

La Superestructura de Vía en los Sistemas Ferroviarios

La Rueda-Carril y la Sustentación Magnética

[Track Superstructure in Railway Systems]
[Wheel-Rail and Magnetic Levitation]

Joan Manuel Estradé Panadés

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

RESUMEN

El presente artículo tiene por objeto exponer, a partir de los diferentes tipos de superestructura de vía existentes en la actualidad, sus posibles aplicaciones en el siglo XXI, teniendo en cuenta las perspectivas de evolución de la velocidad comercial de las circulaciones ferroviarias.

Se comparan los tres tipos de superestructura existentes en la actualidad: vía sobre balasto y vía en placa en el sistema ferroviario de rueda-carril, y vía sin carril en el sistema ferroviario de sustentación magnética. Asimismo, se analiza el coste económico de cada tipo de superestructura. Éste factor resulta decisivo en el momento de elegir un sistema u otro para una nueva línea a construir. No obstante, las iniciales diferencias en el coste de cada tipo de superestructura de vía se van acortando, a medida que avanzan las investigaciones para su optimización. En el siglo XXI estos sistemas ferroviarios convivirán, aportando sus ventajas para cada necesidad específica de transporte, en función de la velocidad, carga y tipo de tren.

ABSTRACT

The present article describes possible applications of different types of existing track superstructure in the 21st century, when considering the prospective evolution of commercial speed of railway traffic. A comparison is made of the three existing types of superstructure: track on ballast beds and track on slabs in the wheel-rail system and tracks without rails in magnetic levitation systems. An analysis is made of the cost of each type of system, this being a decisive factor when selecting one type over another for a new railway line. However, the initial differences in the cost of each type of track superstructure are evening out with the progressive investigation into the cost optimisation of the same. In the 21st century these railways systems will coexist, with each providing their own advantages to suit every specific transport requirement in terms of speed, load and type of train.

1. INTRODUCCIÓN

El ferrocarril tradicional sufrió un cambio sustancial cuando, hace ahora unos 40 años, se pusieron en servicio las primeras circulaciones ferroviarias de alta velocidad. Hasta entonces la superestructura de vía existente ofrecía una calidad de servicio

1. INTRODUCTION

The traditional railway underwent important changes some forty years ago with the introduction of the first high speed trains. Until this time the existing track superstructure provided sufficient service quality

Tabla 1. Evolución de la velocidad en el sistema ferroviario de rueda-carril a lo largo de la segunda mitad del siglo XX
Table 1. Evolution of wheel-rail railway systems throughout the second half of the 20th century

T.A.V./H.S.T AÑO/YEAR	VELOCIDAD MÁXIMA (km/h)/MAXIMUM SPEED (kph)			DÉCADA/DECADE
	EXPERIMENTACIÓN/TEST	COMERCIAL/COMMERCIAL	PROYECTO/DESIGN	
1963	256	160	250	60/70
1972	318	210		
1981	380	270	300	80
1988	407	300		
1991	515	330	350	90
1999	515	350		

suficiente para las necesidades de los trenes que circulaban por ellas: trenes convencionales de cercanías, mercancías y trenes de largo recorrido.

El concepto de alta velocidad puede afirmarse que surgió a raíz de una comunicación científica pronunciada en el Instituto de Investigación Tecnológica de los Ferrocarriles Nacionales de Japón (JNR), el 30 de mayo de 1957. Su título era "Posibilidad de una relación terrestre Tokyo-Osaka en tres horas".

La introducción de la alta velocidad ferroviaria puso en duda si la superestructura de vía existente entonces, podía ofrecer garantías suficientes para que se pudieran mantener en servicio unos trenes a gran velocidad, en las condiciones requeridas de confort y seguridad.

En el momento de proyectar las primeras infraestructuras capaces de soportar circulaciones por encima de los 200 km/h de velocidad punta, la experiencia disponible en el ámbito experimental era muy limitada. La puesta en servicio de la línea de alta velocidad entre Tokio y Osaka sacó pronto de dudas a los investigadores.

El creciente aumento de la velocidad comercial de las circulaciones ferroviarias en el mundo desde entonces, ha obligado a adaptar constantemente el diseño de la superestructura de vía a esa demanda.

A continuación presentamos el desarrollo de la superestructura de la vía desde esa fecha histórica y las soluciones que se aplicarán previsiblemente a lo largo del siglo XXI.

2. EL BINOMIO SUPERESTRUCTURA DE VÍA-ALTA VELOCIDAD

El progreso experimentado en el material rodante desde 1964 ha sido considerable. A título indicativo cabe recordar que hacia 1975 la velocidad máxima lograda en ensayo se situaba en el entorno de los 300 km/h, mientras que en la actualidad se han superado ya los 500 km/h. No es de extrañar, por tanto, la continua evolución de los criterios de proyecto de las infraestructuras para adaptar los trazados y la superestructura de vía a las nuevas posibilidades del material.

for the requirements of the trains using the same: conventional suburban trains, goods trains and long-distance trains.

The concept of high speed rail may be considered to have arisen from a scientific paper presented at the Japanese National Railway Technological Research Institute on 30 May 1957. The title of this paper was "Possibility of a three hour land connection between Tokyo and Osaka".

The introduction of high speed railway created doubts into whether the existing superstructure would be able to provide sufficient guarantee for a high speed train service in terms of comfort and safety.

At the time of designing the first infrastructure capable of supporting the circulation of trains at over 200 km/h, the test experience available was very limited. The opening of the high speed line between Tokyo and Osaka soon clarified the ideas of the researchers.

The continuing world-wide increase of commercial railway speed since then, has forced a constant redesigning of the track in order to suit this demand.

2. HIGH SPEED TRACK SUPERSTRUCTURE

The progress made in rolling stock since 1964 has been considerable. By way of example it is sufficient to recall that in 1975 the maximum speed achieved in tests was around 300 km/h, while this now exceeds 500 km/h. It is, therefore, not surprising that there has been a continuous evolution in infrastructure design criteria in order to adapt the lines and the track superstructure to suit the new material possibilities.

