

MetroDuo

Ildelfonso P. de Matías Jiménez. Ingeniero Aeronáutico
Director Gerente de Metro de Madrid.
Vicepresidente de UITP (Unión Internacional de Transporte Público). imatias@metromadrid.es

Resumen: En el presente artículo se expone una nueva alternativa de transporte ferroviario urbano de gran capacidad y con altas velocidades comerciales como respuesta al problema de la movilidad en las megalópolis, donde las distancias a recorrer son cada vez mayores y el tiempo de viaje pasa a ser un factor decisivo para asegurar la calidad de vida de sus habitantes, su competitividad y, por tanto, su sostenibilidad. Para su elaboración se ha contado con análisis realizados desde distintos ámbitos de Metro de Madrid.

Palabras Clave: Transporte; Ferroviario; MetroDuo; Túnel

Abstract: The article describes a new alternative for large capacity urban rail transport offering high commercial speed in response to the mobility problems posed in megapolitan areas, with increasingly longer travel distances and journey times, and as a decisive means of ensuring the quality of life of inhabitants and the competitiveness and ensuing sustainability of these areas. The article is based on analysis conducted with respect to different areas of the Madrid Metro.

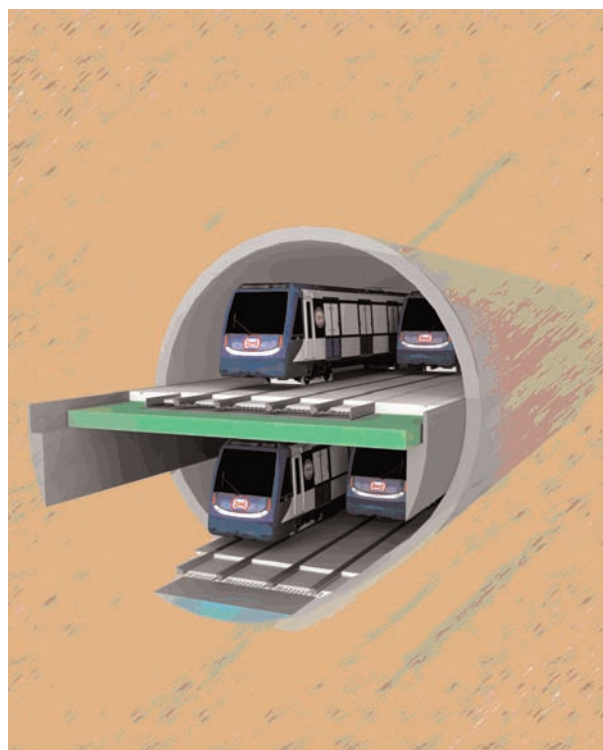
Keywords: Transport; Railway; MetroDuo; Tunnel

1. Introducción

Las tendencias demográficas indican que el proceso de concentración de una gran parte de la población mundial en grandes ciudades va a continuar. Se espera que en el año 2025 existan más de 20 ciudades con más de 10 millones de habitantes y otras 20 más superen los 5 millones.

Las dificultades y resistencias para armonizar, al menos en el corto y medio plazo, las medidas de la política territorial y urbanística, que permitan reducir el número necesario de viajes mecanizados o la distancia a recorrer en cada uno de ellos, conducirá inevitablemente a altos grados de movilidad en el horizonte de los próximos 20 años y con tendencia a aumentar.

La mayor utilización de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC's) debe ayudar a que dicho crecimiento no sea mayor del que cabe esperar, pero aun así, los incrementos en los tiempos dedicados al transporte se traducirán en fuertes costes sociales que afectarán negativamente a la cali-



dad de vida de los habitantes de estas ciudades y a su competitividad, poniendo en riesgo su sostenibilidad. De esta manera, el reto de reducir el tiempo empleado en la movilidad en las grandes ciudades se convierte en un aspecto clave para garantizar la supervivencia de las mismas.

Las distancias a recorrer por los habitantes de esas megalópolis serán cada vez mayores pero además el número de personas afectadas por este fenómeno negativo será también cada vez mayor. Los costes económicos y sociales se dispararán, una parte importante del PIB será dedicada a la movilidad que, como actividad, no es productiva para la sociedad y lejos de tener un impacto positivo en la prosperidad de las ciudades tiene asociados además otros factores sociales y medioambientales.

En esta situación, los metros van a continuar siendo una herramienta absolutamente necesaria para ayudar a resolver los problemas de movilidad como parte de los sistemas integrados de transporte en los que la intermodalidad y los intercambiadores seguirán siendo vitales. Pero estos problemas, en el caso de las megalópolis, cambian radicalmente de dimensión. No es difícil prever la existencia de ciudades superpobladas que cubrirán áreas de centenares de Km². Se tratará de ciudades policéntricas con recorridos urbanos y corredores de transporte de alta intensidad que podrían llegar y superar los 100 kilómetros.

La reducción del tiempo empleado en la movilidad necesaria para desarrollar la actividad económica en las grandes ciudades es un objetivo que ha estado presente siempre en la misión de los metros. Y es también preocupación de la Unión Europea, tal y como se recoge en el Libro Blanco, en donde se propugnan medidas para romper el binomio "a mayor crecimiento económico, mayor movilidad y congestión en las ciudades". Cabe destacar entre ellas la incentivación de la utilización de los transportes públicos, que deberán ser cada vez más eficientes.

Sin embargo, las redes y líneas de metro tal y como las conocemos hasta ahora, no van a poder resolver de forma eficiente el problema que se plantea debido principalmente a los siguientes motivos: a) la experiencia indica que cuando aumenta la longitud de las líneas la velocidad comercial tiende a bajar y que, como consecuencia de ello, los tiempos de recorrido son cada

vez mayores. b) a pesar de estar aplicando tecnologías de señalización ferroviaria de última generación, y trenes también con tecnologías avanzadas, la mejora de las velocidades comerciales resulta insuficiente incluso en el caso de líneas automáticas. c) el tiempo de viaje y la distancia media recorrida por los ciudadanos siguen aumentando, como consecuencia de la expansión de las áreas urbanas y metropolitanas.

Por tanto, se hace necesaria una solución alternativa que incremente la velocidad actual en los desplazamientos, la velocidad comercial en el caso de los metros, como medio para reducir el tiempo empleado en los mismos. Dicha solución debe, al mismo tiempo, responder a las expectativas de los usuarios de las redes de metro convencional actuales, incluyendo una gran capilaridad que garantice un alto grado de cobertura de la red y por tanto una buena accesibilidad a la misma. Pero este último aspecto, que conlleva la existencia de una estación en un radio de pocos cientos de metros (entre 600 y 800 metros de media en las nuevas líneas), implica una penalización de la velocidad comercial por la necesidad de un número elevado de paradas/estaciones.

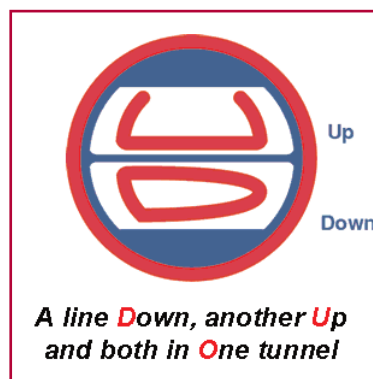
El compromiso entre el incremento de la velocidad comercial, que permita una reducción de los tiempos de viaje, y la alta capilaridad, que permita garantizar una gran cobertura de las redes de metro, es la motivación para la propuesta de líneas de metro duales que hemos denominado MetroDuo, y cuya configuración se describe en este documento.

En los siguientes apartados se recogerán los resultados de los estudios básicos realizados para analizar la viabilidad y rentabilidad de la solución propuesta, tanto desde el punto de vista social como económico y medioambiental. Se compararán los tiempos invertidos en los viajes entre una línea dual y otra convencional así como las inversiones y mantenimientos necesarios en ambos casos.

2. Configuración de una línea dual. El MetroDuo

La línea dual de metro subterráneo, el MetroDuo, está compuesta por cuatro vías que utilizan una infraestructura común tanto en su recorrido en túnel como en las estaciones.

Logo para MetroDuo



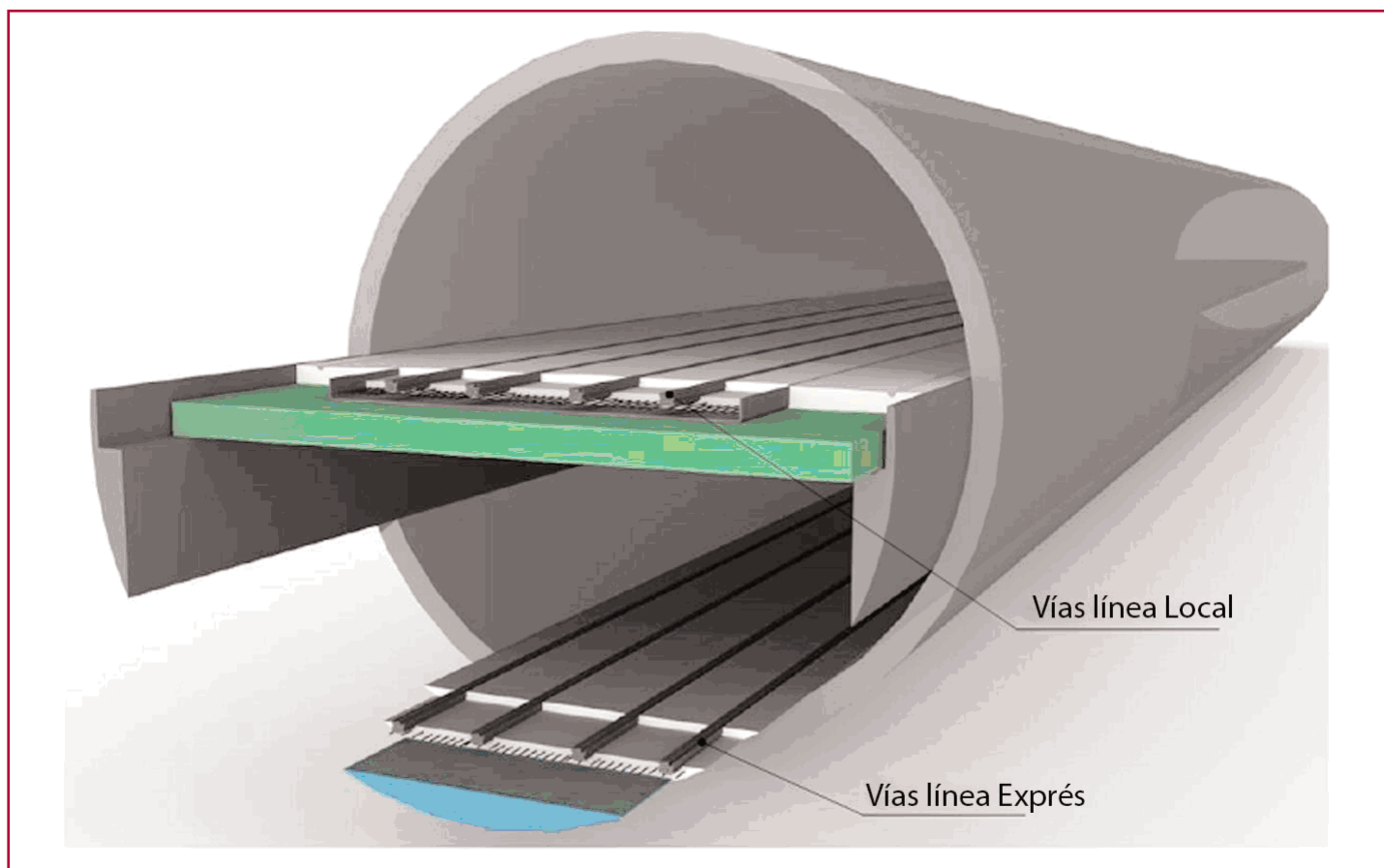


Fig. 1. Vista de la sección del túnel.

