



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Automatización del Metro de Sevilla

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales—Grau en
Enginyeria en Technologies Industrials

AUTOR: Díaz Feter, Javier

Tutores: Vallés Miquel, Marina; Rodríguez Rubio, Francisco

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

Proyecto Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Automatización del Metro de Sevilla

Autor: Javier Díaz Feter

Tutor: Francisco Rodríguez Rubio

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Automatización del Metro de Sevilla

Autor:

Javier Díaz Feter

Tutor:

Francisco Rodríguez Rubio

Catedrático de Universidad

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Autor: Javier Díaz Feter

Tutor: Francisco Rodríguez Rubio

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

1 AGRADECIMIENTOS

A quienes me han ayudado en la elaboración del trabajo,
a mi tutor y a Manuel y Enrique, de Sevilla Quiere Metro.

Pero sobre todo, a quienes me han empujado hasta aquí,
a DAETSII, a mis amigos, a mi hermano, a Cris, a Luka y, primordialmente,
a mis padres, por acompañarme con paciencia y amor en todo el camino.

Resumen

Con el presente Trabajo Final de Grado se pretende realizar un estudio sobre los beneficios de la automatización del Metro de Sevilla. La red de Metro de la ciudad tiene un gran potencial de mejora y, con una inversión adecuada, Sevilla se situaría a la altura del resto de España y de Europa en cuanto a movilidad sostenible se refiere. En este documento se llevará a cabo un análisis sobre los pros y los contras de la automatización del metro de la ciudad, su viabilidad técnica y sobre la componente económica, con un presupuesto de inversión y costes operativos.

Abstract

This Project aims to conduct a study on the benefits of automating the Metro of Sevilla. The city's metro network has significant potential for improvement, and with the right investment, Sevilla could match the sustainable mobility standards of the rest of Spain and Europe. This document will analyze the pros and cons of automating the city's metro, its technical feasibility, and the economic aspect, including an investment budget and operational costs.

1	Agradecimientos	7
	Resumen	10
	Abstract	12
	Índice	13
2	Presentación, introducción y contexto del actual Metro de Sevilla	17
2.1	<i>Introducción</i>	17
2.1.1	Historia del Metro de Sevilla. Construcción e inicios	17
2.2	<i>Situación actual del Metro y futuras soluciones</i>	21
2.3	<i>Objetivos y alcance del proyecto.</i>	22
2.3.1	Exponer la necesidad de invertir en el metro y de construir nuevas líneas.	22
2.3.2	Exponer la conveniencia de la automatización de las nuevas líneas de metro	22
2.3.3	Cálculo económico	23
2.3.4	Mejora del servicio	23
2.3.5	Alineación con la política europea y legislación española	23
2.3.6	Proyecto de automatización del Metro de Sevilla	23
3	Necesidad de la automatización y beneficios para la red de Metro de Sevilla.	24
3.1	<i>¿En qué consiste la automatización del metro?</i>	24
3.2	<i>Antecedentes de la automatización del metro</i>	25
3.2.1	El sistema VAL	25
3.2.2	El Sistema AET	27
3.2.3	AnsaldoBreda	28
3.2.4	El sistema ATO	29
3.3	<i>Líneas mixtas. Combinación de trenes operados automática y convencionalmente.</i>	31
3.4	<i>Ventajas de la automatización</i>	31
3.4.1	Movilidad	32
3.4.2	Humanidad	32
3.4.3	Seguridad	33
3.4.4	Accesibilidad económica	33
3.4.5	Reducción de emisiones contaminantes	34
3.5	<i>Aplicación de la inteligencia artificial al metro</i>	35
4	Análisis previo del software utilizado.	36
4.1	<i>Software en uso</i>	36
4.2	<i>Software CoDeSys</i>	36
5	Automatización del Metro de Sevilla.	38
5.1	<i>Componentes para la automatización del metro</i>	38
5.1.1	Control y gestión	38
5.1.2	Sistemas de señalización	41
5.1.3	Comunicaciones	41
5.1.4	Sensores y actuadores	42

5.1.5	Seguridad	43
5.1.6	Integración de sistemas	43
5.2	<i>Criterios de diseño de la red de metro</i>	45
5.2.1	Categorización de curvas	45
5.3	<i>Diseño del automatismo</i>	51
5.3.1	Dinámica del viaje	51
5.3.2	Apertura de puertas	53
5.3.3	Control de movimientos y aglomeraciones	53
5.3.4	Modos de funcionamiento. Oferta manual	53
5.3.5	Salida de nuevos trenes	54
5.3.6	Situaciones de emergencia	54
6	Presupuesto de la automatización	57
6.1	<i>Inversión de capital</i>	57
6.1.1	Línea 1. Ciudad Expo – Olivar de Quinto	57
6.1.2	Línea 2 Torreblanca – Torre Triana	59
6.1.3	Línea 3. Pino Montano – Los Bermejales	62
6.1.4	Línea 4. Circular	65
6.1.5	Inversión en los trenes.	68
6.1.6	Inversión en formación	68
6.1.7	Resumen de inversión de capital	68
6.2	<i>Costes Operativos</i>	69
6.2.1	Ahorro en costes operativos	69
7	Conclusiones	70
8	Referencias	71

2 PRESENTACIÓN, INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO DEL ACTUAL METRO DE SEVILLA

2.1 Introducción

La historia del metro de Sevilla es un relato fascinante que se remonta a finales del siglo XX, marcando un hito en el desarrollo urbanístico y el transporte público de la ciudad. La necesidad de abordar los retos del crecimiento poblacional y la congestión del tráfico en una urbe en constante expansión llevó a la planificación y construcción de este sistema de transporte subterráneo.

Inaugurado el 2 de abril de 2009, el Metro de Sevilla se convirtió en una respuesta efectiva a los desafíos de movilidad en una de las principales ciudades de España. Su construcción y desarrollo implicaron la colaboración de diversos sectores, desde ingenieros y urbanistas hasta autoridades gubernamentales y la participación activa de la comunidad.

El Metro de Sevilla se erige como un símbolo de modernidad y eficiencia en el transporte público, brindando a los ciudadanos una alternativa rápida, segura y sostenible para desplazarse por la ciudad y sus alrededores. A lo largo de los años, ha evolucionado (y se pretende que lo siga haciendo) en respuesta a las necesidades cambiantes de la sociedad y ha contribuido significativamente a la configuración del paisaje urbano y la conectividad regional.

En esta introducción, exploraremos la evolución del metro de Sevilla desde sus primeros planes hasta la actualidad, con notables mejoras en la movilidad urbana, destacando los logros, desafíos y contribuciones que ha aportado a la vida diaria de los sevillanos.

2.1.1 Historia del Metro de Sevilla. Construcción e inicios

La planificación para la creación del Metro de Sevilla se remonta a las décadas de 1970 y 1980. Aunque las primeras ideas sobre un sistema de metro en la ciudad surgieron en la década de 1960, fue en los años posteriores cuando se realizaron estudios y propuestas más concretas para abordar los problemas de movilidad en la creciente metrópolis.

En 1973 se planteó un proyecto inicial para un sistema de metro en Sevilla, pero este no llegó a concretarse. Sin embargo, a lo largo de los años, la congestión del tráfico y la expansión urbana continuaron siendo desafíos significativos, lo que llevó a retomar la idea del metro como una solución viable.



Figura 1. Tráfico por la avenida Luis Montoto a la altura del colegio de la Borbolla.

Finalmente, en la década de 1990, se retomaron los esfuerzos para materializar el proyecto del metro. El 2 de mayo de 1999, se colocó la primera piedra del Metro de Sevilla, marcando el inicio oficial de la construcción. A partir de ese momento, se llevaron a cabo los trabajos de ingeniería, construcción de túneles y estaciones, y la instalación de la infraestructura necesaria para hacer realidad el sistema de transporte subterráneo.

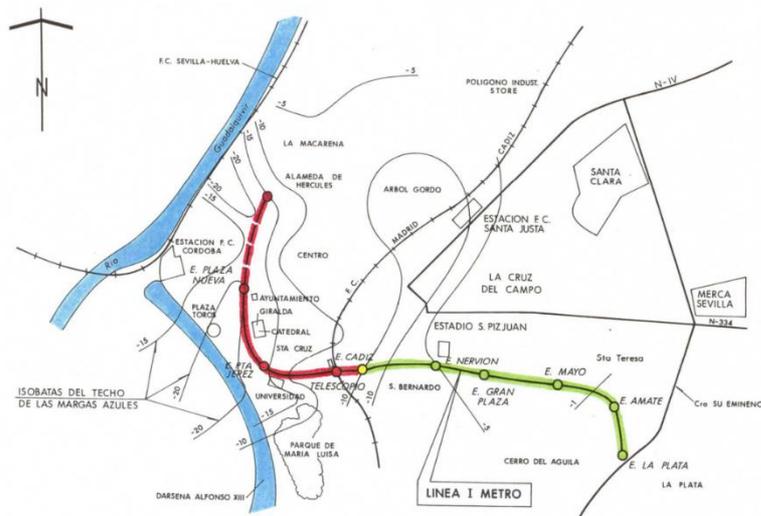


Figura 2. Sector proyectado de La Plata – Alameda de la línea 1

Perfiles longitudinales:

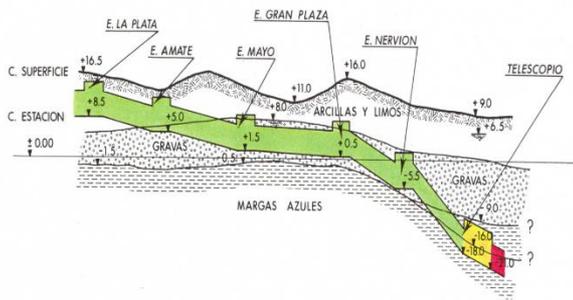


Figura 3. La Plata – Telescopio

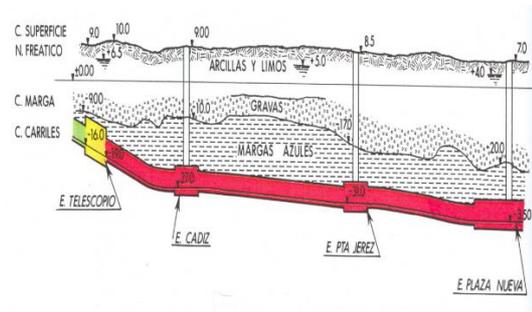


Figura 4. Telescopio – Plaza Nueva

La construcción del metro no estuvo exenta de incidentes durante su ejecución. Mientras que los tramos de La Plata – Telescopio no tuvieron incidentes graves, las tres estaciones profundas Plaza Nueva, Puerta de Jerez y San Bernardo tuvieron numerosos problemas para ser terminadas. Se produjeron algunas filtraciones a través de juntas defectuosas en los pozos de acceso en Plaza Nueva y Puerta Jerez, que en el caso de esta segunda provocaron daños a la Casa de los Guardiola y al edificio de la Equitativa el cual, tras su reparación, se convirtió en el edificio más sólido de Sevilla. La construcción de la estación de San Bernardo provocó numerosas grietas en la estación de RENFE.

Estos daños, sumados a la desconfianza inicial de la ciudadanía del proyecto del Metro, desencadenaron en una campaña de prensa en contra de la construcción del metro de Sevilla. El 4 de marzo de 1983 se solicitó la suspensión de las obras mientras se valoraban los riesgos que podía suponer continuar con la construcción, suspensión que duró prácticamente 20 años.



Figura 5. Campaña de prensa cuestionando la construcción del Metro de Sevilla.

El dinero prometido para la construcción del metro de Sevilla se desvió hacia otros fines, y no se tomaron medidas hasta 1994, cuando la Junta de Andalucía encargó un estudio para el Plan Intermodal de Transporte del Área Metropolitana de Sevilla. Las conclusiones de este estudio parecían intentar descartar el metro a toda costa. En febrero de 1995, se cuestionó la construcción de la línea 1, aunque desde el punto de vista técnico no había obstáculos significativos. Se mencionó que la línea podría tener beneficios limitados en comparación con otros medios de transporte. Sin embargo, adelantándonos un poco al futuro, sabemos que la línea 1 del Metro de Sevilla actualmente supera los 50000 viajeros por día.

Una vez paralizadas las obras se cuestionó el modelo de metro anterior, con enfoque en la profundidad de las estaciones, la necesidad de enlazar Sevilla con su área metropolitana y se pensó, incluso, de acuerdo con los diversos informes del Plan Intermodal, si sería necesaria la finalización del metro y su rentabilidad. Se empezó entonces a hablar de metro ligero.

En el año 2002 comenzaron de nuevo las obras. El Metro de Sevilla fue inaugurado el 2 de abril de 2009, después de una serie de años de planificación y construcción, convirtiéndose en una parte integral del sistema de transporte público de la ciudad. Durante los primeros 7 meses de puesta en marcha, el metro consiguió mover a 5 millones de viajeros.



Figura 6. Chaves accede al Metro de Sevilla en su inauguración

Consiguió conectar el centro de la ciudad con zonas periféricas. Tras su éxito, se planificaron expansiones, como la extensión hacia Montequinto en 2011, y se idearon nuevas líneas y más extensiones para mejorar la cobertura. Desde entonces, el sistema ha continuado desarrollándose con ampliaciones de la red y mejoras en la infraestructura y servicios, desempeñando un papel clave en la movilidad urbana y la reducción de la congestión vehicular.

Los medios de comunicación no tardaron en hacer eco del enorme cambio que supuso la implantación de la primera línea de Metro en la ciudad. Y es que, en apenas 4 años desde su inauguración, los datos de la Consejería de Fomento de la Junta de Andalucía apuntan a una reducción de 22700 toneladas de dióxido de carbono relacionadas directamente con el uso del metro en sustitución del vehículo privado. El 41% de los usuarios del Metro a fecha de septiembre de 2013 aseguran haber aparcado el coche para utilizar este nuevo medio de transporte. Esto supone que, de los 59,5 millones de viajeros transportados desde abril de 2009, 24,3 millones han aparcado el coche y apostado por el metro.

El Metro, además de eliminar coches de la circulación, también ha implementado algunas medidas para una racionalización del consumo energético, como son el sistema de freno regenerativo de los trenes de la Línea 1, que reintegran en la red parte de la energía para su reutilización, y la utilización de paneles de energía fotovoltaica en las cubiertas de talleres y cocheras, que convierten la energía solar en electricidad y ésta es revertida a la red general de distribución. En definitiva, con la incorporación de la línea 1 se consiguió no solo la mejora en cuanto a movilidad, sino también la reducción de emisiones.

2.2 Situación actual del Metro y futuras soluciones

Para entender la situación actual del Metro hay que comprender primero el panorama de la movilidad metropolitana del área de Sevilla. Nos encontramos en un punto en el que el vehículo privado es notablemente mayoritario en cuanto al transporte mecanizado se refiere, canalizando en torno al 70% de los desplazamientos. El transporte público cumple un papel subordinado por estar basado en el autobús, gestionado por TUSSAM. Este modelo de movilidad es insostenible ambientalmente por el ruido y la contaminación, y a esto se le suma que, debido a la incapacidad de la ciudad de absorber tanto vehículo privado, se permite sistemáticamente el aparcamiento en zonas no habilitadas para ello, lo que supone una invasión del viario que ve mermada su capacidad, y las calles se convierten en ocasiones en depósitos de coches.

Sin tener resuelto el problema del transporte se están creando nuevos centros residenciales e implantando nuevos centros comerciales totalmente dependientes del coche privado. Parece evidente que la ampliación de la red de Metro y la inversión en transporte público es más que necesaria, con la que se conseguirá reducir las emisiones (el transporte público emite 150 veces menos de dióxido de carbono por viajero que el privado y ocupa 100 veces menos espacio).

En 2024, una única línea de metro resulta escasa para una metrópolis con más de un millón y medio de habitantes. La dominancia del autobús y del vehículo privado provoca una dependencia directa de todo lo que ocurra en la superficie como partidos de fútbol, festividades de Semana Santa, la Feria de Abril, maratones, etc. La única alternativa eficaz para solucionar el problema de la movilidad es el metro con sus cuatro líneas proyectadas.

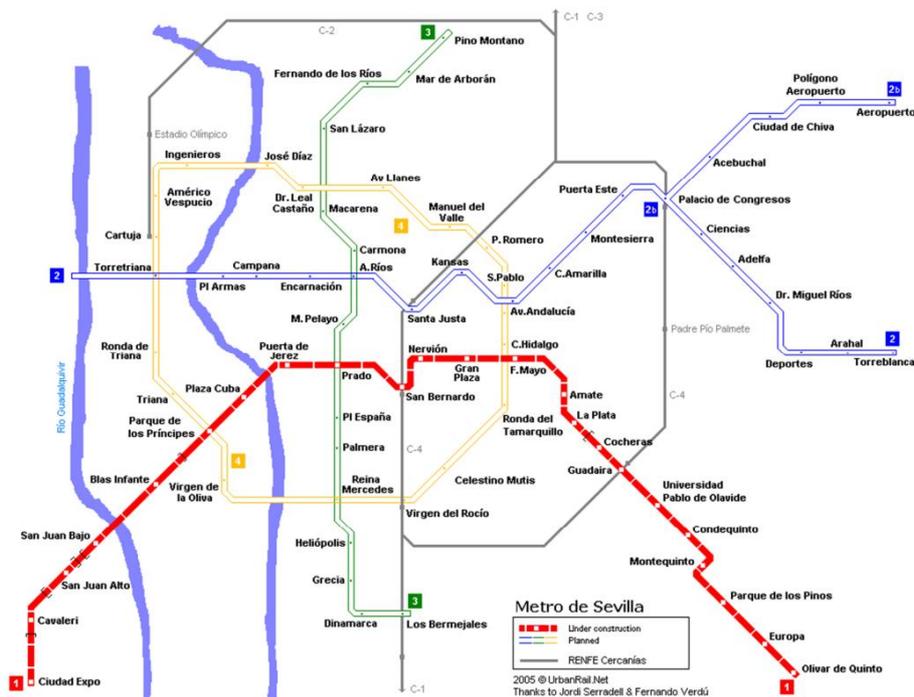


Figura 7. El Metro de Sevilla con las 4 líneas proyectadas (2005).

2.3 Objetivos y alcance del proyecto.

2.3.1 Exponer la necesidad de invertir en el metro y de construir nuevas líneas.

Por todo lo ya mencionado a lo largo de este primer capítulo, es incuestionable la necesidad de aumentar las inversiones en transporte público y más concretamente en el Metro de Sevilla.

2.3.2 Exponer la conveniencia de la automatización de las nuevas líneas de metro

Existen innumerables ventajas de las líneas de metro automatizadas respecto a las convencionales. Las dimensiones que los gobiernos deben tener en cuenta en el diseño de nuevas formas de transporte público son:

1. Movilidad: el sistema de transporte debe abordar eficientemente las necesidades de movilidad actuales y futuras.
2. Seguridad: otorgando al ciudadano la garantía de que la movilidad es segura.
3. Accesibilidad: una red de metro debe ser eficiente para permitir un gasto económico también eficiente a los usuarios.
4. Ecológica: alineada con las políticas europeas, minimizando la huella de carbono de sus trayectos
5. Humanitaria: poniendo al ciudadano en el centro del diseño y motivando un buen clima de trabajo.

En todos estos puntos, que serán desarrollados en profundidad durante el trabajo, la automatización del metro podría jugar un papel fundamental. Aumentaría la oferta de metros disponibles, aseguraría la seguridad de sus trayectos, reduciría costes de operación, se reducirían las emisiones por la optimización del gasto de energía y la experiencia de usuario mejoraría.