As such, when planning a new railway line a host of parameters are normally handled in order to establish the design criteria. The maximum design

Tabla 2. Evolución de la velocidad en el sistema ferroviario de sustentación magnética a lo largo del siglo XX
Table 2. Evolution of the magnetic levitation railway system throughout the 20th century

TREN DE SUSTENTACIÓN MAGNÉTICA (T.S.M.)/MAGNETIC LEVITATION TRAIN

AÑO/YEAR	TIPO DE TREN/TYPE OF TRAIN	
	TRANSRAPID (Alemania)/TRANSRAPID (Germany) VELOCIDAD MÁXIMA/MAXIMUM SPEED (km/h)	MAGLEV (Japón)/MAGLEV (Japan) VELOCIDAD MÁXIMA/MAXIMUM SPEED (km/h)
1976 – 1979	401.3 (1)	517 (2)
1987 – 1988	412.6 (3)	400.8 (4)
1990 – 1994	450 (5)	431 (6)
1999	450	552 (7)

(1) Prototipo KOMET en la pista de 1.3 km en Manching, cerca de Ingolstadt. En esa pista alargada a 2.5 km un TRANSRAPID 04 consiguió 253 km/h en 1977. /KOMET prototype on 1.3 km track in Manching near – Ingolstadt On this same track and when lengthened to 2.5 km a TRANSRAPID 04 reached 253 kph in 1977

(2) El primer prototipo del MAGLEV, ML500, sin personas a bordo en Miyazaki. /The first MAGLEV non-passenger carrying prototype ML500 in Miyazaki

(3) TRANSRAPID 06 de 54 m de largo y 120 t de masa con 200 plazas sentadas en Emsland. /TRANSRAPID D8, 54 m long and 120t for 200 seated passengers in Emsland.

(4) Prototipo MLU001 con 2 vehículos en Miyazaki. /MLU001 prototype with two 2 carriages in Miyazaki

(5) El prototipo de preserie TR07 con 4 vehículos, de 105 m de largo, 3.7 m de ancho y 184 t de masa en vacío, en Emsland. /Prototype of the current TR07 with 4 carriages, 105 m long, 3.7 m wide and 184 t empty weight, in Emsland.

(6) Prototipo MLU002N sin personal a bordo en Miyazaki. /MLU002N non-passenger carrying prototype, in Miyazaki.

(7) La rama MLX01 con 3 vehículos, de 77.8 m de largo, 2.9 m de ancho y 80 t de masa, con 4 bogies de sustentación, en el interior del túnel de Takagawa en la línea de ensayos de Yamanashi. /The MLX01 range with three carriages, of 77.8m long, 2.9m wide and 80t, with 4 support bogies, inside the Takagawa tunnel on the Yamanashi test track.

Así, en el momento de proyectar una nueva línea de ferrocarril es usual manejar una cincuentena de parámetros para configurar los criterios de su diseño. La velocidad máxima de proyecto es el primer parámetro a considerar. Su evolución histórica en el ferrocarril basado en el sistema rueda-carril se presenta en la tabla 1.

La justificación técnica de este proceso se da en la práctica, al establecerse una diferencia de 100/130 km/h entre la velocidad máxima alcanzada en ensayo y la susceptible de ser aplicada en explotación comercial.

En la actualidad, la relación comercial más rápida es la Shinkansen Osaka-Hakata entre Hiroshima y Kotura, con trenes Nozomi de la serie 500 a una media de 261,8 km/h (el AVE consigue unos 209,2 km/h de media). No obstante y según las previsiones de los institutos de investigación y fabricantes de material ferroviario, los nuevos trenes que circularán en el año 2005, podrán alcanzar velocidades comerciales superiores a las actuales.

Las infraestructuras que se están proyectando en la actualidad deberán tener en cuenta esas posibilidades, a la hora de definir los parámetros geométricos de las nuevas líneas a construir en el futuro.

Al respecto, cabe resaltar que el Instituto de Investigación de Tecnología Ferroviaria de Japón (RTRI) está desarrollando el proyecto ATLAS para poder lograr el aumento de la velocidad de los Shinkansen de las compañías JR. Sus principales objetivos son hacer posible una velocidad máxima de 500 km/h en su banco de pruebas, una velocidad máxima de 450 km/h de prueba circulando en líneas principales, una aceleración-deceleración de más de 1 km/h/s, una circulación continua a 400 km/h en rampas del 1% y una emisión de ruido de 75 dB(A) a 25 m del eje de la vía a 350 km/h.

speed being the first of the parameters to be considered. The historical evolution of railway speeds based on the wheel-rail system is shown in table 1.

The technical justification of this process is shown in practice when differences of between 100 and 130 km/h may be found between the maximum test speeds and those actually employed in commercial operations.

At present the fastest commercial speeds are to be found on the Osaka-Hakata Shinkansen between Hiroshima and Kotura, where Nozomi series 500 trains obtain an average speed of 261 kph (the Spanish AVE manages an average speed of 209.2 kph). However, in accordance with the forecasts of research centres and manufacturers of railway material, the new trains circulating in 2005 will be able to reach higher commercial speeds than present.

The infrastructure which is being planned at present has to consider these possibilities when defining the geometrical parameters of future railway lines.

In this regard the Technical Research Institute of Japanese National Railways is developing the ATLAS project in order to increase the speed of the JR Shinkansen. Their main objectives are to achieve a top speed of 500 kph on the test track and a maximum speed of 450 kph on main lines, with an acceleration-deceleration of over 1 km/h/s, a continuous speed of 400 kph on 1% gradients and a noise emission of 75 dB(A) at 23 m from the axis of the track at 350 kph.

