

APLICACIONES EUROPEAS DEL TREN-TRANVÍA, UNA NUEVA ORIENTACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO FERROVIARIO

EUROPEAN APPLICATIONS OF THE TRAM-TRAIN. A NEW TREND IN PUBLIC RAIL TRANSPORT

MARGARITA NOVALES ORDAX. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos
Profesora Asociada

ALFONSO ORRO ARCAÏ. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Asociado

MIGUEL D. RODRÍGUEZ BUGARÍN. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Titular.

Área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes. Universidade da Coruña

RESUMEN: Como respuesta a las demandas de movilidad en áreas metropolitanas, se ha venido desarrollando en Europa, a partir de los años 90, un nuevo sistema de transporte denominado tren-tranvía. Dicho sistema se basa en utilizar líneas ferroviarias convencionales para prolongar, sin necesidad de cambiar de vehículo, los servicios urbanos de tranvías o metros ligeros, intercalándolos entre las circulaciones ferroviarias, obteniéndose una mayor rentabilidad de dichas líneas, a menudo infrautilizadas. De esta forma se consigue ofrecer servicios de transporte directos en un ámbito más extenso, eliminando tiempos de espera y transbordo entre diferentes modos, con un coste por kilómetro mucho menor del que se produciría si se estableciesen líneas de metro ligero de nueva construcción hacia esas zonas. Este uso de vehículos ferroviarios ligeros sobre infraestructuras ferroviarias convencionales conlleva resolver una serie de aspectos técnicos que se tratarán en el presente artículo.

PALABRAS CLAVE: METRO LIGERO, TRANVÍA, VÍAS COMPARTIDAS, TREN-TRANVÍA

ABSTRACT: In response to mobility demands in metropolitan areas, a new transport system called tram-train has been developed since nineties in Europe. This system consists on the use of conventional railway lines to extend, without changing the vehicle, the tram or light rail urban services, inserting them among rail circulations, and getting a greater profitability of these lines, often underused. In such a way, direct transport services can be offered in a more extensive zone, removing waiting and interchange times between different modes, with a much lower cost by kilometre than if new light rail lines to that zones were built. This use of light rail vehicles over conventional railway infrastructures entails several technical issues that must be solved, and that will be treated in this paper.

KEYWORDS: LIGHT RAIL, TRAMWAY, SHARED TRACKS, TRAN-TRAIN

1. EL TREN-TRANVÍA

Como es sabido, los vehículos de metro ligero convencional o tranvías circulan "a la vista", integrados con el tráfico urbano o en vías segregadas. Su explotación no exige altas velocidades sino elevadas prestaciones de aceleración y deceleración y, en consecuencia, un diseño más ligero de los vehículos.

Por el contrario, los vehículos ferroviarios convencionales circulan normalmente en vías segregadas sin apenas interferencias con otros modos de transporte (aparte de los pasos a nivel). La seguridad de la circulación se encomienda a un sistema de señalización y se utilizan vehículos de grandes dimensiones y con cargas por eje importantes. De esta manera se consigue un aumento de la capacidad de transporte y un mayor nivel de confort, pero como contrapartida se tie-

ne una menor capacidad de aceleración y frenado, lo que limita el número de paradas. [1]

Si se combinan ambos sistemas se obtiene un nuevo concepto, conocido como tren-tranvía, que consiste en hacer circular un vehículo de metro ligero, especialmente adaptado, tanto por las vías urbanas que le son propias (pertenecientes a un sistema tranviario existente o de nueva creación), como por las vías del ferrocarril convencional.

2. BREVE APUNTE HISTÓRICO

El primer paso hacia este nuevo concepto de transporte ferroviario se dio en Karlsruhe, Alemania, con la apertura, en 1992, de una línea de metro ligero que circula por el centro urbano bajo el modo tranviario, pero que se introduce después en líneas ferroviarias convencionales de la DB (*Deutsche Bahn* – Ferrocarriles Alemanes) que son utilizadas también por trenes regionales de pasajeros. El tráfico ha aumentado sustancialmente comparado con el servicio de ferrocarril local que los tranvías remplazaron y que llegaba hasta la estación principal en las afueras de la ciudad. Ello ha puesto de manifiesto una vez más el valor de la interoperabilidad. [2]

A partir de este momento, se han venido estudiando y desarrollando numerosos proyectos con este tipo de explotación en muy diversas ciudades europeas.

3. ASPECTOS TÉCNICOS A CONSIDERAR

Las adaptaciones técnicas que se deben realizar en los vehículos de tranvía o metro ligero convencionales para conseguir compatibilizar los dos tipos de circulaciones se muestran en los siguientes epígrafes:

3.1. Tensión de electrificación para tracción

Se trata de una cuestión de singular importancia. La mayoría de los metros ligeros existentes en la actualidad tienen sus equipos de tracción diseñados para una tensión de 600 – 750 V CC. Por el contrario, en el ferrocarril convencional las tensiones de alimentación son mucho más altas: por ejemplo, 1.500 ó 3.000 V CC, y 15.000 ó 25.000 V CA.

Si la línea ferroviaria sobre la que se va a operar no está electrificada, no suele haber problemas técnicos para electrificarla con la tensión del metro ligero, siempre que se respeten las condiciones de gálibo para permitir a los vehículos ferroviarios convencionales pasar bajo el hilo de contacto del metro ligero sin elevar las estructuras existentes. Sin embargo, la empresa propietaria de la línea puede no aprobar la electrificación para metro ligero, ya que esto podría crear una “barrera de entrada” para otros operadores

potenciales de trenes que quieran utilizar la línea en el futuro. [2]

Para poder circular por líneas ferroviarias o de metro electrificadas con una tensión superior, se deben adaptar los equipos de tracción del vehículo de manera que éste sea bitensión. El diseño de dichos equipos es complejo, ya que deben ajustarse para su alojamiento en el espacio existente disponible. Este diseño específico conlleva cierto encarecimiento del material móvil por no tratarse de desarrollos preexistentes.

En algunos casos puede ser apropiada la utilización de metros ligeros diesel, particularmente donde las rutas son largas, relativamente segregadas y con poco tráfico. El RegioSprinter de Siemens, por ejemplo, es un vehículo ferroviario diesel para líneas rurales, pero usa la tecnología del metro ligero para conseguir un peso reducido y el fácil acceso de los pasajeros. Vehículos similares podrían operar en los centros de ciudades y pueblos utilizando un sistema de tracción híbrido o almacenamiento de energía, hasta que estén disponibles otros dispositivos (como las pilas de combustible), que eviten la alimentación exterior del vehículo mediante cables o tercer carril. [2]

3.2. Ancho de vía

Para realizar la compatibilización es necesario que los distintos sistemas (tranvía o metro ligero y ferrocarril convencional o metro) tengan el mismo ancho de vía. En su defecto, será preciso solucionar esta cuestión mediante un tercer carril, una vía en estuche, o incluso mediante vehículos de ejes de ancho variable, de los cuales aún no existe ningún prototipo desarrollado para vehículos ligeros. La solución a elegir dependerá de las circunstancias de cada caso, siendo preciso un riguroso estudio para seleccionarla.

