

Sistema de transporte rápido personal compatible con infraestructura ferroviaria actual y evaluación de su potencial aplicación en el Metro de Madrid

Personal rapid transport system compatible with current railway infrastructure and evaluation of its potential application in Metro de Madrid

Rubén Oliva Domínguez¹, Miguel Fernández Muñoz¹, Ignacio Valiente Blanco¹, Efrén Díez-Jiménez¹

Resumen

El Metro de Madrid es uno de los mejores sistemas de metro en Europa en términos de velocidad de viaje, frecuencia de trenes y seguridad. A pesar de ello, la velocidad de viaje de los pasajeros está limitada por las continuas paradas necesarias en las estaciones. La velocidad media de circulación tiene un valor medido de $35,8 \pm 3,6$ km/h, excluyendo el tiempo de parada. La velocidad media de circulación, incluyendo tiempos de parada, es de $26,1 \pm 2,6$ km/h. El porcentaje de tiempo que el tren se mantiene parado puede llegar a ser del 27,27% del tiempo total de viaje. En este artículo se presenta una tecnología de transporte rápido personal novedosa, llamada OPTIMOTUSS, que podría multiplicar la velocidad de viaje total por un factor de más de 4 si se aplica a redes de metro subterráneo como el Metro de Madrid. Esta tecnología innovadora muestra un gran potencial para mejorar los tiempos de viaje en los sistemas de metro mundiales y su coste de implementación es relativamente bajo, pues los vehículos son compatibles con las infraestructuras de metro actuales.

Palabras clave

Sistema de transporte rápido personal, TRP, transporte urbano ferroviario, Metro de Madrid

Abstract

Metro de Madrid is one of the best metro systems in Europe in terms of travel speed, train frequency and safety. Despite this, the travel speed of passengers is limited by the continuous stops needed at the stations. The average driving speed has a measured value of 35.8 ± 3.6 km / h, excluding stopping time. The average driving speed, including stopping times, is 26.1 ± 2.6 km / h. The percentage of time that the train remains stopped can be 27.27% of the total travel time. This article presents a novel personal rapid transport technology, called OPTIMOTUSS, which could multiply the total travel speed by a factor of more than 4 if applied to underground metro networks such as the Metro de Madrid. This innovative technology shows great potential to improve travel times in global metro systems and its implementation cost is relatively low, as the vehicles are compatible with current metro infrastructures.

Keywords

Personal rapid transport, PRT, urban rail transport, Metro de Madrid

Recibido / received: 10/06/2021. Aceptado / accepted: 14/10/2021.

¹Área de Ingeniería Mecánica, Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad de Alcalá.

E-mails: efrén.diez@uah.es, miguel.fernandezmuno@uah.es, ruben.oliva.89@gmail.com, ignacio.valiente@uah.es



Foto: Shutterstock.

Introducción

Las redes de metro han aumentado su calidad, han mejorado su servicio y han extendido su rango en ciudades significativamente durante los últimos años, por lo que han contribuido con los objetivos medioambientales mundiales y han optimizado los sistemas de transporte públicos.

Aunque las capacidades tecnológicas ferroviarias se encuentran en mejora continua, el concepto de sistema ferroviario no ha cambiado demasiado desde los primeros viajes en ferrocarril en el siglo XIX, a pesar de las limitaciones significativas. Una desventaja principal está asociada con los tiempos de espera y los destinos predeterminados, por ejemplo, en una línea única de metro. Se puede acceder a otros destinos, pero únicamente con uno o más transbordos de una línea a otra. Dado el uso masivo y el principio de “el que llega primero se sienta”, los pasajeros pueden no encontrar un asiento ni un espacio personal para trabajar o relajarse. Además, los trenes de metro suelen circular parcialmente vacíos fuera de las horas punta, lo cual es muy ineficiente en términos de operación, energía y coste.

Para superar las limitaciones convencionales de los trenes, se han propuesto otros sistemas de transporte como los sistemas de transporte rápido personal (TRP). El TRP se define como un sistema de transporte automático en el que los vehículos se usan para transportar un grupo de personas a los destinos demandados sin paradas ni transbordos [1-3]. Estos sistemas de transporte se basan en vehículos autopropulsados, generalmente con conducción autónoma y capacidad para una o varias personas.

Entre los años 1960 y 1990, se llevaron a cabo muchos proyectos TRP [4] en Estados Unidos, Japón, Australia y Europa. Desde 2001, se ha revisado el concepto de transporte a demanda, incluyendo los TPR, a través de varios proyectos europeos como CityMobil (2009) [5] y Cybercars2 (2006) [6]. En términos de aplicaciones comerciales, los sistemas más desarrollados son SkyWeb Express (2009) [7], Vectus (2009) [8] y Mister (2009) [9], que son soluciones completas para los sistemas TRP. Además, RANA (2009), Skytran (2013) [10], JPODS (2014) [11] y Shweeb (2010) [12] presentan ideas para TRP, pero la mayoría de ellas permanecieron en la fase experimental, debido a dificultades técnicas o costos de im-

plementación excesivos. En lo que a los investigadores respecta, solo hay dos sistemas TRP en funcionamiento real: el sistema TRP de Morgantown diseñado por la Universidad de West Virginia [13], operativo desde 1975, y el aeropuerto de Londres Heathrow PRT ULTRA [14], operativo desde 2009 y utilizado para el transporte de personas desde un estacionamiento remoto hasta la terminal central.

Los TRP enumerados anteriormente poseen beneficios comunes con respecto a los sistemas de metro. Sin embargo, hay un escollo principal para su implementación final: todos necesitan infraestructuras separadas y personalizadas. Esto requiere una inversión muy elevada y la necesidad de espacio adicional, ambas dificultades significativas en las grandes ciudades de hoy en día. Por eso, la mayoría de los TRP propuestos no se han implementado más allá de un nivel experimental y únicamente dos de ellos están operativos para distancias de viaje cortas y con un impacto muy limitado en la vida de los ciudadanos. Así, se puede decir que no hay un transporte bajo demanda ni ventajas de operación en infraestructura separada y compatible con las existentes.

Recientemente, se ha propuesto un sistema TRP con características únicas, llamado OPTIMOTUSS, que actualmente está patentado [15]. OPTIMOTUSS posee la versatilidad y la alta velocidad de desplazamiento de un TRP a la vez que es compatible con las infraestructuras actuales. Si una red de metro adoptara la tecnología vehicular OPTIMOTUSS, podría reducir los tiempos de viaje de trenes urbanos en un factor de más de cuatro. Además, la implementación final sería más factible, ya que no necesita una nueva y costosa infraestructura.

En este artículo se presenta la descripción de esta tecnología vehicular emergente, el diseño mecánico preliminar de los vehículos y la estimación del desempeño del vehículo. Además, se realiza un estudio de campo para obtener, con precisión, la velocidad de circulación y velocidad de desplazamiento en la red de Metro de Madrid. A continuación, se calcula la mejora en la velocidad de desplazamiento que supondría un sistema como OPTIMOTUSS para la red de Metro de Madrid.

