudios*

Puesto dependiente jerárquica y funcionalmente del Jefe de la Oficina Técnica de Operación.

Sus funciones serán:

- Elaborar la propuesta de oferta de servicio y análisis y seguimiento de la misma.
- Realizar estudios de dimensionamiento de la oferta de transporte, teniendo en cuenta los criterios de calidad de servicio establecidos.
- Realizar planes de explotación, para proporcionar alternativas de servicio ante cambios.
- elaborar horarios y mallas de transporte, con el fin de mejorar el servicio ofertado a los viajeros, con objeto de mejorar los niveles de operatividad y calidad de servicio.
- Elaborar las especificaciones y diseño funcional de programas de regulación de tráfico, y apoyar en su implantación, para mejorar la regularidad en las líneas.
- Proporcionar los datos necesarios para la confección de los carteles informativos, con el fin de facilitar al usuario la información referente al servicio en los andenes, vestíbulos, páginas Web, etc.
- Realizar la actualización permanente de los datos estructurales, para el mantenimiento de aplicaciones informáticas.
- Elaborar informes técnicos y soluciones informáticas para la Dirección de Operación, sobre diversos aspectos relacionados con la operación, con el propósito de mejorar el control de la misma.
- Participar en las actividades relativas a la coordinación entre los departamentos de Operación y el resto de la Empresa con el fin de facilitar los flujos de información.
- Atender las solicitudes de información de otros departamentos de la Empresa y resolver personalmente las incidencias que se produzcan en su ámbito de actuación, sin recurrir a otras instancias.
- Mantener las relaciones con Organismos Oficiales y Entidades Externas, relacionadas con su ámbito de actuación y/o ámbito geográfico.

- Participar en Equipos, Comités, Reuniones y Organismos de Consulta, sobre las funciones de su competencia relacionadas con las actividades que se le hayan encomendado.

### 9.6.2.3 *Técnico de Información y Demanda*

Puesto dependiente jerárquica y funcionalmente del Jefe de la Oficina Técnica de Operación.

Sus funciones serán:

- Facilitar la información necesaria para la gestión de la operación y el control de la demanda.
- Realizar informes y estudios técnicos sobre diversos aspectos de la operación (Averías de trenes, incidencias que afectan a la circulación, Reclamaciones, Incidencias en Ascensores, Disponibilidad Operativa, Capacidad de transporte, etc.).
- Realizar el seguimiento de los diversos indicadores de gestión.
- Analizar información de la explotación, identificando áreas de mejora, facilitando la información de forma estructurada y proponiendo las mejoras para el acceso a la misma.
- Colaborar en la definición, desarrollo e implantación de las soluciones técnicas más adecuadas y de herramientas de tratamiento, análisis y gestión de la información.
- Realizar el seguimiento y control de la demanda y realización de informes técnicos sobre su evolución y previsiones de comportamiento ante modificaciones de la Red de Metro u otras causas.
- Realizar el mantenimiento de datos estructurales y calibración de la aplicación de modelización de la demanda.
- Coordinación del trabajo de campo para la realización de aforos, encuestas, etc. tanto internas de Metro como colaborando con empresas contratistas.
- Participación en la realización de estudios de opinión y en la evaluación de los mismos.
- Elaboración de informes sobre viajeros afectados en casos de incidencias.
- Atender las solicitudes de información de otros departamentos de la Empresa y resolver personalmente las incidencias que se produzcan en su ámbito de actuación, sin recurrir a otras instancias.



- Mantener las relaciones con Organismos Oficiales y Entidades Externas, relacionadas con su ámbito de actuación y/o ámbito geográfico.
- Participar en Equipos, Comités, Reuniones y Organismos de Consulta, sobre las funciones de su competencia relacionadas con las actividades que se le hayan encomendado.