3.3. Gálibo

En principio, las cajas de los vehículos de metro ligero son más estrechas que las de los vehículos ferroviarios convencionales. Sin embargo, los vehículos de metro ligero suelen tener un carenado en torno a los bogies, para que su utilización en zona urbana con tráfico compartido no sea visto como peligroso por los demás usuarios de la calle, por lo que se puede dar el caso de que estas zonas sobresalgan con respecto al gálibo de partes bajas del ferrocarril. Por tanto, se debe estudiar este tema con detenimiento

3.4. Tipo de carril y perfil de llanta

La interfaz rueda-carril es el elemento básico del movimiento de los vehículos ferroviarios. Generalmente, el conjunto de dimensiones específicas de la rueda (por ejemplo distancia entre las dos pestañas, ancho de la llanta y ángulo

de conicidad, altura de la pestaña de la rueda) de los vehículos de ferrocarril convencional y de metro ligero son diferentes. Ello se debe a que la garganta de los carriles tranviarios es relativamente estrecha y poco profunda para no crear problemas importantes a los usuarios de las calles (peatones, bicicletas, motos, etc.).

Los diámetros de las ruedas de los vehículos de metro ligero son menores que los del ferrocarril convencional, estando comprendidos en el rango de 500 – 750 mm (nuevos), frente a los 900 – 1.000 mm del ferrocarril. Si estos vehículos circulan sobre vías de ferrocarril convencional puede existir un riesgo de descarrilamiento en los desvíos y en las travessías, ya que la dimensión de la laguna y la cota de protección de la punta del corazón hacen que no se garantice un guiado seguro del eje debido al reducido espesor de las pestañas de las ruedas. Por lo tanto, todas estas dimensiones tienen que ser comprobadas para su compatibilidad con las dimensiones ferroviarias planeadas o existentes. [1, 2]

3.5. Resistencia estructural de la caja

Como es conocido, se entiende como seguridad pasiva la protección de los pasajeros implicados en una colisión. La seguridad activa se refiere al nivel de prevención de que ocurra una colisión. [1]

Como ya se ha comentado, los vehículos de metro ligero ofrecen un nivel más alto de seguridad activa que los ferrocarriles convencionales, pero normalmente no cumplen los requisitos de los vehículos ferroviarios convencionales en lo que se refiere a la rigidez de las cajas. Según la ficha UIC-651, éstos últimos deben ser capaces de soportar un esfuerzo de compresión a la altura de los topes de 1.500 kN, mientras que los vehículos tranviarios o de metro ligero convencionales pueden llegar a valores mucho menores, como los 200 kN de los tranvías franceses. Por su parte, los vehículos de tren-tranvía utilizados en Alemania soportan 600 kN. [1]

British Rail Research realizó un estudio sobre la posibilidad de construir metros ligeros que cumplieren los estándares ferroviarios de resistencia al choque, pero llegaron a la conclusión de que ello no era posible. Los factores clave a tener en cuenta son el requisito de que el conductor tenga una buena visibilidad del tráfico de la calle a su alrededor, y modificaciones en las alturas de piso y en las dimensiones del vehículo. [2]

En general se ha aceptado que estos vehículos no cumplan los estándares normales de resistencia al choque para material móvil ferroviario, resolviendo el problema desde un punto de vista de valoración de riesgo, de manera que una persona que circule en una explotación de tren-tranvía no esté sometida a un riesgo mayor que la que circula en los demás sistemas implicados. [2]

British Rail Research realizó un estudio sobre la posibilidad de construir metros ligeros que cumplieren los estándares ferroviarios de resistencia al choque, pero llegaron a la conclusión de que ello no era posible

3.6. Sistemas de seguridad y comunicaciones

La introducción de un vehículo ligero compartiendo la vía no debe implicar una disminución del nivel de seguridad del sistema. Para proporcionar una separación de trenes absolutamente segura, se pueden poner en práctica diferentes medidas, actuando en el vehículo, en la infraestructura y en la operación. Siempre que sea posible todos los vehículos que utilicen vías compartidas deben estar equipados con dispositivos de operación compatibles (por ejemplo ATP, protección automática del tren) y la infraestructura tiene que proveer también a estos sistemas, de manera que los vehículos sean detectables y sean capaces de interpretar la señalización existente en cada ámbito de operación. [1]

3.7. Acceso de viajeros

Puede ser necesario adaptar los andenes existentes de una vía compartida para hacer segura la operación de los dos tipos de vehículos, mejorando la accesibilidad. El reducido ancho de la caja de los vehículos de metro ligero puede ser compensado por medio de escalones retráctiles. El requisito de acceder al tren a nivel y sin distancias horizontales excesivas hace las soluciones técnicas más complicadas, especialmente si las alturas de piso (o de andén) y los anchos de los vehículos son diferentes. [1]

3.8. Compatibilidad funcional de los distintos vehículos

Finalmente, es preciso estudiar para cada caso puntual diversos dispositivos del vehículo ligero que deben acomodarse a su operación sobre vías compartidas. A título de ejemplo, indiquemos, entre otros, los siguientes:

- Pantógrafo. Debe permitir la captación de corriente tanto en el ámbito urbano (normalmente, a partir de un hilo tranviario) como en el ámbito ferroviario convencional (a partir de una catenaria).
- Enganche. En caso de avería, deberá permitir un remolque de emergencia por parte de un vehículo ferroviario convencional.
- Señalización del vehículo. La disposición de luces del vehículo deberá ser compatible con la prescrita por la administración ferroviaria propietaria de la vía compartida.

4. APLICACIONES EUROPEAS

A continuación se estudian las explotaciones que están en marcha o en fase de ejecución en este momento.

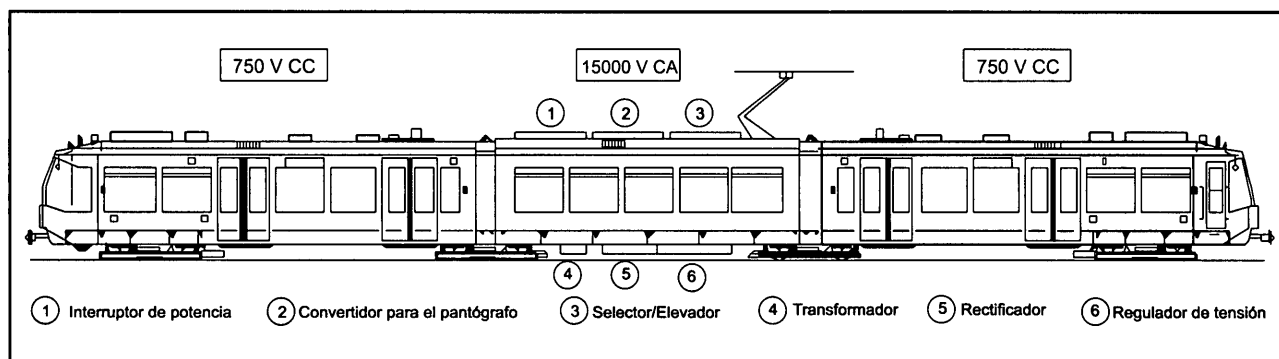


Figura 1: Unidades de potencia del vehículo bitensión de Karlsruhe. Fuente: modificado a partir de [6].