Estudio de campo de la red de Metro de Madrid

Se han estudiado las velocidades de viaje promedio para algunas redes subterráneas estadounidenses y asiáticas [16-18]. Sin embargo, ninguna publicación anterior presenta mediciones ni análisis sistemáticos de la red y solo proporcionan aproximaciones generales. No se encuentran estudios detallados de aceleración, desaceleración, velocidad constante y tiempos de parada, ni velocidades de circulación y desplazamiento de las diferentes redes ferroviarias. Más concretamente, para Metro de Madrid, se pueden extraer datos generales de las webs, o de las publicaciones oficiales, pero no hay estudios de campo abiertos y detallados. Por tanto, para poder determinar con precisión la mejora potencial del sistema OPTIMOTUSS, es necesario recoger datos reales de las líneas de Metro de Madrid en diferentes condiciones operativas.

Metodología experimental

Las líneas de Metro de Madrid se recorren en ambos sentidos y en dos intervalos de tiempo: en hora valle (10-12 h) y en hora punta (18-20 h). La línea 12 se ha excluido del análisis debido a

Estaciones	T. aceleración (s)	T. vel. crucero (s)	T. desaceleración (s)	T. de parada (s)
Pinar de Chamartín	14,48	66,34	13,65	71,90
Bambú	15,20	33,73	16,06	23,80
Chamartín	15,75	75,94	25,86	25,90
Valdeacederas	14,26	33,24	12,86	25,00
Tetuán	14,54	28,99	27,37	22,79
...				
...				
Villa de Vallecas	17,38	56,54	11,35	27,10
Congosto	12,13	19,83	34,24	28,90
La Gavia	13,08	70,63	18,26	37,90
Las Suertes	14,64	41,03	23,56	34,20
Valdecarros	-	-	-	-

Tabla 1. Tiempos medidos de una estación a la estación consecutiva de la línea 1

problemas técnicos durante las mediciones. Durante los viajes, se miden las aceleraciones, desaceleraciones, velocidades constantes y tiempos de parada.

Las distancias entre estaciones se calculan utilizando las herramientas de Google Maps y su error de distancia se estima en $\pm 10\%$. A partir de estos datos, se puede calcular la velocidad de viaje (incluidos los tiempos de parada), la velocidad de circulación (excluidos los tiempos de parada), el porcentaje de tiempo de parada frente al tiempo total de viaje y los tiempos de viaje totales entre estaciones. Las expresiones utilizadas en estos cálculos son:

$$\text{Velocidad de viaje} = \frac{\text{Distancia entre estaciones}}{t_{\text{aceleración}} + t_{\text{velocidad crucero}} + t_{\text{desaceleración}} + t_{\text{parada}}}$$

$$\text{Velocidad de circulación} = \frac{\text{Distancia entre estaciones}}{t_{\text{aceleración}} + t_{\text{velocidad crucero}} + t_{\text{desaceleración}}}$$

$$\% \text{ del tiempo de parada} = \frac{t_{\text{parada}}}{t_{\text{aceleración}} + t_{\text{velocidad crucero}} + t_{\text{desaceleración}} + t_{\text{parada}}} \cdot 100$$

$$\text{Tiempo de viaje} = t_{\text{aceleración}} + t_{\text{velocidad crucero}} + t_{\text{desaceleración}} + t_{\text{parada}}$$

Aunque la mayoría de las líneas del Metro de Madrid tienen conducción semiautomática, puede haber intervenciones por parte de los conductores. Esto puede generar tiempos de aceleración, desaceleración y parada ligeramente diferentes. En consecuencia, se realizan promedios entre las mediciones realizadas en diferentes días, líneas y direcciones, y se estima el error final en alrededor de $\pm 10\%$. Se registran las incidencias inesperadas y se aceptan o rechazan los datos correspondientes según el evento. Todas las mediciones se realizan en el mes de noviembre de 2017, correspondiente al periodo normal de operación subterránea.

A modo de ejemplo, la base de datos para la línea 1, una dirección, en periodo valle se detalla en la tabla 1. Presenta los tiempos medidos desde una estación a la estación consecutiva. La regresión cuadrática y los valores promediados se obtienen para los cálculos acumulativos y se representan en las figuras 1, 2 y 3.

Resultados y discusión

Los primeros resultados presentados en la figura 1 son las velocidades de circulación acumuladas. Esa es la velocidad promedio entre estaciones, excluyendo los tiempos de parada en dichas estaciones.

Se obtiene una velocidad media de circulación de $35,8 \pm 3,6$ km/h entre todas las líneas y periodos. Así mismo, se observa que hay demasiada diferencia entre los dos periodos de operación, y esa diferencia no es mayor del 4% dentro de la mis-

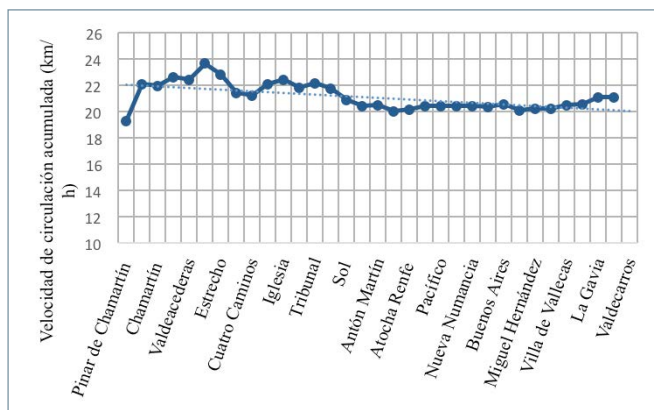


Figura 1. Velocidad de circulación acumulada para la línea 1, periodo de valle y una dirección.

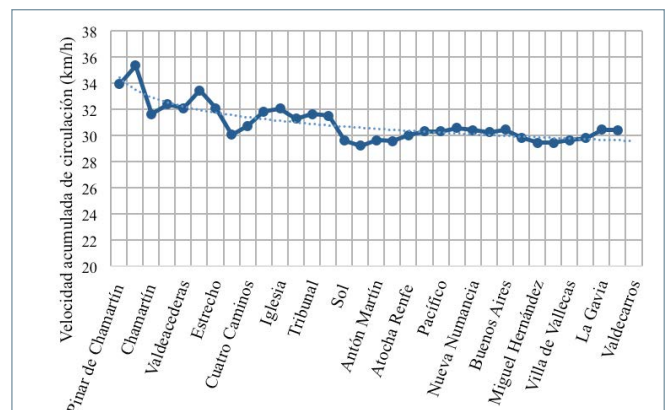


Figura 2. Velocidad de viaje acumulada para la línea 1, periodo de valle y una dirección.