## 9.7 ANEXO 7: ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Líneas UTO proyectadas para el año 2025 [1].	9
Figura 2: Modos de operación según el grado de automatización [1].	9
Figura 3: Versión inicial del esquema funcional de la línea.	10
Figura 4: Parámetros más significativos de la línea.	13
Figura 5: Perfil longitudinal.	14
Figura 6: Valores de aceleración máxima [10].	15
Figura 7: Peralte teórico.	15
Figura 8: Masa del material móvil [20].	18
Figura 9: Masa adherente.	20
Figura 10: Curvas tracción-adherencia.	22
Figura 11: Resistencias a plena carga y 30 km/h.	23
Figura 12: Prestaciones del material rodante.	24
Figura 13: Velocidades máximas material rodante.	25
Figura 14: Tiempo y distancia para alcanzar una velocidad de 80 km/h.	27
Figura 15: Tiempo y distancia para alcanzar una velocidad de 30 km/h.	27
Figura 16: Prestaciones del material rodante (unidad remolcada).	28
Figura 17: Tiempo y distancia para alcanzar una velocidad de 30 km/h (unidad remolcada).	28
Figura 18: Demanda años 2020 y 2050.	29
Figura 19: Cargas máximas años 2020 y 2050.	31
Figura 20: Adaptabilidad oferta-demanda UTO [9].	31
Figura 21: Aplicación grado ocupación en tiempo real.	32
Figura 22: Alarma aplicación grado ocupación en tiempo real [14].	32
Figura 23: Alarma aplicación grado ocupación en tiempo real [14].	33
Figura 24: Cargas máximas previstas para HPM 2020 (izquierda) y HPM 2050 (derecha).	34
Figura 25: Cálculo nivel de servicio para HPM 2020.	35
Figura 26: Niveles de servicio requeridos y ofertados.	35
Figura 27: Tiempo de recorrido entre estaciones.	37
Figura 28: Niveles de servicio ofertados HPM.	40
Figura 29: Tiempos de parada HPM 2050.	41
Figura 30: Pasajeros subidos-bajados y carga máxima para HPM 2050.	42
Figura 31: Maniobras de inversión de marcha.	43
Figura 32: Tiempos de semi-recorrido por sentido.	43
Figura 33: Comparativa de velocidades en función de la maniobra de inversión.	44
Figura 34: RTT y flota necesaria por año y franja horaria.	45
Figura 35: Producción año 2020.	45
Figura 36: Producción año 2050.	46
Figura 37: Consumo medio energético de tracción [20].	47
Figura 38: Consumo energético de tracción.	47
Figura 39: Consumo energético de auxiliares.	47
Figura 40: Consumo energético total.	48
Figura 41: Estudio capacidad intervalo mínimo de seguimiento.	52
Figura 42: Comparativa capacidad de maniobra en cabecera- niveles de servicio.	53
Figura 43: Tiempo de recorrido FS1-A1 en función de la velocidad máxima.	54
Figura 44: Maniobra de inversión por FS1 (bretelle desplazada 88 m).	55
Figura 45: Maniobra de inversión alternativa por FS1 y FS2. Paso 1 (bretelle desplazada).	56