The circulation at high speed establishes the speed limits of the axles which are fully motorised in relation to this maximum speed, even when travelling in rain. As

La circulación a alta velocidad ha colocado el límite de velocidad de ejes plenamente motorizados en torno a esa velocidad máxima, incluida la circulación bajo lluvia. Por tanto, sólo a partir de ese límite estaría justificada una solución de ferrocarril con sustentación magnética.

La técnica de sustentación magnética se debería posicionar en el intervalo de velocidades entre 500 y 800 km/h, lo que permitiría su competencia con la aviación (tabla 2).

Una de las grandes ventajas del ferrocarril de sustentación magnética, a parte de su mayor velocidad de circulación, es su capacidad de aceleración. Así, éste acelera de 0 a 300 km/h en sólo 5 km, mientras que un sistema moderno rueda-carril como el ICE alemán, necesita cerca de 30 km para alcanzar esa misma velocidad.

Diversos estudios de prognosis de tráfico han estimado en 20000 km, la longitud de las líneas que pueden ser susceptibles de ser servidas en el mundo por el ferrocarril de sustentación magnética. Si se tiene en cuenta que la velocidad máxima potencial en túnel (utilizando la fuerza de la gravedad para la propulsión o el frenado) podría ser del orden de los 2000 km/h, las posibilidades de este sistema ferroviario son impresionantes.

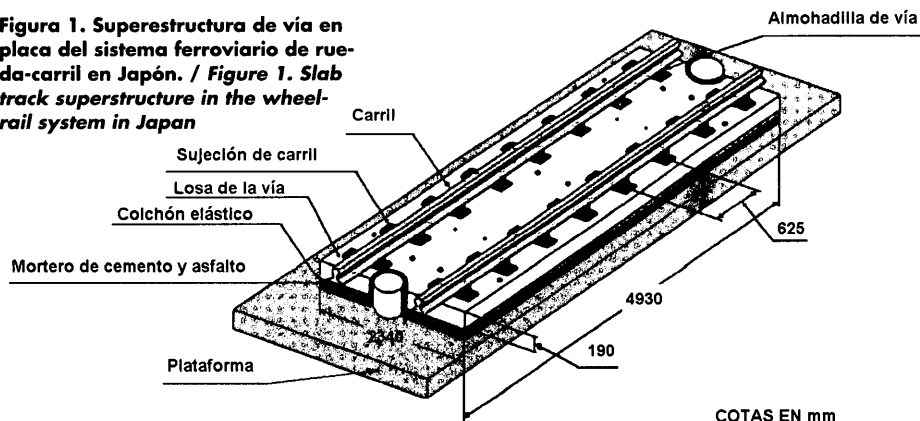
Un dato importante a tener en cuenta, es que las líneas aéreas japonesa (JAL) y alemana (LUFTHANSA) se han unido a las respectivas empresas ferroviarias, JRC y DB AG, para el desarrollo e implantación de esta nueva tecnología en esos países.

3. EVOLUCIÓN DE LA SUPERESTRUCTURA DE VÍA PARA ALTA VELOCIDAD SOBRE RUEDA-CARRIL

La primera línea de alta velocidad entre Tokio y Osaka fue puesta en servicio en 1964 con vía convencional sobre balasto, aunque el 46% de su longitud discurría por puentes y túneles. Su superestructura de vía estaba compuesta por carril de 50 kg/m, traviesas de hormigón de 2,4 m de longitud y espesor de balasto de 200 a 250 mm.

Bajo ese diseño estructural, se desarrollaron elevadas presiones sobre el balasto que obligaron a realizar operaciones de mantenimiento dos o tres veces al año. Se observó la rotura de las partículas de balasto tras sólo cinco años de explotación. La elasticidad de esta estructura tuvo que ser mejorada mediante la colocación de capas de protección bajo el lecho de balasto y se reforzó la estructura con carril de 60 kg/m.

Figura 1. Superestructura de vía en placa del sistema ferroviario de rueda-carril en Japón. / Figure 1. Slab track superstructure in the wheel-rail system in Japan



such, the magnetic levitation railway system only comes into its own over and above these limits. The magnetic suspension technique may be considered within a range of 500 and

800 kph, which then allows it to compete with air travel (table 2).

One of the great advantages of magnetic levitation rail, in addition to its high speed, is its acceleration capacity. This system allows an acceleration from 0 to 300 km/h in just 5 km, while a modern wheel-rail system such as the German ICE needs almost 30 km in order to reach the same speed.

Several traffic prognosis studies have calculated that the total length of railway line requiring magnetic suspension throughout the world would be 20,000 km. When considering that the maximum potential tunnel speed (using force of gravity for propulsion or braking) could be around 2000 kph, then the possibilities of this railway system are staggering.

One important detail to bear in mind is that the Japanese Airlines (JAL) and the Germany company, LUFTHANSA, have joined up with their respective railway companies, JRC and DB AG, in order to develop and introduce this new technology in these countries.

3. EVOLUTION OF TRACK SUPERSTRUCTURE FOR HIGH SPEED WHEEL-RAIL SYSTEMS

The first high speed line between Tokyo and Osaka came into service in 1964 and used a conventional track set on a ballast bed, though 46% of the line passed over bridges or through tunnels. The track superstructure was composed of a 50 kg/m rail, 2.4 m long concrete sleepers and a 200 to 250 mm deep bed.

This structural design led to high pressure on the ballast bed which meant that it was necessary to carry out maintenance operations two or three times a year. The ballast particles were seen to break after just five years of operation. The elasticity of this structure had to be improved by placing protection layers below the ballast bed and to reinforce the structure with 60 kg/m rail.

Dada esa experiencia y que las intervenciones de mantenimiento, en un 40%, estaban relacionadas con el balasto, los ferrocarriles japoneses adoptaron una solución estructural de vía en placa para las nuevas líneas de alta velocidad que se construyeron después de 1970 (figura 1).