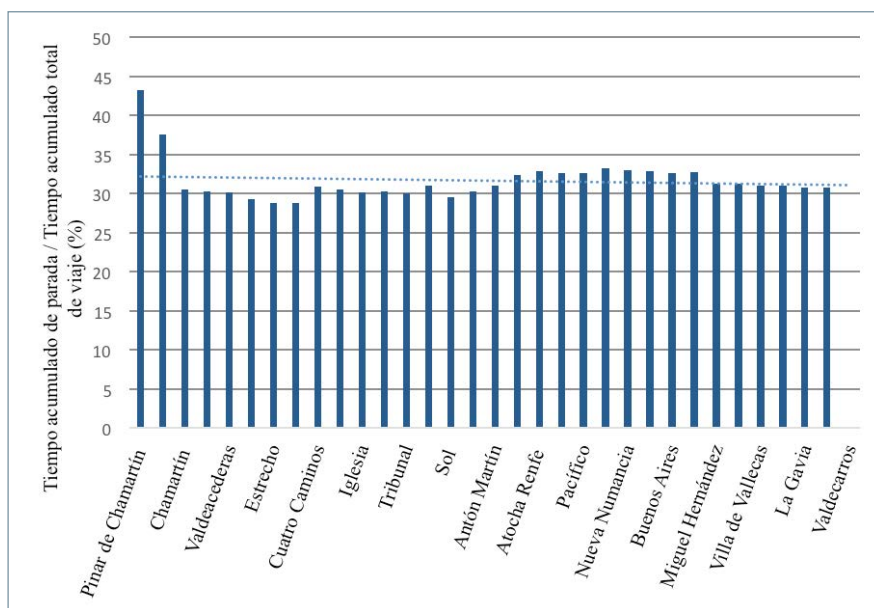


Figura 3. Porcentaje de tiempo de parada acumulado para la línea 1, periodo de valle y una dirección.

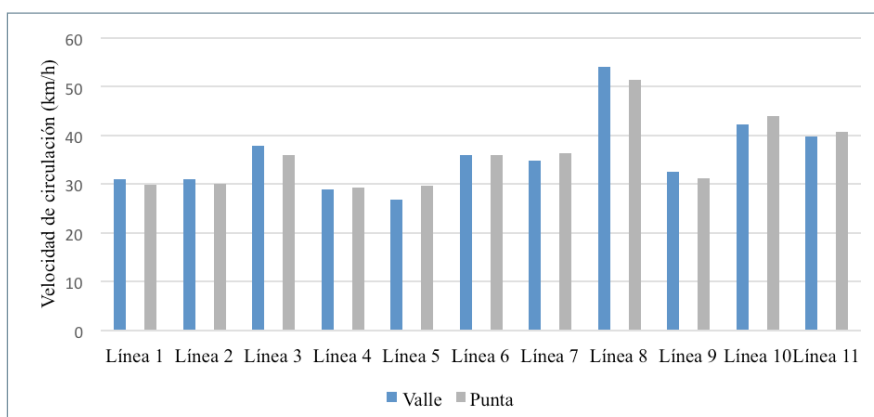


Figura 4. Velocidad de circulación de las diferentes líneas en periodos punta y valle.

ma línea. Se aprecia que la velocidad de circulación es mayor en aquellas líneas que tienen estaciones más distantes. Por ejemplo, la línea 8, con una distan-

cia promedio de 2 km entre estaciones, presenta una velocidad de circulación de 53 km/h, mientras que otras líneas como la 1 y la 5, con 645 metros y 720

metros de distancia entre estaciones, presentan una velocidad de circulación promedio en torno a 30 km/h. Esto se explica por el hecho de que los trenes pueden alcanzar una mayor velocidad de cruce y tiempos de cruce más largos en líneas con menos estaciones y separadas por más distancia.

El segundo resultado interesante es la velocidad de viaje, es decir, la velocidad entre estaciones, incluyendo los tiempos de parada necesarios para el embarque y desembarque de los pasajeros. El tiempo de espera inicial en las plataformas se excluye del cálculo. Se observa en la figura 2.

Por último, en la figura 3, se observa el tiempo acumulado de parada respecto al tiempo acumulado total de viaje. Se puede observar que las paradas conllevan más del 30% en casi todas las estaciones.

Los resultados para cada línea en los periodos valle y punta se presentan en las figuras 4 (velocidad de circulación) y 5 (velocidad de viaje).

Se obtiene una velocidad media de circulación de $26,1 \pm 2,6$ km/h entre todas las líneas y periodos. En este caso, las velocidades de circulación disminuyen el 27,2% con respecto a las de circulación en promedio. Esta disminución es mayor en aquellas líneas con distancias más cortas entre estaciones que en las más separadas.

Al analizar, directamente, las mediciones de tiempo en la tabla 1, se observa que los tiempos de parada son, de promedio, el 15% más extensos en el periodo del valle que en el periodo punta. Esto se puede explicar de la siguiente manera: durante el periodo valle hay menos pasajeros, por lo que

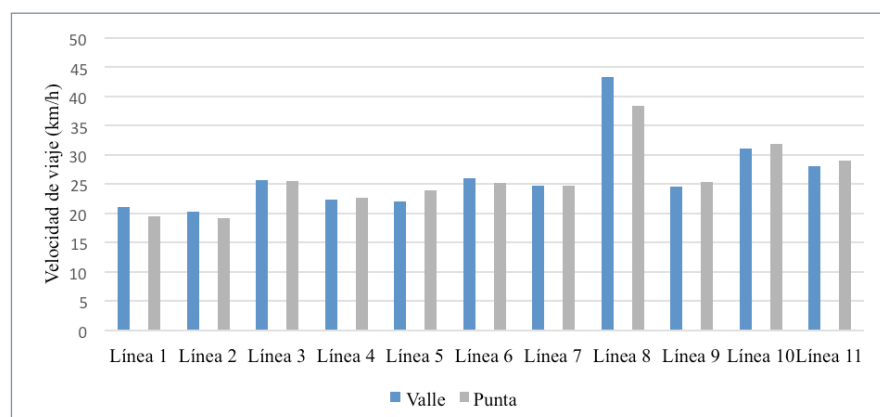


Figura 5. Velocidad de viaje de las diferentes líneas en periodos punta y valle.

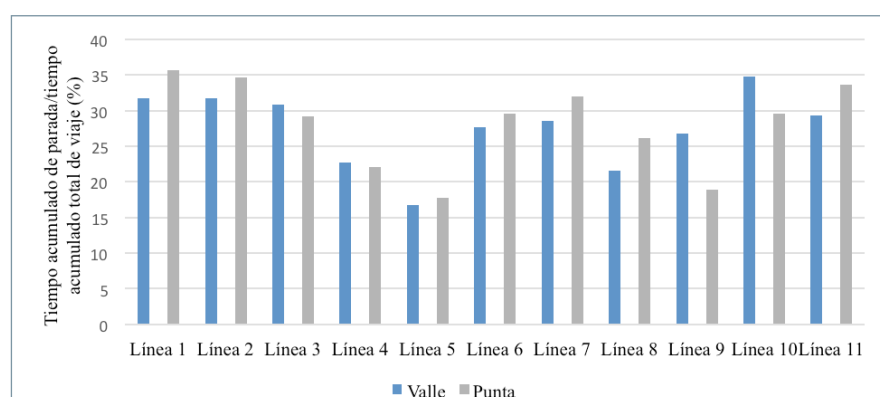


Figura 6. Porcentaje del tiempo de parada acumulado frente al tiempo total de viaje de las diferentes líneas en periodos punta y valle.