Figura 46: Maniobra de inversión alternativa por FS1 y FS2. Paso 2 (bretelle desplazada).....	56
Figura 47: Maniobra de inversión alternativa por FS1 y FS2. Paso 3 (bretelle desplazada).....	57
Figura 48: Maniobra de inversión alternativa por FS1 y FS2 (bretelle desplazada).....	57
Figura 49: Capacidad de maniobra en cabecera- niveles de servicio (con bretelle desplazada).....	58
Figura 50: Intensidades máximas de carga HPM 2020.....	60
Figura 51: Intensidades máximas de carga HPM 2050.....	62
Figura 52: Esquema itinerario bucle E5-E21.....	62
Figura 53: Intensidades máximas de carga HPM 2020 sin bucle y con bucle E5 – E21.....	63
Figura 54: Esquema vías de inversión de marcha.....	63
Figura 55: Detalle configuración vía de inversión de marcha.....	64
Figura 56: Intervalo vía de inversión de marcha.....	65
Figura 57: Subidas y bajadas posibles en E-5 por el sentido 1.....	66
Figura 58: Subidas y bajadas posibles en E-21 por el sentido 1.....	67
Figura 59: Recalculo tiempos de parada con bucles.....	68
Figura 60: RTT trenes línea completa (con bucles).....	69
Figura 61: Resultados trenes línea completa (con bucles).....	69
Figura 62: RTT trenes bucle E5-E21.....	70
Figura 63: Resultados trenes bucle E5-E21.....	70
Figura 64: Trenes de bucle coinciden en estación de final de bucle.....	71
Figura 65: Trenes de línea completa coinciden en estación de final de bucle.....	71
Figura 66: Malla horaria con bucle.....	72
Figura 67: Intensidades de carga HPM 2020 sin bucle y con bucle E5 – E21.....	73
Figura 68: Servicio ofrecido en HPM 2020 con bucle E5-E21.....	73
Figura 69: Servicio ofrecido en HPM 2020 sin bucle.....	74
Figura 70: Esquema funcional inicial.....	76
Figura 71: Esquema funcional final.....	76
Figura 72: Estructura organizativa del personal de operación.....	77
Figura 73: Dimensionamiento elementos de venta.....	84
Figura 74: Coeficientes para pasar la hora pico a los 15 y 5 minutos pico [12].....	85
Figura 75: Subidos y bajados en hora punta para 2050.....	86
Figura 76: Dimensionamiento de la batería de torniquetes.....	87
Figura 77: Comparativa capacidad de maniobra en cabecera- niveles de servicio.....	90
Figura 78: Capacidad de maniobra en cabecera- niveles de servicio (con bretelle desplazada).....	91
Figura 79: Grados de automatización según UNE-EN 62290-1 [22].....	94
Figura 80: Número de kilómetros de metro automático [1].....	96
Figura 81: Distribución geográfica de las líneas automáticas (1980 – 1990) [1].....	97
Figura 82: Distribución geográfica de las líneas automáticas (1990 – 2000) [1].....	97
Figura 83: Distribución geográfica de las líneas automáticas (2000 – 2013) [1].....	98
Figura 84: Distribución geográfica de las líneas automáticas prevista para 2025 [1].....	98
Figura 85: Km de metro automático por ciudad existentes en 2011 [1].....	99
Figura 86: Líneas automáticas en operación de mayor longitud existentes en 2011 [1].....	99
Figura 87: Interdependencia sistema de campo y embarcados. Formas de transmisión tierra-tren [1]....	104
Figura 88: Geometría del desvío simple [20].....	107
Figura 89: Geometría de la diagonal simple [20].....	108
Figura 90: Geometría de la diagonal doble [20].....	108
Figura 91: Geometría de la diagonal doble en sacos de maniobra [20].....	109
Figura 92: Ubicación de las estaciones y tipos de andén [20].....	110
Figura 93: Cuadro de gradientes máximos [20].....	110