Las cuatro vías están segregadas dos a dos y dispuestas en dos niveles diferentes, configurando en realidad dos líneas separadas superpuestas con la misma traza, que se interconectan en las estaciones también comunes.

Estas dos líneas tendrán diferentes características de operación. Mientras que una de ellas, a la que denominaremos en lo sucesivo línea local, tendrá las características de una línea convencional de metro, con estaciones entre 600 y 800 metros, la otra línea a la que denominaremos línea exprés sólo parará en algunas de las estaciones y no en todas, lo que le proporcionará una velocidad comercial muy superior.

La línea local seguirá garantizando altos grados de accesibilidad a la red, mientras que la exprés dotará a los viajes de una velocidad media muy superior a las actuales. Cuanto más largos sean los desplazamientos, mayores serán los ahorros de tiempo con respecto a las soluciones de metro existentes.

La línea exprés ocupará el piso inferior y la local el superior. Hay varias razones para ello: unas de tipo funcional y otras medioambientales. En cuanto a las

primeras hay dos importantes: en primer lugar porque, a no ser que haya un gran desequilibrio en las entradas y salidas de las estaciones de la línea exprés comparada con la local, se estaría penalizando en su recorrido hasta andenes a un mayor número de clientes y, en segundo lugar, porque de lo contrario, para acceder a la línea local deberían pasar, en aquellas estaciones en que la exprés no tenga parada, a través del espacio que ocupa la línea exprés y que no tiene por qué requerir tener un acabado y equipamiento completo para conseguir la funcionalidad que se requiere de las mismas.

En cuanto a las razones medioambientales, éstas tienen que ver con la minimización del nivel de ruido y vibraciones. Aunque se adoptarán en el diseño de vía sistemas de fijación y suspensión elástica de la misma, parece lógico que los trenes de la línea exprés, al alcanzar mayores velocidades, emitirán mayores niveles de vibraciones y ruido que la local y, por tanto, cuanto más alejado esté el foco emisor de las cimentaciones de los edificios, las perturbaciones inducidas en ellos serán menores. De la misma forma, la velocidad

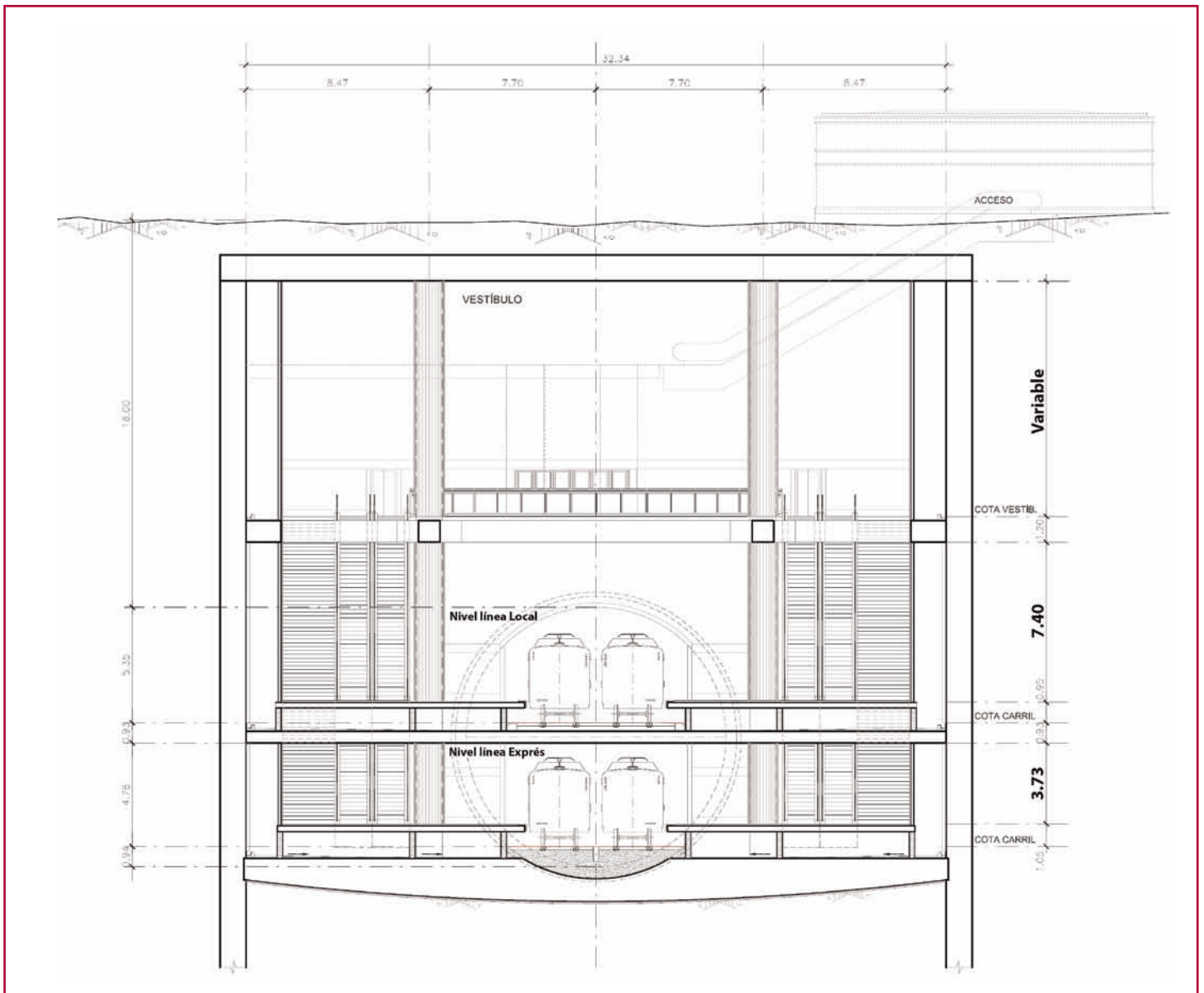


Fig. 2. Detalle de la sección de la estación.

de paso de los trenes de la línea expés por las estaciones en que no paren, aunque como se verá más adelante se limitará, inducirá movimientos del aire que pueden ser más fácilmente controlados si la línea ocupa el espacio inferior.

Se configuran de esta forma varios tipos de viaje en la utilización de la línea dual dependiendo del origen y destino de los mismos:

- a) Los que tienen origen y destino en estaciones de la línea local que no coinciden con estaciones de la línea expés y, que por su corto recorrido de viaje no traspasarán a la expés, al no tener un ahorro

sensible de tiempo. El viaje consta por tanto de una sola etapa realizada sobre la línea local.

- b) Los que tienen origen y destino en estaciones de la línea local que no coinciden con estaciones de la línea expés, pero con distancia de viaje suficiente como para justificar por ahorro de tiempo la utilización de la línea expés como una etapa intermedia del viaje. El viaje consta por tanto de dos trasbordos (de local a expés y de expés a local) y tres etapas, dos sobre la línea local y una sobre la expés.
- c) Los que tienen como origen y destino una estación local que también coincide con una estación de

la línea exprés. En este caso, todo el viaje se realiza en una sola etapa y en la línea exprés.

- d) Los que tienen como origen o destino una estación local en un caso y una estación que coincide con una exprés en otro. En este caso el viaje constará de dos etapas, una sobre la línea local y otra sobre la exprés, y un solo trasbordo (de local a exprés o viceversa).

A la hora de estimar el tiempo de viaje se ha tenido en cuenta tanto el empleado a bordo de los trenes como los de espera y trasbordo.

Es evidente que la rentabilidad social de la línea dual frente a la convencional, ligada en su mayor parte a los ahorros de tiempo, va a depender de diferentes parámetros, entre ellos tres fundamentales:

- 1) El nivel de demanda del corredor.
- 2) El reparto de dicha demanda en el corredor.
- 3) La longitud de los viajes.

Los resultados de los análisis paramétricos se mostrarán más adelante, conjuntamente con otra serie de ventajas basadas en la versatilidad y flexibilidad en la explotación conjunta que presenta este tipo de línea y que redundan, sin duda, en la mejora de los niveles de calidad y seguridad en el servicio.

3. Aspectos constructivos y estructurales

Siendo importantes los aspectos funcionales de la solución que aquí se presenta no lo es menos su viabilidad constructiva. El túnel de una línea dual puede ser construido de forma segura, sencilla y rápida utilizando tecnologías de excavación mecanizada, mediante la utilización de tuneladoras con diámetro suficiente y similares a los que se están utilizando o han sido utilizadas en diversos proyectos, tanto en suelos blandos como en roca, para albergar en la misma sección de túnel dos líneas de vía doble cada una de ellas.

Aunque la alternativa que aquí se desarrolla comprende la utilización de tuneladoras, es evidente que cualquier otro tipo de construcción del túnel es igualmente válido.