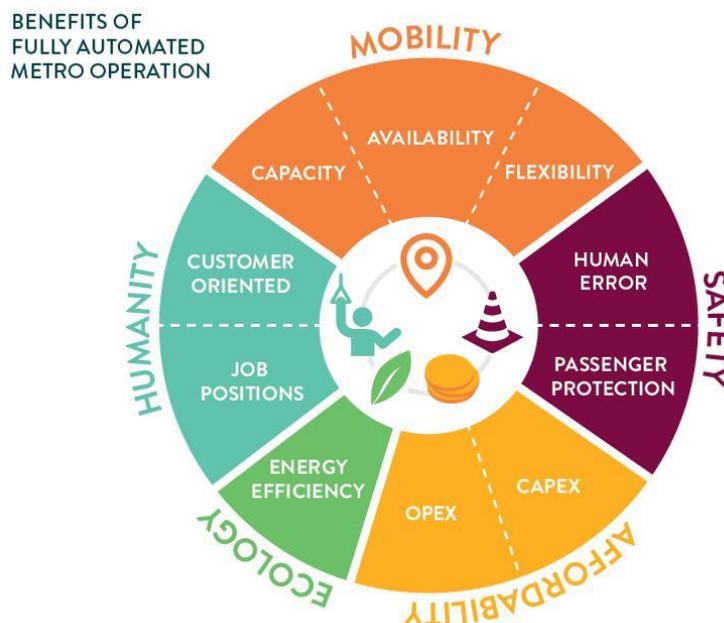


Figura 8. Beneficios del metro automático de acuerdo con la UITP

2.3.3 Cálculo económico

Se analizarán los gastos de capital y operativos de la red de metro automática versus la red convencional.

2.3.4 Mejora del servicio

Uno de los puntos que más importa a la ciudadanía es el cómo afectará la automatización del metro en su vida. Podemos utilizar de ejemplo las redes automáticas ya existentes en el mundo (que no son pocas) para ver el impacto que ha tenido la implantación del metro automático en las ciudades que ya cuentan con él.

2.3.5 Alineación con la política europea y legislación española

El proyecto de automatización del metro está alineado con números Objetivos de Desarrollo Sostenible planteados por la Unión Europea y, por tanto, esta debería de tener interés por incentivar estos proyectos.

La Ley 37/1975, de 31 de octubre, sobre la construcción y explotación del Metro de Sevilla, establece un marco regulador favorable para la automatización de las líneas de metro en la ciudad hispalense. Esta ley no solo aprueba la planificación y construcción del metro como una infraestructura de utilidad pública, sino que también hace al Estado responsable de la construcción de la infraestructura, eliminando carga financiera sobre el Ayuntamiento de Sevilla y la Junta de Andalucía.

La financiación estatal para la infraestructura, incluyendo túneles, estaciones, cocheras, y sistemas de ventilación e iluminación, permite que el Ayuntamiento se enfoque en la adquisición de material móvil y sistemas de señalización y comunicaciones. Además, la ley faculta al Ayuntamiento para gestionar directamente el servicio, lo que facilita la implementación de nuevas tecnologías como la automatización sin los trámites complejos asociados a la concesión de servicios.

La ley también crea una Comisión Técnica Asesora para coordinar la ejecución del plan y asegurar su cumplimiento, permitiendo adaptaciones técnicas y garantizando una supervisión continua para mantener la idoneidad del servicio. Estas disposiciones proporcionan una base sólida para considerar la automatización del metro, ya que aseguran una financiación robusta, reducen los costos y complejidades administrativas, y establecen un marco regulador flexible y supervisado que puede adaptarse a las innovaciones tecnológicas necesarias para mejorar la eficiencia y seguridad del servicio de metro en Sevilla

2.3.6 Proyecto de automatización del Metro de Sevilla

Poniendo en práctica todo lo aprendido sobre automática en el grado, este trabajo contará con un presupuesto de la automatización de las 4 líneas del Metro de Sevilla y una simple demostración de la viabilidad técnica del automatismo.

3 NECESIDAD DE LA AUTOMATIZACIÓN Y BENEFICIOS PARA LA RED DE METRO DE SEVILLA.

3.1 ¿En qué consiste la automatización del metro?

El metro automático se caracteriza por su sistema de conducción automática que permite la circulación de trenes sin requerir de personal a bordo. El control de los trenes se realiza desde el centro de control, que supervisa y programa la velocidad, paradas y analiza miles de parámetros de acuerdo con un programa predefinido, ajustándolo según la demanda. Esta tecnología avanzada permite el control remoto de la red, añadiendo más trenes y aumentando o reduciendo la frecuencia según sea necesario.

Aunque no cuentan con maquinistas a bordo, los metros automáticos pueden tener supervisión humana constante desde el centro de control, donde personal especializado en seguridad, protección civil e información monitorea los trenes y se comunica con los pasajeros a través de megafonía, además de realizar tareas de asistencia en remoto. Esta combinación de tecnología avanzada y supervisión humana garantiza la seguridad y eficiencia del servicio de metro automatizado.



Figura 9. Ventana frontal de un metro sin conductor (Barcelona).

3.2 Antecedentes de la automatización del metro

3.2.1 El sistema VAL

El primer ejemplo de metro automatizado de la historia es el del Metro de Lille. Nos remontamos a 1983 cuando se construyó la primera línea VAL (Vehículo Automático Ligero). Construido por la empresa francesa Matra Transport, este sistema ha conocido aplicaciones muy diferentes como el metro automático ligero (Lille, Francia), el metro automático de gran capacidad (Taipei, Taiwan), el servicio a un centro de ciudad (Jacksonville, USA), servicio interno de un aeropuerto en Chicago, USA y otras muchas variantes.

El éxito de este sistema se debe en parte al saber conservar los elementos del sistema clásico que eran compatibles con la automatización, como por ejemplo la rodadura sobre neumáticos. Algunas de sus características son:

- Permite una fuerte motorización de unos 20kW/tonelada con una buena velocidad comercial que permite al vehículo subir pendientes con escaso ruido y vibraciones.
- El dispositivo anticolidión del sistema VAL se basa en un sistema de conducción automática programado en lógica y un dispositivo de seguridad descentralizado de tipo "seguridad positiva". En condiciones normales, el dispositivo de seguridad no interviene en la operación de los trenes. La seguridad anticolidión se basa en el principio de cantones fijos, la detección de ocupación de los cantones y una detección negativa que utiliza la ausencia de señal para determinar la presencia de un tren.
- La capacidad de realizar nuevas funciones, como el empuje de una rama averiada por otra, lo que aumenta la disponibilidad del sistema y garantiza una operación más fluida.
- La protección de los andenes mediante puertas transparentes, sincronizadas con las puertas de los trenes, para prevenir accidentes como la caída de pasajeros a las vías o el arrastre de pasajeros al inicio del movimiento del tren.
- Además, se ha prestado especial atención a la experiencia del usuario en todos los proyectos VAL, cuidando tanto la parte técnica como la funcionalidad. Se han considerado aspectos arquitectónicos en el diseño de las estaciones, desde la minimización de las correspondencias hasta la inclusión de obras de arte en cada estación para mejorar el ambiente y la estética del sistema.

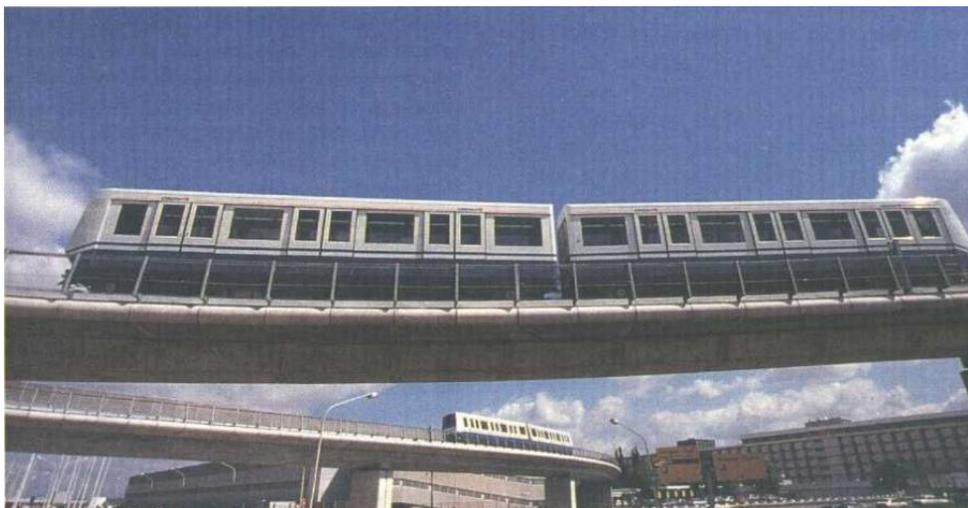


Figura 10. Vehículo Automático Ligero

La implementación del metro VAL provocó una reestructuración de toda la red de transporte, unificando los tres modos existentes bajo una misma compañía de explotación y sistema tarifario. El efecto red se evidenció con un notable aumento de la clientela del transporte público tras la puesta en marcha de la línea VAL.

La línea 1 del VAL, operativa durante veinte horas al día, con intervalos de 1,12 minutos en hora punta y una velocidad comercial de 34 km/h, registró una alta demanda, con 120.000 viajes diarios y más de 30 millones de pasajeros al año desde su inauguración. Además, ha transportado con completa seguridad a más de 200 millones de pasajeros, con una productividad notablemente superior a la media.

Los éxitos obtenidos llevaron a la apertura de una segunda línea en 1989, con planes para una tercera línea en el futuro. Integrado en el plan de ordenación territorial de Lille, el metro VAL ha pasado de ser un sistema moderno de transporte a convertirse en un instrumento clave en la reordenación urbana de la ciudad.

3.2.1.1 Sucesores del sistema VAL de Lille

Después del éxito del sistema de metro lilés, no tardaron en ejecutarse nuevos proyectos en materia de automatización de transporte público. AEG-WESTINGHOUSE realizó numerosas obras de transporte ligero, especialmente en aeropuertos americanos. En 1986 la empresa se encargó de la línea de Miami de 3.2km y 9 estaciones. En 1989 se automatizó la red de metro de Las Colinas. Estos sistemas basaban su funcionamiento en ruedas horizontales que se apoyaban sobre una viga metálica situada por debajo del plano de rodadura. Captaban la corriente en 600 voltios trifásica mediante tres hilos de fase y otro de tierra, dos de los cuales eran utilizados para enviar la frecuencia que sirve de control al puesto de mando. La velocidad de crucero era de 43km/h y la aceleración de 1.1m/s².

Jacksonville, con 850,000 habitantes, enfrentó el deterioro de su centro urbano desde los años cincuenta debido al aumento del uso del automóvil. En 1975, se lanzó un programa para revitalizar el centro con un sistema de transporte eficiente. En 1986, se inauguró el primer tramo del VAL, contribuyendo al renacimiento del centro con nuevas operaciones inmobiliarias y la construcción de un centro de congresos.

Toulouse, con 600,000 habitantes, decidió construir un sistema de transporte subterráneo en 1984 para abordar la saturación del tráfico. Se eligió el sistema VAL en 1985 por su menor costo de operación. Se planea una red de tres líneas y veinte kilómetros en total, con la primera línea programada para 1993. Esta decisión marcó un hito en la modernización urbana de la región.

El aeropuerto de Chicago, el más transitado del mundo, con 56.7 millones de pasajeros en 1988, enfrentaba congestión en su transporte interno. En 1986, se decidió construir una línea de transporte interno, con el primer tramo en desarrollo. Este proyecto busca reducir la congestión, facilitar la transferencia entre terminales y promover actividades inmobiliarias cercanas al aeropuerto.

París-Orly, uno de los aeropuertos más importantes de Europa, con 24 millones de pasajeros en 1989, requería un enlace rápido con la ciudad. En 1987, se eligió el proyecto ORLYVAL para conectar las terminales del aeropuerto con la estación de RER de Antony, con una inauguración prevista para septiembre de 1991. Esta línea, totalmente automatizada, proporcionará un rápido acceso entre el aeropuerto y París.

Taipei, capital de Taiwán, con una población proyectada de 6 millones para el año 2000, lanzó un plan de renovación de transporte público en 1987. Este plan incluyó la construcción de una red de metro, con la primera línea de 11.5 km y 13 estaciones programada para entrar en servicio en 1992.

3.2.2 El Sistema AET

El SAET (Sistema de Automatización de Explotación de Trenes) es un sistema de automatización total de trenes utilizado por la RATP para la operación de algunas líneas del metro de París. Se desarrolló a mediados de los años 90 como parte de la creación de la línea 14 por la entonces filial conjunta de Matra y Siemens. El software SAET era uno de los mayores programas de seguridad jamás creados en el sector ferroviario.



Figura 11. Metro automatizado de la línea 14 de París.

Este sistema presenta varias características distintivas y capacidades que lo diferencian de otros sistemas similares, como el vehículo automático ligero (VAL). Una de las principales características del SAET es su capacidad para adaptar el nivel de servicio a la demanda en tiempo real. Esto significa que puede responder rápidamente a aumentos repentinos en el número de pasajeros, incluso fuera del horario programado, mediante la puesta en servicio de trenes adicionales. Esto se logra gracias a un intervalo teórico de 75 segundos entre dos lanzaderas, lo que permite una mayor flexibilidad en la gestión del tráfico.

Otra particularidad del SAET es la posibilidad de operar en un entorno de "tráfico mixto" y la "no polarización de los trenes". Esto significa que los trenes pueden circular de manera independiente y comunicarse entre sí, lo que permite la coexistencia de trenes con conducción totalmente automática y aquellos con conducción manual o semiautomática en la misma línea. Esta capacidad ha sido utilizada en la automatización de líneas del metro de París, como la línea 1 y la línea 4, durante períodos de transición entre diferentes modelos de trenes.

El SAET también facilita el estacionamiento de trenes en las estaciones durante las paradas de servicio, lo que permite un inicio simultáneo de operaciones en todas las estaciones de una línea. Sin embargo, esto puede requerir el movimiento de trenes estacionados durante servicios especiales nocturnos.

Además, el SAET gestiona controles remotos seguros y puede operar en modo de funcionamiento degradado después de un incidente, imponiendo límites temporales de velocidad o gestionando riesgos ferroviarios clásicos como los adelantamientos.

Cuenta con varios subsistemas interconectados mediante una red de fibra óptica de larga distancia, con velocidades de hasta 10 megabits por segundo. Estos subsistemas incluyen:

- Equipos centralizados en la línea PCC o PAL, encargados de enviar comandos de seguridad, gestionar la lógica de tracción digital y registrar la posición de los trenes.
- Equipo PAS centralizado (para líneas 1 y 4) y descentralizado en estación (para línea 14), que gestiona controles relacionados con el espaciado entre trenes y la comunicación con las balizas en tierra. También controla equipos de señalización, tracción y andenes.

- Balizas de reubicación en la vía, alimentadas remotamente desde las lanzaderas, recalibrando la distancia recorrida por los trenes para asegurar una parada precisa en las estaciones.
- Unidades de piloto automático a bordo instaladas en los trenes, que se comunican continuamente con los elementos pasivos a través de ondas de radio, garantizando un diálogo efectivo entre el sistema y los trenes.

Esta comunicación se realiza mediante diferentes frecuencias de transmisión, con velocidades específicas para cada dirección de comunicación entre los PAS y los trenes, lo que garantiza una interacción eficiente y segura entre el sistema de automatización y los trenes en funcionamiento.

3.2.3 AnsaldoBreda

El metro automático AnsaldoBreda es un tipo de metro sin conductor y su correspondiente sistema de señalización creados por la empresa italiana AnsaldoBreda. El material rodante utilizado en el sistema de metro descrito consta de coches estándar articulados, con composiciones que pueden variar de 3 a 6 coches, alcanzando longitudes de trenes de 39 a 109 metros. Los trenes tienen 2.65 metros de ancho, excepto los del metro de Roma, que tienen 2.85 metros.

Los trenes están equipados con motores trifásicos asíncronos, con potencias entre 105 y 128 kW por motor, sumando una potencia total de 630 a 764 kW por tren. La velocidad máxima alcanza los 80 o 90 km/h, con una capacidad de aceleración o deceleración de 1.3 m/s².

El sistema de control del tren es completamente automatizado y se encuentra localizado en el centro de mantenimiento. Este sistema incluye el ATP (protección automática del tren), el ATO (operación automática del tren) y el ATS (supervisión automática del tren). El ATO se encarga de conducir el tren según un horario programado, deteniéndose en las estaciones y operando las puertas. El ATS monitoriza todos los componentes de la red y muestra un esquema en vivo de la situación de la red en el centro de control.

Este sistema está siendo utilizado en numerosos países tales como Italia (Milán, Nápoles, Sassari, Sardinia, Florencia, Roma, Brescia), Suecia (Gotemburgo), Turquía (Samsun), Grecia (Atenas, Tesalónica), Hungría, Dinamarca (Copenhague), China (Taipei), España (Madrid)...



Figura 12. Metro de la Serie 9000 de AnsaldoBreda para Madrid

Desde su puesta en marcha, este tipo de tren ha ido ganando mala fama entre los usuarios y los compradores. En Madrid existe un movimiento a favor de la retirada de estos trenes utilizados en el metro, apelando que “la Serie 7000 y 9000 del Metro de Madrid ha experimentado numerosos problemas técnicos desde su introducción. Estos incluyen la apertura de puertas a altas velocidades, caídas de motores a la vía durante la marcha, y la caída de una puerta del convoy en movimiento. Estos fallos han provocado interrupciones en el servicio, así como incidentes más graves, como el descarrilamiento de un convoy en la estación de Moncloa (Línea 6 Circular) en 2009, que resultó en 5 heridos leves y la retirada de estos trenes de dicha línea. Otros incidentes incluyen descarrilamientos al entrar en las cocheras de Cuatro Vientos (Línea 10) y Fuencarral (Línea 10), así como al salir de la estación de Fuencarral y entrar en la estación de Tres Olivos. Además, los trenes presentan problemas de falsas salidas, dificultades para operar en tramos de calle con lluvia, brusquedad al frenar, vibraciones y tambaleos a velocidades moderadas. En resumen, estos trenes se consideran inestables e inseguros tanto para los pasajeros como para los trabajadores del Metro de Madrid.”, según recoge change.org en una de sus peticiones.

3.2.4 El sistema ATO

Los sistemas ATO (Automatic Train Operation) no requieren que el maquinista realice ningún tipo de operación, salvo algunas básicas como apertura y cierre de puertas, arranque, etc. Este sistema trabaja juntamente con el ATP y permitiendo la conducción manual, pero no desobedece al propio ATP. El ATP es un sistema de seguridad que supervisa la conducción en trenes, que aplica freno de emergencia o impide otras acciones cuando no se cumplen algunas condiciones de seguridad.

El sistema ATO se utiliza principalmente en trenes metropolitanos y, cuando está activado, regula la marcha, el frenado y las funciones básicas para el movimiento y la seguridad de los vagones, pero necesita de un maquinista que se limita a abrir y cerrar puertas, dar orden de salida al propio ATO y supervisar la seguridad del sistema. Permite frecuencias de tren de 3 minutos y velocidades de hasta 80km/h.