4.1. Karlsruhe (Alemania)

El área metropolitana de Karlsruhe tiene una población de 550.000 habitantes, que se reparten en 350.000 en el centro y 275.000 en el resto del área metropolitana. Su característica más representativa a la hora de entender el fenómeno del tren-tranvía es que su estación ferroviaria principal está situada en la periferia de la ciudad, del orden de 2 km al sur del centro. Así, los viajeros que utilizaban el ferrocarril para llegar desde la región al centro urbano tenían que realizar un transbordo en la misma, y pasar al sistema tranviario o de autobuses. Este hecho penalizaba el transporte ferroviario regional, ya que el necesario transbordo era mal valorado por el usuario en su percepción de la calidad del servicio prestado. Al objeto de potenciar la movilidad regional, se pensó en eliminar dicho transbordo realizando servicios directos hacia o desde Karlsruhe mediante tranvías que utilizan la infraestructura ferroviaria convencional existente. [3]

La primera línea ferroviaria en la que se introdujeron vehículos de tranvía fue la de Karlsruhe – Bretten – Gölshausen, con una longitud de 30,2 km, que se abrió el 27 de septiembre de 1992. El éxito de este sistema animó a iniciar este tipo de servicio en otras líneas en el entorno de Karlsruhe, la mayoría de las cuales han sido puestas en servicio desde 1996, como son Karlsruhe – Wörth, Karlsruhe – Pforzheim – Bietigheim-Bissingen, Karlsruhe – Rastatt – Baden-Baden, Bretten – Eppingen – Heilbronn y Bruchsal – Menzingen/Odenheim. [4]

Las condiciones previas que debían cumplirse para que este sistema con vías compartidas funcionase de forma adecuada eran las siguientes:

- Debían utilizarse vehículos que pudieran circular por las vías del metro ligero en el área urbana y por las vías del ferrocarril convencional de la DB en el ámbito regional. Se debía garantizar la compatibilidad del material rodante así como la seguridad.
- Se debían cumplir dos normas distintas, que son la BOS-trab (*Verordnung über den Bau und Betrieb der Strassenbahnen - Strassenbahn-Bau-und-Betriebsordnung* - Reglamentaciones alemanas para la construcción y explotación de

tranvías) y la EBO (*Eisenbahn-Bau-und-Betriebsordnung* - Reglamentaciones alemanas para la construcción y explotación de ferrocarriles).

- Las diferentes redes tenían que estar conectadas.
- La nueva red debía incorporar la construcción de nuevas paradas a lo largo de las líneas de ferrocarril convencional existentes, que pueden servirse sin aumentar el tiempo de viaje gracias a la mejora de la aceleración de los vehículos de metro ligero. [5]

A continuación se señala la solución técnica que se le ha dado a alguno de los problemas de compatibilidad planteados, ya referidos a lo largo del epígrafe 3.

4.1.1. Electrificación

En Karlsruhe, las líneas de la DB están electrificadas en 15 kV CA 16 2/3 Hz, mientras que las líneas tranviarias urbanas tienen una tensión de alimentación de 750 V CC. Los ingenieros de ABB Henschel han diseñado y construido un sistema de electrónica de potencia con un formato extremadamente compacto, lo que permite introducirlo en el reducido espacio que hay en los vehículos. El equipamiento eléctrico adicional se instala en la sección central del vehículo, y está constituido por un transformador y un rectificador que convierten la corriente de 15 kV CA en 750 V CC, y alimentan al equipamiento de corriente continua del vehículo. De esta manera se obtiene un vehículo de corriente alterna con su propia subestación rectificadora a bordo. Todo el equipamiento se instala sobre el techo o bajo el suelo, por lo que no se elimina espacio en el habitáculo de pasajeros, como se puede observar en la figura 1). [6, 7]

En vía, en las zonas de transición entre la alimentación de corriente continua y alterna, el vehículo cambia automáticamente de tensión de alimentación sin que el conductor intervenga más que con la colocación del regulador de tracción en neutro. Automáticamente el vehículo detecta la nueva tensión de servicio y se prepara para ella. El conductor puede seguir esta operación observando el voltímetro de tensión de línea y tres pictogramas de control en su pupitre. Como el vehículo circula a la deriva por las secciones neutras mientras cambia de tensión de alimentación, dichas zonas se han colocado delibe-

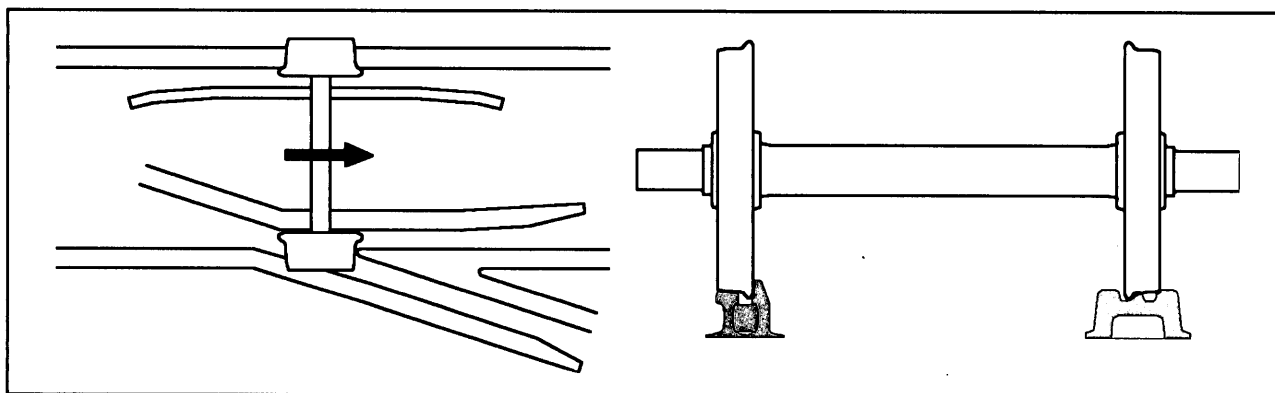


Figura 2:
Esquema de
eje ferroviario
al paso por un
desvío.
Fuente: [9].

radamente fuera de restricciones como señales, pasos a nivel y paradas. [6, 7, 8]

4.1.2. Resistencia estructural de la caja

El vehículo cumple las exigencias de las normas de construcción y operación tanto para tranvías como para ferrocarriles. Sólo la resistencia longitudinal de 600 kN no está conforme con la norma UIC-651. La justificación de este hecho es la enunciada en el epígrafe 3.

4.1.3. Sistemas de seguridad y comunicaciones

Los automotores de Karlsruhe son los primeros vehículos urbanos que están dotados de dos sistemas de seguridad diferentes: el sistema INDUSI (sistema de repetición de señales de los Ferrocarriles Alemanes - DB) y el sistema IMU, con parada automática, de la AVG (los servicios de transporte de la ciudad de Karlsruhe) y de la compañía de transportes de la Albtal. [7, 8]

En la cabina del conductor, al lado del equipo de radio propio de la AVG, existe también el de transmisión de la DB. Gracias a este último equipamiento los conductores se pueden anunciar a su entrada en línea, según la regulación de la DB, y dar igualmente la seguridad de "tren completo" (sin ruptura de enganche) a los agentes de circulación de las estaciones, que no tienen que salir al andén para verificar que

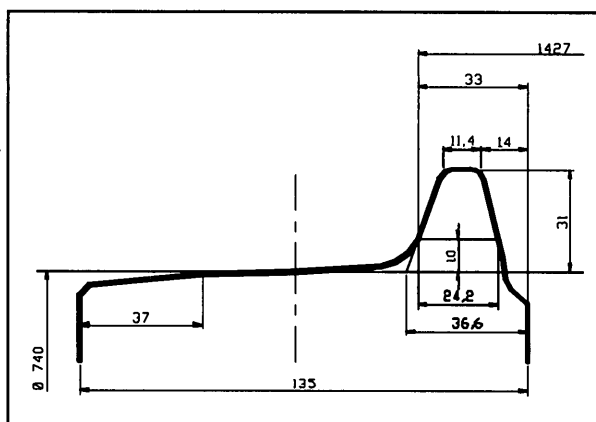


Figura 3: Perfil
de llanta del
tren-tranvía de
Karlsruhe.
Fuente: [11].