En el caso que nos ocupa se ha diseñado una sección circular de túnel basada en los resultados de los análisis para determinar los gálibos cinemáticos de trenes con ancho de plataforma en los coches de

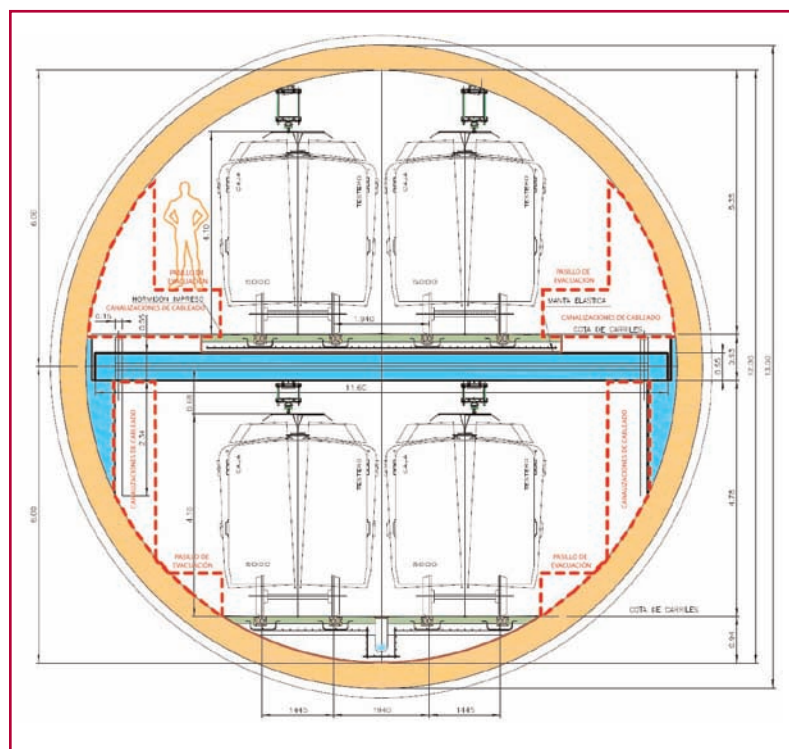


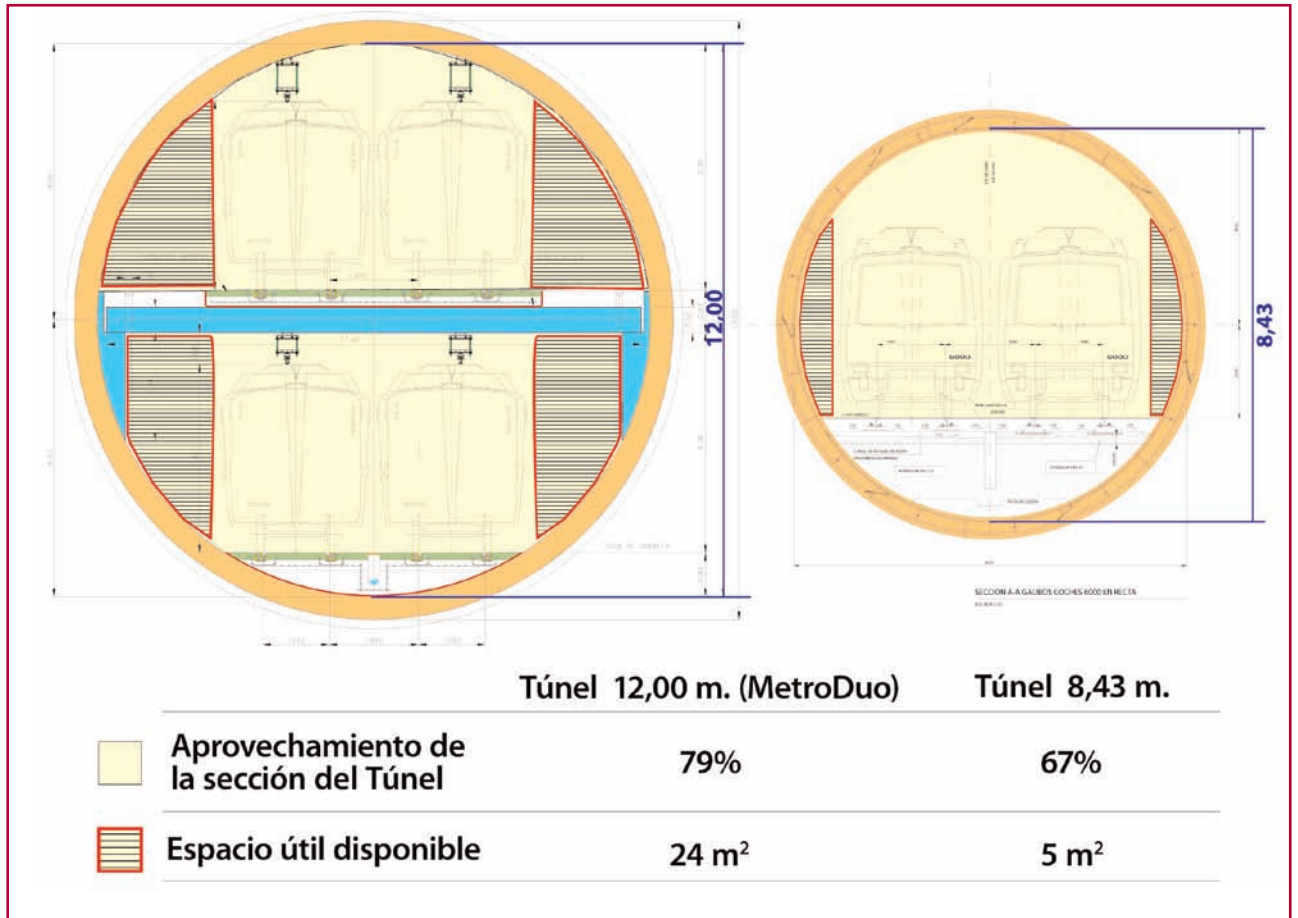
Fig. 3. Prediseño de la sección de túnel.

2,80 metros y con radios mínimos de curvatura en el trazado de 250 metros.

En la figura 3, que muestra el prediseño de la sección de túnel, se pueden observar algunas características de la misma, como el diámetro interior libre de 12 metros, aunque de forma estricta se podría llegar a diámetros del orden de 11,5 metros. Con estas dimensiones de sección los constructores de tuneladoras consultados confirman la posibilidad de trazar los radios mínimos de curvatura anteriormente dichos.

Un aspecto de especial relevancia es el aprovechamiento de la sección de túnel. Para una sección de 8,43 metros de diámetro correspondiente a una línea convencional, el aprovechamiento del túnel teniendo en cuenta la ocupación de los trenes por gálibo, resulta ser de un 67 %, y para la sección de 12 metros de diámetro del túnel en MetroDuo, este aprovechamiento es de un 79 %. Por otro lado, el espacio útil para el túnel de 8,43 metros de diámetro, descontando la zona superior, que resulta de utilidad únicamente para la toma de alimentación del tren es de 5 m², mientras que para el túnel de 12 metros de diámetro es de 24 m². En este último caso, el espacio útil se destinaría a pasillos de evacuación y canalizaciones de cableado, tal y como se puede ver en la figura 3.

Fig. 4. Detalle del aprovechamiento del túnel y espacio disponible.



La experiencia y el conocimiento que existe en estos momentos en España, y particularmente en Madrid, en proyectos de construcción empleando tuneladoras para excavar en zonas urbanas, es seguramente la más alta del mundo. Es conocido que la contribución que a ello ha tenido el impulso dado en la utilización de estas tecnologías por parte de Manuel Melis, anterior Presidente de Metro de Madrid, resultó decisiva. Se han empleado desde tuneladoras de pequeño diámetro para excavar colectores y túneles de servicio, pasando por los de metro (entre 6 y 9 metros) y terminando con los de la M30 (más de 15 metros). Se puede asegurar, por tanto, que excavar con tuneladoras del diámetro que se propone no representa ningún problema o riesgos nuevos, tanto si se excava en suelos blandos como en roca.

Así mismo, las experiencias acumuladas en la construcción de túneles demuestran que la velocidad de excavación no disminuye sensiblemente con el aumento de sección, por lo tanto, parece lógico afirmar que los túneles de una línea dual excavados con tu-

neladora pueden ser ejecutados con rendimientos similares a los ya conocidos, aproximadamente medias de 600 metros de túnel al mes. Una sola tuneladora podría excavar 15 kilómetros de túnel en dos años.

El tipo de suelo marcará la profundidad mínima a la que se deberá realizar la excavación del túnel para evitar subsidencias. En el caso de suelos blandos y aplicando la regla general de situar la clave del túnel a una distancia de 1,5 veces el diámetro de excavación, el nivel de la cota de carriles de la línea superior se situará aproximadamente a 24 metros de profundidad y el de la inferior a 30 metros. Las plataformas de los andenes correspondientes estarán aproximadamente a una distancia 1 metro menor, es decir, a 23 y 29 metros respectivamente. Estas profundidades podrán reducirse en función de la calidad del terreno a excavar y de los tratamientos de mejora del mismo que se realicen.