Regula la marcha del tren de acuerdo con unas curvas de aceleración y frenado previamente diseñadas de la manera mas eficiente posible. Reduce el tiempo de estación a estación al apurar la velocidad límite, el frenado es uniforme, se puede regular la parada siempre en el mismo punto del andén, e impide la velocidad excesiva.

La mayoría de redes de metro con automatización parcial utilizan el modo ATO como pueden ser el Metro de Ankara, Barcelona, Bucarest, Málaga, Bilbao, Caracas, Copenhague, Dubai, Madrid, San Juan, Sao Paulo, Santiago, Valencia y de especial relevancia para nosotros, Sevilla.

3.2.4.1 El sistema ATO del Metro de Sevilla



Figura 13. Unidad del Metro de Sevilla equipado con el sistema ATO.

La Línea 1 del Metro de Sevilla ya cuenta con un sofisticado sistema de señalización y automatización basado en la línea de productos CITYFLO de Bombardier. Este sistema incluye:

- Sistema ATP: Implementado desde la puesta en servicio de la línea, supervisa continuamente el tren para evitar alcances entre trenes, el paso de señales en rojo y el exceso de velocidad.
- Sistema ATO: Implementado en 2010, controla el frenado y la tracción del tren, permitiendo una conducción suave y regular que mejora el confort del pasajero.
- Sistema de transmisión Wi-Fi: Integrado en 2012, permite la comunicación en tiempo real entre los trenes y el sistema de control de tráfico, facilitando distintas órdenes de marcha y el intercambio de información.
- Sistema ATR (Automatic Train Regulation): Implementado en 2013, calcula y envía información a los trenes para adaptar su régimen de marcha y el tiempo de parada en estaciones, mejorando la regularidad y la calidad del servicio prestado. Basado en la plataforma de gestión de tráfico ferroviario Ebiscreen 2000, forma parte de la solución de sistemas de control ferroviario CITYFLO 350 de Bombardier. Con estos avances tecnológicos, la Línea 1 del Metro de Sevilla cuenta con un sistema integral de Supervisión Automática de Trenes de Bombardier, pero todavía necesita de un conductor supervisor.

La incorporación del sistema ATO a la Línea 1 del Metro de Sevilla ha sido crucial para la optimización de la eficiencia y seguridad del servicio. Este sistema automatizado permite una gestión más precisa de los intervalos entre trenes, mejorando la puntualidad y la capacidad de transporte. Además, el ATO reduce el consumo de energía al optimizar las velocidades y frenadas, contribuyendo a un transporte más sostenible. En conjunto, estas mejoras aumentan la satisfacción del usuario y la competitividad del metro como medio de transporte urbano.

3.3 Líneas mixtas. Combinación de trenes operados automática y convencionalmente.

El metro de Nuremberg es el primer metro automático en compartir vía con metros convencionales. En julio de 2008, la línea U3 incorporó nuevos trenes sin conductor de Siemens.

En este tipo de líneas, es crucial garantizar la interoperabilidad y seguridad entre los sistemas automáticos y convencionales para garantizar un funcionamiento fluido y seguro del servicio de transporte. Esto puede implicar la instalación de sistemas de señalización y control compatibles con ambos tipos de trenes, así como la implementación de medidas de seguridad adicionales para evitar conflictos en la circulación.

Además, es importante considerar aspectos operativos, como la coordinación de horarios y frecuencias de los trenes automáticos y convencionales para minimizar los tiempos de espera y optimizar la capacidad de transporte de la línea. También se deben tener en cuenta las necesidades de mantenimiento y supervisión específicas de cada tipo de tren, asegurando la disponibilidad y fiabilidad del servicio en todo momento.

Esta combinación de trenes automáticos y convencionales puede servir para complementar a las líneas que actualmente son operadas al 100% por maquinistas. Para las líneas convencionales ya existentes resulta muy complicado económicamente retirar toda la flota de vehículos para instalar una nueva remesa de trenes automatizados, por lo que una introducción paulatina de trenes automáticos, rellenando franjas horarias inoperativas o una sustituyendo a los anteriores poco a poco, puede ser una buena opción para aquellas ciudades que ya tengan la infraestructura de metro con metros tradicionales.

3.4 Ventajas de la automatización

La automatización del metro dejó de ser ciencia ficción hace más de 35 años. Cada día se operan más de 1000km de vías de metro automáticamente en todo el mundo, llevando de manera segura y confiable a millones de pasajeros a su destino. Un cuarto de los metros del mundo ya cuenta con al menos una línea completamente automatizada, lo que representa el 7% de la infraestructura de metro en funcionamiento en la actualidad. Se espera que en los próximos 5 años, la automatización completa se convierta en el diseño predominante para las nuevas líneas de metro. Sin embargo, la automatización sigue siendo un tema controvertido a nivel político y económico.

Cuando se implementa un sistema de transporte público, hay cinco dimensiones clave que cualquier autoridad debe considerar en su diseño:

- Movilidad: el sistema de transporte debe abordar eficientemente las necesidades de movilidad actuales y futuras.
- Humanidad: garantizar que el sistema de transporte esté diseñado a escala humana, es decir, colocando al cliente en el centro y proporcionando un entorno de trabajo motivador, sin causar destrucción de empleo.
- Seguridad: garantizar que la movilidad sea segura para los clientes y el personal.
- Accesibilidad económica: garantizar el costo total de propiedad más eficiente para el sistema de transporte.
- Reducción de emisiones contaminantes: minimizar el impacto ecológico de la solución de movilidad.

3.4.1 Movilidad

3.4.1.1 Capacidad

La automatización maximiza la capacidad al permitir intervalos mínimos y una mayor velocidad comercial, gracias a las curvas de velocidad y tiempos de espera optimizados de manera constante y al reporte continuo de la ubicación precisa de los trenes en todo el servicio. Los sistemas de operación completamente automatizados pueden lograr hasta un 30% de aumento en la capacidad en comparación con una línea convencional.

- Permite una mayor frecuencia de trenes, llegando a alcanzar los 60 segundos de frecuencia en algunas líneas ya automatizadas.
- Optimiza los tiempos de parada en las estaciones.
- Reduce los tiempos de espera de los usuarios como consecuencia de la mayor frecuencia y velocidad óptima.
- Puede aumentar la velocidad comercial debido a las mejoras en seguridad y al mayor ajuste constante entre la velocidad ideal y la velocidad del tren.

3.4.1.2 Disponibilidad

La automatización minimiza las interrupciones operativas gracias a la mayor fiabilidad, regularidad y redundancia incorporada en el sistema, y la reducción de interrupciones debidas a factores humanos. Facilita la capacidad de respuesta en caso de incidentes proporcionando una mayor disponibilidad del servicio en general. Los sistemas de operación completamente automatizados suelen lograr una disponibilidad completa. Además, toda la flota de vehículos está disponible para la red de metro durante todo el día para atender a las necesidades puntuales.

3.4.1.3 Flexibilidad

La automatización permite una operación adaptable, ofreciendo la capacidad de reaccionar a aumentos de la demanda mediante la inyección de trenes casi en tiempo real o ajustando itinerarios para servicios exprés y mixtos. Hace que los servicios fuera de hora sean más asequibles y facilita la operación las 24 horas del día, los 7 días de la semana.

- Permite la improvisación en caso de averías o cualquier otro problema y en horas punta, al no estar sujeto a horarios ni a disponibilidad del personal. Un pico de demanda imprevisto puede ser absorbido en cuestión de minutos.
- Adaptabilidad del tamaño del tren, ajustándose en todo momento a la demanda para no cargar con peso de vagones innecesarios.

3.4.2 Humanidad

La automatización facilita una mejora en el servicio al cliente. Los clientes están más satisfechos con líneas completamente automatizadas, un resultado que no puede atribuirse únicamente al factor novedad, ya que las tasas de satisfacción permanecen consistentemente altas después de años de operación. Además de la percepción de un sistema más tecnológico y confiable, la presencia aumentada de personal visible e interactivo contribuye a la satisfacción del cliente. Desligados de sus cabinas, el personal itinerante, polivalente y versátil es más cercano a los pasajeros, contribuyendo así a una mejor experiencia de viaje.

La automatización fomenta un modelo organizativo con puestos de trabajo que requieren un conjunto más amplio de habilidades y aportan un valor añadido al servicio, aumentando la satisfacción de los empleados.

Estos nuevos perfiles laborales se alinean con un mercado laboral con mayores expectativas de educación y profesionalismo, y ofrecen un mayor potencial de evolución profesional.

En la experiencia de los operadores que gestionan tanto líneas automatizadas como convencionales, los empleados de líneas automáticas están más satisfechos y comprometidos con el servicio, presentando tasas de absentismo más bajas. Los límites tradicionales entre los trabajos de línea y mantenimiento se diluyen en un modelo más orientado a procesos, trabajando en un modelo de rotación del personal.

Estos nuevos puestos requieren personal todoterreno con mejores cualidades y una mentalidad orientada al cliente, más alineada con el mercado laboral y las expectativas de las nuevas generaciones. Los perfiles laborales de las líneas automáticas son, por lo tanto, más atractivos y tienen un mayor potencial de evolución.

3.4.3 Seguridad

La automatización en el transporte público, como el metro, juega un papel crucial en la prevención de errores humanos y la protección de los pasajeros. Las tareas repetitivas y críticas para la seguridad se automatizan, eliminando así la posibilidad de fallos humanos. Este enfoque ha demostrado ser altamente efectivo, con líneas de metro totalmente automatizadas manteniendo un historial impresionante de seguridad, sin fatalidades en más de 35 años.

Al minimizar errores humanos, se evitan señales pasadas en rojo, exceso de velocidad u otras situaciones de peligro susceptibles a ser accidentalmente ignoradas por humanos. La protección de los pasajeros se ve reforzada aún más mediante sistemas avanzados de protección de vías, que previenen lesiones y reducen incidentes como el acceso no autorizado a las vías y suicidios.

Las puertas en el propio andén son una solución clave para garantizar la seguridad de los pasajeros en las estaciones automatizadas. Estas puertas no solo previenen intrusiones, sino que también reducen los incidentes de atrapamiento de puertas y mejoran la percepción de seguridad entre los usuarios. Además, la automatización contribuye a viajes más suaves con menos interrupciones forzosas, lo que reduce el riesgo de lesiones para los pasajeros dentro de los trenes.

En conjunto, la automatización no solo mejora la seguridad, sino que también aumenta la percepción de esta entre los pasajeros. El uso de tecnologías avanzadas, como CCTV e intercomunicadores, permite una vigilancia más efectiva y una comunicación directa entre los pasajeros y el centro de control de operaciones. Esto libera recursos del personal para brindar un mejor servicio al cliente, lo que contribuye a una experiencia de viaje más segura y satisfactoria.

3.4.4 Accesibilidad económica

3.4.4.1 Inversión inicial

La automatización conlleva una optimización de la flota y la infraestructura, lo que podría resultar en una reducción del gasto de capital, en función de los objetivos de la administración. Esta optimización se logra al aprovechar la capacidad del metro para aumentar la velocidad comercial y al diseñar las líneas de manera óptima. Además, el aumento de la frecuencia de los trenes puede ofrecer servicios con trenes más cortos, lo que permite estaciones más pequeñas, reduciendo así los costos de obra civil sin sacrificar la capacidad del sistema en general.

En cuanto a los costos del sistema, las diferencias entre los sistemas totalmente automatizados y los convencionales disminuyen cada año conforme avanza la tecnología. Aunque los sistemas de señalización totalmente automatizados siguen siendo más caros que los convencionales, los trenes automáticos ya no son necesariamente más costosos. Los sistemas de protección siguen siendo el principal elemento de costo adicional, pero su implementación cada vez más frecuente en líneas convencionales resulta en economías de

escala que reducen su gasto de capital.

3.4.4.2 Costes operativos

La automatización del metro conllevará, potencialmente, un aumento de ingresos, la optimización de recursos y un ahorro de energía. Las prácticas actuales muestran que los ahorros en gastos operativos pueden alcanzar hasta un 30% en comparación con una línea de metro convencional.

- Más ingresos: El aumento de disponibilidad de líneas automatizadas conduce a menos interrupciones, lo que contribuye a una mayor confianza y demanda.
- Operación más eficiente: Las líneas automatizadas son más eficientes, reduciendo los costos operativos totales por kilómetro de vehículo en un 25%-35% mediante el ahorro de energía, la optimización de la flota (aumento de la frecuencia, acoplamiento de trenes) y la reducción de movimientos de trenes vacíos.
- Acoplamiento/desacoplamiento automático: Esta función permite ajustar los tamaños de los trenes de manera más eficiente, facilitando la operación con trenes más cortos cuando sea suficiente, lo que reduce los costos (energía, desgaste del equipo, etc).
- Organización más eficiente: Se puede mejorar aún más la eficiencia operativa desarrollando un concepto organizativo más eficiente, ya que el concepto organizativo implementado en los metros automáticos es más propicio a un uso eficiente de los recursos del personal. Los servicios de tren ya no estarían limitados por la disponibilidad de conductores, lo que permite una operación más flexible.
- Costos de conductor: La posición laboral de los conductores desaparece, pero dependiendo del enfoque de servicio al cliente de la empresa y de las políticas de la administración, los ahorros asociados pueden dirigirse a otras posiciones.
- Mantenimiento: Los costos operativos vinculados al mantenimiento de una línea completamente automatizada tienen reducciones en algunos equipos compensadas por costos aumentados en otros.

3.4.5 Reducción de emisiones contaminantes

La automatización puede contribuir a reducir el consumo total de energía del sistema gracias a la optimización del tamaño de los trenes y la optimización del número de operaciones, patrones de conducción respetuosos con el medio ambiente y maximización del impacto del frenado regenerativo. Una combinación de estas medidas puede producir un ahorro estimado del 15% en energía, y hasta un 30% al operar con acoplamiento de trenes según datos de la UITP:

- Tamaño de los trenes y flexibilidad: Ofrecer un nivel óptimo de servicio con una flota reducida resulta en una reducción general del consumo de energía. Además, la capacidad en los trenes automáticos puede asignarse de manera óptima (donde y cuando se necesite en cada instante de tiempo), generando mayores ahorros de energía al minimizar el desplazamiento de la capacidad no utilizada; una ventaja que puede maximizarse adaptando la longitud de los trenes mediante el acoplamiento y desacoplamiento automatizado.
- Modo ecológico: El comportamiento regular y repetitivo del sistema maximiza el aprovechamiento del modo ahorro en diagramas de funcionamiento optimizados en horas no pico, que representan hasta un 80% del tiempo de servicio total.
- Frenado regenerativo: La automatización permite la sincronización de trenes (aceleración y frenado) para un frenado regenerativo efectivo.

En definitiva, a pesar de la polémica por su implantación en algunas ciudades, resulta evidente que la automatización del metro cuenta con una larga lista de ventajas respecto a las líneas convencionales.

3.5 Aplicación de la inteligencia artificial al metro

Son numerosas las aplicaciones de la inteligencia artificial en las redes de metro que ya cuentan con esta tecnología en sus líneas:

- Máquinas de venta de billetes. Su instalación en Madrid está prevista para 2025, incluida en el Plan de Mejora Tecnológica del Metro de Madrid. Conseguirá hacer las máquinas más accesibles para personas con discapacidad, incluyendo también opciones de videollamada o fotografías de los destinos.
- Vigilancia. El metro de Londres ha probado herramientas de vigilancia con IA en tiempo real para detectar posibles situaciones de riesgo o conflicto y permitir al personal intervenir rápidamente. Detecta comportamientos agresivos e identifica a las personas que acceden al metro sin pagar.
- Ventilación. Ferrocarril Metropolità de Barcelona ha probado un nuevo sistema de regulación de la ventilación basado en inteligencia artificial, cuyo objetivo es la utilización eficiente de todos los activos de ventilación de la red. Este sistema permite establecer la estrategia óptima de aireación para cada una de las estaciones y líneas de metro.
- Gestión de multitudes. Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana ha buscado la fórmula para controlar el aforo en sus estaciones con el objetivo de conocer cuales son los flujos de desplazamientos más masivos y en qué momentos y dónde se producen aglomeraciones en sus instalaciones. Además, este sistema podrá ofrecer a los usuarios información sobre el estado de los andenes y vestíbulos, así como de los trenes.

Cualquier aspecto del metro puede ser mejorado con la ayuda de la IA, no obstante, los anteriormente mencionados no afectan de forma directa a la disponibilidad ni a la frecuencia de los metros.

Por otra parte, existe un gran potencial de mejora en cuanto a la planificación de viajes de cada vagón. En una red como la de Sevilla, esto no tiene ningún sentido, pues solo tenemos una línea y nuestro único condicionante es la disponibilidad de maquinistas y de trenes por lo que, para un horario dado, solamente podemos controlar la frecuencia de trenes ajustándonos al número de trenes y maquinistas del que disponemos. Sin embargo, para una red con numerosas líneas y cocheras, esta puede ser una herramienta muy interesante para la optimización de rutas y horarios.

La inteligencia artificial permitirá planificar de forma óptima todos los desplazamientos de cada uno de los vagones. Esta tecnología nos dará a conocer, en cada momento, dónde hará falta un tren y con cuantos vagones deberá contar. Además, podemos contar con curvas de demanda precisas para cada día, hora y segundo del año, además de permitir cuadrar las paradas de un tren de una línea con otro de otra línea distinta con el objetivo de optimizar el flujo de gente, favoreciendo los trasbordos.

También podría tener en cuenta la movilidad en superficie, así como los autobuses, atascos, calles cortadas o hasta semáforos en rojo cercanos a las estaciones que podrían, por ejemplo, hacer parar el tren unos segundos hasta que a los peatones afectados hayan podido acceder al metro si esto no supone un retraso en la red.

4 ANÁLISIS PREVIO DEL SOFTWARE UTILIZADO.

4.1 Software en uso

Los sistemas de metro automáticos se programan y operan utilizando una combinación de software especializado en control de trenes, señalización, supervisión y gestión. Estos programas han sido desarrollados por empresas punteras del sector ferroviario y no suelen ser accesibles para los usuarios.

Algunos ejemplos son:

- Alstom Urbalis, desarrollado por Alstom.
- Siemens Trainguard MT, sistema CBTC (Communications-Based Train Control) desarrollado por Siemens
- Thales SelTrac, sistema CBTC desarrollado por Thales
- Bombardier CITYFLO, sistema CBTC desarrollado por Bombardier
- Hitachi Rail CBTC, desarrollado por Hitachi Rail.
- Mermec.

El CBTC es una tecnología avanzada de señalización ferroviaria que utiliza la comunicación continua entre los trenes y el centro de control y permite el control automático de los trenes, incluida la regulación de la velocidad, la gestión de la distancia entre trenes y la supervisión de la posición de los trenes en tiempo real. Es ampliamente utilizado por los desarrolladores por su altas prestaciones, garantizando una capacidad optima de la línea, la seguridad y la eficiencia operativa en general.

Además, las redes de metro automáticas deben contar con redes de comunicaciones seguras y robustas para transmitir toda la información sin fallos entre trenes y centros de control. Están diseñadas con múltiples capas de redundancia y seguridad para prevenir errores y garantizar la seguridad de los pasajeros y trabajadores, incluyendo sistemas de respaldo, protocolos de emergencia y pruebas rigurosas de seguridad.

4.2 Software CoDeSys

CoDeSys (Controller Development System) es una plataforma de desarrollo de software para la programación de controladores lógicos programables (PLC) y sistemas de automatización. Desarrollado por la empresa alemana 3S-Smart Software Solutions, CoDeSys se utiliza ampliamente en la automatización industrial, la automatización de edificios, y otros campos que requieren sistemas de control automatizado.