Esta solución consistió en losas de hormigón prefabricadas sobre una capa de mortero de cemento y betún. Cada 5 m se colocaba un retén de

hormigón de 400 mm de diámetro y 200 mm de altura, para evitar el desplazamiento de la losa en sentido longitudinal y transversal. Las losas para el Shinkansen son de hormigón armado o pretensado. Cada placa mide 2340 mm de ancho por 4930-4950 mm y 160-200 mm de largo y espesor, respectivamente. En consecuencia, los trabajos de conservación cambiaron, dedicándose el 30% de esas actuaciones al mantenimiento de la sujeción.

Dado que en Europa la alta velocidad entró en servicio mucho más tarde, hubo tiempo suficiente para resolver los problemas estructurales que se dieron en la vía sobre balasto del primer Shinkansen. El desarrollo de soluciones estructurales mejoradas permitió el empleo de la superestructura de vía tradicional sobre balasto en las líneas de alta velocidad europeas.

Así, en Europa se emplea en la actualidad una superestructura de vía compuesta por el carril UIC60 en barra larga soldada, traviesas de hormigón pretensado de 2,60 m de longitud, monobloc o bibloque, sujeción elástica con una almohadilla bajo el carril, una capa de balasto de 350 mm de espesor sobre subbase y capa anticongelante.

Con esta solución estructural (figura 2), los trabajos de depuración de balasto deben realizarse después de un tráfico de 250-300 millones de toneladas remolcadas, según la experiencia francesa en su línea de alta velocidad París-Lyon. En una línea convencional (velocidad máxima de 160 km/h) se retrasa a los 1.000 millones.

En las líneas europeas de alta velocidad, la solución de vía en placa sólo se aplicó inicialmente en tramos experimentales de corta longitud, generalmente en túneles. Sin embargo, los ferrocarriles alemanes han tomado recientemente la decisión de adoptarla, como base de partida, en la planificación de sus nuevas líneas de alta velocidad. Así, en la línea de Hannover a Berlín se ha instalado vía en placa (en los tramos de nueva construc-

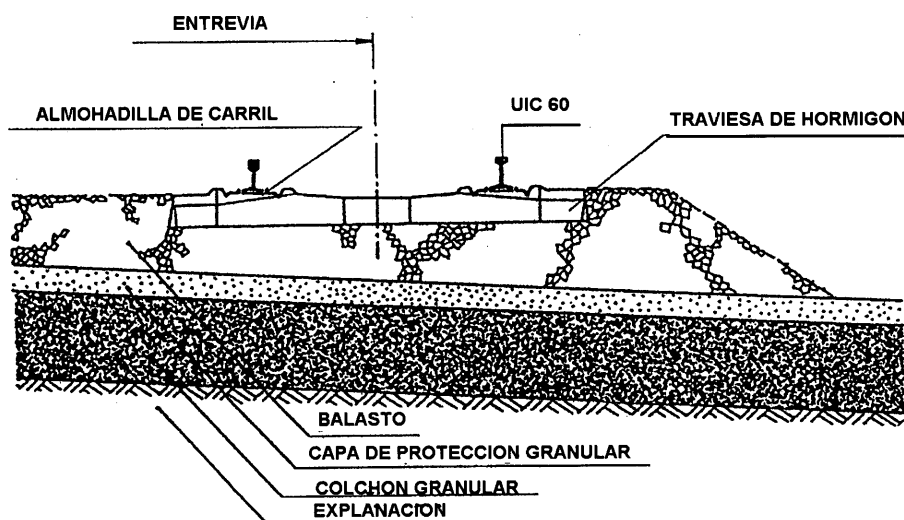


Figura 2. Superestructura de vía con balasto en el sistema ferroviario de rueda-carril.
Figure 2. Superstructure of ballasted track in the wheel-rail system

In the light of this experience and the fact that 40% of the maintenance work was related to the bed, Japanese Railways adopted the structural solution of track set on slab for the new high speed lines built after 1970 (Fig 1).

This solution consisted of prefabricated concrete slabs set on a layer of cement mortar and asphalt. A

400 mm diameter and 200 mm high concrete retainer was set every 5 m in order to prevent the longitudinal and transverse displacement of the slab. The slabs employed for the Shinkansen being either reinforced or prestressed concrete. The slab is 2340 mm wide by 4930-4950 long and 160-200 mm deep. As a result of the employment of these slabs, the maintenance work then changed and 30% of these operations were then directed to this support.

As the high speed train came into operation in Europe much later on, there was sufficient time to resolve the structural problems that had been observed in the ballast set track for the first Shinkansen. The development of improved structural solutions enabling the use of a traditional track superstructure set on a ballast bed on European high speed lines.

In Europe, the high speed lines now employ a track superstructure composed of a long welded bar UIC60 rail with 2.60 m long monoblock or bi-block prestressed concrete sleepers, elastic support with cushioning below the rail, a 350 mm thick ballast bed set on a subbase and an antifreeze layer.

According to French experience on their high speed Paris-Lyon line, this structural system (figure 2), requires ballast clearing work after it has received a traffic of 250 - 300 million tonnes of rolling stock. On a conventional line (maximum speed of 160 kph) this work can be delayed until receiving a total of 1,000 million tonnes.

The concrete slab solution was only initially employed in European high speed lines purely in short test tracks and generally in tunnels. However, the German Railways have recently taken the decision to adopt this system in the design of their new high speed lines. For instance, on the Hanover to

ción) en un 60% de los 153 km de su longitud y en la nueva línea de Colonia a Francfort de 177 km se va a instalar la superestructura de vía en placa en su totalidad.

Esa decisión ha provocado un amplio desarrollo de la vía sin balasto en Alemania. Sólo en ese país, se han desarrollado 26 tipos constructivos diferentes. Cuatro de ellos han obtenido ya la calificación de "recomendable", para poder aplicarse de forma generalizada en las nuevas líneas a construir. A diferencia de la solución japonesa, las europeas de vía en placa han utilizado, en general, las travie-

sas como elementos constituyentes de su superestructura, en sus dos variantes, con traviesa empotrada o apoyada (figura 3).