Las estaciones tendrían una configuración similar a las diseñadas para los diferentes Planes de Ampliación de la red de Metro de Madrid. Se trata de estaciones

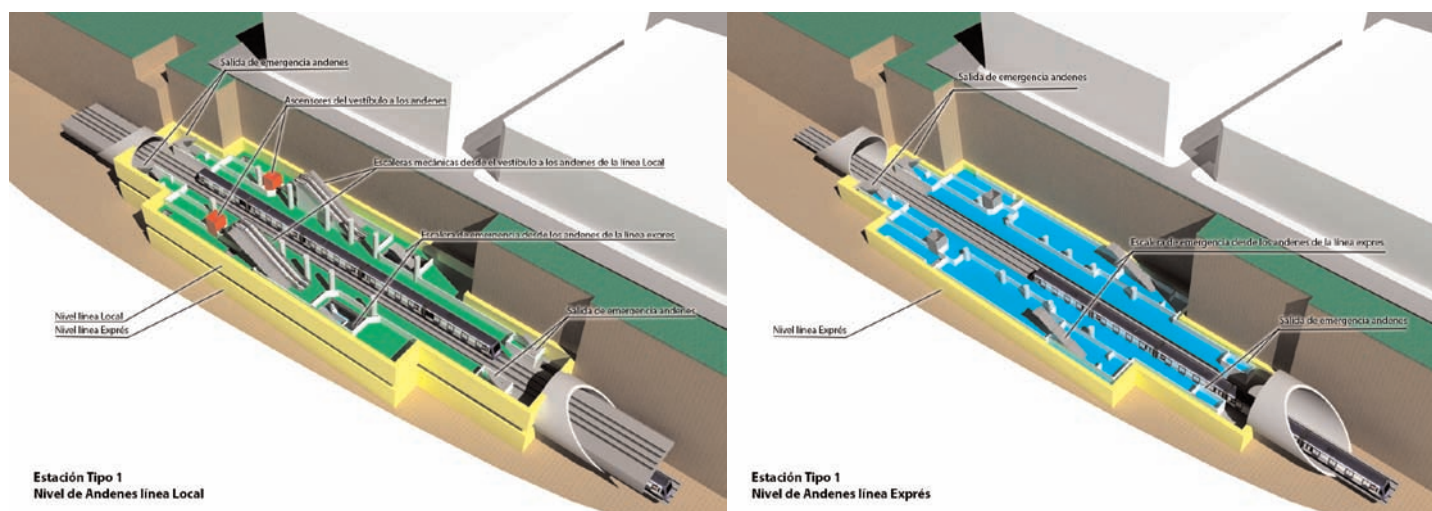


Fig. 5. Detalle de estaciones tipo 1.

dobles. El criterio seguido a la hora de diseñarlas es que en todas ellas, con independencia de que la línea expés tenga o no parada en condiciones normales de explotación, en el nivel inferior se le dotará de los acabados y elementos suficientes como para ser utilizada en situaciones excepcionales del servicio o de emergencia como un elemento importante que aporte flexibilidad a la explotación de la línea o en su caso a la evacuación. Por lo tanto, en su terminación, se incluirán los andenes, escaleras fijas, tanto normales como de emergencia, la iluminación y todos aquellos sistemas que hagan posible la utilización del nivel inferior de la estación con la misma seguridad que la de una línea normal aunque con condiciones de confort limitadas.

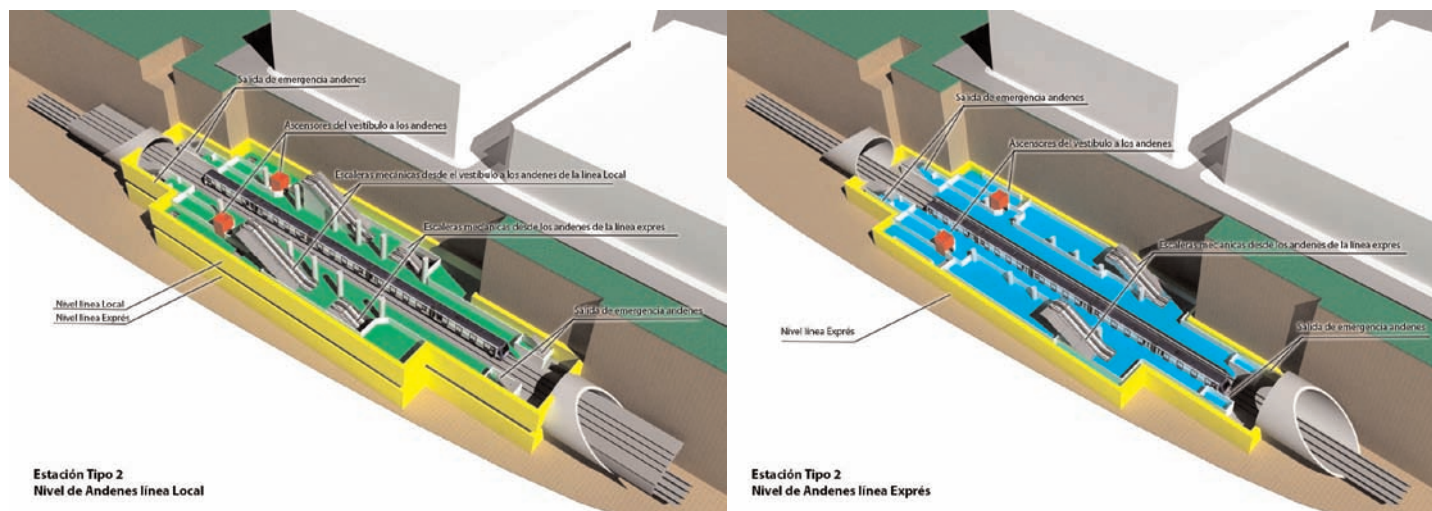
En todo caso, deberá permitir realizar en su ámbito, de forma sencilla y sin afectar a la circulación de trenes, las modificaciones necesarias en el equipa-

miento para que en el futuro se puedan transformar en estaciones con parada de todos los trenes de la línea expés, en el caso de que los cambios en la demanda lo aconsejen. En resumen: la geometría de las estaciones con parada únicamente de la línea local y de las estaciones con parada de la línea local y la expés es la misma. Sin embargo, no lo será el equipamiento con el que se dote a ambos tipos de estaciones para el nivel inferior o nivel expés.

Por ello, las estaciones presentan dos tipologías: estación tipo 1 con parada de línea local y estación tipo 2 con parada de línea expés y local. El hecho de compartir la geometría en ambos tipos de estaciones permite convertir una estación tipo 1 en tipo 2 sin más que equiparla con las instalaciones necesarias.

El criterio de diseño del acceso facilita no solo un intercambio fácil y rápido entre los dos niveles cuan-

Fig. 6. Detalle de estaciones tipo 2.



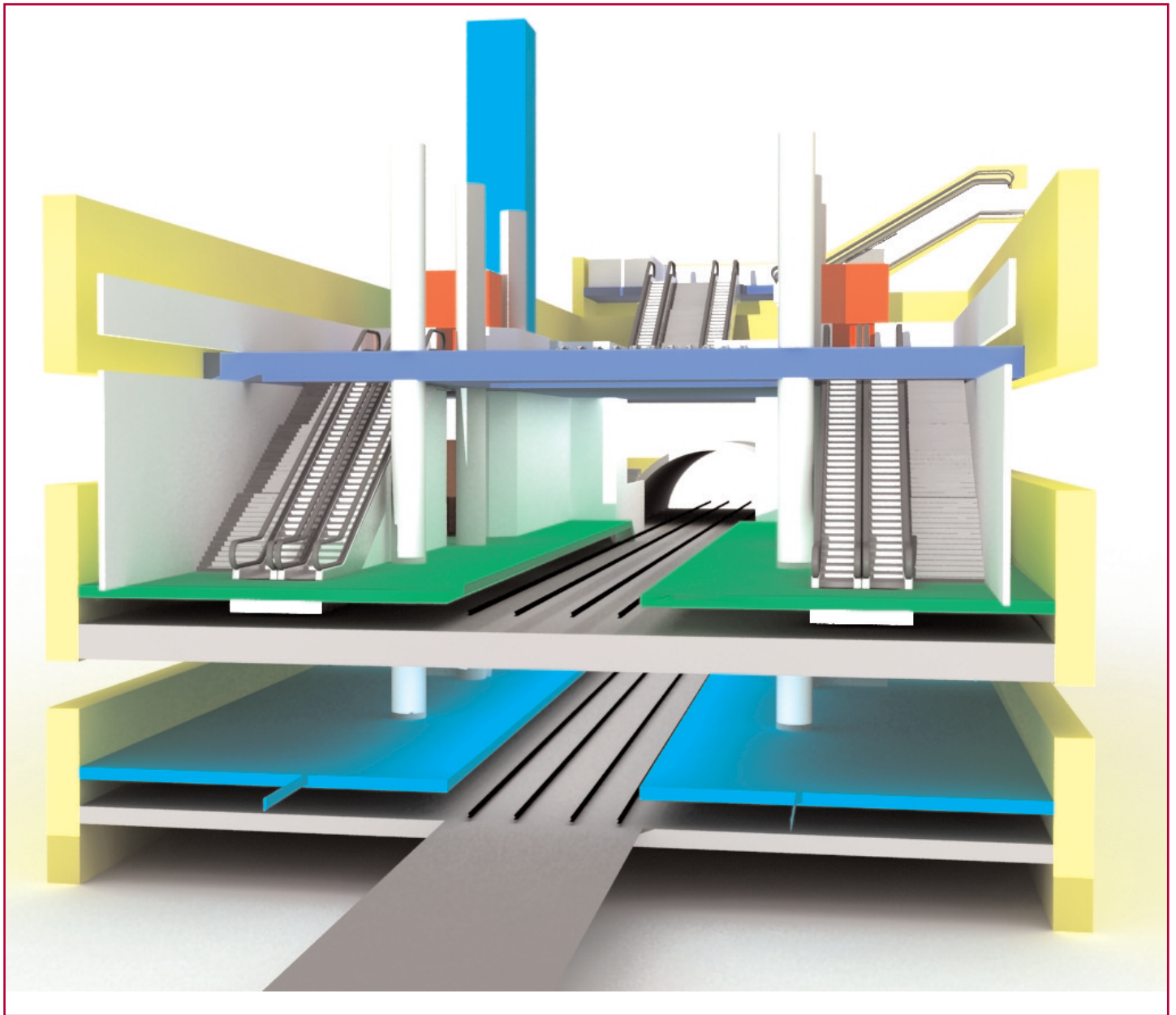


Fig. 7. Sección de estación tipo 2.

do coincidan paradas de ambas líneas, sino también una entrada al vestíbulo lo más directa posible. La longitud de los andenes que se ha considerado es de 120 metros, pero podrá variar en función del material móvil a utilizar en la explotación.

Las estaciones tendrán un ancho similar a las construidas en los últimos años en Madrid, pues el mayor diámetro del túnel no condiciona dicha dimensión y se considera suficiente para asegurar la transitabilidad de un número elevado de personas, aunque en algún caso, donde las demandas alcancen niveles extraordinarios, serán necesarios diseños

con mayores espacios, pero siguiendo los mismos criterios funcionales.

4. Tiempos de viaje. Análisis paramétricos

Se han determinado los tiempos de viaje en Metro-Duo y se han comparado con los de una línea convencional. Con el fin de simplificar los análisis se ha supuesto que la traza de la línea es recta, sin desniveles y que las estaciones de la línea local están situadas a una distancia que varía entre los 700 y 1000 metros.

Así mismo, se han fijado unas características cinemáticas idénticas para los trenes de la línea local y la exprés, pues de hecho, uno de los aspectos que le dará flexibilidad a la oferta de trenes es que estos puedan circular indistintamente por una línea o por otra, pudiendo cambiar de nivel en los terminales de la línea MetroDuo, que serán instalaciones para mantenimiento, talleres y aparcamientos de trenes comunes a ambas.