no se ha producido la separación de ninguna de las unidades del vehículo. [7, 8]

4.1.4. Perfil de llanta

El punto que presenta problemas es, evidentemente, el paso de la laguna del corazón de los aparatos de vía unificados de la DB, por dos motivos:

- por una parte, esta laguna es más larga que la de los aparatos de vía del tranvía,

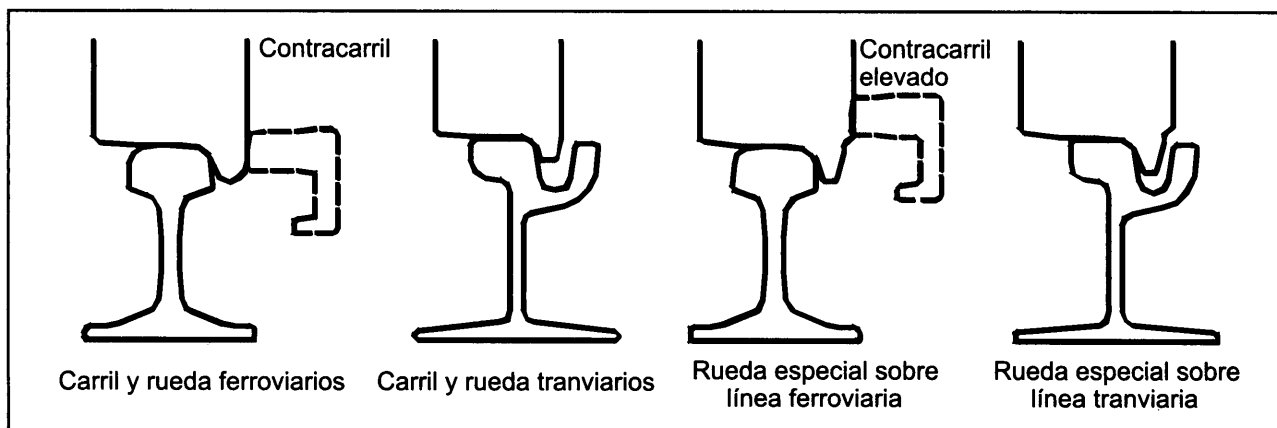


Figura 4:
Uso de
contracarriles
elevados y
llanta
modificada de
Karlsruhe.
Fuente:
modificado a
partir de [10].

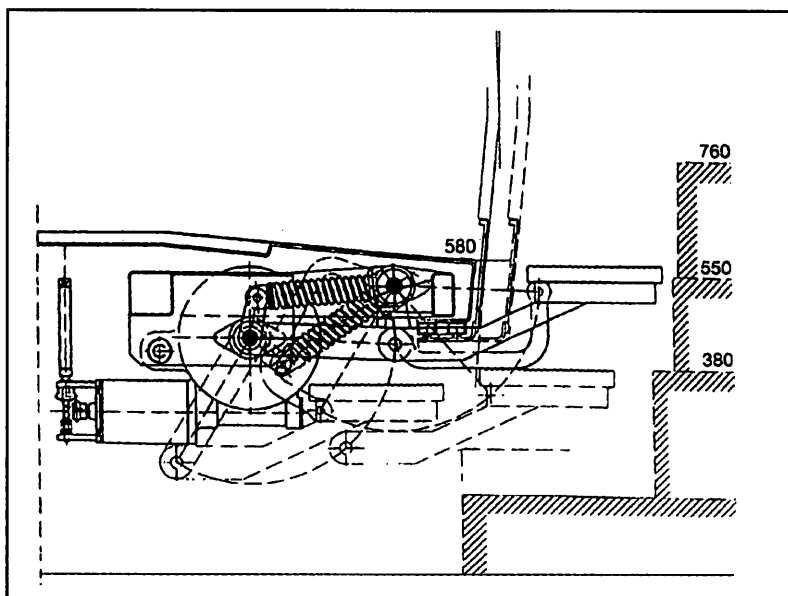


Figura 5: Escalones retráctiles utilizados en el vehículo de Karlsruhe. Fuente: [12].

• por otra parte, la cota de protección de la punta del corazón es excesiva, es decir, el contracarril opuesto a la punta del corazón se sitúa a una distancia del carril que permite a la pestaña de la rueda, más delgada que la del material ferroviario convencional, tropezar con este punto e incluso introducir la rueda en la dirección para la que la aguja no está dispuesta (ver figura 2). [7]

En Karlsruhe se ha solucionado este problema mediante un perfil de llanta especial que se presenta en la figura 3. Su funcionamiento consiste en que la pestaña estrecha cumpla los estándares normales de circulación tranviaria por la calle, pero la parte interna de la rueda, que es más ancha por encima del nivel de la superficie de la calle, contacte con el contracarril (que ha de ser elevado) y cuya entrecalle está diseñada en función de las ruedas del ferrocarril pesado (ver figura 4). [10]

4.1.5. Alturas de andén

Para resolver el problema de la coexistencia de andenes altos en las líneas ferroviarias convencionales y el andén bajo en la ciudad, el vehículo dispone de unos escalones retráctiles que permiten a los viajeros alcanzar los andenes bajos con mayor facilidad (ver figura 5).

4.1.6. Resultados

Los resultados obtenidos después de la apertura de la primera línea de tráfico compartido en Karlsruhe fueron muy satisfactorios. Desde su apertura en Septiembre de 1992 se produjo un aumento de pasajeros del 479% (de 533.660 a 2.554.976). Es particularmente destacable que el 40% de los mismos eran antiguos usuarios del vehículo privado. También aumentó el número de pasajeros los fines de semana. [5]

La proporción de transporte público en la ciudad de Karlsruhe es del 17%. En las relaciones entre la ciudad y el resto de la región se alcanza una proporción de aproximadamente el 50%, e incluso en algunas rutas de mucho éxito se llega al 67%. [4]

4.2. Saarbrücken (Alemania)

La ciudad de Saarbrücken, con 196.000 habitantes y 101.000 puestos de trabajo, constituye la capital y centro económico del Land de Saar, región industrial cuya población supera el millón de habitantes. [11]

El primer tronco de línea con vías compartidas, de Ludwigstrasse a Sarreguemines, se inauguró el 24 de octubre de 1997.

Básicamente la tecnología utilizada en el caso de Saarbrücken es la misma que en el de Karlsruhe, aunque con dos particularidades: por una parte, la utilización de un vehículo de piso bajo, y por otra, el hecho de que en Saarbrücken los tranvías habían desaparecido desde 1965, por lo que se creó una nueva red urbana de metro ligero, que se pudo adaptar a las necesidades impuestas por la compatibilización con el ferrocarril convencional.

Al igual que en el caso de Karlsruhe, a continuación se pasa revista a algunas de las soluciones más características.

4.2.1. Electrificación

El problema de la electrificación se resuelve de la misma manera que en el caso de Karlsruhe, salvo en lo que se refiere a la longitud de la sección neutra de transición de una tensión a otra, que pasa de los 170 m utilizados en Karlsruhe, a 80 m en Saarbrücken.