Figura 94: Valores de resistencia al avance del tren [20].....	111
Figura 95: Resistencia longitudinal debida a la gravedad [6].....	112
Figura 96: Resistencia especifica en el arranque en función de la rampa [6]......	114
Figura 97: Datos del tren [20]. .....	114
Figura 98: Demanda captada HPM 2020. ....	115
Figura 99: Demanda captada HPT 2020. ....	116
Figura 100: Demanda captada HV 2020. ....	117
Figura 101: Demanda captada HPM 2050. ....	118
Figura 102: Demanda captada HPT 2050. ....	119
Figura 103: Demanda captada HV 2050. ....	120
Figura 104: Intensidades de carga (pphps) HPM 2020. ....	121
Figura 105: Intensidades de carga (pphps) HPT 2020. ....	122
Figura 106: Intensidades de carga (pphps) HV 2020. ....	123
Figura 107: Intensidades de carga (pphps) HPM 2050. ....	124
Figura 108: Intensidades de carga (pphps) HPT 2050. ....	125
Figura 109: Intensidades de carga (pphps) HV 2050. ....	126
Figura 110: Velocidades máximas sentido 1 [20].....	127
Figura 111: Velocidades máximas sentido 2 [20].....	127
Figura 112: Recorrido bucle E8 – E21.....	128
Figura 113: Densidades de carga para bucle E8 – E21 .....	128
Figura 114: Recorrido bucle E7 – E21.....	129
Figura 115: Densidades de carga para bucle E7 – E21 .....	129
Figura 116: Geometría de la diagonal doble [20]. ....	131
Figura 117: Geometría de la diagonal doble en sacos de maniobra [20].....	131
Figura 118: Maniobra de inversión de marcha por un andén .....	133
Figura 119: Cálculo de intervalo para maniobra de inversión de marcha por un andén.....	133
Figura 120: Maniobra y cálculo de la maniobra de inversión de marcha por dos andenes. ....	134
Figura 121: Maniobra de inversión de marcha servicio alternativo por dos andenes (vuelta por detrás). 135	
Figura 122: Cálculo de intervalo maniobra servicio alternativo por dos andenes.....	136
Figura 123: Maniobra de inversión de marcha servicio alternativo con andén central. ....	137
Figura 124: Cálculo intervalo maniobra servicio alternativo con andén central.....	138
Figura 125: Comparativa capacidad de maniobra en cabecera- niveles de servicio .....	138
Figura 126: Capacidad de maniobra en cabecera- niveles de servicio (con bretelle desplazada). ....	139
Figura 127: Producción año 2020 con bucle E5 – E21 .....	140
Figura 128: Producción año 2050 con bucle E5 – E21 .....	140
Figura 129: Ahorro de trenes*km obtenido por el bucle en los años 2020 y 2050 .....	141
Figura 130: Ahorro estimado de coches*km con bucle E5 – E21 .....	142



## 9.8 ANEXO 8: ABREVIATURAS Y TERMINOLOGÍA

**ATC:** Automatic Train Control.

**ATO:** Automatic Train Operation.

**A TP:** Automatic Train Protection.

**ATS:** Automatic Train Supervision.

**Depósito:** Recinto provisto de las vías e instalaciones necesarias donde se encierran los trenes para su estancia, revisión, reparación o limpieza.

**GoA:** Grado de operación automática.

**HPM:** Hora Punta de la Mañana.

**HPT:** Hora Punta de la Tarde.

**HV:** Hora Valle.

**PCC:** Puesto de Control Central.

**Pendiente:** Plano inclinado de la vía en sentido descendente.

**PSD:** Platform Screen Doors; puertas de andén.

**Piñón:** Es el punto donde finaliza el andén y comienza la interestación.

**PMR:** Paso adecuado específicamente para personas de movilidad reducida.

**Pphps:** Pasajeros por hora por sentido.

**Rampa:** Plano inclinado de la vía en sentido ascendente.

**RTT:** Round Trip Time; tiempo de vuelta redondo.

**Saco de maniobras:** En las estaciones finales de línea, es el lugar comprendido entre el piñón extremo y el final de la línea, donde se pueden realizar la inversión de marcha y el estacionamiento de los trenes.

**UTO:** Unattended Train Operation. Se denomina así a las líneas en las que la operación del tren se realiza sin personal a bordo (GoA4).