La velocidad máxima de los trenes será de 110 Km./h, limitándose la velocidad en los trenes de la línea exprés a su paso por estaciones sin parada a 60 Km./h. Esta velocidad de paso puede aumentarse si se toman medidas de diseño específicas en las estaciones para controlar la velocidad del aire.

Se han analizado los casos correspondientes situando una estación con parada de la línea exprés cada 4 de la línea local, cada 5, 6 y 7, lo que supone intersecciones en la línea exprés de 2,8 kilómetros, 3,5 kilómetros, 4,2 kilómetros y 4,9 kilómetros, en el caso de distancias entre estaciones locales de 700 metros, y de forma análoga con distancias de 1.000 metros (4, 5, 6 y 7 kilómetros).

Para todos estos casos se han hecho las simulaciones de los tiempos de viaje utilizando una línea convencional (equivalente a utilizar solo la línea local en Metro-

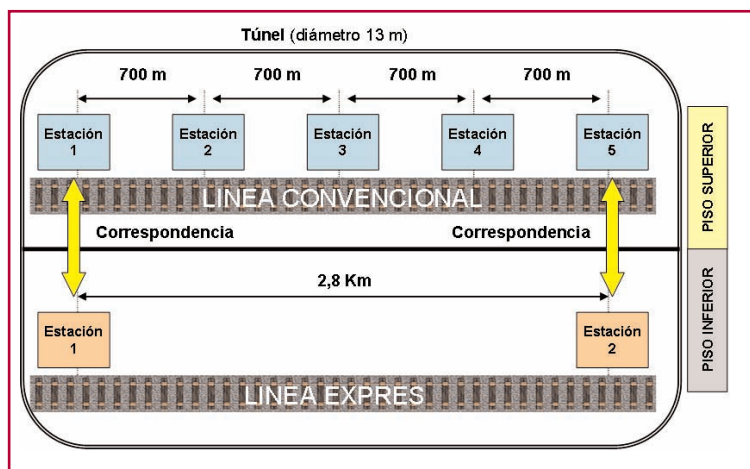


Fig. 8. Configuración de la línea MetroDuo con intersección local de 700 metros.

Duo) y utilizando las posibilidades de MetroDuo, de acuerdo con los diferentes tipos de viaje descritos en el Apartado 2.

Se han considerado los tiempos de espera en andenes, los de intercambios entre líneas cuando son necesarios, los tiempos de parada en estación y los tiempos de viaje en tren.

El gráfico 1 se corresponde con el esquema de la figura 8 y con estaciones de la línea exprés separadas 2,8 km.

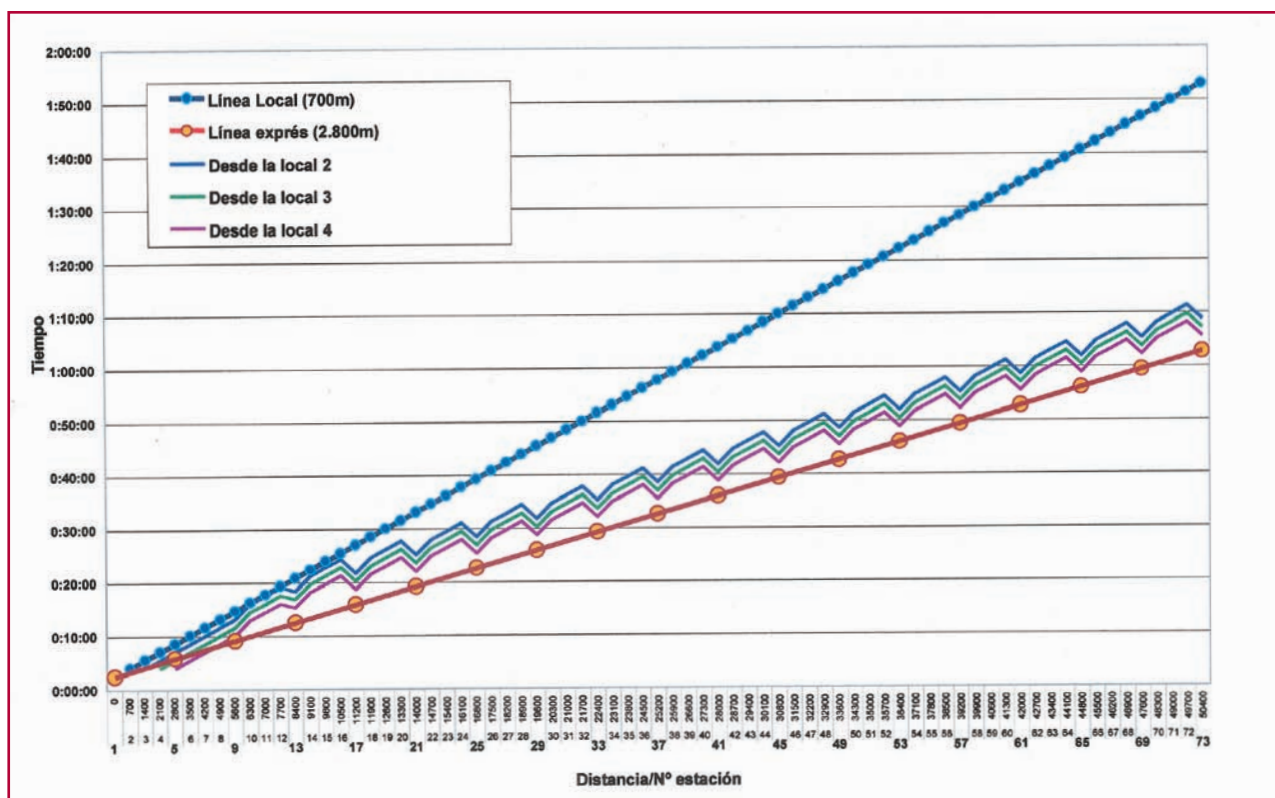


Gráfico 1. Tiempo de Recorrido combinado entre estaciones de una línea MetroDuo de 50,4 km con distancias entre estaciones locales de 700 metros y 2.800 metros para estaciones exprés (1 exprés de cada 4 locales).

Gráfico 2.
Tiempo de Recorrido entre estaciones locales y Expres de una Línea MetroDuo con distancias entre estaciones de 700 y 1000 m. (1 de cada 4).

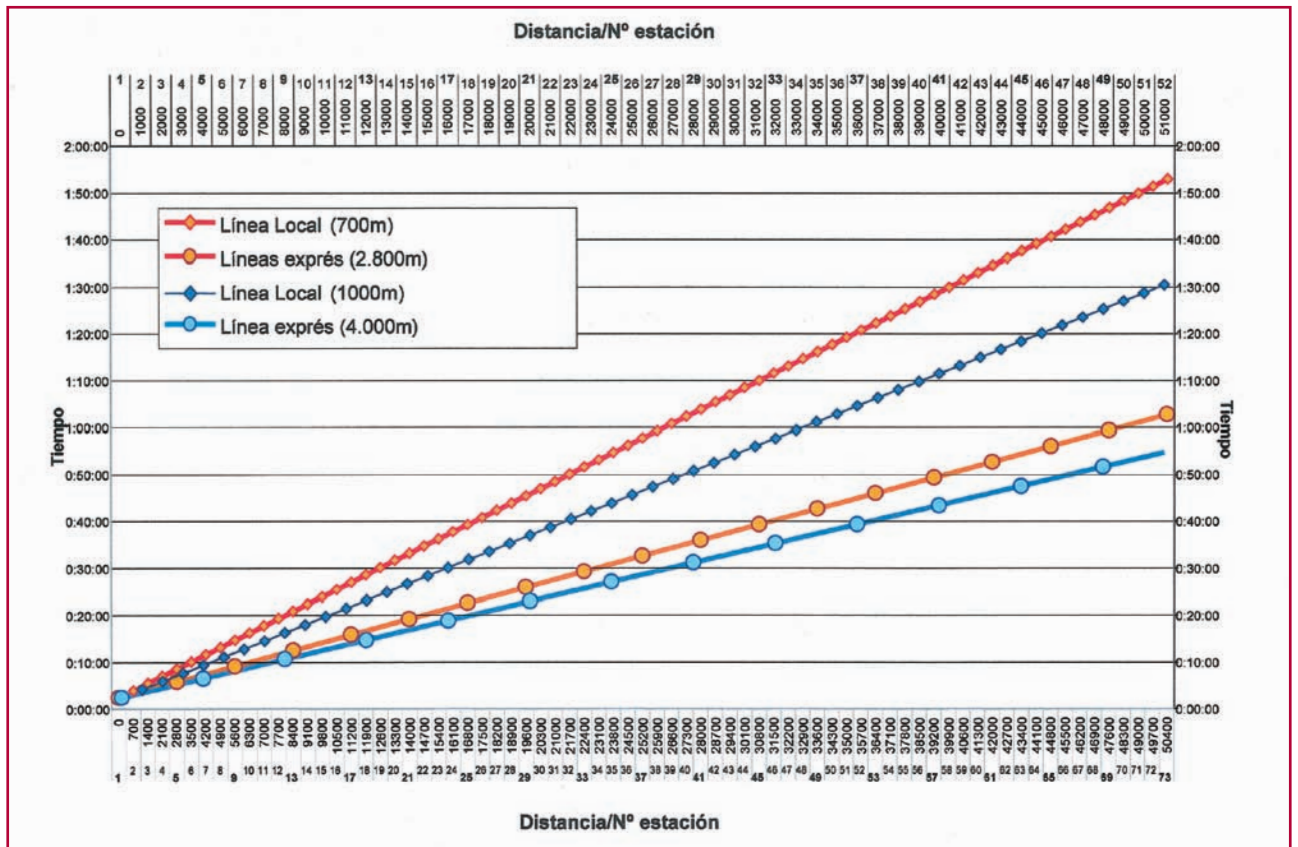


Gráfico 3.
Tiempo de recorrido de una Línea MetroDuo con distancias entre estaciones de 700 m y 4.900 m. (1 de cada 7).