4.2.2. Señalización y ayuda a la explotación

Salvo sobre el Köllertalbahn y la sección de Brebach a Sarreguemines, el tren-tranvía circula principalmente en marcha a la vista, sin señalización, siguiendo las normas de la BOS-trab. Sólo disponen de señalización los tramos de vía única. [4, 13]

El Köllertalbahn continúa siendo explotado como una línea ferroviaria convencional, equipada con señalización clásica (señal principal y avanzada). La detección de la ocupación de las vías se efectúa mediante dispositivos contadores de ejes. [13]

4.2.3. Perfil de llanta

Como el Saarbahn (metro ligero de Saarbrücken) es un sistema totalmente nuevo, que no tiene que conectarse con vías urbanas preexistentes, ha sido posible elegir un perfil de rueda típico de los ferrocarriles alemanes, lo que permite evi-

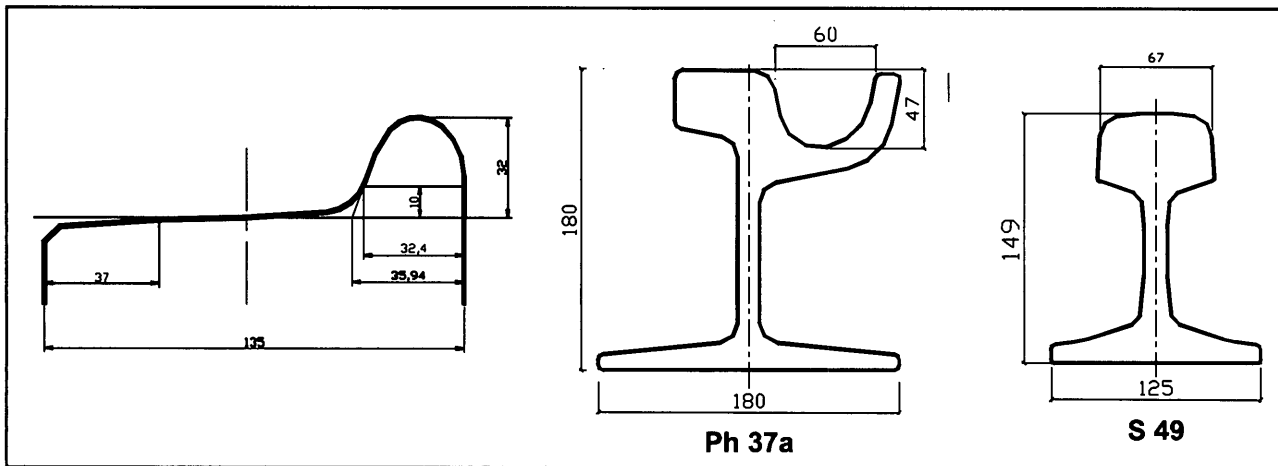


Figura 6: Perfil de llanta y carriles utilizados para el tren-tranvía de Karlsruhe. Fuente: [13, 16].

tar todo el problema de compatibilidad con las infraestructuras de la DB. Para ello se utiliza, en la zona urbana, un perfil de carril que acepta la rueda ferroviaria, como son el carril de garganta Ph 37a, y el convencional de patín S49 (ver figura 6). [13, 14, 15]

4.2.4. Alturas de andén

En la ciudad, dentro del viario urbano, los andenes de las estaciones están 350 mm por encima de la tabla de rodadura del carril. El borde del andén está situado a 1,40 m del eje de la vía, quedando una distancia horizontal de 75 mm entre el umbral de la puerta y el andén (ya que el ancho de los vehículos es de 2,65 m). En las paradas que tienen también servicio de autobuses, la altura del andén se reduce a 200 mm. [4, 13]

Sobre los recorridos ferroviarios, los andenes están a la cota de 380 mm (conforme a la EBO) y el borde del andén está a una distancia de alrededor de 1,60 m del eje de la vía, quedando una distancia horizontal de 275 mm entre el borde del andén y la puerta del vehículo. Ésta se cubre mediante el movimiento de un peldaño retráctil de 197 mm de desarrollo, que reduce la laguna final a alrededor de 78 mm. La altura de andén ha tenido que ser rebajada de 760 mm a 380 mm en la estación de Saarbrücken, y de 550 mm a 380 mm en la estación de Sarreguemines. [4, 13]

4.2.5. Piso bajo

La parte baja del gálibo del tren-tranvía está a 75 mm de la vía, lo que permite al vehículo pasar por encima de los aparatos de vía de la DB.

4.2.6. Resultados

La implantación del Saarbahn ha dado lugar a un aumento del uso de la línea. Así, diariamente, de lunes a vier-

nes, 25.000 viajeros toman el Saarbahn, incluyendo los dos sentidos. Las previsiones realizadas suponían 11.000 viajeros por sentido. Esta afluencia es tanto más destacable si se tiene en cuenta que en los datos de realización de los conteos no se han considerado ciertos tramos entre Brebach y Sarreguemines que todavía no se habían terminado, y que no se había realizado tampoco ninguna operación de marketing importante destinada a los usuarios potenciales del tren-tranvía. [15]

Figura 7: Sección de estación con cuatro carriles. Fuente: [19]

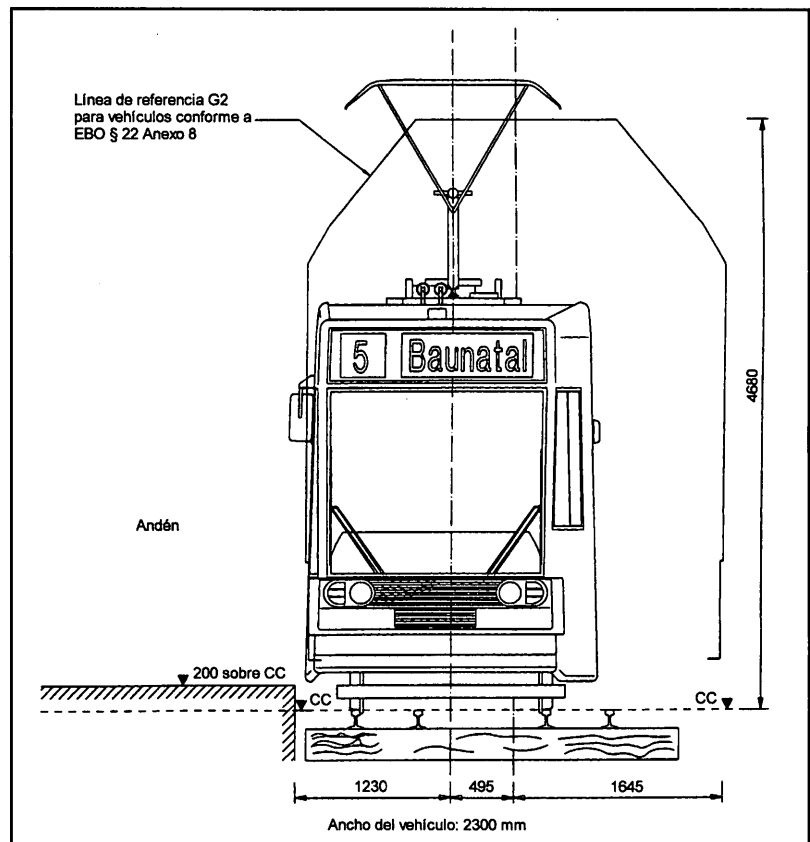




Figura 8: Aparatos de vía y disposición de carriles en estación con doble andén. Fuente: [20]