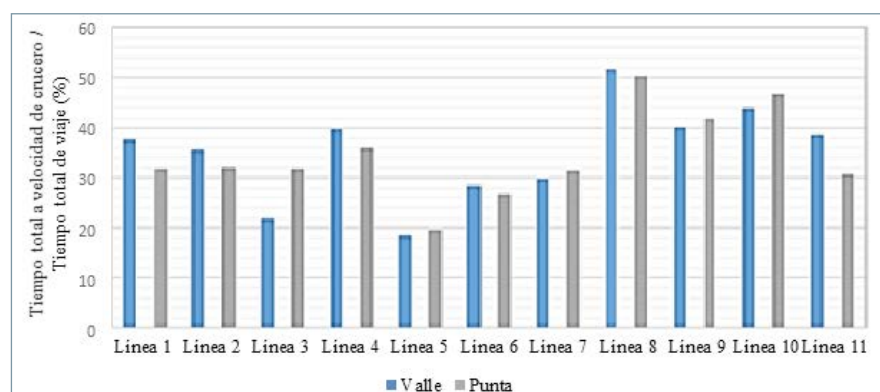


Figura 7. Porcentaje del tiempo de cruceo frente al tiempo total de viaje de las diferentes líneas en periodos punta y valle.

se asume que los conductores esperan más en cada estación para transportar un mayor número de personas. Dado que los tiempos de permanencia son más cortos en las horas punta, la velocidad de viaje debería ser mayor que en el periodo valle. Por otro lado, la velocidad de circulación es mayor en horas valle. Esto puede deberse a que los conductores quieren compensar

los tiempos de permanencia más largos. También se observa que los trenes tardan más en acelerar y frenar durante las horas punta. Esto es porque, al transportar más personas, el peso total es mayor, por lo que el tren necesita más tiempo para alcanzar la velocidad de cruceo.

Además, es útil analizar el porcentaje de tiempo que los trenes permane-

cen en la estación, tiempo de parada, en comparación con el tiempo total de viaje. Los resultados se presentan en la figura 6.

El porcentaje de tiempo que los trenes permanecen detenidos alcanza el 27,3% de media para toda la red de Metro de Madrid. Este porcentaje suele ser más largo en los periodos punta que en los valle. Esto se explica porque la afluencia de pasajeros es mayor en las horas punta. En algunas líneas, el porcentaje medio de tiempo detenido es superior al 35%. En algunas estaciones principales como Atocha y Sol, los tiempos de parada pueden llegar hasta el 50% con respecto al tiempo total de viaje entre estaciones consecutivas, especialmente en horas punta.

No solo el tiempo de parada es significativo, sino que también los tiempos de aceleración y desaceleración duran una parte significativa del tiempo total de viaje. El porcentaje del tiempo de cruceo frente al tiempo total de viaje se presenta en la figura 7.

Como era de esperar, las líneas con distancias más largas entre estaciones tienen tiempos de cruceo mayores, y los tiempos de aceleración y desaceleración son relativamente cortos. En cambio, en líneas como la número 5, con estaciones muy consecutivas, el tren acelera o frena constantemente incluso sin un periodo significativo de circulación de cruceo.

Los trenes de Metro de Madrid pueden, técnicamente, alcanzar velocidades de cruceo de unos 100 km/h. Sin embargo, la proximidad de las estaciones hace que esto no pueda suceder. Es significativo que el tiempo a velocidad de cruceo no supere el 34,7% del tiempo total de viaje, en promedio, para la red de Metro de Madrid. Si los trenes pudieran estar el mayor tiempo posible a su velocidad de cruceo, la velocidad total de viaje sería mucho mayor. Sin embargo, esto es imposible en los sistemas de metro actuales basados en trenes y esta es una limitación común para la mayoría de las redes de metro en todo el mundo. Los sistemas OPTIMOTUSS descritos en la siguiente sección proponen una solución para esto.

Descripción de la tecnología vehicular OPTIMOTUSS

OPTIMOTUSS es un sistema de transporte rápido inteligente bajo demanda para pasajeros, basado en una

flota de vehículos autónomos auto-propulsados, apoyados y estabilizados lateralmente en un solo carril. Los vehículos tienen capacidad para una o varias personas. Su diseño es compatible con la circulación de, al menos, dos flujos paralelos de vehículos en una misma vía (dos carriles) (Fig. 8). El material rodante es compatible con las infraestructuras actuales de dos carriles por sentido, y pueden duplicar el total de vehículos que circulan simultáneamente por una vía férrea. El beneficio de tener dos flujos de vehículos paralelos es que un riel se puede usar como riel de velocidad de crucero continuo y el otro se puede usar como un carril de aceleración y desaceleración para los vehículos que entran o salen de una estación en particular. Esto permite un flujo continuo de vehículos entre la estación de origen y destino en velocidad de crucero, sin necesidad de realizar paradas intermedias y, por tanto, multiplicando la velocidad efectiva real de desplazamiento de los pasajeros y optimizando el tiempo de viaje entre origen y destino. Potencialmente, el impacto socioeconómico de este enfoque es enorme.

La figura 9 muestra una vista superior de los andenes de una estación de metro con vehículos OPTIMOTUSS. Se indican las áreas de entrada (2.1) y salida (2.2) de pasajeros de las plataformas. Las estaciones de metro actuales suelen tener dos vías férreas, una por cada sentido. Luego, hay cuatro rieles disponibles en total. En OPTIMOTUSS, los dos carriles exteriores (2.3), los más cercanos a las plataformas, sirven como carril de aceleración o desaceleración de los vehículos (2.4.) lo que permite la entrada y salida de pasajeros del vehículo. Los dos rieles interiores (2.5) sirven como carriles de



Figura 8. Vistas representativas de una estación de metro con el sistema OPTIMOTUSS.

velocidad de crucero. Esto facilita el flujo ininterrumpido de vehículos. Los cambios de aguja (2.6), que realizan el cambio de riel, también se representan conceptualmente.

Los vehículos deben diseñarse para permitir al menos dos flujos paralelos de vehículos en la misma vía férrea. Un vehículo de ancho entre 1 metro y 0,8 metros es una buena opción para la mayoría de los anchos de vía ferroviarios actuales (ancho estándar/internacional de 1.435 mm). También podrían entrar vehículos más anchos o más largos para necesidades especiales (sillas de ruedas, carritos de bebé, personas grandes, etc.). Además, el vehículo tiene que incluir un sistema de conducción autónoma, así

como los sensores necesarios para su funcionamiento, junto con sistemas de comunicación para la gestión del tráfico. Además, cada vehículo debe incluir panel de botones, *software* de reconocimiento automático de voz y conexión de aplicaciones móviles para configurar la estación de destino del pasajero.

Diseño preliminar del vehículo

La figura 10 muestra a la izquierda una vista de *renderizado* isométrica de este diseño preliminar. Esta imagen incluye material rodante (4.1), cabina (4.2) y pantógrafo (4.3). Todo el vehículo está apoyado verticalmente sobre un riel Vignole convencional.

El material rodante, que se muestra aislado en la figura 10 derecha, está compuesto por un chasis (4.4) y los elementos mecánicos que hacen posible el movimiento del vehículo: motor (4.5), ruedas delanteras y traseras (4.6), ruedas estabilizadoras laterales (4.7) (tres a cada lado del riel). Prevenir el descarrilamiento es fundamental para el correcto funcionamiento de cualquier vehículo, aún más en curvas. Además, los sistemas de transmisión (4.8), las cajas de grasa (4.9) y las suspensiones (4.10) están prediseñados. La suspensión del vehículo incluye un mecanismo de dirección (4.11) en la rueda delantera para autoguiar el vehículo a lo largo del riel. Dentro de la cabina, hay un asiento para dos personas de tamaño medio, espacio para un equipaje y una pantalla interactiva para la selección de la estación de destino, información general y/o aplicaciones de entretenimiento.