La construcción de nuevas líneas de alta velocidad se vio consolidada en la pasada década con la definición del concepto de "Redes Transeuropeas". Así en 1989, se creó un grupo de trabajo por el Consejo de Ministros Europeo, asociando a los Estados, Empresas Ferroviarias e Industria para la elaboración de un proyecto de red europea de alta velocidad, apoyada de partida en los proyectos nacionales.

El Consejo Europeo de Primeros Ministros celebrado en Essen en diciembre de 1994, aprobó la realización de 14 proyectos, llamados prioritarios de la red de transporte, de los que 10 correspondían al ferrocarril. Entre ellos se encontraba el "Proyecto 3. Tren de alta velocidad Sur: Madrid-Barcelona-Perpignan-Montpellier y Madrid-Vitoria-Dax", en el que están incluidos el Madrid-Valladolid y la "Y Vasca". Dichos proyectos han sido confirmados por el Consejo Europeo de Cardiff en junio de 1998.

A pesar de sus dificultades, la red ferroviaria europea de altas prestaciones ha alcanzado ya los 2.800 km de extensión desde 1981 (figura 4). En el año 2005 previsiblemente estarán en servicio unos 6.000 km.

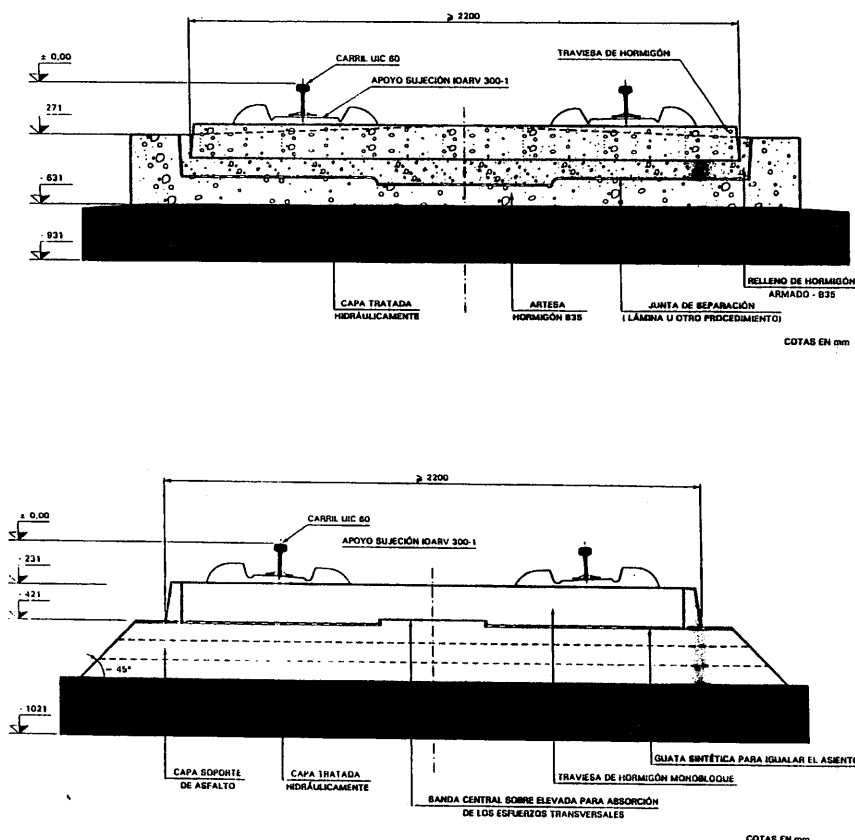


Figura 3. Variantes europeas de la superestructura de vía en placa en el sistema ferroviario de rueda-carril. / Figure 3. European variations of slab track superstructure for the wheel-rail system

Berlin line slab track has been placed (in the newly constructed sections) in 60% of the 153 km route and the new 177 km Cologne-Frankfurt line will be entirely set on slab.

This decision has led to the wide development of unballasted track in Germany and in this country alone 26 different construction types have already been developed. Four of these systems have already been classified as "recommendable" for general use in the new lines to be constructed. As opposed to the Japanese solution,⁶ the European slab track has generally

employed the sleepers as their supporting element, using either embedded or supported sleepers (figure 3).

The construction of new high speed lines was consolidated in the nineties by the then newly defined concept of the "Trans-European Network". In 1989 a work group was established by the European Council of Ministers in association with the States, Railway Companies and Industry in order to prepare a project for a high speed European network which was initially based on national projects.

The European Summit Meeting held in Essen in December 1994, passed 14 projects which were considered of main priority for the transport network. Ten of these projects were for railway connections and included the "Proyecto 3", the Southern high speed train: Madrid-Barcelona-Perpignan-Montpellier and Madrid-Vitoria-Dax", which, in turn, includes the Madrid-Valladolid and the "Basque Y". These projects were confirmed by the European Council in Cardiff in June 1998.

In spite of its difficulties, the European high speed railway network has already gained 2,800 km of line since 1981 (figure 4) and by the year 2005 some 6,000 km will possibly be in service.

4. LA SUPERESTRUCTURA DE VÍA DEL TREN DE SUS-TENTACIÓN MAGNÉTICA

Japón y Alemania son los únicos países que han desarrollado y ensayado la tecnología de sustentación magnética y su aplicación práctica, desde mediados de la década de los 60 (1962 en Japón y 1969 en Alemania). No obstante, las tecnologías que han desarrollado estos dos países se diferencian considerablemente en todos los aspectos. En la tabla 3 se presentan las diferencias entre las tecnologías MAGLEV (japonesa) y TRANSRAPID (alemana).