4.3. Kassel (Alemania)

En Mayo de 1995 la línea tranviaria 5 se extendió a Baunatal en el suroeste, utilizando una línea privada de mercancías que iba de Kassel a Naumburg. La diferencia de anchos de las cajas de un vehículo tranviario y uno ferroviario clásico hizo necesaria una solución especial en las paradas, que consiste en desviar la línea tranviaria del eje de la vía, de forma que queda una sección con cuatro carriles (ver figuras 7 y 8), y ambos sistemas pueden utilizar el mismo andén de 20 cm de altura. El número de pasajeros diarios aumentó de 2.800 a 5.800. [17, 18]

Al este de la ciudad, las líneas tranviarias 4 y 8 se extendieron a Kaufungen Papierfabrik en 1999. El número de pasajeros en esta corta sección aumentó en un 16% desde su apertura. Posteriormente se realizaron trabajos en la Lossetalbahn desde Kaufungen Papierfabrik a Helsa. La línea de 14 km utiliza la antigua línea ferroviaria de la Waldkappler Van, que se utiliza únicamente para tráfico de mercancías. Para este año está prevista otra ampliación que llevará la línea tranviaria hasta Hessisch Lichtenau. [17]

Estas extensiones forman parte de un plan bimodal más extenso para Kassel llamado Regiotram. Este plan, que comprende ocho líneas, incluye un intercambiador en Kassel Hauptbahnhof (estación ferroviaria principal) y una nueva línea tranviaria en el centro urbano. Ello proporcionará una conexión directa desde el centro urbano hasta las ciudades y pueblos de los alrededores de Kassel. Una primera línea podría conectar el centro de Kassel con Hofgeismar y Warburg (a 30 km al noroeste de Kassel). La línea sería operada por medio de vehículos similares a los de Saarbrücken. [17]

4.4. Sunderland (Reino Unido)

Se pretende realizar una conexión entre Sunderland y Newcastle, aprovechando las líneas ferroviarias de la Rail-

track en el tramo Pelaw-Sunderland, basando su explotación en vehículos de metro. [4]

El sistema de metro existente tiene un total de 59 km. La sección compartida entre Pelaw y Sunderland añadirá otros 14 km, con otros 4,5 km de metro de nueva construcción entre Sunderland y South Hylton. Todas estas actuaciones hacen que aumente en 12 el número de estaciones de la red, de las cuales 8 serán nuevas, y las 4 existentes en la línea ferroviaria serán mejoradas para cumplir los estándares de metro. [4]

En la figura 9 se puede observar el trazado de la línea y su relación con la red de metro.

4.4.1. Señalización y ayuda a la explotación

El sistema tren-tierra ya se utiliza en todos los vehículos de metro. Se dispondrá una infraestructura integrada de radio para permitir al IECC (Centro de Control Electrónico Integrado) de la Railtrack hablar con los conductores de todos los vehículos en la ruta, tanto si son de metro o de ferrocarril pesado. [4]

4.4.2. Catenaria

La catenaria para el sistema de 1.500 V CC se instalará a la altura estándar para los sistemas del Reino Unido, con altura mínima de 5,6 m sobre el nivel del carril (que es el mínimo para los pasos a nivel). Se utiliza esta solución ya que no va a circular por la línea ningún vehículo ferroviario convencional eléctrico. [4]

4.4.3. Equipamiento de vía

No se espera que la mínima diferencia de ancho de vía entre las líneas ferroviarias clásicas (1.432 mm) y el ancho estándar de 1.435 mm produzca ninguna dificultad durante la explotación. Los anchos son suficientemente parecidos como para asegurar que en la explotación normal de la vía no

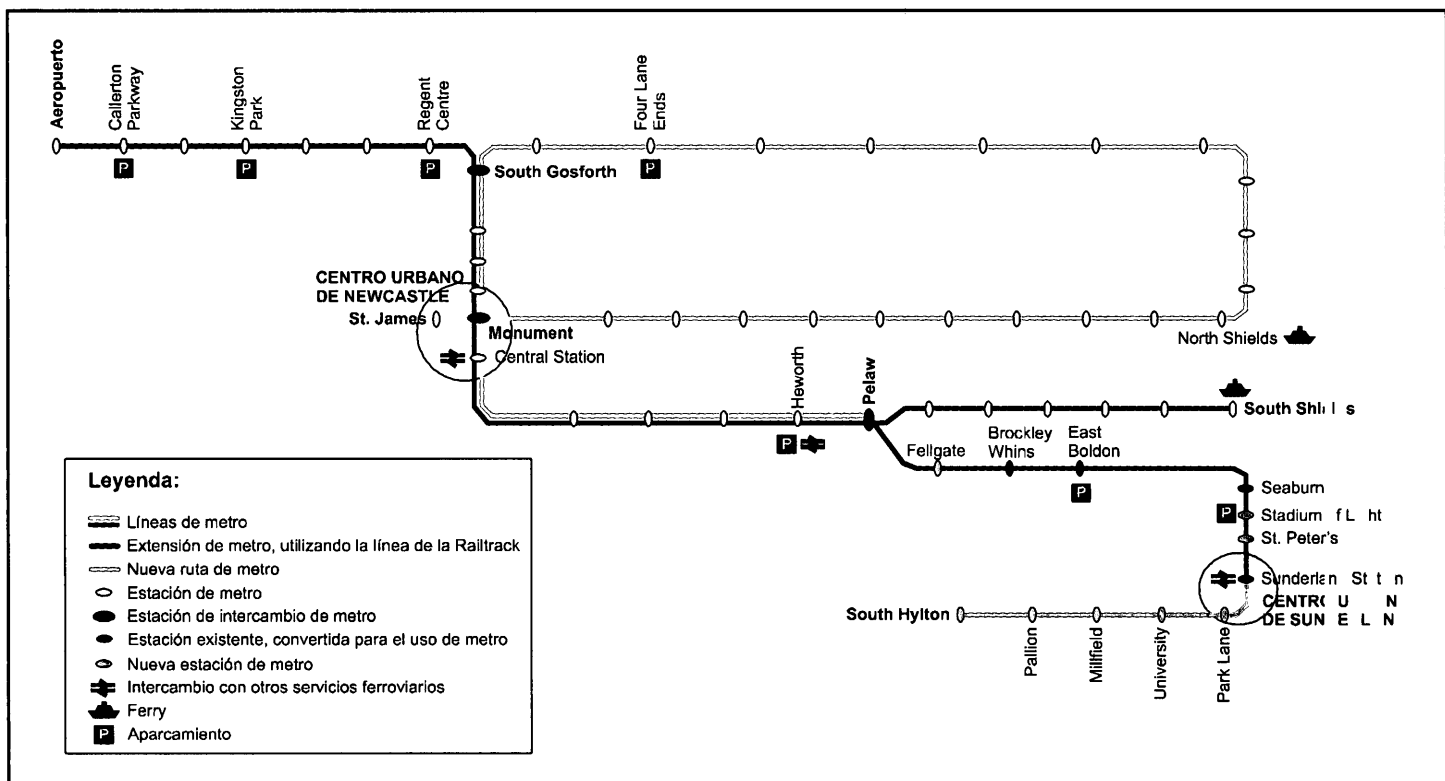


Figura 9: Red de metro de Sunderland.
Fuente: [21].

haya restricciones, aunque sí las habrá en los dos puntos en los que metro se une a la red ferroviaria. [4]

5. ESTUDIOS DE IMPLANTACIÓN EN OTRAS CIUDADES

En el cuadro adjunto se compendian las características que mejor definen algunos de los proyectos actualmente en estudio para la incorporación de un sistema de tren-tranvía a su red de transportes. En el mismo cuadro también se recogen las características de los sistemas que actualmente están en operación, cuya descripción esquemática se ha realizado en el epígrafe anterior.