Las dimensiones principales de un vehículo OPTIMOTUSS se muestran en figura 11. El tamaño volumétrico es de 1.500 x 950 x 3.230 mm, excluido el pantógrafo. Las estimaciones de peso se han realizado de una manera muy conservadora. Se deben realizar más análisis estructurales, de fatiga y de fabricación en un diseño final. El peso total en vacío del vehículo se ha estimado en 500 ± 50 kg. La distribución longitudinal del peso es el 25% del peso total en la rueda delantera y el 75% del peso soportado por la rueda trasera. Lateralmente, la distribución del peso debe ser lo más simétrica posible para mantener el centro de gravedad en la sección media.

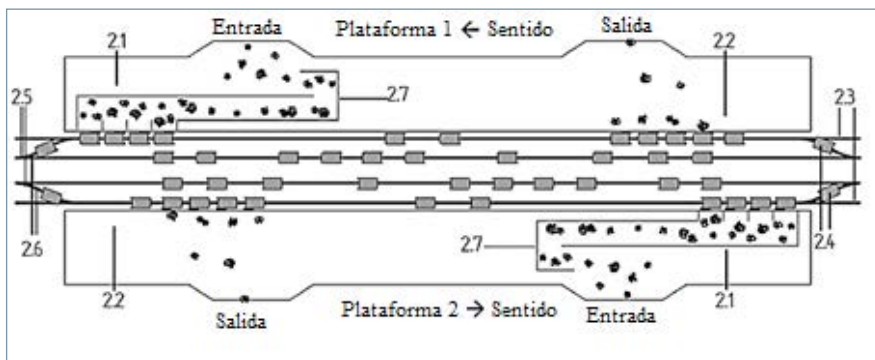


Figura 9. Descripción del esquema de la estación de Metro OPTIMOTUSS.

Los vehículos deben ser ágiles, con una respuesta dinámica rápida como una motocicleta. Por eso, es importante reducir el peso. La reducción de peso también contribuye a un menor desgaste en el sistema de riel y rueda. Por otro lado, un bajo peso puede significar una falta de adherencia entre las ruedas y el raíl, dependiendo de los materiales de las ruedas o un comportamiento dinámico muy dependiente de la masa de pasajeros o del comportamiento dentro de la cabina. Por tanto, se debe hacer un compromiso entre la reducción de peso y un comportamiento dinámico adecuado.

Se puede realizar una estimación de la velocidad de cruce máxima igualando la resistencia al movimiento a una cierta velocidad con la fuerza de tracción máxima proporcionada por el motor, teniendo en cuenta la limitación de la adherencia. Si se considera un motor eléctrico de $P_{motor} = 54 \text{ kW}$ [22], se calcula la velocidad de cruce:

$$P_{movimiento} = (0,737 \cdot v^2 + 324,2) \cdot v = 54.000 \text{ W}$$

$$v_{cruce} \cong 140 \text{ km/h}$$

Esta velocidad de cruce se utiliza para calcular el factor de mejora de la velocidad de desplazamiento.

El tiempo de aceleración de 0 a 100 km/h es un segundo parámetro importante del rendimiento cinemático del vehículo [23].

El vehículo OPTIMOTUSS requiere, en primera estimación, una potencia de 24 kW para mover a una persona que viaja a 100 km/h. Esto conduce a 0,96 MJ/pkm. En comparación con el transporte ferroviario regional de pasajeros en Alemania, necesita 0,90 MJ/pkm. Así, el consumo específico de OPTIMOTUSS es, al menos, del mismo orden de magnitud, incluso inferior al de otros sistemas ferroviarios [24,25].

Cálculo de la mejora de la velocidad de desplazamiento

Utilizando los valores para la velocidad de cruce y la aceleración y desaceleración de los vehículos, se puede estimar la mejora de la velocidad de viaje que, potencialmente, proporciona OPTIMOTUSS. Se realiza una estimación para cada línea de la red de Metro de Madrid.

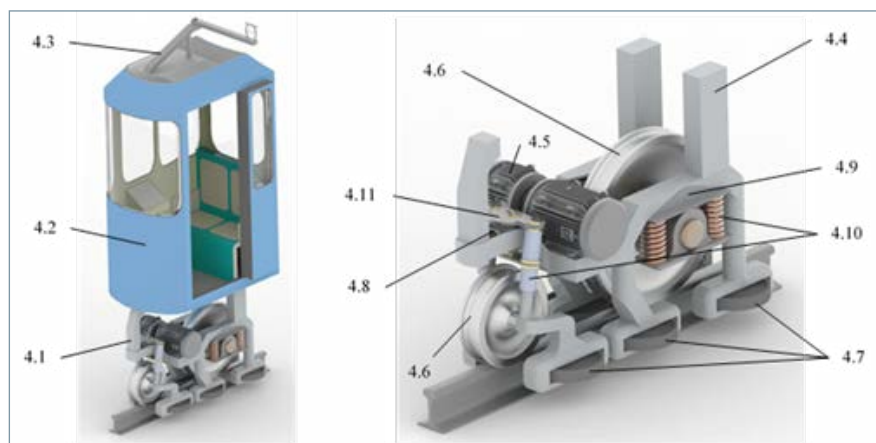


Figura 10. Diseño preliminar de un solo vehículo del sistema OPTIMOTUSS. Izquierda: vista completa isométrica. Derecha: material rodante.

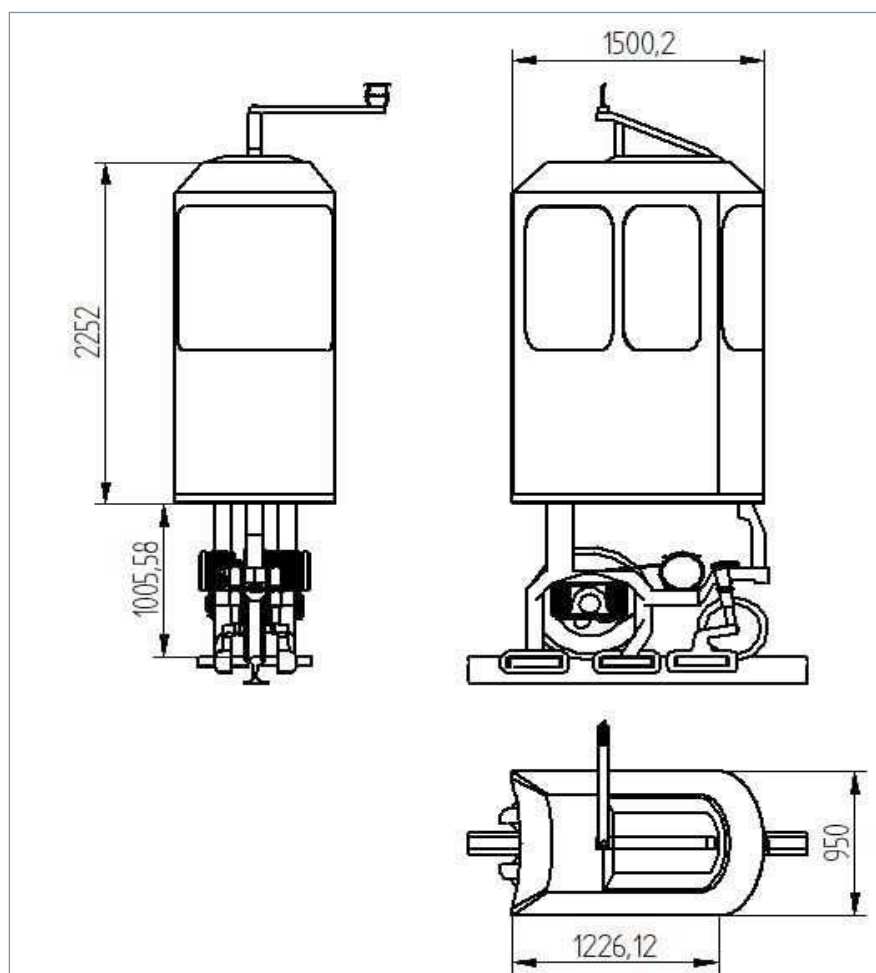


Figura 11. Vista frontal, lateral y superior del diseño preliminar.