CoDeSys es un entorno de programación de autómatas programables que permite la programación según la norma IEC-61131-3. Este entorno facilita la edición de programas en los lenguajes que propone la citada norma, la simulación, la comunicación con el PLC y la monitorización del programa que se ejecute en dicho dispositivo. En definitiva, permite realizar todos los pasos necesarios para el diseño de aplicaciones para autómatas programables.

Uno de los lenguajes que contempla la norma anteriormente citada es SFC (Sequential Function Chart). Este lenguaje básicamente es muy similar a Grafset, y está basado en Redes de Petri. Se trata de una metodología de diseño de automatismos lógicos secuenciales basado en un grafo de estados compuesto por etapas a las que se le asocian las acciones de control a realizar en cada momento, y transiciones que permiten la evolución dinámica del sistema en función de los valores que van tomando las entradas.

El análisis en profundidad de Grafset queda fuera del estudio de este trabajo, pero su funcionamiento se podría resumir en etapas asociadas a acciones y condiciones para saltar de unas etapas a otras:

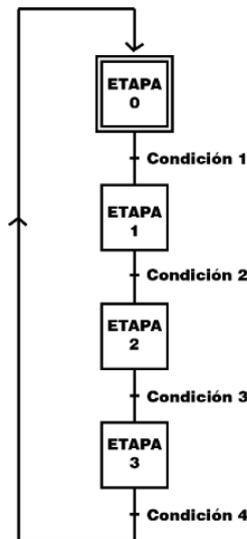


Figura 14. Esquema de funcionamiento de CoDeSys.

En este sentido, CoDeSys permite la edición de Grafcet de acuerdo a la norma IEC, pero también permite usar lo que denominan “etapas simplificadas”, cuya sintaxis queda fuera de la citada norma. Por ello, antes de empezar a trabajar, habrá que pedir al programa que use el lenguaje Grafcet únicamente de acuerdo con la norma IEC.

CoDeSys proporciona un entorno de desarrollo integrado y completo que incluye herramientas de depuración, simulación y monitoreo en tiempo real. Estas características facilitan el desarrollo y la prueba de aplicaciones de control complejas, permitiendo validar y depurar la lógica de control sin necesidad de hardware físico, lo cual es especialmente útil en un entorno académico.

Grafcet, por su parte, ofrece una visualización clara y estructurada del flujo de control del proceso, lo que facilita la comprensión y la comunicación del diseño del sistema. Como un estándar ampliamente reconocido (IEC 60848) para la representación de secuencias de control, CoDeSys asegura que el diseño siga las mejores prácticas de la industria. La estructura gráfica de Grafcet permite realizar cambios y mantenimiento de forma más intuitiva y menos propensa a errores en comparación con lenguajes textuales, lo cual es una gran ventaja para la documentación y la futura modificación del sistema.

La combinación de CoDeSys y Grafcet ofrece una integración eficiente, permitiendo crear y gestionar secuencias de control directamente dentro del mismo entorno de desarrollo. Esto mejora la documentación del sistema de control, proporcionando diagramas claros y detallados que pueden ser fácilmente entendidos por otros ingenieros y técnicos. Además, su uso optimiza el flujo de trabajo del desarrollo del sistema de control al permitir una programación más estructurada y modular, lo que es especialmente útil en proyectos complejos como una red de metro.

En el contexto específico de la Red de Metro de Sevilla, las operaciones (como la secuencia de apertura y cierre de puertas, control de semáforos y gestión de trenes) son eminentemente secuenciales, lo que hace que Grafcet sea particularmente adecuado para modelar estos procesos. Además, permite una gestión precisa de los estados y transiciones del sistema, lo que es crucial para la operación segura y eficiente de una red de metro. Eu estructura facilita también la escalabilidad y la modularidad del sistema, permitiendo añadir nuevas funcionalidades o modificar las existentes sin una reestructuración significativa del código.

5 AUTOMATIZACIÓN DEL METRO DE SEVILLA.

Este proceso implicará una planificación detallada de las secuencias de control de los trenes, la gestión de estados y transiciones críticas, así como la integración de diversos sistemas de señalización, seguridad y comunicaciones. Abordaremos cada uno de estos elementos esenciales, asegurando que la operación del metro sea segura, eficiente y confiable. La combinación de Grafset y CoDeSys nos permitirá estructurar y modularizar el sistema de manera clara, facilitando tanto el desarrollo como el mantenimiento y futuras expansiones del sistema automatizado.

5.1 Componentes para la automatización del metro

5.1.1 Control y gestión

Invertir en sistemas de control y gestión centralizada es crucial para la automatización de una línea de metro. Los costos iniciales son significativos, pero los beneficios a largo plazo en términos de eficiencia, seguridad y reducción de costos operativos justifican esta inversión.

5.1.1.1 Sistemas de control y gestión:

Necesitamos un hardware y software encargado de la operación y el control de los trenes de forma automática. Este sistema deberá incluir el ATP (Automatic Train Protection) y el ATO (Automatic Train Operation). Con esto cubriríamos las necesidades de la automatización de las secuencias de operación descritas y la protección y la seguridad del tren.

Para implementar los sistemas ATO y ATP, serán necesarios los siguientes componentes:

- **Balizas:** Dispositivos instalados a lo largo de la vía que transmiten información sobre la señalización y la velocidad permitida a los trenes que pasan. Proporcionan en tiempo real la ubicación y las condiciones de operación del tren. El precio de cada una puede variar en función de la tecnología y el proveedor, pero podemos estimar un precio por unidad de 5000€ en el caso de las balizas de la marca Alstom. Son necesarias de 5 a 10 balizas por km de vía, por lo que su coste por kilómetro ronda los 45000€.



Figura 15. Baliza del sistema ATP.

- Sensores: Dispositivos adicionales que monitorean diversos parámetros como la velocidad del tren, posición o estado de frenos. Teniendo en cuenta sensores de velocidad, de posición, de aceleración y frenado y de seguridad, además de la redundancia de los mismos, podemos estimar un total de 25 sensores por tren y un número variable dependiendo de la línea en cuestión. El costo por sensor varía según el tipo y la tecnología, pero podemos asumir un precio típico de 1000€, lo cual suma 25000€ por tren. Además, cada kilómetro de vía requiere en torno a 10 sensores, por lo que atribuiremos un coste de 10000€ por km de vía adicional.
- Ordenadores a bordo: son responsables de recibir datos de las balizas y sensores, procesar la información y tomar decisiones en tiempo real. Esta computadora tiene un precio de en torno a 60000€ por tren.

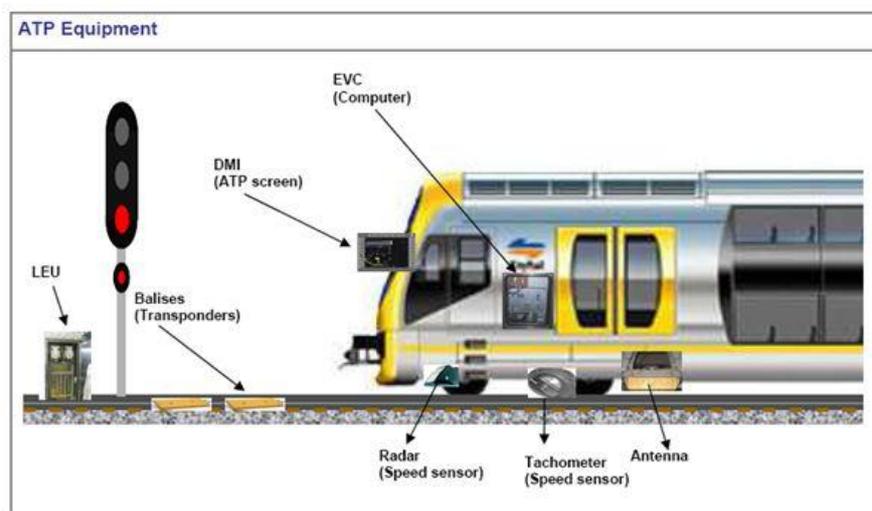


Figura 16. Resumen del equipamiento del ATP.

5.1.1.2 Sistemas SCADA

Utilizado para supervisar y controlar los procesos industriales. Permite monitorizar y controlar la infraestructura, así como monitorizar señales, energía, ventilación y otros sistemas. Proporciona datos en tiempo real, proporcionando una visión completa de la operación de la línea y permitiendo una respuesta rápida ante cualquier incidencia.

- Hardware de supervisión y control: incluye los servidores centrales que ejecutan el software SCADA y las estaciones de trabajo de los operadores. Se estima su coste en unos 600000€ para toda la red.
- Software SCADA: incluye la plataforma SCADA y las licencias necesarias. Coste estimado de unos 250000€ para la red
- Sensores y dispositivos de campo: para monitorizar señalización, energía, ventilación y climatización, sensores de seguridad o infraestructura. El coste depende del tipo de sensor utilizado, marca y tecnología. No obstante, podemos asumir un promedio de 40000€/km.

5.1.1.3 Centro de control operacional:

Es el centro desde donde se supervisa y se controla la actividad de la línea de metro. Equipado con pantallas, consolas de control y sistemas de comunicación, permite gestionar la operación en tiempo real y supervisar el tráfico de trenes, gestionar incidentes, coordinar las operaciones de mantenimiento y garantizar la seguridad del sistema y los pasajeros.

- Interfaz Hombre-Máquina: pantallas y dispositivos de entrada en el centro de control operacional, permitiendo a los operadores monitorear y controlar la operación del sistema. Una consola de control es una estación de trabajo equipada con las herramientas necesarias para los operadores para gestionar la operación del sistema de trenes. Está formada por pantallas, dispositivos de entrada (periféricos), software de supervisión y control y la infraestructura necesaria para la monitorización en tiempo real de los trenes, la gestión de incidentes y la actuación segura y eficiente. Cuenta con pantallas, sistemas de comunicación y software de gestión y monitoreo. Un centro de control operacional típico puede contar con 20 pantallas (3000€/ud), 10 unidades de control (5000€/ud), redes de comunicación, software, mobiliario y equipamiento adicional, lo que puede sumar una cantidad de en torno a 700000€ para la red.



Figura 17. Centro de control del metro de Madrid.

5.1.2 Sistemas de señalización

Los sistemas de señalización son imprescindibles para una mayor seguridad y, no menos importante, una mejora en la eficiencia operativa, en la capacidad de transporte y en la flexibilidad. El sistema CBTC permite una reducción del intervalo entre trenes, lo que aumenta la capacidad de la línea sin necesidad de añadir más trenes. La señalización en cabina proporciona información en tiempo real, lo que reduce el riesgo de accidentes y errores humanos.

5.1.2.1 Sistemas de comunicación basada en tren (CBTC):

Es un sistema de control de trenes que utiliza comunicaciones digitales para transmitir datos entre el tren y los equipos de la vía. Está formado por quipos de vía (transpondedores, antenas, cables, etc.), equipos a bordo (sensores, controladores, interfaces, etc.) y su instalación, mantenimiento y soporte. Se colocará un transpondedor cada 500m con un coste unitario de unos 4000€, una antena por km con un coste unitario de unos 1000€ y cables y equipos de alimentación con un coste de 7000€/km, lo que resulta en 16000€/km de instalación.

5.1.2.2 Señalización en cabina:

Proporciona al sistema automático información en tiempo real sobre la operación del tren incluyendo límites de velocidad, distancias de frenado y otros datos críticos. La señalización en cabina reemplaza a la señalización fija en la vía, permitiendo una operación más flexible y adaptativa, especialmente útil en condiciones de alta demanda, donde la capacidad y la eficiencia son cruciales. Debería contar con pantallas y dispositivos de interfaz en cabina, sensores y sistemas de retroalimentación, que con su mantenimiento, soporte e instalación tendría un coste inicial de 90000€ por tren.

5.1.3 Comunicaciones

Otro elemento crucial es la infraestructura de comunicaciones. Permite la transmisión de datos en tiempo real entre trenes, sistemas de control y centro de control operacional. La implementación de una infraestructura de comunicaciones robusta y avanzada asegura una operación más fiable y eficiente, mejorando la experiencia tanto para los operadores como para los pasajeros.

5.1.3.1 Redes de Fibra Óptica

Forman la columna vertebral de la infraestructura de comunicaciones en una línea de metro automatizada. Permite la transmisión de grandes volúmenes de datos a alta velocidad, lo cual es crucial para el funcionamiento de sistemas de control y supervisión en tiempo real. Son utilizadas para conectar diversas partes de la infraestructura incluyendo estaciones, túneles, centros de control y equipos de señalización. Teniendo en cuenta el costo por metro de cable, y el costo de conectores y equipos de terminación, podemos atribuir 9000€/km de vía a los gastos en redes de fibra óptica.

5.1.3.2 Sistemas de comunicación inalámbrica

Proporcionan una conectividad entre la infraestructura y los trenes en movimiento en toda la línea. Esta comunicación es esencial para los sistemas de control como el CBTC y para proporcionar conectividad a bordo para aplicaciones operativas o incluso para mantener conectados a los pasajeros. Antenas, estaciones base, repetidores y amplificadores de señal suman en torno a 3500€/km basándonos en los datos de otras redes de metro.

5.1.3.3 Equipos de telecomunicaciones

Incluyendo switches, routers, servidores y otros dispositivos necesarios para gestionar y enrutar el tráfico de datos dentro de la infraestructura de comunicaciones. Debería de incluir también sistemas de redundancia y respaldo para garantizar la continuidad del servicio. El coste de la implantación de los equipos de telecomunicaciones, teniendo en cuenta los tanto los equipos como su instalación, suma en torno a 4000€/km.

5.1.3.4 Dispositivos de comunicación a bordo

Son esenciales para la transmisión y recepción de datos entre el tren y la infraestructura. Permiten el intercambio de información en tiempo real, incluyendo datos de control, supervisión y estado operativo. Además, cada tren deberá contar con antenas y receptores que permitan esta comunicación y se encarguen de captar y transmitir señales de radiofrecuencia de forma continua y estable. El gasto atribuible a estos dispositivos está en torno a los 12000€ por tren.

5.1.4 Sensores y actuadores

Por otro lado, son necesarios los sensores y los actuadores para controlar el funcionamiento de los trenes. Permiten la monitorización y el control de diversas funciones operativas y de seguridad.

5.1.4.1 Sensores de proximidad

Detectan la presencia de objetos cercanos sin contacto físico. Pueden detectar trenes en estaciones, monitorizar las puertas y el control de la distancia entre trenes. El costo unitario de la implantación está en torno a los 300€, y serán necesarios 10 de estos por tren, y 5 por km de tramo. Lo que resultaría en 3000€ por tren y 1500€ por km de vía.

5.1.4.2 Sensores de detección y supervisión

Permiten la supervisión continua de las vías, túneles y otras áreas críticas. Pueden ser sensores de movimiento, cámaras de detección, sensores infrarrojos, etc. Se estima un coste por tren de 3000€ y por kilómetro de 5000€.

5.1.4.3 Actuadores

Convierten señales eléctricas en movimientos físicos. Se utilizan para operar una variedad de sistemas, como la apertura y cierre de puertas, operación de sistemas de ventilación y el control de señales y barreras. Son necesarios unos 10 actuadores de puertas y 2 de ventilación por tren, con un costo total de unos 8000€. Además, de forma habitual hay 4 actuadores para el control de señales están presentes por kilómetro de recorrido con un coste unitario de unos 1000€, resultando el 4000€/km.

5.1.5 Seguridad

Los sistemas de seguridad son fundamentales en la automatización de una línea de metro. Garantizan la protección de los pasajeros, el personal y la infraestructura y, aunque los gastos iniciales pueden ser elevados, los beneficios en términos de seguridad mejorada justifican la inversión.

5.1.5.1 Videovigilancia inteligente

Con tal de reforzar la videovigilancia convencional, el sistema inteligente puede monitorizar en tiempo real las estaciones, túneles y trenes. Podría detectar comportamientos anómalos como objetos abandonados en la vía, intrusiones y todo tipo de situaciones de emergencia, utilizando algoritmos para analizar las imágenes y alertar automáticamente al personal de seguridad. La videovigilancia inteligente requiere de un software específico para el efecto, cuya licencia tiene un coste de en torno a 5000€ y serviría para toda la red. Si estimamos 5 cámaras por kilómetro y 10 por estación, con un coste unitario de 2000€ sumaría un total de 10000€/km y 20000€/estación.

5.1.5.2 Detección de intrusiones

Con sensores que detecten el acceso de usuarios en áreas restringidas. Pueden incluir sensores de movimiento, barreras infrarrojas y tecnologías de radar. Pueden enviar alertas automáticas, permitiendo una respuesta rápida ante cualquier intento de intrusión. Si en la red utilizamos sensores de movimiento, de acuerdo con el ejemplo de otras redes del mundo, necesitaríamos un total de 5 unidades de sensores de movimiento y 4 unidades de barreras infrarrojas por estación, y 10 unidades de sensores de movimiento y 5 de barreras infrarrojas por kilómetro, lo que resultaría en un gasto de 3500€ por estación y 8000€ por kilómetro de vía.

5.1.5.3 Sistemas de alerta

Incluyen alarmas, sistemas de megafonía y paneles de información que se activan en caso de emergencia para alertar a los pasajeros y al personal. Una red típica de metro automática cuenta en cada estación con 5 alarmas, 2 puntos de megafonía y 2 paneles de información, y en cada kilómetro con 10 alarmas y 2 puntos de megafonía. En total, el coste sería de 5000€ por kilómetro y 4000€ por estación.

5.1.6 Integración de sistemas

Un componente esencial de la automatización de la red de metro es la integración de todos los sistemas, ya que garantiza que todos los subsistemas trabajen de manera cohesiva y eficiente. La integración incluye la interconexión de hardware, software y redes de comunicación para asegurar un funcionamiento armonioso del sistema. La integración de sistemas robusta asegura una operación más confiable y efectiva, mejorando la experiencia tanto para los operadores como para los pasajeros.

5.1.6.1 Software de integración

Este software facilita la comunicación y coordinación entre diferentes subsistemas, como control de trenes, señalización, sistemas de seguridad, etc. El software de integración asegura que los datos se transmitan correctamente entre los sistemas y que las operaciones se sincronicen en tiempo real. Este software es un punto elemento crítico del sistema y debe ser robusto y eficiente. Es por eso que su coste suele ser demasiado elevado, con licencias que pueden superar los 50000€.

5.1.6.2 Consultoría e ingeniería

Como todo proyecto ingenieril de gran envergadura, es necesario un servicio de planificación, diseño, implementación y pruebas de la integración de sistemas. La ingeniería de integración asegura que todos los componentes del sistema se comuniquen y operen de manera eficiente. Este proceso implica una evaluación detallada de los requerimientos del sistema, el desarrollo de soluciones personalizadas y la realización de pruebas exhaustivas para asegurar la compatibilidad y funcionalidad de todos los subsistemas. Requiere de miles de hora de trabajo de ingeniería y de soluciones personalizadas, por lo que contar con este servicio es imprescindible además de muy costoso. Existen algunas empresas dedicadas a la implantación de sistemas automáticos en redes de metro. Contratar un proyecto de esta envergadura puede costar a la administración en torno a 300000€, aunque es una cifra que depende de múltiples factores, entre ellos las políticas empleadas en la elaboración del proyecto. Existen opciones más “low-cost” y otras de mayor calidad.