6. APLICACIÓN EN ESPAÑA

En lo que respecta a España, se ha estudiado la implantación de un sistema de tren-tranvía en Valencia, pero por el momento se ha desechado esta opción debido a las complicaciones técnicas que suponía en ese caso particular. Sin embargo, los Ferrocarriles de la Generalitat Valenciana están estudiando su aplicación al caso de Alicante.

Por otra parte, en Bilbao, los vehículos de tranvía utilizarán un tramo de las líneas ferroviarias para llegar hasta los talleres, que serán compartidos. Sin embargo,

al tratarse de un tramo pequeño se ha optado por solucionar la mayoría de los problemas técnicos en la pequeña zona de infraestructura ferroviaria afectada.

Por otra parte, los autores del presente artículo han realizado un estudio de compatibilización de un sistema de metro ligero de nueva creación, con las líneas de Cercanías de Renfe y con la línea de Metrosur en Madrid. Aunque se ha orientado el problema para este caso concreto, el estudio de la compatibilización con Renfe se ha realizado de forma genérica, y podría ser de aplicación a otras líneas de dicha compañía en cualquier lugar de España.

7. BENEFICIOS DEL CONCEPTO DE TREN-TRANVÍA

Los servicios ferroviarios convencionales no proporcionan un servicio puerta a puerta conveniente. Los viajes en transporte público a menudo requieren el uso mixto de autobuses y trenes, intercambios, largas esperas, incertidumbre, y a menudo bastante camino andando. [2]

Se admite comúnmente en los modelos de demanda de transporte que los tiempos adicionales al de desplazamiento en el modo principal (es decir, esperas, transbordos y tiempos de acceso) son percibidos muy negativamente por los viajeros. De este modo, una de las prin-

TABLA 1: CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES DE TREN-TRANVÍA (EN EXPLOTACIÓN O PROYECTADAS)

Ciudad	Población	Ancho vía FFCC (mm)	Ancho vía ML (mm)	Ancho vía TT (mm)	Tracción FFCC	Tracción ML	Tracción TT	Líneas férreas a utilizar	Tipo de tráfico ferroviario	Operador FFCC	Operador ML/tranvía	Operador TT	Radio mínimo	Altura andén urbano (mm)
Nantes	547000	1435	1435	1435	Ninguna (1) 25 kV y no electrificadas	750 V DC	750 V/25 kV 750 V/25 kV (2)	Haluchère - Sucé sur Erdre Esplanade-Molsheim-Obenral-Barr Molsheim-Gresswiller	Mercancías Pasajeros y mercancías	SNCF	SEMITAN	-	25 m	250
Strasbourg	430000	1435	1435	-	25 kV SNCF, 15 kV CFF	-	750 V/25 kV/15 kV	Coppel-Cornavin-Airport (CFF) Evian-Thonon-Annemasse-Eaux Vives (SNCF)	-	SNCF y CFF	TPG	-	25 m	280
Geneva	400000	1435	1000	1435 (3)	15 kV y no electrificadas	-	750 V/15 kV 50 Hz o 750 V/diesel	Kiel-Neumünster (NOB & DB) Kiel-Piön (DB) Kiel-Eckernförde (DB) Kiel-Rendsburg (NOB)	Pasajeros y mercancías	NOB y DB	sistema tranvía eliminado en 1985	-	30 m	-
Bremen	540000	1435	1435	1435	15 kV AC	-	750 V/15 kV 50 Hz	Bremen-Deimendorst-Nordenham Bremen-Rottenburg/Wümmen	-	DR-Regio	-	-	30 m	100
Aarhus	282137	1435	no	-	no electrificadas	-	diesel- eléctrico	Odder Line Grenaa Line	-	HHJ en Odder y Danish National Railway Agency en Grenaa	-	-	25 m	-
Göteborg	600000	-	1435	-	15 kV 16 2/3 Hz	750 V DC	-	Alingsås-Göteborg Frida-Göteborg	-	SJ	GS	-	20 m	170-250
Tallinn	411594	1520	1067	1520	3300 V DC	600 V (750 V nueva línea)	750/3300 V	-	Pasajeros y mercancías	Elektriraudtee AS Edeleiraudtee AS	TTA	-	25 m	-
Aachen	500000	1435	nuevo planeado 1435 mm	-	3300 V DC	750 o 1500 V DC	-	Aachen-Heerlen	-	-	-	-	-	-
Brussels	964000	-	-	-	3300 V DC	700 V DC	700/3300 V	-	-	SNCF/NMBS	STIB/MIVB	-	20 m	150 superficie 275 tune 300
Anvers	590000	1435	1000	1435 (4)	3300 V DC	700 V DC	-	-	-	SNCF/NMBS	DE LIJN	-	25 m	-
Katowice	4000000	1435 y 1524	-	-	3000 V DC	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Patra	200000	1000	no	1000	no electrificadas	-	diesel- eléctrico	Psathopyrgos-Patras-Achala	-	OSE	-	-	-	-
Valenciennes	332000	-	no - estudio para construirlo	-	-	750 V DC	-	Mons-Quévrain-Valenciennes Mons-Borinage-St. Ghislain- Quévrain-Valenciennes Mons-Cuesmes-Quévy-Aulnoye- Maubeuge	Pasajeros y mercancías	SNCF y SNCB	-	20 m	-	
Liverpool	450000	1435	no - propuesto	1435	750 V DC y 25 kV AC	-	750 V	-	-	-	-	-	-	-
SISTEMAS DE TREN-TRANVÍA EN EXPLOTACIÓN O EN CONSTRUCCIÓN														
Kaisruhe	550000	1435	1435	1435	15 kV 16 2/3 Hz	750 V DC	750 V/15 kV 16 2/3 Hz	Kaisruhe-Bretten Kaisruhe-Pforzheim-Bietigheim- Bissingen Kaisruhe-Rastatt-Baden-Baden Bretten-Eppingen-Heilbronn Bruchsal-Menzingen/Odenheim Brebach-Sarrequeimmes Old Kellertal Kassel-Baunatal Kassel-Heilsa Pelaw-Sunderland	Pasajeros y mercancías	DB-Regio	AVG, VBK	KVW	-	0-200
Saarbrücken	500000	1435	no	1435	15 kV 16 2/3 Hz	750 V DC	750 V/15 kV 16 2/3 Hz	-	-	DB-Regio, SNCF	-	Stadtbahn Saar GmbH	30 m	200-350
Kassel	200000	1435	1435	1435	-	600 V DC	-	-	Mercancías	RBK	KVG	-	30 m	200
Sunderland	200000	1432	1435	1432 y 1435	no electrificadas	1500 V DC	1500 V	-	Pasajeros y mercancías	Northern Spirit	Nexus	Nexus	-	-

(1) Deberá electrificarse

(2) Tendrá que ser intensidad si se extiende hasta Kehl

(3) Tercer carril en zona urbana o dispositivo de cambio de ancho

(4) Tres o cuatro carriles en zona urbana

cipales ventajas del concepto tren-tranvía es eliminar estos tiempos.