Cálculos de la velocidad efectiva de OPTIMOTUSS

La expresión de la velocidad de desplazamiento total en OPTIMOTUSS es:

$$v_{viaje \text{ en OPTIMOTUSS}} = \frac{n \cdot s}{(t_{acel} + t_{dec}) + t_{cruce}} = \frac{n \cdot s}{2 \frac{v_{cruce}}{a_{media \text{ de } 0 \text{ a } 100}} + t_{cruce}}$$

Donde n el número de estaciones y s es la distancia entre estaciones, t_{acel} es el tiempo en aceleración, t_{dec} el tiempo de frenado y t_{cruce} es el tiempo a velocidad

de crucero. Este tiempo de crucero se puede expresar en función de n , $v_{crucero}$ como:

$$t_{crucero} = \frac{S \text{ a velocidad crucero}}{v_{crucero}} = \frac{n \cdot s - 2 \cdot s_{acelerando}}{v_{crucero}} = \frac{n \cdot s - \frac{v_{crucero}^2}{a_{media \text{ de } 0 \text{ a } 100}}}{v_{crucero}}$$

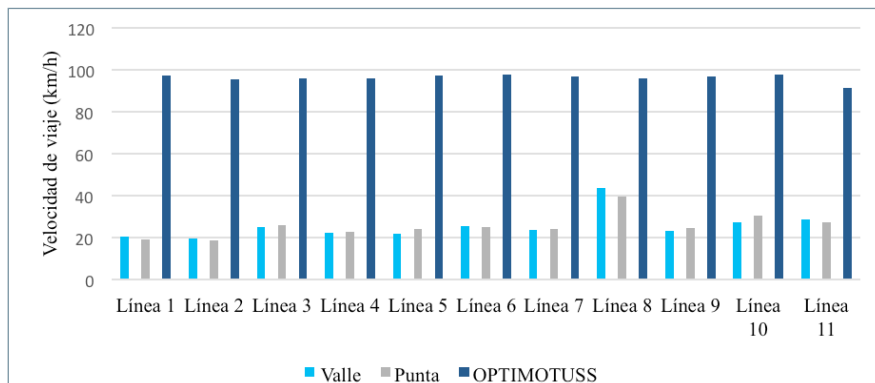


Figura 12. Comparación de la velocidad de desplazamiento de la línea completa con los trenes de Metro de Madrid y OPTIMOTUSS.

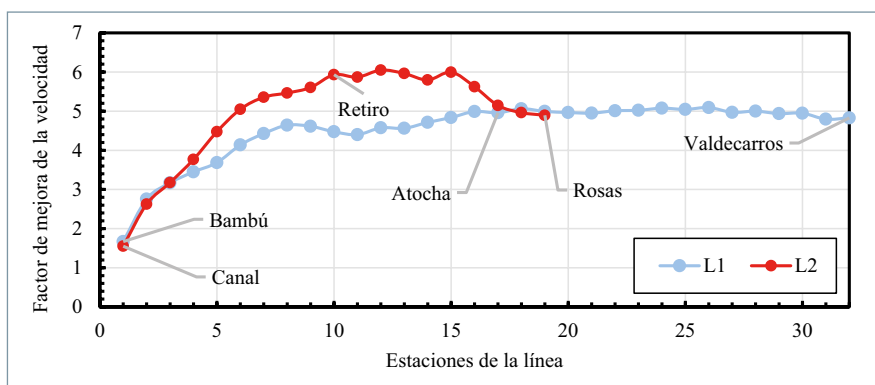


Figura 13. Factor de mejora de la velocidad de desplazamiento para las líneas 1 y 2.

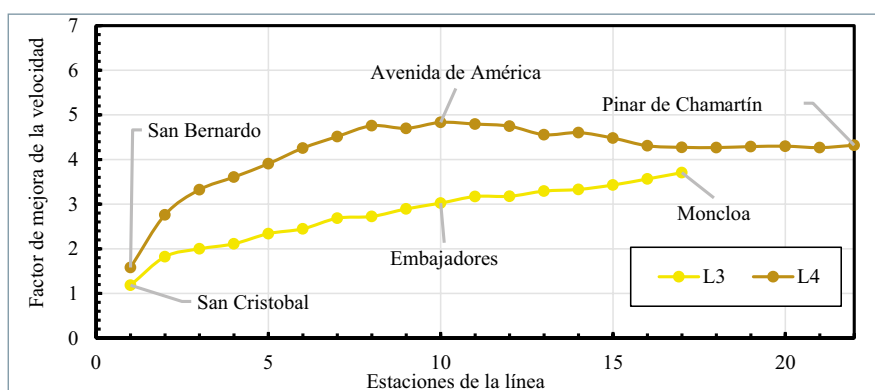


Figura 14. Factor de mejora de la velocidad de desplazamiento para las líneas 3 y 4.

Todos los cálculos se realizan utilizando 100 km/h como velocidad de crucero conservadora para vehículos OPTIMOTUSS y una aceleración/desaceleración constante de 1,3 m/s².

Se calcula la velocidad de desplazamiento que tendría OPTIMOTUSS

en la línea de Metro de Madrid. Los resultados se presentan en la figura 12.

La velocidad de desplazamiento media proporcionada por OPTIMOTUSS es de unos 95 km/h, cercana a la velocidad de crucero. Con los trenes convencionales, la velocidad de viaje

no supera los 30 km/h para la mayoría de las líneas. Los tiempos de viaje se reducen en el 64,2% de media. Es, aproximadamente, una tercera parte del tiempo que se utiliza actualmente para recorrer toda la línea.

Factor de mejora de la velocidad de desplazamiento dentro de una línea

La mejora introducida por el sistema OPTIMOTUSS depende del número de estaciones recorridas. El factor de mejora de la velocidad de desplazamiento se calcula en función de las estaciones viajadas. Todos los cálculos se realizan considerando un viaje dentro de la misma línea, sin transbordos. Las figuras 13-17 presentan los resultados de estos cálculos.

Las líneas 1 y 2 son las más antiguas. En estas líneas se reduce la separación entre estaciones, en promedio 600 metros. La mejora que potencialmente proporciona un sistema de omisión de paradas como OPTIMOTUSS es sobresaliente. Para estos casos, el factor de mejora es superior a cinco en viajes de más de cinco estaciones.

El factor de mejora de la línea 4 es mayor que cuatro para viajes de más de cinco estaciones. Para la línea 3, el factor de mejora es mayor que 2,5.