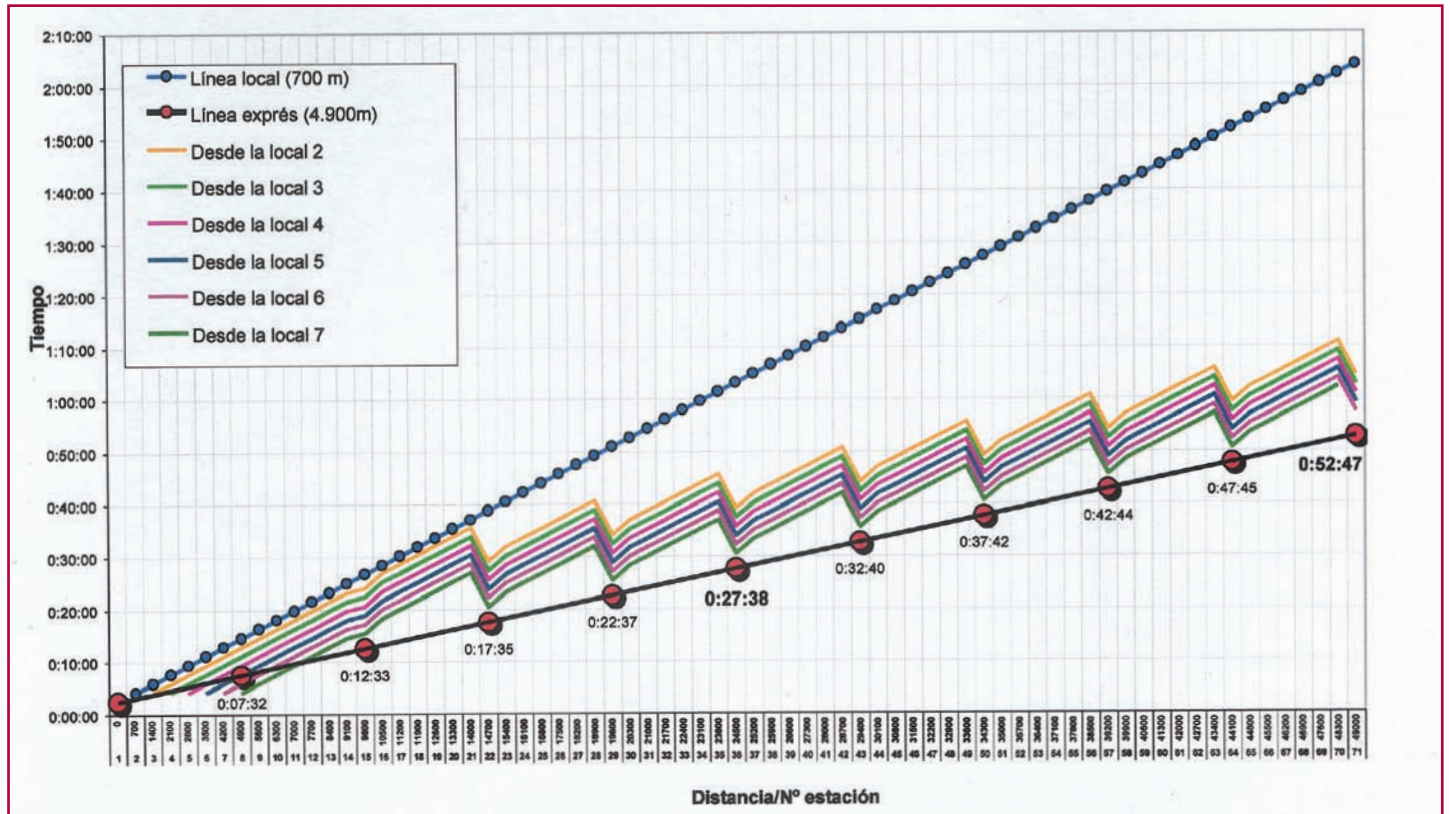




Imagen del Metro de Sao Paulo.

Como se puede observar en el gráfico 1, para cada distancia hay un tiempo máximo de viaje, correspondiente a la recta que responde a la velocidad comercial de la línea local (o de líneas convencionales) y un mínimo, correspondiente a la recta que marca la velocidad comercial de la línea exprés. En este caso, obviamente, los valores sólo tienen sentido cuando la distancia se corresponde con la posición de una estación con parada de la línea exprés. Las curvas con forma de diente de sierra recogen los valores de los tiempos empleados en los viajes que tienen que realizarse de forma combinada, teniendo como origen y/o destino una estación de la línea local.

En el gráfico 2 se muestra el análisis comparativo de tiempos de recorrido para distancias de interestación de 700 m y 1000 m.

El gráfico 3 corresponde al caso en que las intersecciones de la línea exprés tienen 4,9 kilómetros de longitud.

A la vista de los resultados se puede concluir que:

- 1.- Excepto en los casos en que el viaje se realice solo sobre la línea exprés, los ahorros medios de tiempo empiezan a ser notables a partir de los 5 o 10 km.
- 2.- La mayor separación de las estaciones exprés aumenta la velocidad comercial de la misma (disminuye la pendiente de la recta de la línea exprés), pero penaliza el tiempo de los viajes combinados (aumentan los valores de los picos de la curva en diente de sierra).

En lo que sigue se presenta el análisis efectuado para el primer caso planteado, es decir, estaciones de la línea local a 700 metros de distancia y a 2.800 metros las de la línea exprés.

Se considerará así mismo que la longitud de la línea es de unos 50 km. Esta hipótesis parece estar dentro de lo razonable para la tipología de ciudad que se está considerando. En el mundo ya hay líneas que rozan estas longitudes, superando los 70 km en el caso de Londres. En Madrid también se está próximo a alcanzar dicha longitud, aunque con ruptura de la demanda en algunos puntos (MetroSur, línea 9, línea 10).

5. Modelo de demanda y cuantificación de los ahorros de tiempo

La comparación en lo que respecta a capacidad de las líneas, tiempos de viaje, consumo energético y otros factores, se va a establecer entre una línea tipo MetroDuo y una línea convencional dotada de la tecnología más avanzada, que opera con conducción automática integral, es decir, aquella que tiene la posibilidad, con el estado del arte actual, de tener la máxima capacidad de transporte y la máxima velocidad comercial.

Para valorar la rentabilidad de la línea es necesario previamente construir un modelo de demanda. Para ello, se han tomado como base los datos de las redes de ciudades del mundo en donde ya se plantean problemas de movilidad como el que se quiere resolver con MetroDuo, con valores altos de la demanda, grandes niveles de ocupación en trenes y cercanos ya a la saturación de algunas líneas. En este sentido se han considerado datos de las redes que operan en Moscú, Sao Paulo, Santiago de Chile, México DF y Tokio.

Tomando la media de los viajeros por kilómetro para las redes anteriores, y aplicando dicho resultado a la línea de estudio (50 kilómetros de longitud), se obtiene una demanda total en día laborable de 1.090.000 viajes. Para esta demanda se estima una intensidad máxima para la hora punta y tramo más cargado de 43.600 viajeros/hora y sentido.

Una línea convencional explotada con un sistema de ATP y con regulación automática de la velocidad (ATO) en el estado tecnológico actual alcanza una capacidad de transporte de 30.000 viajeros/hora con los datos de partida de material móvil señalados ante-

Tabla 1. Datos de explotación de línea convencional automática y MetroDuo.

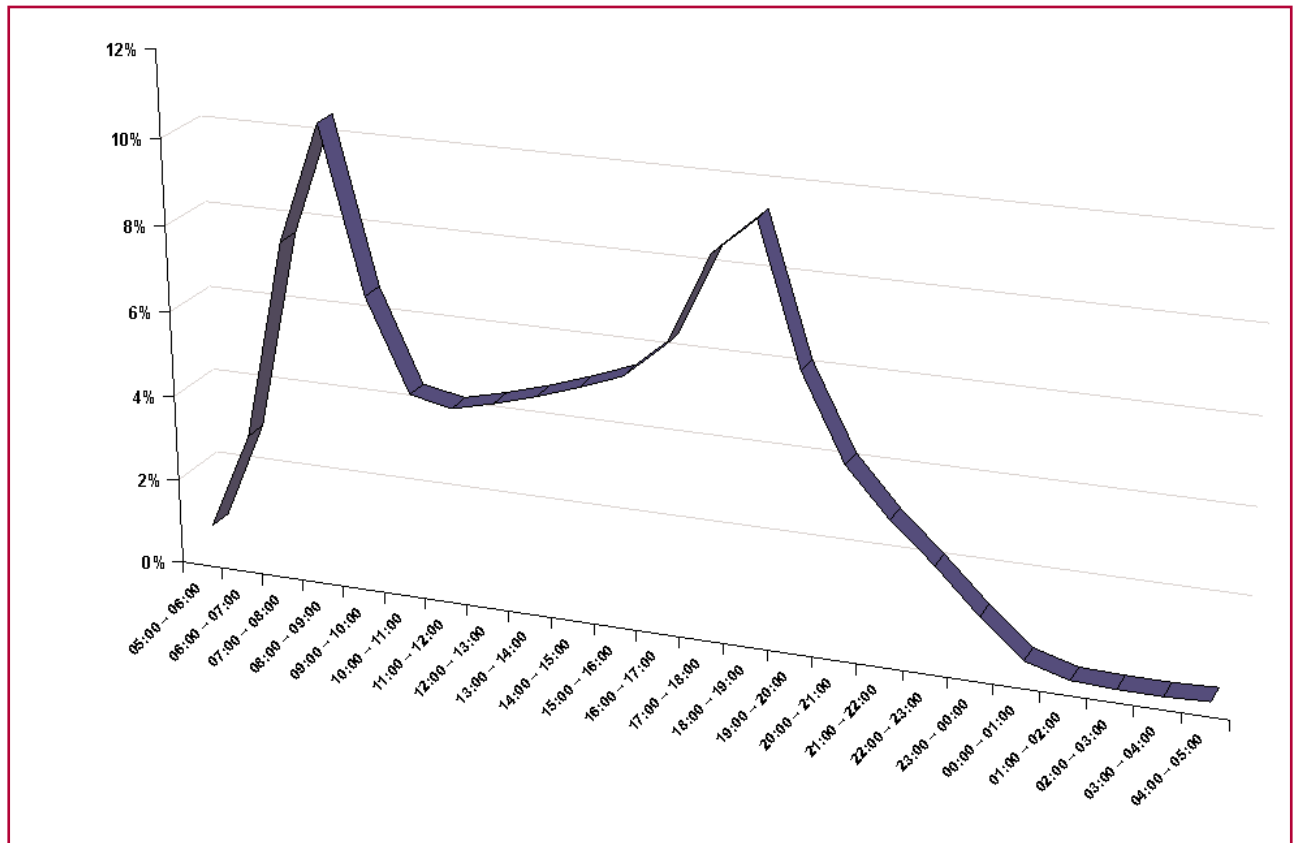
	Línea Automática	Línea Local / Expres (para la misma capacidad)		
		Local	Expres	Trenes / Capacidad Total
Velocidad Comercial (km/h)	27,04	26,76	48,18	
Tiempo de viaje redondo	3h. 43'	3h. 46'	2h. 5'	
Intervalo medio entre trenes (seg.)	105	262	175	
Número de Trenes	128	52	43	95
Capacidad de Transporte (Viaj./h.)	43.611	17.478	26.167	43.645

riormente, con lo que no sería posible atender a la demanda objetivo al encontrarse al 145 % de su capacidad, para lo que es necesario aceptar niveles de ocupación media mucho más altos de los de diseño (6 viajeros/m²) (Tabla 1).