Este tipo de explotación tiene diversas ventajas [22]:

Ventajas económicas

- Se rentabiliza el uso de la infraestructura ferroviaria clásica existente, reduciéndose las necesidades de inversión en nuevas infraestructuras.
- Se evita la construcción de largas secciones de vía nueva, necesarias para la creación de líneas de nueva construcción, con lo que se consiguen ahorros considerables en los presupuestos del estado, ya que se obtiene un sistema con unos costes por kilómetro mucho menores que los del metro ligero de nueva implantación.
- Se obtienen ingresos adicionales en la explotación debido al aumento del número de viajeros, por lo que se necesitarán menos subvenciones para los presupuestos anuales de explotación. Este aumento del número de viajeros está producido, por una parte, por el aumento de estaciones, por el mejor intercambio con el sistema urbano y por las conexiones más directas con las zonas residenciales y de empleo. Por otra parte, dicho aumento también se produce por la mayor calidad y mejor imagen del sistema de metro ligero, que produce una predisposición de los usuarios del vehículo privado a cambiar a este modo sin tener una sensación de "pérdida" de movilidad.
- Existe la posibilidad de ajustar las composiciones de los vehículos durante los períodos de menos tráfico (tarde, sábados y domingos), reduciéndose así los costes totales de operación.
- Menores costes de operación de los vehículos ferroviarios ligeros en comparación con el material móvil clásico.

Ventajas para los usuarios

- Ahorro de tiempo para los usuarios del transporte público, ya que el tren-tranvía alcanza velocidades comerciales por encima del doble de las de los servicios de autobús paralelos. El tiempo de puerta a puerta del desplazamiento se hace comparable al del vehículo privado, dado que se reducen los tiempos de circulación entre estaciones, debido a los valores de aceleración y frenado de los vehículos ferroviarios ligeros en comparación con los convencionales. También influyen los tiempos de parada más cortos en las estaciones, debido a la facilidad para la entrada y salida rápidas de los viajeros, gracias al número y disposición de las puertas laterales de acce-

Los autores del presente artículo han realizado un estudio de compatibilización de un sistema de metro ligero de nueva creación, con las líneas de Cercanías de Renfe y con la línea de Metrosur en Madrid

so al vehículo. Por último, también se evitan las esperas del intercambio modal.

- Acceso directo desde las zonas periféricas de la región hasta los principales centros de empleo y comerciales, sin necesidad de realizar intercambios modales en la estación de ferrocarril principal, como ocurría antes de la introducción de estos servicios.
- La fiabilidad en el cumplimiento de los horarios es elevada, al tratarse de un modo que no se ve afectado por las incidencias del tráfico rodado.
- Ahorros en el coste de aparcamiento.
- Ahorros en los costes externos (accidentalidad, congestión, contaminación atmosférica, etc.).
- Mayor confort, debido al mayor número y amplitud de los asientos en cada vehículo y a las mejores características dinámicas, que hacen que la rodadura sea más suave.
- Facilidad de utilización, ya que la implantación de esta explotación suele ir acompañada de una mejora de los sistemas de información al usuario, con la colocación de dispositivos electrónicos de información en las paradas, normalmente operados desde el centro de control, en los que se especifica la hora de llegada del siguiente vehículo, así como las paradas a las que sirve y el tiempo de espera.
- Integración tarifaria, ya que es habitual que se cree una entidad que se encarga de la planificación y coordinación de los horarios y tarifas del transporte público urbano y regional, para facilitar su uso por los clientes.
- Mayor cercanía de las estaciones, ya que por lo general se aumenta el número de paradas de la zona anteriormente explotada únicamente por el ferrocarril, lo que redundaría en un aumento de la accesibilidad del sistema.
- Mayores frecuencias del servicio ferroviario ligero en comparación con el servicio anterior de ferrocarril clásico, lo que reduce los tiempos de espera en las paradas.

Ventajas para la sociedad

- Menor congestión en las autopistas y en las carreteras locales.
- Disminución de las necesidades de inversión en construcción y mantenimiento de carreteras.
- Menor impacto al medio ambiente.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología el apoyo que les ha brindado a través de la financiación del Proyecto de Investigación y Desarrollo Tecnológico TRA99-0291. ■

BIBLIOGRAFÍA

- [1] UITP Light Rail Committee, *Track sharing*, Union Internationale des Transports Publics, Montpellier, Julio 2001.
- [2] Griffin, Trevor, "Inter-operable urban rail transport", *Institution of Mechanical Engineers*, paper C514/035, 1996, pp. 109-118.
- [3] Axhausen, K.W.; Brandl, P.G., "Dynamics of LRT growth: Karlsruhe since 1975", *Transport Reviews*, 1999, Vol. 19, N° 3, pp. 221-240.
- [4] ScanRail Consult, DK, *Integrating local and regional rail, incl. cross-border aspects*, GROWTH Project GRD1-1999-10843 of FP5, 2001
- [5] "Karlsruhe: The Karlsruhe model of a dual-mode railway", 1996, <<http://www.eaue.de/winuwld/85.htm>>, Página web de la European Academy of the Urban Environment.
- [6] Drechsler, G., "Light railway on conventional railway tracks in Karlsruhe, Germany", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, London, 2, 1996, pp. 81-87.
- [7] Ludwig, D.; Brand, W.; Wallochny, F.; Gache, A., "En matière de transports urbains et régionaux: Karlsruhe, un exemple à méditer...", *Chemins de Fer*, París, 422, 5/1993, pp. 8-16.
- [8] Hérissey, Ph., "Le tramway à la mode de Karlsruhe", *La Vie du Rail*, N° 2377, 7 de Enero 1993, pp. 12-20.
- [9] García Díaz-de-Villegas, J.M.; Rodríguez Bugarín, M. D., *Desvíos Ferroviarios*, Ingeniería Cantabria S.A., Santander, 1995. ISBN: 84-605-4337-4.
- [10] Griffin, T., "Light rail transit sharing the Railtrack system", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, Londres, 2, 1996, pp. 98-103.
- [11] Hope, R., "Saarbrücken to launch second dual-mode LRT in the autumn", *Railway Gazette International*, Sutton, 3, 1997, pp. 155-157.
- [12] Hondius, H., "What is Light Rail?. Its origins, today's state of the art and its importance throughout the world", *Railway Technical Review (RTR)*, 1, 1998, pp. 2-11.
- [13] Krempper, M., "Où en est le Tram-train de Sarrebruck?", *CDR - Connaissance du Rail*, Valignat, N° 210, Enero 1999, pp. 11-17.
- [14] Keudel, W., "La Saarbahn - Le nouveau système de transport urbain et régional sur voie ferrée de la région de Sarrebruck", *Transport Public International*, París, 4, 1998, pp. 25-31.
- [15] Veinnant, B.; Cacciaguerra, F., "Un tram-train nommé succès: l'exemple de Sarrebruck", *Revue Générale des Chemins de Fer*, París, 11-12, 1998, pp. 35-42.
- [16] Documentación facilitada por Bombardier Transportation.
- [17] "Trams on railtracks - a versatile and simple success", <<http://www.euronet.nl/~wijzer/>>.
- [18] Catling, D.; Guillosou, M.; Rovere, G.; Stefanovic, V., *Easy use of light rail systems*, UITP, París, 1995.
- [19] Ausschuss für Bahnbau; Schienenfahrzeug-Ausschuss, *Einsatz von Stadtbahn-Fahrzeugen im Mischbetrieb nach BOStrab und EBO*, Köln, Julio 1995.
- [20] Klee, W., "Eine (neue) Klasse für sich", *Strassenbahn Magazin*, N° 143 - 32, Septiembre 2001.
- [21] Plano con la red de metro de Sunderland, <<http://www.inform-rail.co.uk/sunderland/smap.htm>>
- [22] Novales, M.; Orro, A.; R. Bugarín, M., "The tram-train: state of the art", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 216, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, F01201, 2002.