Las líneas 5 y 6 se construyeron en el mismo periodo de tiempo y la separación entre estaciones es bastante similar. Para estas líneas, se obtiene un factor superior a 4 en viajes de más de 10 estaciones.

El factor de mejora de la línea 7 es mayor de tres para viajes de dos estaciones o más. La línea 8 es un caso especial porque la separación entre líneas es muy grande, más de 2.000 metros en promedio. Para esta línea, el factor de mejora es menor, de 1,5-2, pero sigue siendo significativo y valioso.

Factor de mejora de la velocidad de viaje considerando transbordos

OPTIMOTUSS también puede significar la eliminación del tiempo de transbordo entre líneas, ya que un vehículo puede pasar de una línea a otra con la infraestructura de túneles adi-

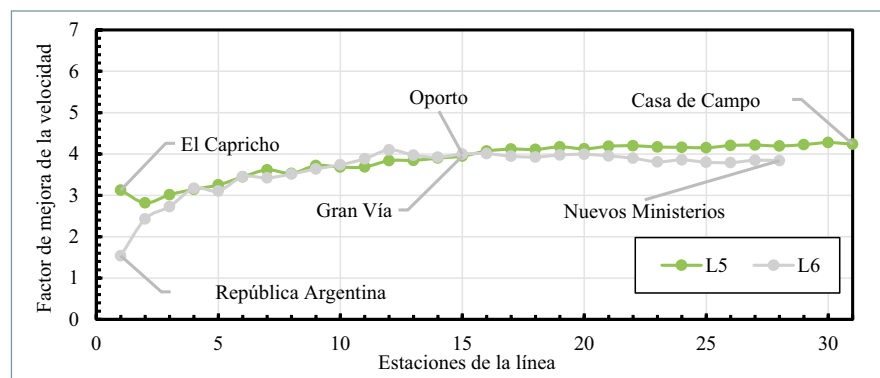


Figura 15. Factor de mejora de la velocidad de desplazamiento para las líneas 5 y 6.

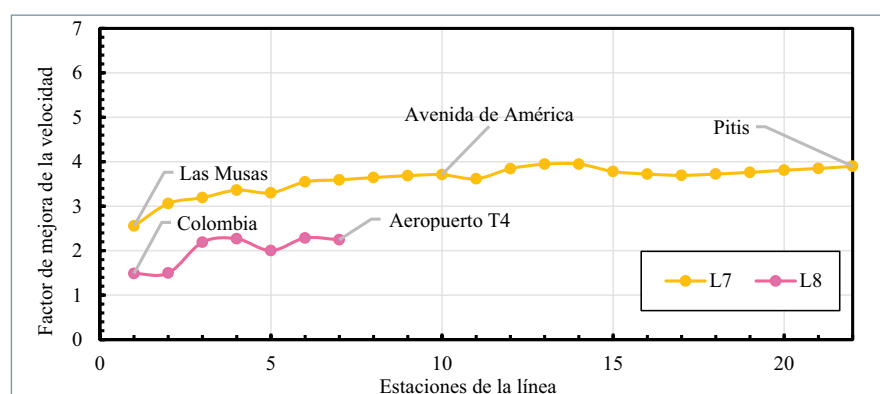


Figura 16. Factor de mejora de la velocidad de desplazamiento para las líneas 7 y 8.

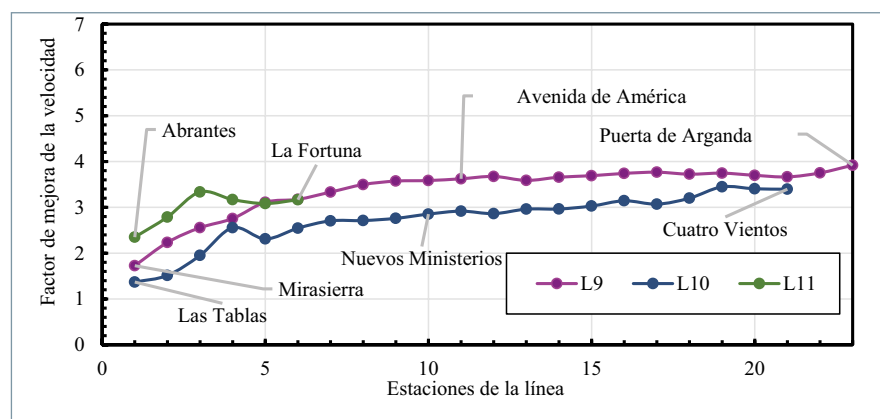


Figura 17. Factor de mejora de la velocidad de desplazamiento para las líneas 9, 10 y 11.

cional adecuada. El tiempo de transbordo y el de espera para el siguiente tren de la línea desaparecen, por lo que aumenta la mejora introducida por el nuevo sistema.

En esta sección se analizan tres casos específicos.

- Un viaje de dos transbordos desde Casa de Campo a Almendrales. Este comienza en la línea 5, requiere un transbordo en la estación de

Oporto de la línea 5 a la línea 6 y otro en la estación de Legazpi de la línea 6 a la línea 3.

- Un viaje de un transbordo desde Casa de Campo a Méndez-Álvaro, que es una estación muy relevante de la red de metro debido a la conectividad con múltiples líneas y otros sistemas de transporte (bus y tren). A partir de la línea 5, requiere un transbordo en la estación de

Oporto de la línea 5 a la línea 6.

- Por último, un viaje simple sin transbordo a lo largo de una la línea 5, desde Casa de Campo a la estación de El Capricho.

De manera optimista, se considera un tiempo de transbordo y espera de 3 minutos para los cálculos.

Los tiempos de viaje con el sistema de metro actual y con OPTIMOTUSS se muestran en la figura 18.

La reducción del tiempo de viaje es mayor en los viajes con dos traslados. En este recorrido, la velocidad media de desplazamiento acumulada desciende por debajo de los 20 km/h, mientras que con el sistema OPTIMOTUSS se acerca a los 100 km/h.

La innovadora tecnología emergente OPTIMOTUSS presentada en este artículo muestra un gran potencial para mejorar los tiempos de viaje en los sistemas de metro, así como la comodidad y la seguridad para todos los pasajeros. Sin embargo, hay muchas preguntas abiertas que deben investigarse profundamente antes de que podamos reclamar la viabilidad total del sistema, por ejemplo: equilibrio en carriles con 1/20 de inclinación, velocidad límite en curvas, tiempo de cambio de carril, fatiga, desgaste de los rieles, cambio de ferrocarril y administración del tráfico en las horas punta, ubicación de vehículos y administración de pasajeros.

Conclusiones

Metro de Madrid es uno de los mejores sistemas de metro de Europa en términos de velocidad de viaje, frecuencia de trenes y seguridad. Sin embargo, la velocidad de desplazamiento efectiva de los pasajeros está limitada por las continuas paradas necesarias. En este trabajo se realiza un estudio de campo de tiempos de viaje, tiempos de parada y velocidades para toda la red de Metro de Madrid.

La velocidad media de circulación se calcula a partir de datos experimentales en $36,9 \pm 3,6$ km/h, excluyendo el tiempo de parada. La velocidad media total de viaje, incluido el tiempo de parada, es de $26,1 \pm 2,6$ km/h. El porcentaje medio de tiempo que los trenes permanecen detenidos suma el 27% del tiempo total de viaje.