Para la misma capacidad de transporte, 43.600 viajeros/hora y sentido se necesitan 95 trenes en la solución Metroduo frente a los 128 para el caso de la línea automática integral sin conductor. Pero además,

la diferencia más importante entre una y otra solución es que mientras la línea automática quedaría al borde de su capacidad máxima, MetroDuo tiene posibilidades de aumentar su capacidad, bien operando más trenes o bien dotándoles de los equipamientos necesarios para la automatización. MetroDuo permitiría, sin automatizar, llegar a operar 145 trenes con una capacidad de 61.056 viajeros/hora y sentido, lo que significa un 40% más de capacidad que la línea auto-

Gráfico 4. Promedio de distribución horaria de la demanda de las principales redes en día laborable.



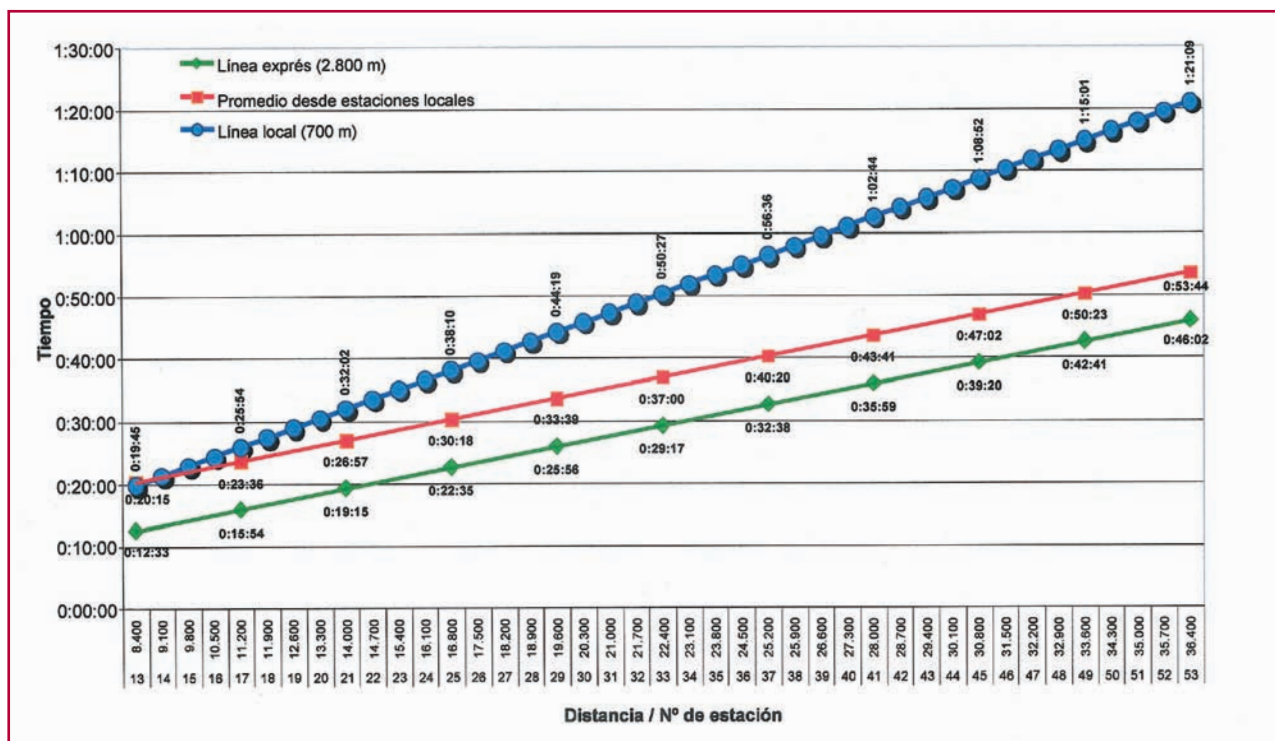


Gráfico 5. Tiempos de trayecto para una distancia de interestación de 700 m. (1 exprés de cada 4 locales).

mática, y hasta 204 trenes si se automatizan la línea local y la líneas exprés, llegando a los 87.223 viajeros/hora y sentido, es decir, el doble de capacidad de la línea automática integral sin conductor.

A partir de los datos existentes de las redes antes mencionadas se ha determinado también el promedio de la distribución horaria de la demanda con el fin de aplicarla al análisis.

La demanda total para un día laborable, estimada en 1.090.000 viajes, se distribuiría de acuerdo al perfil mostrado en el gráfico 4.

Los valores anteriores de demanda y de intensidad máxima no son en absoluto desmesurados. Suponen una densidad por kilómetro de red para la línea de 21.626 viajeros. Próximamente se abrirá una línea en Sao Paulo con 14 kilómetros de red y 15 estaciones, con una intensidad máxima durante la hora punta en el tramo más cargado de 72.000 viajeros/hora y una densidad por kilómetro de red de 85.714 viajeros. No se pondrán en servicio todas las estaciones hasta que una mayor vertebración de la red permita moderar dicho valor.

Las rectas de el gráfico 5 recogen las velocidades de desplazamientos resultantes de la simulación para una línea de metro convencional automática y para MetroDuo. En el caso de ésta, se ha desdoblado en

dos rectas. La recta verde responde a la velocidad comercial cuando el viaje se realiza sólo sobre la línea exprés y la recta roja representa la velocidad comercial equivalente media cuando se utiliza de forma combinada tanto la exprés como la local.

Los tiempos vienen dados respectivamente por:

$$T_{convencional} = Distancia / (Veloc. Comercial) / 60 = Distancia / 27 / 60$$

$$T_{exprés} = Distancia / (Veloc. Comercial) / 60 = Distancia / 48 / 60$$

$$T_{combinada} = T_{exp.} + 7,5$$

NOTA: las distancias se expresan en Kilómetros y los tiempos en minutos.

Para realizar la comparación de ahorros de tiempos de viaje entre ambas soluciones se necesita hacer hipótesis sobre el reparto de la demanda entre cada uno de los posibles tipos de viaje y sobre la distancia de recorrido medio de los mismos.

Se ha supuesto que la demanda, en cuanto a entradas y salidas, es uniforme en todas las estaciones de la línea excepto en las que tienen parada tanto de la red local como de la exprés, pues se da por hecho que éstas se situarán en puntos singulares, bien porque por sí mismas sean generadoras de un número

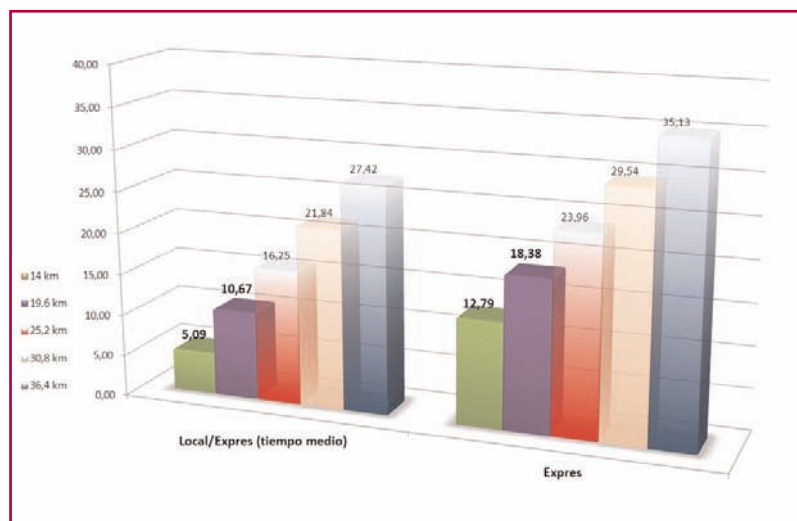


Gráfico 6. Tiempo ahorrado en función de la distancia recorrida respecto de la línea convencional.

importante de viajes o por su interrelación con el resto del sistema de transporte (correspondencia con otras líneas, intercambiadores de transporte, etc.). Para tener en cuenta este aspecto, se le ha dado un peso a estas estaciones del doble de las simples.

Para el estudio del recorrido medio se han realizado también análisis paramétricos. Los resultados que aquí se presentan corresponden a recorridos de 14 y 20 Kilómetros, acordes con las características de las ciudades donde, como ya hemos dicho, el problema se presenta en el elevado tiempo de viaje que supone cubrir distancias de esta longitud utilizando metros convencionales. Estas distancias medias son similares a las que ya se recorren a día de hoy en algunos ferrocarriles metropolitanos (Moscú, por ejemplo).

En el gráfico 6 se muestran los ahorros en tiempo cuando se viaja en MetroDuo con respecto a una línea automática convencional en función de la distancia y del tipo de viaje.

Aplicando estos ahorros por viaje a la demanda total de la línea se obtienen los siguientes valores de

ahorro de horas anuales de MetroDuo respecto de la línea convencional automática.

Se han considerado únicamente los ahorros derivados de los viajes en días laborables (250 días al año), correspondientes a la demanda diaria para la línea y mencionada anteriormente (1.090.000 viajes).

La monetarización de los costes, tanto los del tiempo, como de las inversiones necesarias para la construcción y puesta en servicio de las líneas que se exponen en la tabla 2, se ha llevado a cabo con los valores aplicables en España. Para monetarizar los ahorros de tiempo se utiliza la hora de desplazamiento al trabajo, sobre la que existen diferentes valoraciones. Para este estudio se ha utilizado el valor de 11,75 €/hora⁽¹⁾.

6. Inversión de construcción y puesta en servicio

Se muestra en la tabla 3 la inversión necesaria para poner en servicio una línea automática, con su máxima capacidad, de 43.600 viajeros/hora y una línea MetroDuo con la misma capacidad que la anterior, con las características de partida que ya se han comentado anteriormente.