5.2 Criterios de diseño de la red de metro

Actualmente, la “red” de Metro sevillana consiste en una única línea, de ahí que llamarlo red sea algo incoherente. No obstante, hay una segunda línea en construcción, la línea 3, y está prevista la construcción de 2 líneas más, la 2 y la 4, para proporcionar un sistema de transporte público a la altura de otras ciudades del país o de Europa.

El diseño de la gestión de las cocheras queda fuera del estudio de este trabajo, al no ser una particularidad de la automatización. Estas cocheras serán tomadas como una parada más, estando localizadas al principio y al final de la línea. Para nuestra programación, asumiremos que siempre hay un tren disponible para salir en la primera parada de la línea. Además, nuestro único final de línea estará en las estaciones iniciales de cada línea, es decir, cuando el tren regrese al punto desde el que ha salido. Debe ser la gestión de las cocheras quien proporcione las instrucciones necesarias para que el modelo sea viable.

Existen diferentes modelos de la Red de Metro de Sevilla, en los que la línea 1 aparece modificada de su ruta actual. No obstante, nos centraremos en el siguiente modelo, propuesto por la asociación Sevilla Quiere Metro que pretende optimizar la propuesta original:

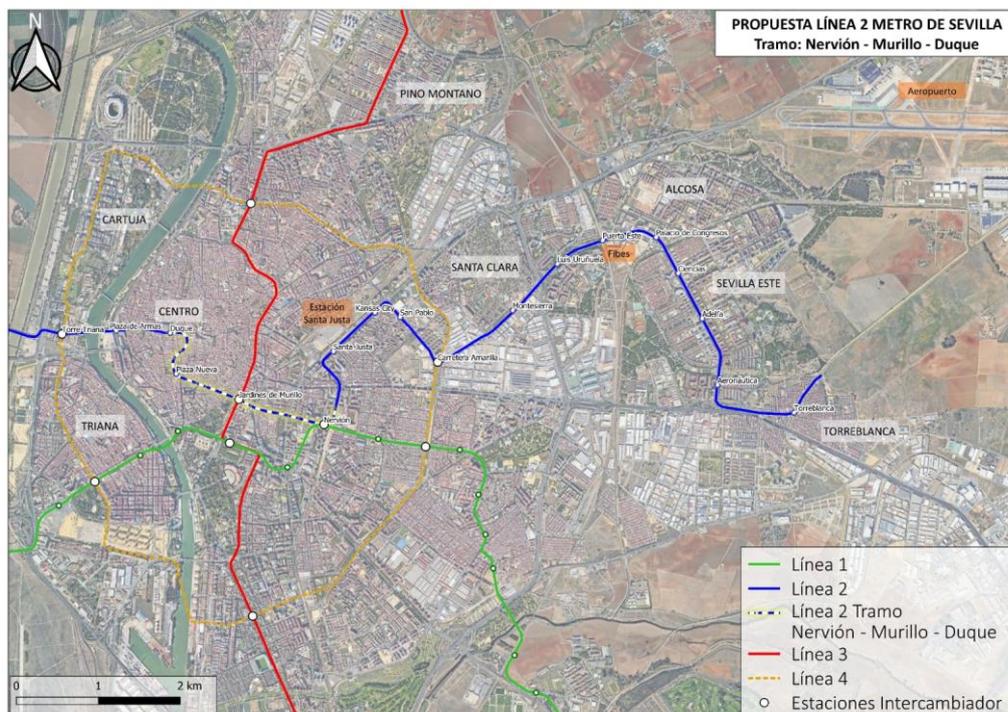


Figura 18. Red completa del Metro de Sevilla propuesta por Sevilla Quiere Metro.

5.2.1 Categorización de curvas

Para simplificar el proyecto y enfocarnos en el objetivo último del mismo, vamos a categorizar las curvas en 3 tipos:

- Rectas: pueden ser atravesadas por el metro a 90km/h. En el programa, se les asigna la velocidad *velreg*.
- Rápidas: pueden ser atravesadas por el metro a 70km/h. En el programa, se les asigna la velocidad *veladm1*.

- Lentas: pueden ser atravesadas por el metro a 60km/h. En el programa, se les asigna la velocidad *veladm2*.

Velreg, *veladm1* y *veladm2* también podrán ser utilizadas para cualquier otra circunstancia. Las curvas sin una pronunciación apreciable para el tren, serán tomadas por el mismo a velocidad de régimen, *velreg* (90km/h).

Fijándonos en la forma del trazado, de forma orientativa, podemos clasificar las curvas conforme lo expuesto en los puntos 4.2.1.1, 4.2.1.2, 4.2.1.3, 4.2.1.4. No se trata de una clasificación estricta, pues la categorización de las curvas es un tema mucho más complejo que requiere conocimiento técnico sobre las vías y las particularidades de cada curva. Solamente tratamos de establecer diferentes límites de velocidad en diferentes tramos, basándonos únicamente en la forma del trazado.

En la entrada a cada zona, habrá un sensor que detecte la llegada del tren y provocará la modificación de la velocidad. En CoDeSys, reciben el nombre de *si_j*, donde *i* será el identificador de la línea en la que está colocado y *j* el identificador del sensor.

5.2.1.1 Categorización de curvas de la Línea 1

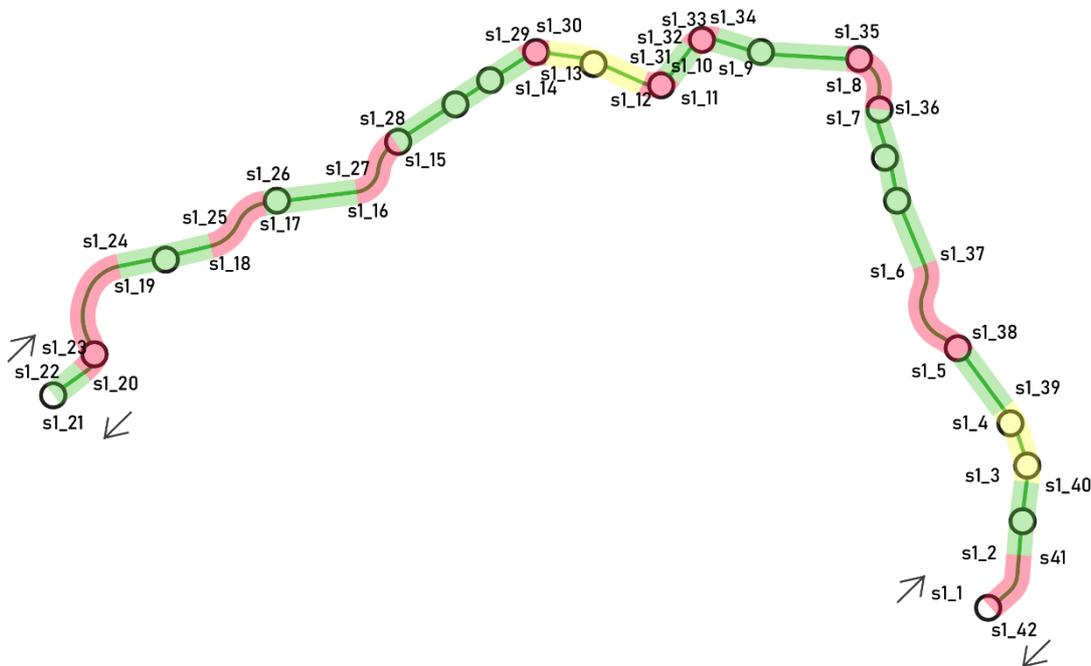


Figura 19. Categorización de las curvas de la Línea 1.

Para esta línea necesitaremos un total de 21 sensores por sentido de la vía, 2 de los cuales estarán situados en los extremos de la línea. En total, necesitamos 42 sensores de detección de trenes o contadores de ejes. Reciben el nombre de *si_j*, con *j* comprendida entre 1 y 42.

Agruparemos estos sensores según la velocidad límite que el programa debe asignar al tren tras la activación de los mismos:

- Rectas: $j = 2, 4, 6, 8, 10, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 32, 34, 36, 38, 40$.
- Rápidas: $j = 3, 12, 30, 39$.
- Lentas: $j = 1, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 23, 25, 27, 29, 31, 33, 35, 37, 41$.
- Fin de trayecto: $j = 21, 42$.

Con 21 paradas y dos sentidos por vía, la línea 1 contará con 42 sensores de contacto en la estación (*e1_j* con *j* comprendida entre 1 y 42) y otros 42 sensores de acercamiento a la estación (*ec1_j*). Para un mejor entendimiento del programa, la estación *e1_1* será la coincidente con el inicio, donde se sitúa *s1_1* y las

posteriores seguirán el mismo sentido que la nomenclatura de los sensores $s1_j$. Lo mismo ocurrirá con los sensores de proximidad a la estación.

5.2.1.2 Categorización de curvas de la Línea 2

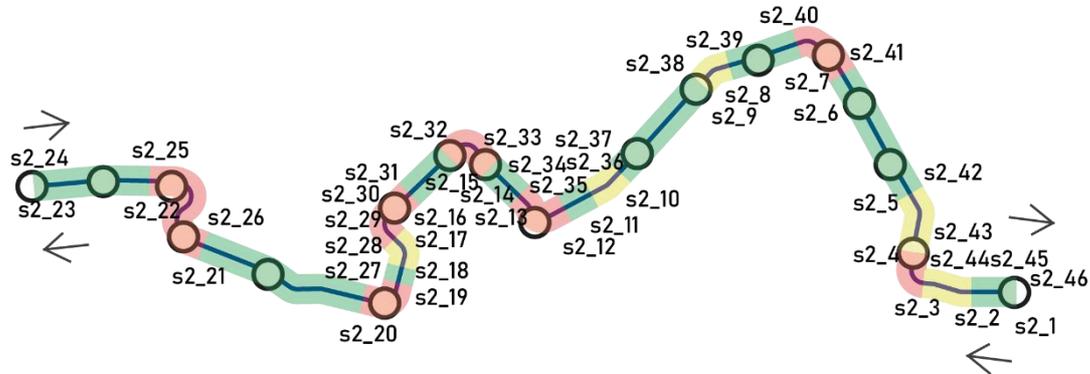


Figura 20. Categorización de las curvas de la Línea 2.

Para la línea 2 necesitaremos 23 sensores por sentido de la vía, incluyendo los sensores de los extremos, que sumarían 46 sensores para toda la línea. Reciben el nombre de $s2_j$, con j comprendida entre 1 y 46.

- Rectas: $j = 1, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 31, 33, 35, 37, 39, 41, 45$.
- Rápidas: $j = 2, 4, 8, 10, 17, 29, 36, 38, 42, 44$.
- Lentas: $j = 3, 6, 12, 14, 16, 19, 21, 25, 27, 30, 32, 34, 40, 43$
- Fin de trayecto: $j = 23, 46$.

Con 18 paradas y dos sentidos por vía, la línea 2 contará con 36 sensores de contacto en la estación ($e2_j$ con j comprendida entre 1 y 36) y otros 36 sensores de acercamiento a la estación ($ec2_j$). Para un mejor entendimiento del programa, la estación $e2_1$ será la coincidente con el inicio, donde se sitúa $s2_1$ y las posteriores seguirán el mismo sentido que la nomenclatura de los sensores $s2_j$. Lo mismo ocurrirá con los sensores de proximidad a la estación.

5.2.1.3 Categorización de curvas de la Línea 3

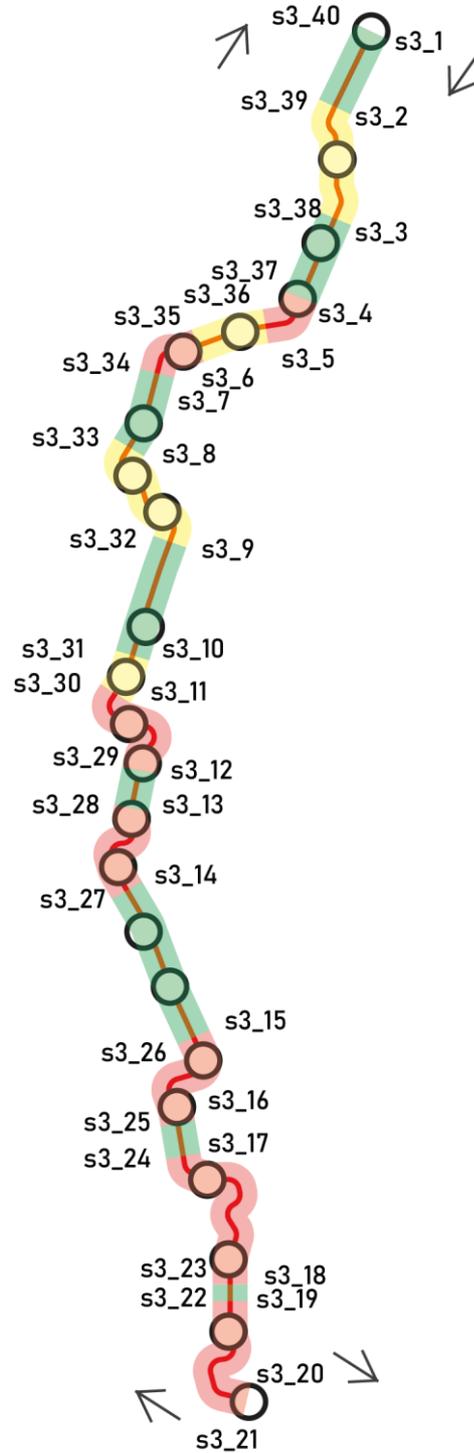


Figura 21. Categorización de las curvas de la Línea 3.

Para la línea 3 podemos contar cambios de velocidad que, contando con los sensores de los extremos, darían un total de 20 detectores, por sentido de la línea, un total de 40 para todo el tramo. Reciben el nombre de $s3_j$, con j comprendida entre 1 y 40.

- Rectas: $j = 1, 3, 7, 9, 12, 14, 16, 18, 22, 24, 26, 28, 31, 33, 37, 39$.
- Rápidas: $j = 2, 5, 8, 10, 30, 32, 35, 38$.
- Lentas: $j = 4, 6, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 34, 36$.
- Fin de trayecto: $j = 20, 40$.

Con 23 paradas y dos sentidos por vía, la línea 3 contará con 46 sensores de contacto en la estación ($e3_j$ con j comprendida entre 1 y 46) y otros 46 sensores de acercamiento a la estación ($ec3_j$). Para un mejor entendimiento del programa, la estación $e3_1$ será la coincidente con el inicio, donde se sitúa $s3_1$ y las posteriores seguirán el mismo sentido que la nomenclatura de los sensores $s3_j$. Lo mismo ocurrirá con los sensores de proximidad a la estación.

5.2.1.4 Categorización de curvas de la Línea 4

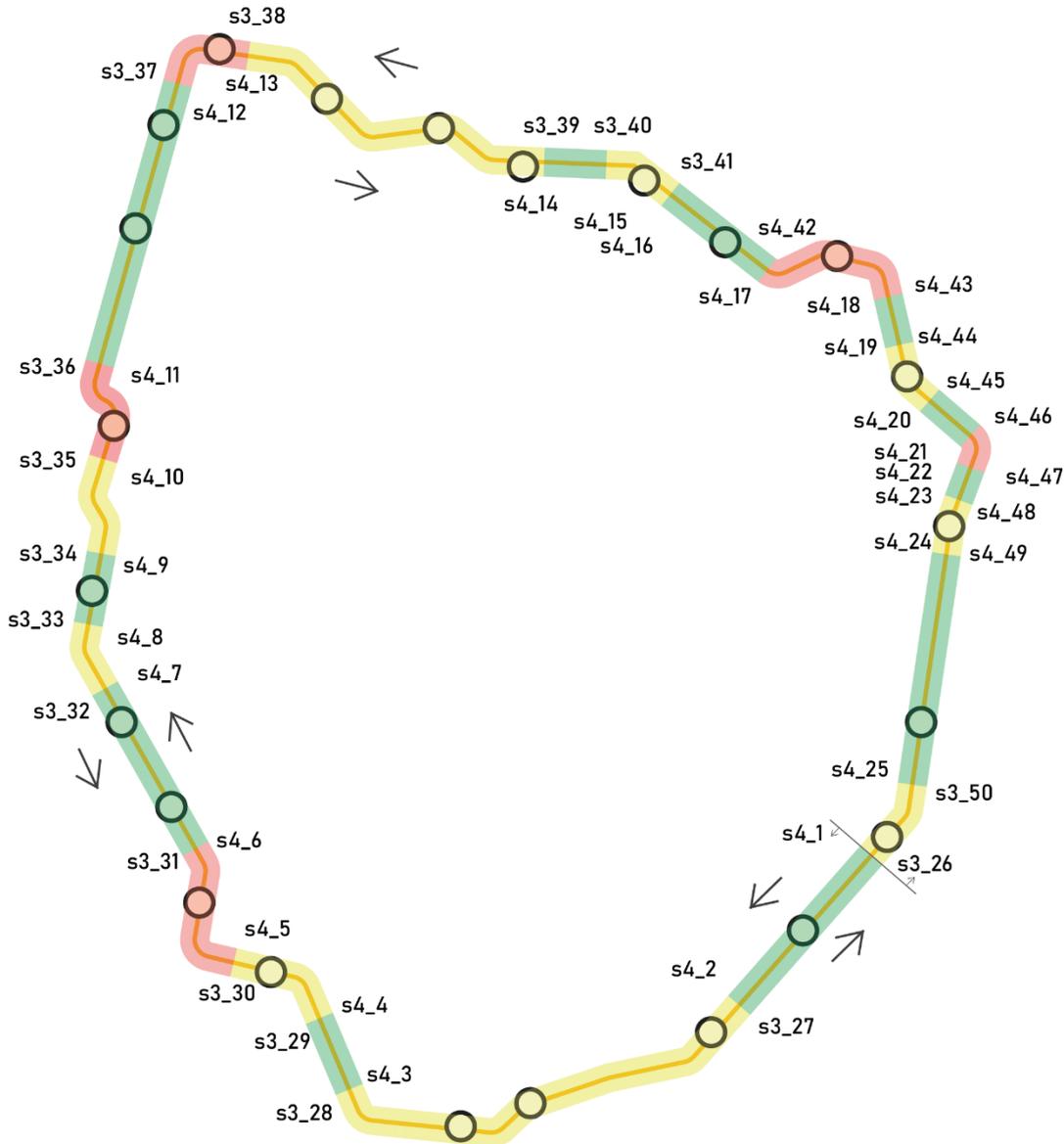


Figura 22. Categorización de las curvas de la Línea 4.

En el caso de la línea 4 circular, tendremos 25 sensores por sentido de la línea, es decir, 50 sensores en total. Reciben el nombre de $s4_j$, con j comprendida entre 1 y 50.

- Rectas: $j = 1, 3, 6, 8, 11, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 27, 29, 32, 34, 37, 40, 42, 44, 46, 48, 50$.
- Rápidas: $j = 2, 4, 7, 9, 13, 15, 19, 23, 25, 26, 28, 30, 33, 35, 39, 41, 45, 49$.
- Lentas: $j = 5, 10, 12, 17, 21, 31, 36, 38, 43, 47$

Con 23 paradas y dos sentidos por vía, la línea 4 contará con 46 sensores de contacto en la estación ($e4_j$ con j comprendida entre 1 y 46) y otros 46 sensores de acercamiento a la estación ($ec4_j$). Para un mejor entendimiento del programa, la estación $e1_1$ será la siguiente de $s4_1$ y las posteriores seguirán el mismo sentido que la nomenclatura de los sensores $s4_j$. Lo mismo ocurrirá con los sensores de proximidad a la estación.