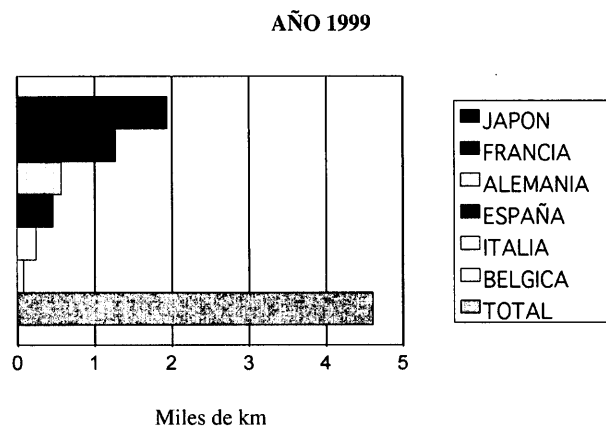


Figura 4. Longitud de las líneas de alta velocidad del sistema ferroviario de rueda-carril en la actualidad.

Figure 4. Length of high speed train lines currently employing the wheel-rail system.

4. TRACK SUPERSTRUCTURE FOR THE MAGNETIC LEVITATION TRAIN.

Since the sixties, Japan and Germany are the only countries who have developed, tested and put into practice the magnetic levitation technique (1962 in Japan and 1969 in Germany). However, the technologies developed in these two countries varies considerably in all aspects. Table 3 shows the differences between the Japanese MAGLEV system and the German TRANSRAPID system.

Tabla 3. Características técnicas de los sistemas ferroviarios MAGLEV y TRANSRAPID
Table 3. Technical characteristics of the MAGLEV and TRANSRAPID railway systems

CARACTERÍSTICAS/CHARACTERISTICS	MAGLEV	TRANSRAPID
PRINCIPIO MAGNÉTICO/MAGNETIC PRINCIPLE	REPULSIÓN/REPULSION	ATRACCIÓN/ATTRACTION
TIPO DE SUSTENTACIÓN/TYPE OF SUSPENSION	ELECTRODINÁMICA/ELECTRODYNAMIC	ELECTROMAGNÉTICA/ELECTROMAGNETIC
MÉTODO DE SUSTENTACIÓN/METHOD OF SUSPENSION	IMANES SUPERCONDUCTORES EN EL VEHÍCULO/ SUPERCONDUCTING MAGNETS ON VEHICLE	ELECTROIMANES REGULADOS EN EL VEHÍCULO REGULATING ELECTROMAGNETIC IN VEHICLE
TREN DE RODADURA/UNDERCARRIAGE	ADICIONAL DE RUEDAS PARA V<120 km/h ADDITIONAL WHEELS FOR SPEED <120 Kph	NO NECESITA NOT REQUIRED
INSTALACIONES FIJAS FIXED INSTALLATIONS	BOBINAS DE SUSTENTACIÓN, CONDUCCIÓN Y TRACCIÓN EN LAS PAREDES LATERALES LEVITATION, GUIDANCE AND PROPULSION COILS IN LATERAL WALLS	COLOCACIÓN SEPARADA DE LOS COMPONENTES PARA CONDUCCIÓN Y SUSTENTACIÓN/ TRACCIÓN EN LA VÍA SEPARATE PLACING OF COMPONENTS FOR SUSPENSION-GUIDANCE AND PROPULSION ON TRACK
SISTEMAS DE FRENOS BRAKING SYSTEMS	GENERADORES, AERODINÁMICOS Y DE DISCO AERODYNAMIC AND DISC GENERATORS	GENERADORES, POR CORRIENTES DE FOUCAULT Y ELECTROMAGNÉTICOS DE PATÍN GENERATORS, WITH EDDY CURRENT AND SLIP ELECTROMAGNETS
DISTANCIA SEPARACIÓN VEHÍCULO-VÍA VEHICLE-TRACK DISTANCE	100 mm	10 mm
TIPO DE TRACCIÓN/PROPULSION	MOTOR LINEAL DE ESTÁTOR LARGO SIN HIERRO NON-FERROUS LONG SYNCHRONISED STATOR LINEAR MOTOR	MOTOR LINEAL DE ESTÁTOR LARGO SÍNCRONO CON HIERRO FERROUS LONG SYNCHRONISED STATOR LINEAR MOTOR
FRECUENCIA DEL MOTOR/MOTOR FREQUENCY	0 A 56 Hz	0 A 270 Hz
GEOMETRÍA DE VÍA/TRACK FORM	FORMA DE "U"	FORMA DE "T"

En Japón se optó desde el comienzo por la "tecnología de sustentación electrodinámica (EDS)" para la alta velocidad. Las razones esenciales fueron la economía de peso en los vehículos, la inexistencia de una regulación específica de la separación de los imanes superconductores y una mayor separación de los imanes en comparación con las otras tecnologías existentes.

La vía adopta la forma de un canal cuya solera constituye el camino de rodadura

para la circulación a baja velocidad, y cuyas paredes son sendas vigas de hormigón pretensado en cuyo interior se alojan los electroimanes de levitación y guiado, así como los de propulsión. Las tolerancias dimensionales de este conjunto son sumamente pequeñas, por lo que en la construcción, fabricación y montaje de las vigas es necesaria una precisión extremada.

En los últimos años se han desarrollado importantes mejoras en la colocación de las bobinas de sustentación, conducción y tracción en la vía, que se ha efectuado principalmente con forma de "U" (figura 5).

Los objetivos fundamentales eran la reducción de los esfuerzos de frenado por corrientes de Foucault en el ámbito de arranque y la simplificación de la técnica de aislamiento, fabricación y montaje de las bobinas sin hierro en la vía. Como sistema de tracción se ha utilizado el motor lineal de estátor largo síncrono sin hierro.