El coste de la línea MetroDuo incluyendo infraestructura, instalaciones, equipamientos y trenes se sitúa en unos 6.023 millones de euros lo que representa un coste de 120 millones de euros por kilómetro.

El coste de la línea convencional automática, con los mismos conceptos, es de unos 4.424 millones de euros, es decir, una inversión de 88 millones de euros

(1) Valor utilizado en la Cuenta Económica y Socioambiental del Transporte Terrestre de Viajeros de la Comunidad de Madrid en 2004. (actualizado a 2008).

Tabla 2. Valoración económica de las horas anuales ahorradas.

Distancia de viaje (km)	Utilización	Ahorro (min)	Ahorro medio por viaje (min)	Ahorro Total día laborable (min)	Ahorro día laborable (horas)	Ahorro Anual (horas)	Monetarización (€)
14	Local/exprés	5,09	9,71	10.583.173	176.386	44.096.556	518.134.528
	Exprés	12,79					
19,6	Local/exprés	10,67	15,29	16.669.007	277.817	69.454.194	816.086.785
	Exprés	18,38					

Tabla 3. Valoración de la inversión diferencial Línea Automática y MetroDuo.

	Metroduo (1 expres-4 local)	Línea Automática	Diferencia
Coste de la Infraestructura (€ por km)	92.385.146	47.903.955	44.481.190
Coste de las Instalaciones (€ por Km)	324.640	240.654	83.986
Coste Total (€ por Km)	92.709.786	48.144.609	44.565.177
Coste total para longitud de línea de 50,4 km (€)	4.672.573.213	2.426.488.299	2.246.084.914
Material Móvil: Tren 6 coches (ATO) (€)	10.200.000		
Material Móvil: Tren 6 coches (UTO) (€)		12.000.000	
Trenes: capacidad de transporte 43.600 Viaj./hora incl. Reserva	103	139	-36
Coste Material Móvil (€)	1.050.600.000	1.668.000.000	-617.400.000
Coste 2 Cocheras Capacidad 70 Trenes (€)	220.000.000		
Coste 2 Cocheras Capacidad 70 Trenes (UTO) (€)		250.000.000	-30.000.000
Coste Taller con Equipamiento (€)	80.000.000	80.000.000	
Coste Total (€)	6.023.173.213	4.424.488.299	1.598.684.914

por kilómetro. Por tanto, la inversión se incrementa en 1.600 millones de euros para la línea MetroDuo respecto de la línea convencional automática, lo que representa un incremento de un 36 %.

7. Otros aspectos económicos, sociales y medioambientales.

En este apartado se valoran otros aspectos de carácter económico, social y medioambiental que contribuyen, junto con los ahorros de tiempo de viaje, al retorno de la inversión de MetroDuo.

Consumo energético

La menor necesidad de número de trenes en MetroDuo para satisfacer el mismo volumen de demanda, lleva a un ahorro energético que se estima en 34,20 GW/hora al año, con una repercusión económica de 3.077.919 €/año.

Pérdidas de tiempo por perturbaciones en la línea

Adicionalmente, al tratarse de una explotación con dos líneas paralelas existen menores pérdidas de tiempo derivadas de perturbaciones en el servicio por incidencias en una de ellas, dado que es posible utili-

zar la otra línea como alternativa. A nos ser que se produzcan averías simultáneas en ambas, la movilidad en el corredor está siempre garantizada. Aplicando los datos existentes sobre índices de averías que miden las perturbaciones del servicio en explotaciones de Metro, se obtienen los valores reflejados en la tabla 4.

Se han considerado las incidencias de una línea convencional con una vía por cada sentido de acuerdo a la demanda del modelo y se estima una reducción del 80 % en el tiempo perdido en las mismas.

Disminución emisiones GEI

La reducción del consumo energético descrita anteriormente lleva asociada una disminución de las emisiones de gases efecto invernadero.

Tabla 4. Cuantificación de los ahorros de tiempo en incidencias.

	Pérdida de tiempo por incidencias (horas)	Valoración económica (€)
Convencional	1.094.396	12.859.151
Línea Metroduo	218.879	2.571.830
Ahorro de tiempo incidencias	875.517	10.287.321

**Página de publicidad
Omitida intencionadamente**

Tabla 5. Cuantificación de los ahorros energéticos, emisiones evitadas y equivalencias.

Ahorro energético diario (kwh)	Ahorro energético anual (Gwh)	Valoración económica (€)	Emisiones evitadas año (TM)	Monetarización (€)	Árboles equivalentes
136.796	34,20	3.077.919	13.064	287.409	332.350

La tabla 5 presenta la valoración de la reducción de Gases Efecto Invernadero. Para ello, se utiliza el factor de emisiones correspondiente a la energía consumida por Metro de Madrid durante el año 2008, obteniendo las TM ahorradas que se valoran a razón de 22 €/TM⁽²⁾. Se incluye además una equivalencia con árboles necesarios para absorber las emisiones anteriores.

8. La rentabilidad social de MetroDuo.

Períodos de retorno de la inversión

Se han calculado los retornos anuales para las inversiones definidas en el apartado 6 considerando ahorros de carácter económico y socioambiental en un escenario diferencial referenciado a la línea automática integral, que se monetarizan para anali-

(2) Valor en el rango de la recomendación del estudio Impact v 1.1. (Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport) Feb. 08. Participado por INFRAS (Universidad Karlsruhe).

zar la rentabilidad de MetroDuo sobre la misma (Tabla 6):

- Ahorros de tiempo de viaje.
- Ahorros de tiempo por reducción del impacto de las incidencias.
- Ahorros de consumo energético.
- Ahorros de emisiones de gases de efecto invernadero GEI.

A la vista de los ahorros anuales los períodos de retorno se expresan en la tabla 7.

9. Otras ventajas adicionales de MetroDuo

Además de la ya mencionada en el apartado 7, en lo que se refiere a la posibilidad de continuar dando servicio por una de las líneas, en el caso de corte de servicio en la otra, hay otras relacionadas con la

Tabla 6. Cálculo del retorno anual.

TIEMPO	Valor económico
Ahorro anual de tiempo de viaje 14 km (€)	518.134.528
Ahorro anual de tiempo de viaje 19,6 km (€)	816.086.785
Ahorro por reducción impacto de incidencias (€)	10.287.321
ENERGÍA CONSUMIDA	
Ahorro anual por menor consumo energético (€)	3.077.919
Ahorro anual por reducción de emisiones de GEI (€)	287.409

Tabla 7. Período de recuperación.

	Recorrido medio viaje 14 km	Recorrido medio viaje 19,6 km
Inversión diferencial (MetroDuo - L. convencional) (€)	1.598.684.914	
Retorno anual (€)	531.787.177	829.739.434
PERIODO DE RETORNO (AÑOS)	3,01	1,93

seguridad de difícil cuantificación, pero que indudablemente mejoran los niveles de la misma.

La existencia de dos ámbitos distintos para cada una de las líneas permite que, interconectando los dos niveles a través de la losa de separación, una de ellas puede utilizarse como camino de evacuación seguro, en caso de producirse un incidente en la otra.

También, la existencia del espacio correspondiente al nivel inferior de las estaciones sin parada de la línea expres, no utilizado en la explotación en condiciones normales, puede ser utilizado como una pieza importante de los planes de evacuación en casos de emergencia.

Finalmente, la línea MetroDuo permite la optimización del uso de equipos no embarcados que podrían ser compartidos por las dos líneas.

11. Conclusiones

Se ha diseñado un nuevo sistema de transporte ferroviario suburbano para grandes ciudades que hemos denominado MetroDuo y se analizará su rentabilidad considerando los aspectos económicos, sociales y medioambientales. Del análisis del triple balance se deduce que esta alternativa presenta mejoras sustanciales con respecto a los sistemas de metro más avanzados que existen en la actualidad. Las mejoras en rentabilidad se basan fundamentalmente en la fuerte reducción de los costes sociales ligados a elevados ahorros de tiempo. De dicho análisis se extraen las siguientes conclusiones:

1. Para niveles de capacidad de transporte superiores a los admisibles por las líneas automáticas de metro, MetroDuo necesita una inversión de construcción y puesta en servicio del 36% superior, pero presenta grandes retornos de carácter socioambiental.

2. Los ahorros relacionados con el tiempo y la energía consumida que supone MetroDuo, con respecto a las líneas automáticas, amortizan esta diferencia de inversión en un plazo de tiempo que se puede estimar en 3 años para el escenario más conservador. A partir de ese momento, para una línea de 50 km y con los grados de ocupación y distancias de viaje supuestos, la monetarización de los ahorros de tiempo y energéticos se estiman entre los 530 y los 830 millones de euros anuales.
3. En las condiciones expuestas, mientras la capacidad de una línea automática con igual trazado y longitud queda agotada y no puede responder a posibles aumentos de demanda, MetroDuo tiene capacidad remanente suficiente pues puede transportar hasta el doble de clientes.
4. MetroDuo es más eficiente energéticamente y, como consecuencia de ello, y en igualdad de condiciones emite 13.000 toneladas de CO₂ al año menos que la línea convencional automática.
5. La construcción y puesta en servicio de MetroDuo se lleva a cabo con procedimientos y tecnologías existentes en el mercado y suficientemente probadas, con alto grado de seguridad y eficiencia.

12. Agradecimientos

La evaluación de MetroDuo ha sido posible gracias a la participación de personal de Metro de Madrid pertenecientes a las Direcciones del Área Técnica y a la Subdirección de Calidad y Procesos. En especial mi agradecimiento para Juan Carlos Díez, Emiliano Durán, Julio Plaza, Jesús Vadillo, Dionisio Izquierdo, Laura Guerrero, Antonio Buendía, Fernando Rodríguez, Jose Antonio Gallego, Victor Gonzalez, Carlos Rodríguez y Pedro Pablo García. ♦

Referencias:

- Handbook on estimation of external costs in the transport sector. Impact v 1.1. (Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport) Participado por INFRAS (Universidad Karlsruhe). Feb. 2008.
- Cuenta Económica y Socioambiental del Transporte Terrestre de Viajeros de la Comunidad de Madrid. 2004.
- Consultas realizadas a COMET (Community of Metros). Railway and Transport Strategy Centre (RTSC), Imperial College London.
- "Libro Blanco del Transporte (U.E.)". Comisión Europea.