5.3 Diseño del automatismo

Todas las líneas tienen sus peculiaridades, pero existen un conjunto de instrucciones que son comunes para todas. Estas son:

5.3.1 Dinámica del viaje

A continuación, desarrollaremos la secuencia lógica secuencial del automatismo que regula el arranque y la parada del metro. Nos centraremos en:

1. Cuando el tren está listo para arrancar

Esta instrucción comienza con la comprobación de que todas las puertas están cerradas, incluyendo las puertas dobles. Además, comprobará que la distancia con el tren de delante sea la suficiente y que no estemos aproximándonos a una nueva estación. En este momento, se activará E1, señal que indica que el tren puede acelerar de forma segura. Lo vemos en el programa *arrancar*.

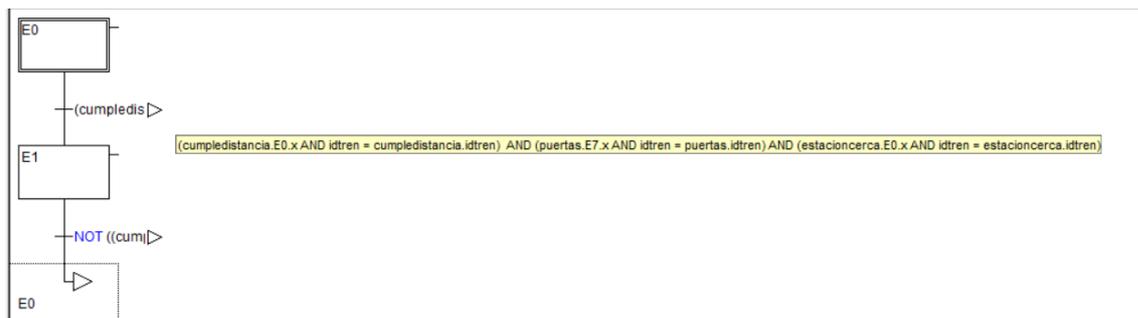


Figura 23. Secuencia del programa arrancar.

2. Dinámica del viaje

Una vez *arrancar* nos informa de que podemos arrancar, *dinámica* manipulará la velocidad del tren adecuándola a las circunstancias. Si la velocidad deseada es menor a la actual (por ejemplo, estamos en una recta y nos aproximamos a una curva) la aceleración a la que se someterá al tren será la negativa de *aceleracionsuave*, es decir, comenzará a frenar hasta la *velmax* establecida. Una vez la alcance, mantendrá la velocidad hasta que cambiemos la velocidad máxima en *velocidad* o se dejen de cumplir las condiciones para arrancar. Si la velocidad deseada es mayor a la actual (salimos de una curva y entramos en una recta) ocurrirá lo mismo, pero esta vez con *aceleracionsuave* positiva. En el caso en que las condiciones para arrancar dejen de cumplirse en una aceleración o deceleración, ya sea porque nos aproximamos a una estación o porque el siguiente tren está demasiado cerca, el programa realizará las acciones pertinentes. En el primer caso, reducirá la velocidad para hacerla 0 cuando lleguemos a la estación y, en el segundo caso, la reducirá hasta una velocidad *velseg* considerada segura hasta que la distancia entre un tren y el próximo sea segura. Si a pesar de mantenernos en una velocidad segura la separación se reduce demasiado, se procederá a una parada total hasta que el próximo tren se separe lo suficiente.

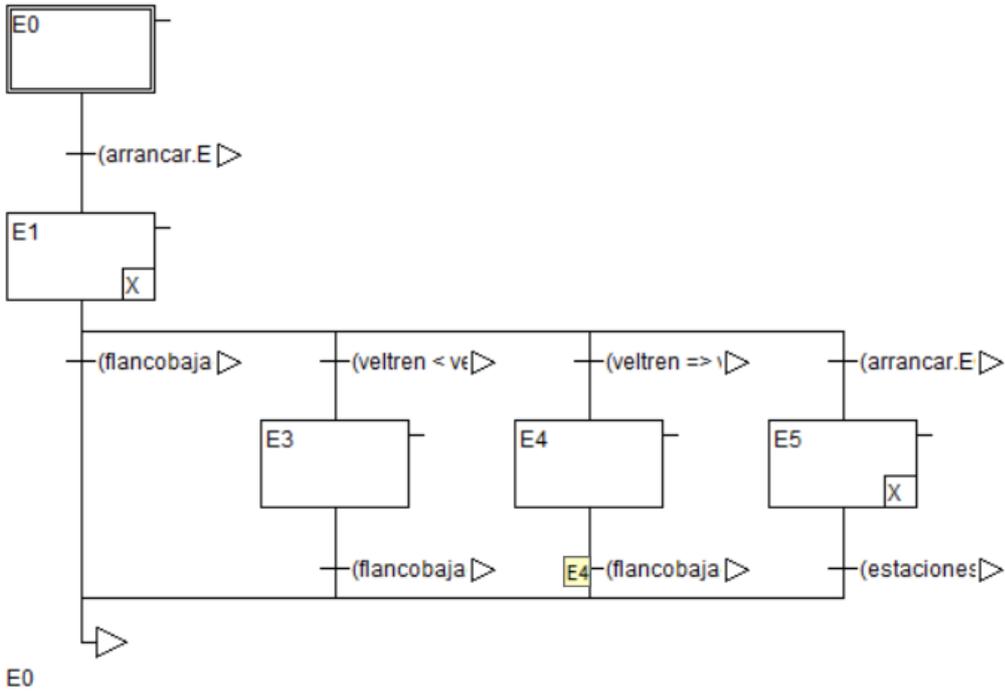


Figura 24. Secuencia del programa dinámica.

3. Velocidad

Dependiendo del punto del trazado en el que se encuentre, debido a las señales de si_j , el tren debe ajustarse a la velocidad máxima de cada trazado. Para ello se han definido zonas de velocidad y, dependiendo de cuál esté atravesando el tren, el programa *velocidad* se encontrará en E1, E2 o E3, lo cual establecerá *velmax* en diferentes vales que se tendrán en cuenta en *dinámica*.

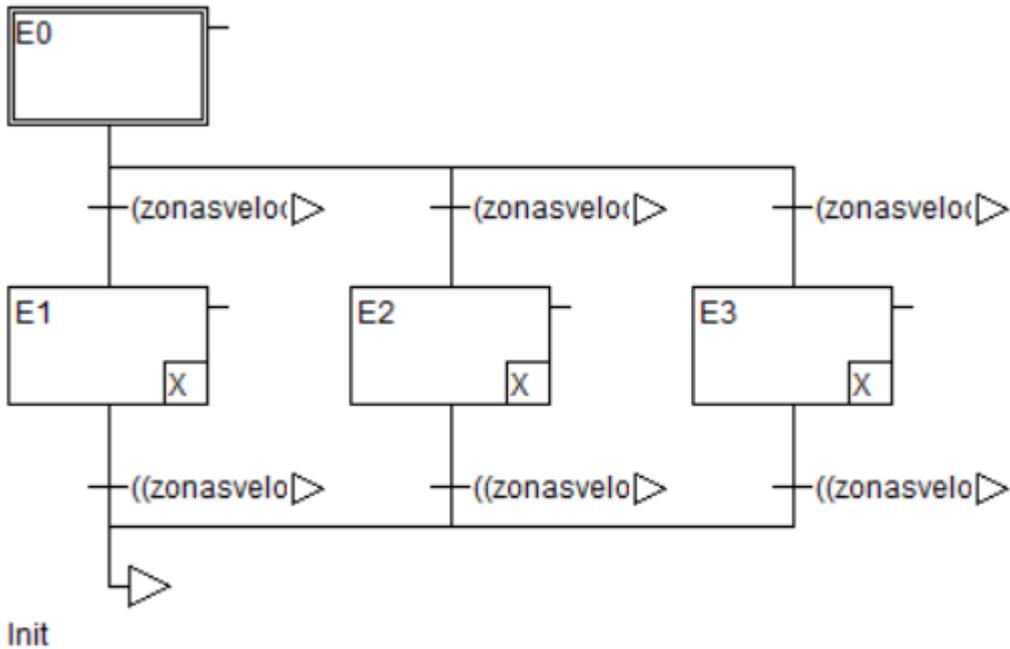


Figura 25. Secuencia del programa zonasvelocidad.

4. Control de distancia

Cumpledistancia se encargará de medir constantemente la separación entre un tren y el siguiente e informarnos de si se está cumpliendo la distancia o, por el contrario, hay que reducir la velocidad de alguno de los trenes. Esta información será utilizada por *dinámica*, que ajustará la velocidad o incluso la hará cero si se supera un umbral de seguridad.

5.3.2 Apertura de puertas

Se trata de la secuencia mediante la cual, tras detenerse completamente el tren, se abren y se cierran las puertas permitiendo la salida y el paso de los usuarios.

5.3.3 Control de movimientos y aglomeraciones

El sistema debe ser capaz de detectar aglomeraciones para notificar al servicio de seguridad o para valorar la necesidad de aumentar puntualmente la frecuencia de una línea. Para ello, habrá un contador de personas en cada andén. Una forma de calcular si debemos bajar o subir la frecuencia de una línea es hacer la media de pasajeros esperando a su tren. Otro criterio para tomar esta decisión podría ser que alguna de las estaciones estuviese muy saturada. Para simplificar la programación, asumiremos que todas las estaciones tienen el mismo aforo, *aforomax*. También se asume que la red siempre dispondrá de trenes para mantener las estaciones sin saturar.

5.3.4 Modos de funcionamiento. Oferta manual

Podemos establecer diferentes modos de funcionamiento:

1. Funcionamiento normal
2. Funcionamiento nocturno
3. Alta demanda general
4. Alta demanda de una línea

En este sentido, el punto 4 es de vital importancia para mantener un buen funcionamiento de la red cuando ocurran eventos multitudinarios que requieran de una alta oferta, como los rutinarios partidos en el Sánchez Pizjuan o en el Benito Villamarín, que saturarán las paradas de Heliópolis y de Nervión, lo que haría necesario multiplicar el número de metros de las líneas 1 o 3 en horario de partido cada fin de semana.

Lo único que nos dirá esta instrucción será el número de trenes en cada línea, lo cual depende múltiples factores como los ya comentados eventos multitudinarios, o factores de distribución de la población en la ciudad que quedan fuera del estudio de este trabajo.

5.3.5 Salida de nuevos trenes

Si el número de trenes en una línea es menor que el demandado, en cuanto el último tren que haya salido de cochera haya superado una distancia determinada, deberá salir otro nuevo. Esto deberá gestionarse desde las cocheras. El sistema automático deberá informar en cada momento de cuantos trenes hacen falta en cada línea. Esto se hace mediante *demanda1*, *demanda2*, *demanda3*, *demanda4*.

5.3.6 Situaciones de emergencia

Se interpretarán las señales de emergencia para actuar en consecuencia. Algunas de estas señales de emergencia pueden ser:

1. Pulsadores de emergencia del interior del tren
2. Pulsadores de emergencia de una estación
3. Detección de humo
4. Detección de peso excesivo
5. Detección de descarrilamiento
6. Detección de personas en la vía

El funcionamiento de las líneas, de acuerdo con lo descrito anteriormente y con la programación en CoDeSys será el siguiente:

- La instrucción *arrancar* verificará las condiciones que sean necesarias para informar de que un tren, en inicio y en cada parada, cumple las condiciones para ponerse en marcha. Una vez las cumpla pasará al estado E1, que leerán los demás programas para ejecutar las instrucciones requeridas para cuando el tren pueda estar en marcha.
- En todo momento estará *cumpledistancia* midiendo la distancia entre un tren y el de delante. Se han definido diferentes distancias: *distmin*, que establece la separación entre dos trenes para que puedan funcionar uno independiente del otro de forma segura, y *discrit* que define la distancia mínima que puede haber entre 2 trenes antes de poner en riesgo la seguridad del sistema y los usuarios. De esta forma, superada *distmin* el tren reducirá su velocidad hasta una velocidad segura, *veladm3* de 50km/h. Si tras haber disminuido la velocidad, la distancia entre un tren y el de delante se reduce hasta *discrit*, el sistema deberá frenar el tren hasta 0, hasta que se reestablezca de nuevo la distancia de seguridad. Todo esto es ejecutado por el programa *dinámica*, que recibe la información de *cumpledistancia*.
- Al igual que *cumpledistancia*, *estacioncerca* se ejecutará constantemente para comprobar si nos estamos aproximando a una estación. Se activará con la activación de cualquier señal *eci_j*, con *i* siendo la línea y *j* el identificador de la parada. Y se desactivará una vez lleguemos a una estación, verificado con *contactoestación*.
- El programa encargado de controlar el tren en movimiento es *dinámica*. Al recibir por parte de *arrancar* que el tren está en condiciones de arrancar, comenzará a aumentar la velocidad deseada del tren hasta uno de los siguientes casos:
 - El programa *velocidad* nos informa de que hemos entrado a una nueva zona de velocidad, por la que la velocidad máxima del tren debe modificarse. Pasamos de nuevo a la etapa inicial, desde la cual nos moveremos entre aceleración y deceleración en función de si la velocidad deseada es mayor o menor que la actual.
 - La velocidad actual es mayor que la deseada. En este caso, la aceleración es negativa y se modifica la velocidad en E1. Una vez la velocidad del tren es menor que la máxima, pasamos un nuevo estado E3 en el que mantenemos constante la velocidad hasta que cambiemos el modo de velocidad o, de nuevo, *arrancar* nos informe de que el tren no puede estar en marcha.

- La velocidad actual es menor que la deseada. En este caso, la aceleración es positiva y se modifica la velocidad en E1. Una vez el tren alcanza la velocidad máxima, pasamos un nuevo estado E4 en el que mantenemos constante la velocidad hasta que cambiemos el modo de velocidad o, de nuevo, *arrancar* nos informe de que el tren no puede estar en marcha.
- Por último, si durante la aceleración o deceleración del tren *arrancar* nos informa de que hay que parar, el programa entrará en E5 que hará al tren comportarse de una manera diferente:
 - Si el motivo para parar es la proximidad de una nueva estación, el sistema se encargará de calcular la distancia hasta la estación y modificar la velocidad de manera progresiva hasta llegar a la parada en condiciones de frenar por completo.
 - Si el motivo es la aproximación a otro tren, como ya está descrito, se reducirá la velocidad y, si se acerca demasiado, se frenará por completo el tren hasta que se reestablezca una separación mínima.
- *Estaciones* cumple la función de detectar la aproximación y la llegada a cualquier estación. Con la activación de *eci_j*, activará la señal *contactoestacion* que será utilizada por *estacioncerca* para ejecutar el automatismo correctamente. Lo mismo ocurrirá con los sensores *ei_j*, que informarán a *estacioncerca* de la llegada a una estación con la señal *contactoestacion*.
- *Zonasvelocidad* se encarga de detectar el paso de los trenes por los diferentes sensores que indican el paso del tren hacia una nueva zona con un nuevo límite de velocidad. Como ya se ha descrito, estos tramos están divididos en 3 velocidades diferentes: recta, rápido o lento. Con la activación de *recta*, *rápida* o *lenta*, *dinámica* se encargará de reestablecer los límites de velocidad y modificar la velocidad de los trenes.
- Por último contamos con el programa *puertas*, con las instrucciones necesarias para abrir y cerrar las puertas de los trenes una vez han llegado a la estación.

Todos los trenes deben poder ser operados también de forma manual. Dependiendo del modelo utilizado, pueden incorporar una cabina de mandos desde los que controlar el tren, o pueden ser controlados remotamente desde un centro de control.

Este automatismo es solamente un ejemplo de cómo podría ser la automatización de una línea de metro. Existen multitud de fabricantes, marcas y modelos que pueden automatizar una red de metro de forma diferente, pero el resultado siempre debe ser el mismo: una gestión eficiente y segura de la red. A partir del modelo básico de la automatización de las líneas, vamos a conocer los diferentes componentes de una línea automatizada real, junto con su presupuesto.

El funcionamiento del programa principal (PLC_PRG) para la regulación de la dinámica de los trenes y de la demanda de los mismos se resume en la siguiente figura:

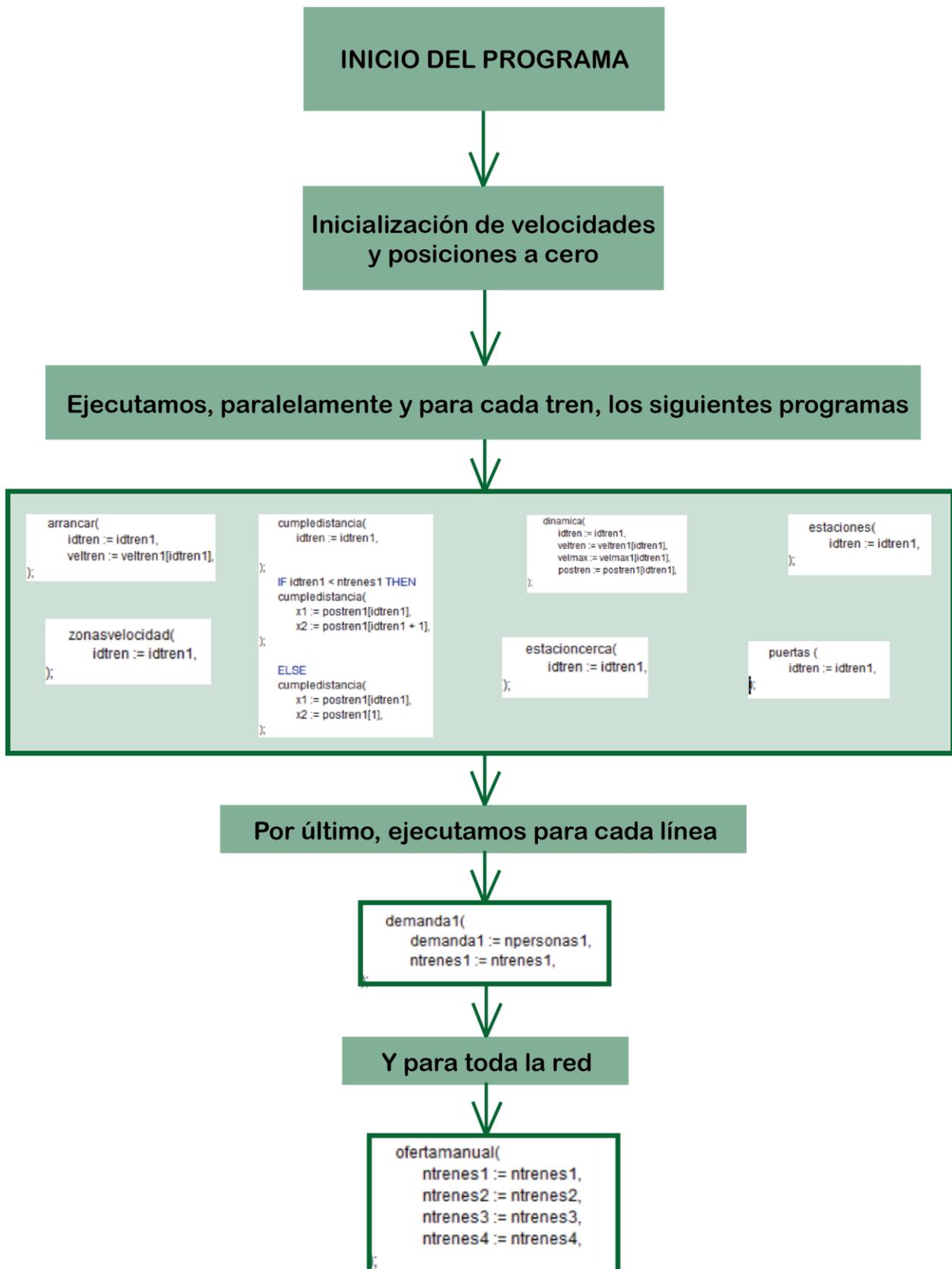


Figura 26. Cuadro resumen del funcionamiento del programa principal

6 PRESUPUESTO DE LA AUTOMATIZACIÓN

6.1 Inversión de capital

6.1.1 Línea 1. Ciudad Expo – Olivar de Quinto

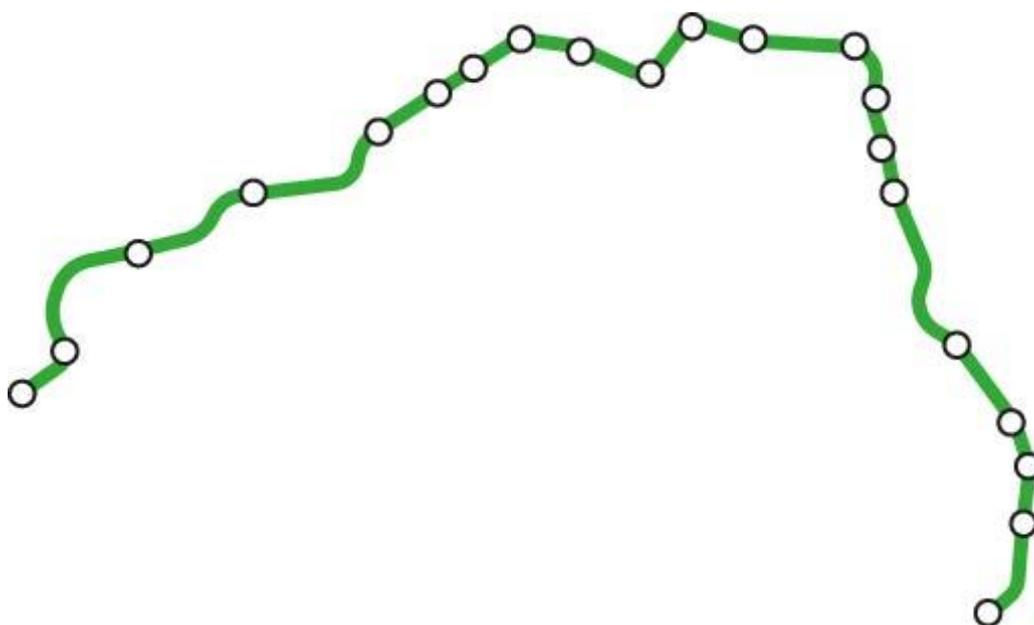


Figura 27. Trazado de la Línea 1.

La única línea de metro en activo de la ciudad, que cuenta con un total de 21 estaciones activas (Guadaíra todavía no está operativa), 7 de ellas en superficie y recorre aproximadamente 18 kilómetros de longitud. Fue inaugurada en 2009 y desde entonces ha sido una parte vital del sistema de transporte público de la ciudad, facilitando la movilidad 14 millones de pasajeros al año actualmente y se estima que beneficia a 227974 habitantes, de acuerdo con la información de la Junta de Andalucía. Su frecuencia en hora punta es de 4 minutos, cuenta con 50 conductores y 17 trenes y genera en torno a 300 empleos. La Línea 1 conecta importantes puntos de interés y áreas residenciales de Sevilla, incluyendo el centro histórico, la estación de tren de San Bernardo o el centro comercial y de negocios de Nervión. Su inversión fue, de acuerdo con los datos oficiales, de en torno a 600 millones de euros.

Su recorrido es el siguiente:

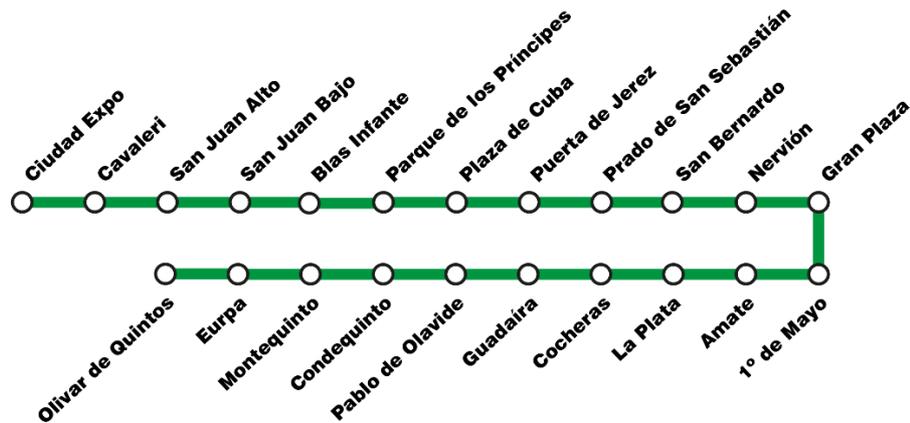


Figura 28. Recorrido de la Línea 1.

En resumen, los factores que afectan al coste inicial de la implantación de la automatización de la línea 1 son los siguientes:

Número de estaciones: 22 (contando con la estación de Guadaíra, que estará operativa en un futuro).

Longitud de la vía: 18 kilómetros.

Para el funcionamiento del automatismo de la línea 1, podría hacerse uso del programa explicado en el apartado 5.3. Para su implementación, necesitamos del hardware descrito en el capítulo 5.

Con estos datos, el coste inicial de la automatización de la línea 1 sería el siguiente:

LÍNEA 1. PRESUPUESTO					
DATOS					
Longitud (km) :	18				
Estaciones:	22				
Trenes	20	(estimación)			
1. Control y gestión					
Sistemas de control y gestión		Coste (€ / km)	Coste (€ / estación)	Coste (€ / tren)	Coste en la línea
Balizas		45000			810000
Sensores		10000		25000	680000
Ordenadores a bordo				60000	1200000
Sistemas SCADA					0
Hardware supervisión Punto 7.					0
Software SCADA Punto 7.					0
Dispositivos de campo		20000			360000
Centro de control					0
Interfaz Hombre - Máquina Punto 7.					0
2. Sistemas de señalización					
CBTC		16000			288000
Señalización en cabina				90000	1800000
3. Comunicaciones					
					0

Fibra óptica	9000		162000
Comunicación inalámbrica	3500		63000
Equipos de telecomunicaciones	4000		72000
Dispositivos a bordo		12000	240000
4. Sensores y actuadores			0
De proximidad	1500	3000	87000
De detección	5000	3000	150000
Actuadores	4000	8000	232000
5. Seguridad			0
Videovigilancia inteligente	10000	20000	620000
Detección de intrusiones	8000	3500	221000
Sistemas de alerta	5000	4000	178000
6. Integración de sistemas			
Software de integración	Punto 7.		
Consultoría e ingeniería	Punto 7.		
7. Costes compartidos con otras líneas	Coste total		Coste proporcional
Hardware SCADA			0
Software SCADA	100000		25000
Interfaz Hombre - Máquina	700000		175000
Licencia videovigilancia	5000		1250
Software de integración	50000		12500
Consultoría e ingeniería	300000		75000
COSTE AUTOMATIZACIÓN			7451750

6.1.2 Línea 2 Torreblanca – Torre Triana

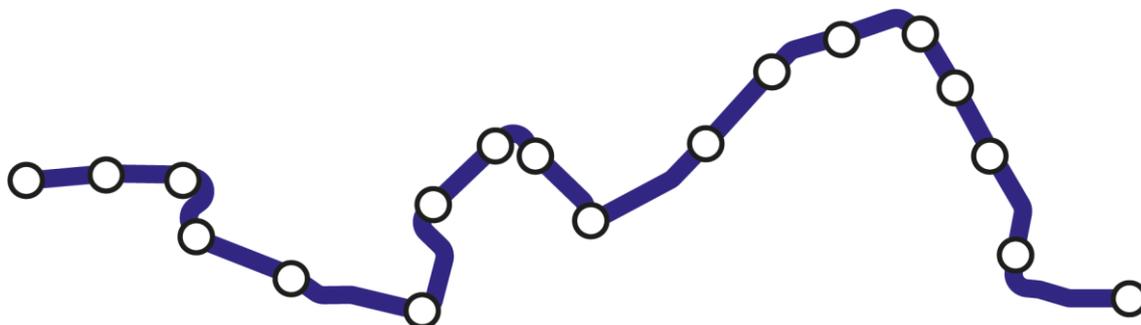
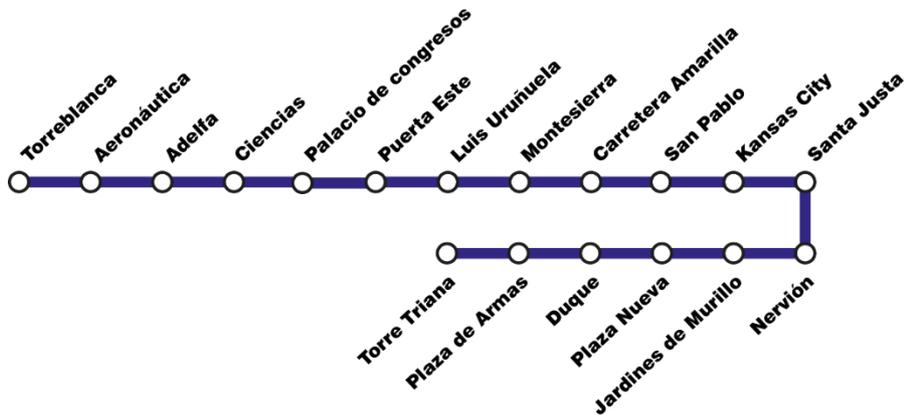


Figura 29. Trazado de la Línea 2.

La Línea 2 del Metro de Sevilla está diseñada para conectar los barrios de La Cartuja y Torreblanca, abarcando una longitud de 13.57 km y 18 estaciones. La ruta incluirá tramos subterráneos, a nivel de calle y elevados. Las estaciones notables en la línea incluyen Torre Triana, Plaza de Armas, Santa Justa, y el Palacio de Congresos. La línea no tendrá conexión directa con la Línea 1, pero se integrará con las futuras líneas 3 y 4. Se estima que servirá a unos 19.6 millones de pasajeros anuales y costará entre 1032 y 1233 millones de euros.

Su recorrido es el siguiente:

*Figura 30. Recorrido de la Línea 2.*

En resumen, los factores que afectan al coste inicial de la implantación de la automatización de la línea 2 son los siguientes:

Número de estaciones: 18.

Longitud de la vía: 13.57 kilómetros.

Para el funcionamiento del automatismo de la línea 2, podría hacerse uso del programa explicado en el apartado 5.3. Para su implementación, necesitamos del hardware descrito en el capítulo 5.

Con estos datos, el coste inicial de la automatización de la línea 2 sería el siguiente:

LÍNEA 2. PRESUPUESTO				
DATOS				
Longitud (km) :	13,57			
Estaciones:	18			
Trenes	20 (estimación)			
1. Control y gestión				
Sistemas de control y gestión	Coste (€ / km)	Coste (€ / estación)	Coste (€ / tren)	Coste en la línea
Balizas	45000			610650
Sensores	10000		25000	635700
Ordenadores a bordo			60000	1200000
Sistemas SCADA				0
Hardware supervisión Punto 7.				0
Software SCADA Punto 7.				0
Dispositivos de campo	40000			542800
Centro de control				0
Interfaz Hombre - Máquina Punto 7.				0
2. Sistemas de señalización				
CBTC	16000			217120
Señalización en cabina			90000	1800000
3. Comunicaciones				
Fibra óptica	9000			122130
Comunicación inalámbrica	3500			47495
Equipos de telecomunicaciones	4000			54280
Dispositivos a bordo			12000	240000
4. Sensores y actuadores				
De proximidad	1500		3000	80355
De detección	5000		3000	127850
Actuadores	4000		8000	214280
5. Seguridad				
Videovigilancia inteligente	10000	20000		495700
Detección de intrusiones	8000	3500		171560

Sistemas de alerta	5000	4000	139850
6. Integración de sistemas			
Software de integración	Punto 7.		
Consultoría e ingeniería	Punto 7.		
7. Costes compartidos con otras líneas	Coste total		Coste proporcional
Hardware SCADA	0		0
Software SCADA	250000		62500
Interfaz Hombre - Máquina	700000		175000
Licencia videovigilancia	5000		1250
Software de integración	50000		12500
Consultoría e ingeniería	300000		75000
COSTE AUTOMATIZACIÓN			6717120

6.1.3 Línea 3. Pino Montano – Los Bermejales

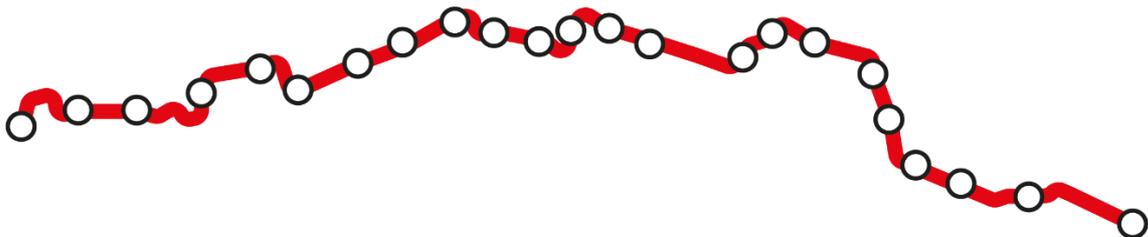


Figura 31. Trazado de la Línea 3.

La Línea 3 del Metro de Sevilla, actualmente en construcción, abarcará 11,5 kilómetros y contará con 18 estaciones, conectando el barrio de Pino Montano en el norte con Los Bermejales en el sur. La mayoría del trayecto será subterráneo, lo que minimizará el impacto en la superficie y preservará la infraestructura existente.

El tramo norte de la línea, que ya ha comenzado a construirse, se extenderá desde Pino Montano hasta Prado de San Sebastián. Este segmento incluirá 12 estaciones, de las cuales 11 serán subterráneas y una en superficie, cubriendo una longitud de 7,55 kilómetros. Este tramo inicial servirá a una población de alrededor de 120,000 residentes, mejorando el acceso a hospitales, centros culturales, universidades y tribunales, y facilitando la conexión con la Línea 1 del metro en Prado de San Sebastián.

El costo total estimado para la construcción de la Línea 3 es de 1,3 mil millones de euros, con el gobierno español cubriendo el 50% de este costo mediante un acuerdo firmado con la Junta de Andalucía.

Su recorrido es el siguiente:

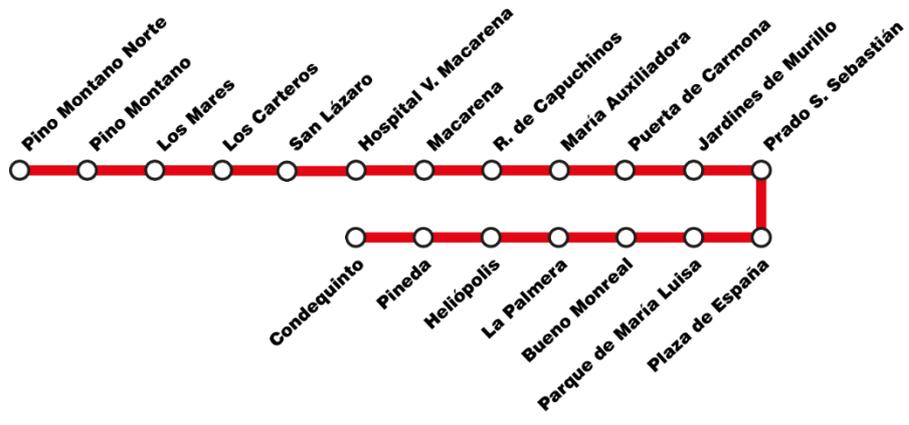


Figura 32. Recorrido de la Línea 3.

En resumen, los factores que afectan al coste inicial de la implantación de la automatización de la línea 3 son los siguientes:

Número de estaciones: 18.

Longitud de la vía: 11.5 kilómetros.

Para el funcionamiento del automatismo de la línea 3, podría hacerse uso del programa explicado en el apartado 5.3. Para su implementación, necesitamos del hardware descrito en el capítulo 5.

Con estos datos, el coste inicial de la automatización de la línea 3 sería el siguiente:

LÍNEA 3. PRESUPUESTO					
DATOS					
Longitud (km) :	11,5				
Estaciones:	18				
Trenes	20 (estimación)				
1. Control y gestión					
Sistemas de control y gestión		Coste (€ / km)	Coste (€ / estación)	Coste (€ / tren)	Coste en la línea
Balizas		45000			517500
Sensores		10000		25000	615000
Ordenadores a bordo				60000	1200000
Sistemas SCADA					0
Hardware supervisión	Punto 7.				0
Software SCADA	Punto 7.				0
Dispositivos de campo		40000			460000
Centro de control					0
Interfaz Hombre -	Punto 7.				0

Máquina			
2. Sistemas de señalización			0
CBTC	16000		184000
Señalización en cabina		90000	1800000
3. Comunicaciones			0
Fibra óptica	9000		103500
Comunicación inalámbrica	3500		40250
Equipos de telecomunicaciones	4000		46000
Dispositivos a bordo		12000	240000
4. Sensores y actuadores			0
De proximidad	1500	3000	77250
De detección	5000	3000	117500
Actuadores	4000	8000	206000
5. Seguridad			0
Videovigilancia inteligente	10000	20000	475000
Detección de intrusiones	8000	3500	155000
Sistemas de alerta	5000	4000	129500
6. Integración de sistemas			
Software de integración	Punto 7.		
Consultoría e ingeniería	Punto 7.		
7. Costes compartidos con otras líneas	Coste total		Coste proporcional
Hardware SCADA	0		0
Software SCADA	250000		62500
Interfaz Hombre - Máquina	700000		175000
Licencia videovigilancia	5000		1250
Software de integración	50000		12500
Consultoría e ingeniería	300000		75000
COSTE AUTOMATIZACIÓN			6425250

6.1.4 Línea 4. Circular

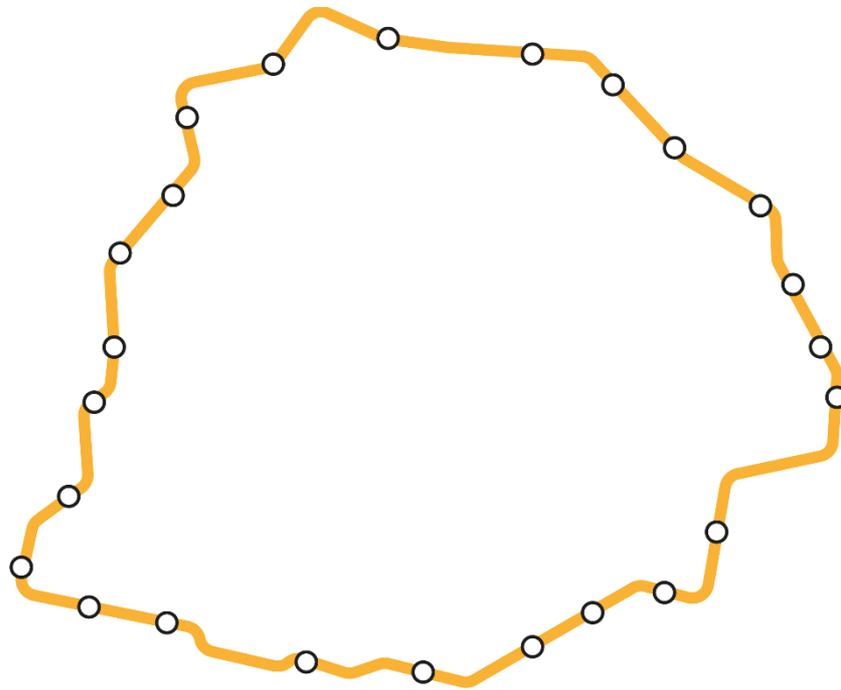


Figura 33. Trazado de la Línea 4.