Para ensayar el sistema MAGLEV, se construyó en 1977 una vía de ensayo en Miyazaki, donde se obtuvieron muchos resultados, incluido el de la velocidad de 517 km/h en 1979. Sin embargo, esta vía de ensayo estaba limitada, debido a su escasa longitud de 7 km, a la ausencia de secciones en túnel y ser una vía única en la que era imposible el ensayo de dos trenes circulando en sentidos opuestos.

Por ello, en noviembre de 1990 se empezó a construir una nueva línea de ensayos en Yamanashi. Una sección prioritaria de 18,4 km, de los 42 km totales, fue puesta en servicio en marzo de 1997, para hacer ensayos de circulaciones a una velocidad máxima de 550 km/h. Esta línea de ensayo forma parte del trazado de la futura línea Tokio-Osaka. En la tabla 4 se presenta un resumen de los datos más significativos de este tramo experimental.

Bobina de tierra para sustentación y guiado

Bobina de tierra para propulsión

Pared lateral

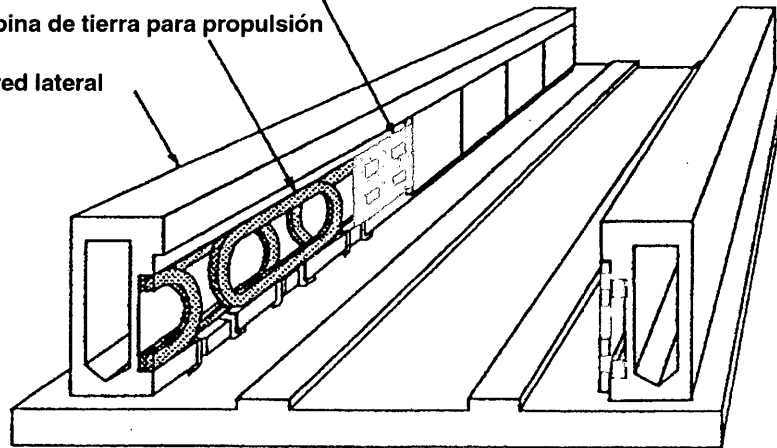


Figura 5. Superestructura de vía en el sistema ferroviario de sustentación magnética tipo MAGLEV. / Figure 5. Track superstructure of the MAGLEV magnetic levitation railway system.

From the outset Japan opted for the "electrodynamic suspension system (EDS) for their high speed railway. The basic reasons for this selection were the reduced weight of the vehicles, the lack of specific regulation for the spacing of the superconducting magnets and the greater spacing of the magnets in relation to other existing techniques.

The track takes the form of a channel guideway

in which the floor serves as the track bed at lower speeds and where the walls of the same are formed by prestressed concrete beams which house the levitation-guidance and propulsion electromagnets. The dimensional tolerances of this arrangement are minute and, therefore, extreme precision is required in the construction, manufacture and assembly of the beams.

In recent years important improvements have been made in the placing of levitation-guidance and propulsion coils in the track guideway which mainly takes a "U" shape. (figure 5)

The basic objectives were to reduce the braking stresses by eddy currents when starting and the simplification of the insulation, manufacture and assembly of the non-ferrous coils in the track. The propulsion system employs a non-ferrous long synchronised stator linear motor.

The MAGLEV system was tested on a test track built in Miyazaki in 1977 and of the many results obtained a speed of 517 kph was recorded in 1979. However, this test track was somewhat limited by its short length of only 7 km, the absence of any tunnel sections and by the fact that it was a single track which prevented the testing of the effect of two oncoming trains.

As such, construction began on a new test track in Yamanashi in 1990. The main 18.4 km section of the 42 km track was opened in March 1997 in order to make tests on circulation at a maximum speed of 550 kph. This test track forms part of the route of the future Tokyo-Osaka line and Table 4 shows a summary of the most important details of this experimental track.

The first railway line based on the MAGLEV system is expected to be put into operation by the Japanese Railway

Está prevista la puesta en servicio de la primera línea basada en este sistema "MAGLEV", por la compañía ferroviaria japonesa JRC, con el nombre de "Chuo-Shinkansen" entre Tokio y Osaka a partir del año 2005.

En Alemania se adoptó en el año 1977 la "técnica de sustentación electromagnética (EMS)"

con motor lineal de estátor largo síncrono con hierro. Así, la variante "TRANSRAPID" se desarrolló como única línea de investigación para su aplicación práctica en el tráfico de alta velocidad.

El motor lineal síncrono de estátor largo e imán permanente de este sistema, consta del arrollamiento de campo integrado en la vía y embebido en las ranuras del estátor, y de los imanes permanentes a bordo del vehículo. Para reducir las pérdidas al mínimo, el estátor se subdivide en secciones que a su vez se dividen en secciones de motor. Para ajustarse a las características específicas del trazado, el número de espiras en las ranuras del estátor puede ser diferente (figura 6).

Entre 1980 y 1987 se construyó por un consorcio industrial, a lo largo de dos fases constructivas, un circuito experimental en Emsland. En la actualidad, ese circuito dispone de una infraestructura de 31,5 km de longitud (40 km si se efectúa un recorrido de todo el circuito). En él se han realizado todos los ensayos de este sistema. En la tabla 4 se presenta un resumen de los principales datos de este tramo experimental.

No obstante, dado que este circuito sólo posee una vía, no permite realizar todas las pruebas necesarias para su uso práctico a escala 1:1. Por tal motivo, se ha planificado la construcción de un nuevo tramo de 40 km de longitud, en el que puedan realizarse las consiguientes comprobaciones de marcha real a partir del año 2002. Todo ello para que pueda ponerse en servicio, la explotación del primer tren entre Hamburgo y Berlín después del año 2005.