Se presenta un nuevo concepto de tecnología vehicular de transporte rápido personal, denominado OPTIMOTUSS. Este nuevo sistema de transpor-

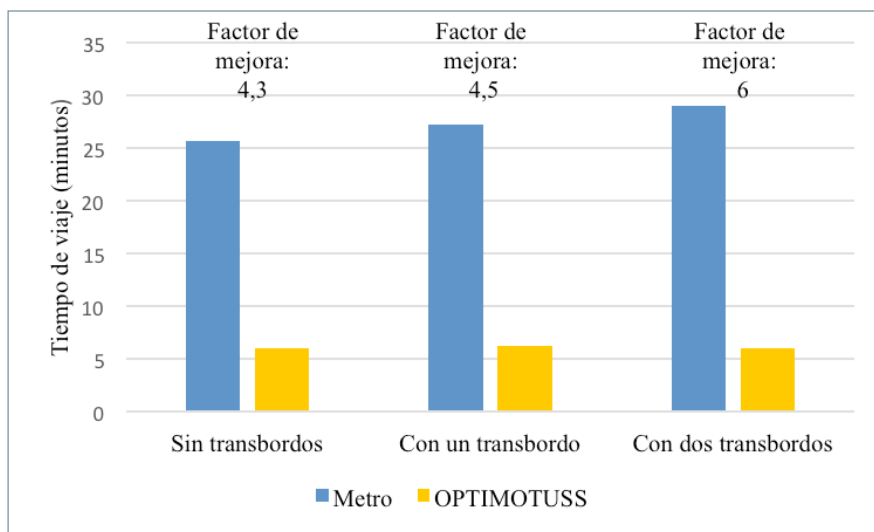


Figura 18. Comparación de tiempos de viaje entre el metro convencional y OPTIMOTUSS considerando transbordos.

te masivo es un sistema de transporte rápido inteligente bajo demanda para pasajeros basado en una flota de vehículos autónomos autopropulsados, apoyados y estabilizados lateralmente en un solo carril. Los vehículos tienen capacidad para una o dos personas. Su diseño es compatible con la circulación de, al menos, dos flujos paralelos de vehículos en la misma vía férrea en la infraestructura subterránea actual. Los vehículos OPTIMOTUSS pueden alcanzar una velocidad de crucero estimada de al menos 100 km/h y un tiempo de aceleración para alcanzar una velocidad de crucero de unos 21 segundos. La mejora de tiempo potencial de OPTIMOTUSS (en comparación con el sistema de metro actual) es siempre mayor a 1,5 veces, y alcanza viajes hasta 6 veces más rápidos en líneas con un número muy elevado de estaciones.

Esta innovadora tecnología vehicular muestra un gran potencial para la optimización de los tiempos de viaje en los sistemas de metro de todo el mundo. También presenta ventajas desde el punto de vista de la comodidad de los pasajeros y la optimización del sistema de transporte masivo. Sin embargo, todavía quedan muchas preguntas abiertas que deben ser tratadas en profundidad antes de poder reclamar la viabilidad total del sistema.

Agradecimientos

Los autores de este artículo quieren agradecer la labor desarrollada por un

grupo de alumnos del curso Ingeniería Transporte 2017-2018 del Máster en Ingeniería Industrial de la Universidad de Alcalá en la recogida de algunos de los datos. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Beca de Investigación Ramón y Cajal 2017 del Ministerio de Ciencia e Innovación y Universidades. Además, la presentación de estos resultados de investigación recibió financiación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades del Gobierno de España dentro del marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2017-2020 bajo convenio de subvención con referencia EIN2019-103093.

Referencias

- [1] H. Zheng and S. Peeta. Network design for personal rapid transit under transit-oriented development. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 55, pp. 351-362, 2015.
- [2] G. Malavasi, P. Palleschi, and S. Ricci, "Driving and operation strategies for traction-energy saving in mass rapid transit systems," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 225, no. 5, pp. 475-482, Sep. 2011.
- [3] K. Sohn. An investigation into the station capacities for personal rapid transit systems. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 226, no. 5, pp. 457-468, Sep. 2012.
- [4] PRT Simulators (2009). Innovative transport design, planning and operational simulation software packages.
- [5] J. P. van Dijke and M. van Schijndel. CityMobil, Advanced Transport for the Urban Environment. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2324, no. 1, pp. 29-36, Jan. 2012.

- [6] 2015 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES).
- [7] C. A. Brebbia, L. C. (Lal C. Wadhwa, and Wessex Institute of Technology., Urban transport XI : urban transport and the environment in the 21st century. WIT Press, 2005.
- [8] J. Gustafsson. Vectus-Intelligent Transport. *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 11, pp. 1856-1863, Nov. 2009.
- [9] Mister (2009). [Online]. Disponible en: <http://www.mist-er.com>.
- [10] Skytran (2013). [Online]. Disponible en: <https://www.skytran.com/>.
- [11] JPODS (2014). [Online]. Disponible en: <http://www.jpods.com/>.
- [12] Shweeb (2010). [Online]. Disponible en: <https://www.shweeb.co.nz/>.
- [13] IEEE Aerospace and Electronic Systems Society and Institute of Electrical and Electronics Engineers. Aerospace and Electronic Systems Group. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*. [Institute of Electrical and Electronics Engineers].
- [14] M. Lowson, Personal Rapid Transit for Airport Applications. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 1930, pp. 99-106, Jan. 2005.
- [15] E. Díez-Jiménez, M. Fernández-Muñoz, and R. Oliva-Domínguez, "Sistema de transporte rápido de personas sobre un rail compatible con dos flujos paralelos de tráfico en una única vía", *ES 2752750 B2*, fecha de prioridad: 04/10/2018, fecha de publicación: 17/06/2021
- [16] Average schedule speed: How does Metro compare? - Greater Greater Washington.
- [17] Speed vs coverage: How do metro systems decide how to space their stops? CityMetric.
- [18] S.-L. Chen, S.-C. Hsu, C.-T. Tseng, K.-H. Yan, H.-Y. Chou, and T.-M. Too. Analysis of Rail Potential and Stray Current for Taipei Metro. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, no. 1, pp. 67-75, Jan. 2006.
- [19] WORLD'S BEST DRIVERLESS METRO LINES 2017, 2017.
- [20] F. Aparicio Izquierdo, Ingeniería del transporte. Madrid, 2008.
- [21] B. W. McCormick, Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mechanics. 1994.
- [22] Parker Hannifin Corporation Catalogue, 2018.
- [23] E. Díez-Jiménez, M. Fernández-Muñoz, R. Oliva-Domínguez, D. Fernández-Llorca, and M. A. Sotelo. Personal Rapid Transport System Compatible With Current Railways and Metros Infrastructure. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, pp. 1-11, Mar. 2020.
- [24] M. Domínguez, A. Fernández, A. P. Cucala, and P. Lukaszewicz. Optimal design of metro automatic train operation speed profiles for reducing energy consumption. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 225, no. 5, pp. 463-473, Sep. 2011.
- [25] M. C. Falvo, D. Sbordone, A. Fernández-Cardador, A. P. Cucala, R. R. Pecharrmán, and A. López-López. Energy savings in metro-transit systems: A comparison between operational Italian and Spanish lines. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 230, no. 2, pp. 345-359, Feb. 2016.