La Línea 4 del Metro de Sevilla está diseñada para completar la red de metro de la ciudad con una línea circular. Con una longitud de 17,7 kilómetros y 24 estaciones, esta línea conectará importantes zonas como Cartuja, Tamarguillo y Reina Mercedes, facilitando el acceso y la movilidad entre diferentes partes de la ciudad. Además, esta línea permitirá una mejor interconexión con las otras tres líneas de metro, mejorando la eficiencia del sistema de transporte urbano.

Se espera que esta línea juegue un papel crucial en la integración de diversas áreas de la ciudad, proporcionando una opción de transporte rápida y eficiente para los residentes y visitantes. La línea incluirá tanto tramos subterráneos como de superficie, asegurando una mínima interrupción en la infraestructura existente y maximizando la accesibilidad a áreas clave de Sevilla. El costo estimado del proyecto es de unos 1000 millones de euros.

Su recorrido es el siguiente:



Figura 34. Recorrido de la Línea 4.

En resumen, los factores que afectan al coste inicial de la implantación de la automatización de la línea 4 son los siguientes:

Número de estaciones: 24.

Longitud de la vía: 17.7 kilómetros.

Para el funcionamiento del automatismo de la línea 4, podría hacerse uso del programa explicado en el apartado 5.3. Para su implementación, necesitamos del hardware descrito en el capítulo 5.

Con estos datos, el coste inicial de la automatización de la línea 4 sería el siguiente:

LÍNEA 4. PRESUPUESTO					
DATOS					
Longitud (km) :	17,7				
Estaciones:	24				
Trenes	20 (estimación)				
1. Control y gestión					
Sistemas de control y gestión		Coste (€ / km)	Coste (€ / estación)	Coste (€ / tren)	Coste en la línea
Balizas		45000			796500
Sensores		10000		25000	677000
Ordenadores a bordo				60000	1200000
Sistemas SCADA					0
Hardware supervisión	Punto 7.				0
Software SCADA	Punto 7.				0
Dispositivos de campo		40000			708000
Centro de control					0

Interfaz Hombre - Máquina	Punto 7.		0
2. Sistemas de señalización			0
CBTC	16000		283200
Señalización en cabina		90000	1800000
3. Comunicaciones			0
Fibra óptica	9000		159300
Comunicación inalámbrica	3500		61950
Equipos de telecomunicaciones	4000		70800
Dispositivos a bordo		12000	240000
4. Sensores y actuadores			0
De proximidad	1500	3000	86550
De detección	5000	3000	148500
Actuadores	4000	8000	230800
5. Seguridad			0
Videovigilancia inteligente	10000	20000	657000
Detección de intrusiones	8000	3500	225600
Sistemas de alerta	5000	4000	184500
6. Integración de sistemas			
Software de integración	Punto 7.		
Consultoría e ingeniería	Punto 7.		
7. Costes compartidos con otras líneas	Coste total		Coste proporcional
Hardware SCADA	0		0
Software SCADA	250000		62500
Interfaz Hombre - Máquina	700000		175000
Licencia videovigilancia	5000		1250
Software de integración	50000		12500
Consultoría e ingeniería	300000		75000
COSTE AUTOMATIZACIÓN			7464450

6.1.5 Inversión en los trenes.

El número de trenes aproximados con los que contaría la red de Metro de Sevilla, una vez comiencen a funcionar las 4 líneas, depende de algunos factores como la demanda. No obstante podemos estimar que en total la flota estará formada por 80 metros, 20 por línea, que se deberían distribuir entre las líneas de forma automática si, finalmente, se decide automatizar la red. Evidentemente el coste de un tren es considerablemente mayor a lo que vemos en los presupuestos. En este trabajo se recoge únicamente el gasto atribuible a la automatización, es decir, se trata de una estimación del coste de transformar un tren convencional en automático, o en la diferencia de precio entre la adquisición de un tren automático y otro convencional. En la práctica, los trenes automáticos suelen estar dotados de tecnología puntera en todos los sentidos, no solo en automatización, por lo que su precio final suele ser incluso más alto de lo estipulado en el presupuesto.

6.1.6 Inversión en formación

Para dar el salto a la automatización completa de la red de metro, en primer lugar, sería necesaria la formación del personal de la línea 1 para adaptarse a las nuevas necesidades. Es necesario tener esto en cuenta, pero, a nivel presupuestario, el porcentaje de la partida destinada a tal efecto sería muy baja, por lo que no será considerado en el presupuesto. Además, esta formación específica solo sería necesaria para la plantilla actual, en el caso de que las nuevas líneas (la 2, 3 y 4) se planifiquen como automáticas desde su construcción. Los nuevos trabajadores recibirán desde un primer momento formación en relación con el metro automático, por lo que su anterior formación será sustituida por otra, sin suponer un coste extra para la administración.

6.1.7 Resumen de inversión de capital

AUTOMATIZACIÓN DEL METRO DE SEVILLA PRESUPUESTO - CUADRO RESUMEN				
Desglose de costes		Kilómetros de vía	Número de estaciones	Número de trenes
Control y gestión	12157750	60,77	82	80
Sistema de señalización	8172320			
Comunicaciones	1962705			
Sensores y actuadores	1758085			
Seguridad	3657710			
Integración de sistemas	350000			
COSTE AUTOMATIZACIÓN RED	28.058.570,00 €			
			<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;"> Coste por kilómetro de red 461.717,46 € </div>	

Es importante entender que en esta tabla únicamente se ven reflejados los gastos atribuibles a automatizar la línea, ya sea desde cero o partiendo de otra convencional. El coste exacto puede variar en función de la infraestructura ya existente como, por ejemplo, muchos de los sensores con los que se ha contado para el presupuesto. En definitiva, hay que entender los 28058570€ como una estimación para entender el orden de magnitud del coste de automatizar la red.

Según los datos de la junta, fueron 600 millones los que se gastaron en la construcción de la línea 1, aunque algunas fuentes apuntan a sobrecostes en las obras que aumentaron el gasto hasta los 900 millones de euros. Tomando en consideración estas cifras y poniéndolas en una balanza, podemos apreciar que el coste de automatizar una línea de metro es realmente bajo. Tan solo 7.5 millones en automatizar la línea 1 frente a los 600 que costó.

6.2 Costes Operativos

Los costes operativos son más difíciles de cuantificar con exactitud. Entre otros factores, entra en juego cuánta importancia tiene para la administración prescindir de ciertos puestos de trabajo para sustituir la labor humana por máquinas. Si con tal de automatizar el metro destruimos oportunidades para la población sevillana, algo estamos haciendo mal. Es por eso que, con casi total certeza, el personal ya contratado que trabaje para el metro cuya labor pueda ser sustituida por un programa, será reinsertado de otra forma en el metro, manteniendo su sueldo y condiciones. Asimismo, habría que replantear desde cero las necesidades laborales para las nuevas líneas automáticas, favoreciendo la incorporación de gestores de la red en lugar de favorecer puestos de control manual y maquinistas.

El Metro de Sevilla emplea alrededor de 150 personas, distribuidas en funciones clave para su operación y mantenimiento. El equipo incluye conductores para emergencias, personal de control que gestiona el tráfico desde el centro de control, y técnicos de mantenimiento que se encargan de los trenes y la infraestructura. La seguridad está garantizada por personal en estaciones y trenes, así como operadores de videovigilancia. Además, el personal administrativo y de servicio al cliente podría dedicarse a gestionar tareas financieras y brindar asistencia a los pasajeros. Ingenieros y planificadores trabajarían en la mejora y expansión del sistema.

Los puestos de trabajo más afectados serían los de los maquinistas, que deberían ser reintroducidos en puestos de control del metro en lugar de estar físicamente en ellos. Poder prescindir de la necesidad de una persona física en el metro permite mayor maniobrabilidad y flexibilidad horaria, permitiendo ajustar la frecuencia en función solo de la demanda y no de la disponibilidad horaria de maquinistas.

6.2.1 Ahorro en costes operativos

La red conseguiría ahorros de hasta un 30% en comparación con líneas convencionales gracias al incremento en los ingresos, optimización laboral y ahorro de energía, tal y como se puede observar en redes ya automatizadas. La mayor disponibilidad y fiabilidad de las líneas incrementaría las ventas y la fidelidad del cliente. La operación sería más eficiente, reduciendo los costos por kilómetro entorno al 30% mediante la optimización de la flota y la reducción de movimientos innecesarios. La organización sería más eficiente, ya que no dependería de la disponibilidad de conductores. Además, el coste de mantenimiento de las líneas automatizadas no es necesariamente más alto que los de las líneas convencionales. Los componentes críticos en gastos de soporte y mantenimiento son prácticamente los mismos que en una línea convencional, con la diferencia de que en una línea con la última tecnología en automatización la tarea de mantenimiento estaría monitorizada de forma óptima.

7 CONCLUSIONES

El metro de Sevilla, planificado desde las décadas de 1960 a 1980 para enfrentar la congestión del tráfico y el crecimiento poblacional, comenzó su construcción oficial en 1999. Inaugurado el 2 de abril de 2009, enfrentó problemas iniciales que incluyeron filtraciones y daños estructurales, lo que llevó a una suspensión de casi 20 años. Desde su apertura, ha mejorado la movilidad urbana, reducido emisiones de CO2 y cambiado hábitos de transporte. Actualmente, es evidente la necesidad de expandir y automatizar la red para mejorar la eficiencia y reducir costes operativos.

A lo largo de este trabajo hemos visto numerosos argumentos a favor de la automatización. Por un lado, se trata de una labor técnicamente viable, puesto que ya contamos con el ejemplo de otras ciudades que, sin demasiada dificultad, demuestran lo factible que es automatizar las líneas de metro. Por otro, también hay que dar importancia a la mejora del confort de los viajeros y a la optimización del servicio, que aseguraría una oferta ajustada a la demanda en cada momento y un servicio más fiable y asequible. Además, como hemos visto, no se trata de una inversión grande, y los costes operativos no son mayores en una línea automática que en una línea convencional.

Uno de los aspectos que más preocupa a la población sobre la automatización del metro es la destrucción de puestos de trabajo que hipotéticamente serían sustituidos por máquinas. En primer lugar, la automatización conllevaría una reasignación de roles, en la cual los maquinistas podrían ser reentrenados para, por ejemplo, desempeñar funciones de supervisión, mantenimiento o atención al cliente. Asimismo, el aumento de la demanda consecuente de una mejora del servicio conllevaría, inevitablemente, creación de puestos de empleo y, si esta demanda se sabe aprovechar al máximo, el metro se podría convertir en un agente económico con una gran masa de empleo como podemos ver en otras ciudades. No solo preservamos los empleos existentes, sino que también podemos crear nuevas oportunidades en diversas áreas. En definitiva, al automatizar las tareas repetitivas que los humanos realizábamos hasta ahora, el personal se puede centrar en tareas más críticas y de mayor valor añadido, mejorando tanto la seguridad como la satisfacción laboral.

8 REFERENCIAS

- Alpañés, J. L. de J. (n.d.). Historia del Metro de Sevilla. Recuperado de https://www.rasc.es/assets/el_metro_de_sevilla.pdf
- Consejería de Obras Públicas y Transportes. (n.d.). Metro de Sevilla. Junta de Andalucía. Recuperado de <https://www.juntadeandalucia.es/html/especiales/especialmetro-sevilla/inauguracion.html>
- Diario de Sevilla. (2013). Sevilla reduce 22.700 toneladas de emisiones de CO2. Recuperado de https://www.diariodesevilla.es/sevilla/Sevilla-reduce-toneladas-emisiones-CO2_0_736726968.html
- Vía Libre. (2008). El metro de Nuremberg, el primer metro automático que comparte vía con uno convencional. Recuperado de <https://www.vialibreffe.com/noticias.asp?not=2357#:~:text=El%20metro%20de%20Nuremberg%2C%20el,comparte%20v%C3%ADa%20con%20uno%20convencional>
- Jiménez Sánchez, F., & Caro Fuentes, M. (2020). El Metro de Sevilla: Análisis del impacto de un gran proyecto urbano desde la perspectiva de la movilidad sostenible. Revista de Ciencia y Tecnología del Transporte. Recuperado de <https://recyt.fecyt.es/index.php/CyTET/article/download/83793/61861/276018>
- Artigas, M. (2008). Proyecto de Línea 9 del metro de Barcelona: Diseño y construcción de túneles y estaciones. Recuperado de https://www.vialibreffe.com/pdf/11271_pdf_12.pdf
- Rieles. (2020). Metro de París inaugura nuevo tren automatizado para la línea 14. Recuperado de <https://www.rieles.com/front/metro-de-paris-inaugura-nuevo-tren-automatizado-para-la-linea-14/>
- Herranz, J. (2021). Impacto de la inteligencia artificial en el control de tráfico ferroviario. Universidad Pontificia Comillas. Recuperado de <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/51270/TD00041.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- EADIC. (2024). Características de los sistemas de protección ferroviaria. Recuperado de <https://eadic.com/blog/entrada/caracteristicas-de-los-sistemas-de-proteccion-ferroviaria/>
- Railway Technology. (n.d.). Tren de alta velocidad en Turquía. Recuperado de <https://www.railway-technology.com/projects/tren/>
- Wikipedia. (n.d.). Metro automático AnsaldoBreda. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Metro_autom%C3%A1tico_AnsaldoBreda
- Fandom. (n.d.). AnsaldoBreda. Recuperado de <https://ferrocarriles.fandom.com/wiki/AnsaldoBreda>
- Change.org. (n.d.). La retirada de trenes AnsaldoBreda de las series 7000 y 9000 del Metro de Madrid. Recuperado de <https://www.change.org/p/metro-de-madrid-la-retirada-de-trenes-ansaldobreda-de-las-series-7000-y-9000-del-metro-de-madrid>
- Thales Group. (2024). El nuevo SelTracTM G8. Recuperado de <https://www.thalesgroup.com/es/el-mundo-transport-urban-mobility/signalling-solutions-urban-mobility/news/el-nuevo-seltractm-g8>
- Thales Group. (2024). Train control SelTracTM. Recuperado de <https://www.thalesgroup.com/en/markets/transport/urban-mobility/train-control-seltractm>
- Transportes Metropolitanos de Barcelona (TMB). (n.d.). ¿Qué es el metro automático?. Recuperado de <https://www.tmb.cat/es/conoce-tmb/mejoras-red-transporte/metro-automatico/que-es>
- UITP. (2024). The benefits of full metro automation. Recuperado de <https://www.uitp.org/publications/the-benefits-of-full-metro-automation/>
- Ridao Carlini, M. A. (2021). Fundamentos de CoDeSys. Editorial Universidad de Sevilla. Recuperado

de <https://www.codesys.com/>

- Junta de Andalucía. (n.d.). Línea 1 del Metro de Sevilla. Recuperado de <https://www.juntadeandalucia.es/html/especiales/especialmetro-sevilla/lineas.html>
- Técnica Vía Libre. (2024). Proyecto del Metro de Sevilla. Recuperado de https://www.tecnica-vialibre.es/documentos/Articulos/Montserrat_Artigas.pdf
- Cadena SER. (2023). Arrancan las obras de la Línea 3 del Metro de Sevilla. Recuperado de <https://cadenaser.com/andalucia/2023/02/20/arrancan-hoy-las-obras-de-la-linea-3-del-metro-catorce-anos-despues-de-la-apertura-de-la-linea-1-radio-sevilla/>
- Europa Press. (2024). Adjudicación de obras del primer subtramo de la Línea 3. Recuperado de <https://www.europapress.es/andalucia/sevilla-00357/noticia-junta-adjudica-96-millones-obras-primer-subtramo-linea-metro-sevilla-pino-montano-20240208120659.html>
- Sevilla 21. (2024). Planificación del Metro de Sevilla. Recuperado de <https://www.sevilla21.es/?p=1423>
- Railway Technology. (2024). Proyecto del Metro de Sevilla. Recuperado de <https://www.railway-technology.com/projects/seville-metro/?cf-view>
- OHLA Group. (2024). Construcción del nuevo tramo de la Línea 3 del Metro de Sevilla. Recuperado de <https://ohla-group.com/ohla-construira-un-nuevo-tramo-de-la-linea-3-del-metro-de-sevilla-por-957-millones-de-euros/>
- Red Eléctrica de España (REE). (2024). Centro de control eléctrico. Recuperado de <https://www.ree.es/es/actividades/operacion-del-sistema-electrico/centro-de-control-electrico>
- Metro de Madrid. (2024). Puesto de mando del Metro. Recuperado de <https://www.metromadrid.es/es/noticia/asi-eramos-asi-somos-el-puesto-de-mando>
- SICE. (2024). Metros y tranvías. Recuperado de <https://www.sice.com/metros-y-tranvias/>
- Metro de Sevilla. (2024). Balance anual 2021. Recuperado de <https://www.metro-sevilla.es/noticias/57>
- Junta de Andalucía. (2024). Cifras del Metro de Sevilla. Recuperado de <https://www.juntadeandalucia.es/html/especiales/especialmetro-sevilla/cifras.html>
- Boletín Oficial del Estado. (1975). Ley de Metro de Sevilla. Recuperado de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1975-22432>
- Junta de Andalucía. (2024). Presupuestos. Recuperado de <https://www.juntadeandalucia.es/organismos/economiahaciendayfondoseuropeos/areas/presupuestos.html>
- Junta de Andalucía. (n.d.). Fomento, Articulación del Territorio y Vivienda. Recuperado de <https://www.juntadeandalucia.es/organismos/fomentoarticulaciondelterritorioyvivienda.html>
- ABC Sevilla. (2010). El Metro circula casi automático. Recuperado de https://www.abc.es/sevilla/ciudad/metro-circula-casi-automatico-201007040000_noticia.html
- Transports Metropolitans de Barcelona. (n.d.). Dossier Metro automático: mayor seguridad y eficacia. Tecnología punta al servicio de las personas.
- Railway Signalling Concepts. (n.d.). Automatic train protection railway signalling equipment. Recuperado de <https://www.railwaysignallingconcepts.in/automatic-train-protection-railway-signalling-equipment/>
- IEA. (n.d.). Publicaciones del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). Recuperado de <https://www.iea.org/>
- Hanwha Vision. (n.d.). High-definition high-performance video surveillance solutions helping to keep subways safe. Recuperado de <https://hanwhavision.eu/es/high-definition-high-performance-video-surveillance-solutions-helping-to-keep-subways-safe/>

- International Association of Public Transport. (2020, June). Statistics brief: Metro automation. https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/06/Statistics-Brief-Metro-automation_final_web03.pdf