## **10 REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA**

- [1] UITP; Observatory of Automated Metros; Fuente:  
<http://metroautomation.org/publications/>
- [2] Pachl, Joern. “Railway Operation and Control” 3rd edition, VTD Rail Publishing, año 2014. (ISBN: 978-0-9719915-8-3).
- [3] Hansen, I. A. and Pachl, J. “Railway Timetabling & Operations. Analysis - Modelling - Optimisation - Simulation - Performance Evaluation”. 2nd edition. año 2014, (ISBN: 978-3777104621).
- [4] Vukan R. Vuchic. “Urban Transit: Operations, Planning and Economics” 1st Edition (ISBN: 978-0471632658).
- [5] Vukan R. Vuchic. “Urban Transit: Systems and Technology” 1st Edition (ISBN: 978-0471758235).
- [6] García Álvarez, Alberto. “Dinámica de los trenes en alta velocidad” Año 2015. (ISBN: 978-84-89649-62-0).
- [7] García Álvarez, Alberto. “Energía y emisiones en el transporte por ferrocarril” Año 2016.
- [8] Melis Maynar, Manuel y González Fernández, Francisco Javier. “Ferrocarriles Metropolitanos. Tranvías, Metros Ligeros Y Metros Convencionales”. Colegio de ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Año 2004. (ISBN: 8438002870).
- [9] González Fernández, Francisco Javier. “Señalización ferroviaria. Del guardagujas a la operación sin conductor”. Año 2009. (ISBN: 978-84-612-9599-9).
- [10] López Pita, Andrés. “Infraestructuras ferroviarias” Ediciones UPC. Año 2006. (ISBN: 9788483018538).
- [11] Transportation Research Board of the National Academies “Transit Capacity and Quality of Service Manual, 2nd Edition”
- [12] London Underground “Station planning standards and guidelines, 2012 edition”
- [13] National Fire Protection Association “NFPA 130: Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems”
- [14] Metro de Madrid; “Manual de operador aplicación ICARO”.



[15] Metro de Santiago de Chile; “Informe Anual 2015”. Fuente:

<https://www.metroantiago.cl/corporativo/memoria>

[16] Metro de Madrid; “Plan de ahorro energético de Metro de Madrid”. Fuente:

[https://www.metromadrid.es/export/sites/metro/comun/Portal\\_de\\_transparencia/Documents/Informacion\\_institucional/PlanAhorroEnergetico\\_x2x.pdf](https://www.metromadrid.es/export/sites/metro/comun/Portal_de_transparencia/Documents/Informacion_institucional/PlanAhorroEnergetico_x2x.pdf)

[17] Domínguez M; Fernández, A; Cucala, P; Lukaszewicz, P; “Optimal design of metro automatic train operation speed profiles for reducing energy consumption”

[18] Universidad Pontificia de Comillas ICAI; Apuntes del Master Universitario en Sistemas Ferroviarios.

[19] Contrato de concesión Línea 2 Metro de Lima; Fuente:

<https://www.ositran.gob.pe/ferrocarriles/tren-electrico-linea-2.html#contratos>

[20] Propuesta técnica Línea 2 Metro de Lima; Fuente:

<http://www.proyectosapp.pe/modulos/JER/PlantillaProyecto.aspx?ARE=0&PFL=2&JER=5695>

[21] Fundación de ferrocarriles españoles; “Diseño para modelos de eficiencia energética en líneas metropolitanas” Fuente:

[http://www.investigacionffe.es/documentos/elecrail/M9ElecRail\\_Dise%C3%B1o\\_1%C3%ADneas\\_metropolitanas.pdf](http://www.investigacionffe.es/documentos/elecrail/M9ElecRail_Dise%C3%B1o_1%C3%ADneas_metropolitanas.pdf)

[22] Norma UNE IEC 62290-1:2014; Aplicaciones ferroviarias. Gestión del transporte guiado urbano y sistemas de mando/control. Parte 1: Principios del sistema y conceptos fundamentales.

[23] UITP; Subcomité de operaciones; “Gestión del tiempo de parada en estaciones”; mayo 2006.

[24] UIC; International Union of Railways; “Leaflet 406”; junio 2013.