Esta línea se ha diseñado para una velocidad máxima de 500 km/h, si bien la velocidad de los trenes del TRANSRAPID se limitará a 400 km/h, que se reducirá a 200 km/h en las áreas habitadas. La línea seguirá el trazado paralelo a la autopista existente. Será de doble vía, a nivel del suelo y parcialmente elevada. Las vigas de los tramos elevados serán de acero, mientras que en los tramos a nivel serán de hormigón. Los ejes de la vía estarán separados entre sí 5,1 m. Las secciones elevadas se encontrarán, normalmente, a 5 m por encima del nivel del suelo, que es la altura normalizada para los puentes.

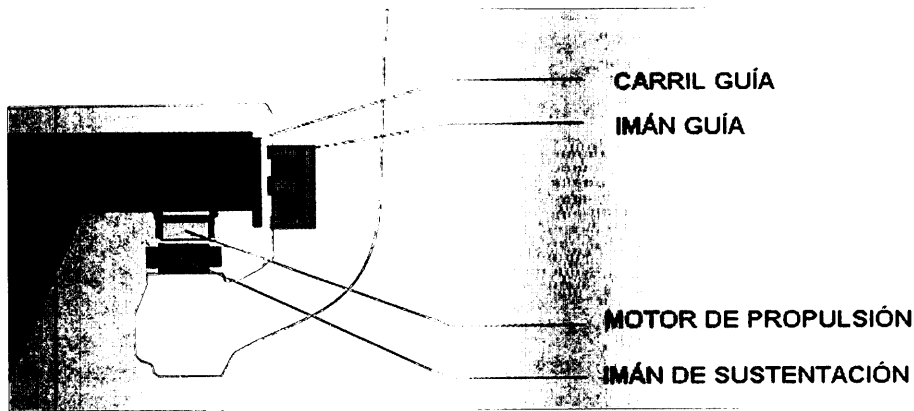


Figura 6. Superestructura de vía en el sistema ferroviario de sustentación magnética tipo TRANSRAPID. / Figure 6. Track superstructure of the TRANSRAPID magnetic levitation railway system

Company, under the name of "Chuo-Shinkansen, between Tokyo and Osaka as from 2005.

Germany in 1977 adopted the "electromagnetic suspension technique" (EMS) employing a ferrous long synchronised stator linear motor. The "TRANSRAPID" variation was then

developed as a single line of investigation for its subsequent practical application in high speed transport.

The synchronised linear motor with long stator and permanent magnet of this system consists of integrated field windings within the track and embedded in the stator slots, and permanent magnets aboard the vehicle. In order to reduce losses to a minimum, the stator is sub-divided into sections which are in turn divided into motor sections. In order to adjust to the specific characteristics of the line, the number of coil sides in the stator slots may vary (figure 6).

A test track was built by an industrial consortium at Emsland in two construction stages between 1980 and 1987. The circuit currently has an infrastructure of 31.5 km (40 km when following the entire route of the circuit) and all the tests on this system have been carried out at this circuit. Table 4 shows a summary of the principle results yielded on this test track.

However, as this test track is only fitted with a single track, it is not possible to carry out all the necessary tests for practical use at full scale. As such, a new 40 km stretch of track is planned for construction where it will be possible to carry out the corresponding tests under true conditions as from the year 2002. All this with the aim of putting the first train into commercial operation between Hamburg and Berlin after 2005.

This line has been designed for maximum speeds of 500 kph even though the speed of the TRANSRAPID trains is limited to 400 kph, which will be reduced even further to 200 kph through populated areas. The line will follow a parallel route to the existing motorway between the cities. The line will consist of double track and be set at ground level or partially elevated. The beams on the elevated sections will be made of steel while those at ground level will be made of concrete. The track axes will be spaced at 5.1 m and the elevated sections will usually be set 5 m above ground level, this being the standard height for bridge sections.

Tabla 4. Características de las líneas experimentales del ferrocarril de sustentación magnética
Table 4. Characteristics of test tracks for magnetic levitation railway

LÍNEAS EXPERIMENTALES DEL T.S.M./ MAGNETICALLY LEVITATED RAILWAY TEST TRACKS

DENOMINACIÓN/LOCATION	YAMANASHI	EMSLAND
PAÍS/COUNTRY	JAPÓN/JAPAN	ALEMANIA/GERMANY
LONGITUD TOTAL PREVISTA/TOTAL FUTURE LENGTH	42.8 km	80 km
LONGITUD ACTUAL/CURRENT LENGTH	18.4 km	31.5 km
LONGITUD EN TÚNEL/LENGTH THROUGH TUNNEL	16 km	0
LONGITUD TÚNEL MÁS LARGO/LONGEST TUNNEL	5.9 km	0
SECCIÓN DE TÚNEL/TUNNEL SECTION	74 m ²	0
RADIO MÍNIMO/MINIMUM RADIUS	8000 m	1000 m
RAMPA MÁXIMA/MAXIMUM GRADIENT	4 %	3.5 %
DISTANCIA ENTRE EJES/DISTANCE BETWEEN AXES	5.8 m	vía única/single track
PERALTE/BANKING	10°	12°

El radio mínimo de las curvas para los tramos de circulación a velocidad máxima de 500 km/h será de 4415 m, de 2825 m para 400 km/h, 705 m para la velocidad de 200 km/h y un mínimo absoluto de 350 m en las estaciones. El peralte máximo será de 16°. Si bien el TRANSRAPID puede hacer frente a pendientes de hasta 10%, el trazado será prácticamente llano (figura 7).

Esta línea de ferrocarril de sustentación magnética, Hamburgo-Schwerin-Berlín, estará integrada a la red ferroviaria existente, a través de cómodas posibilidades de transbordo, así como tarifarias. Gracias a la situación de sus estaciones, directamente unidas a las grandes estaciones ferroviarias de Hamburgo y Berlín serán posibles conexiones rápidas, tanto al sistema ferroviario de alta velocidad ICE, como a los ferrocarriles regionales, al suburbano y el metro.

Para el año 2005 estaba prevista la explotación de 800 km de líneas en el mundo, con el sistema ferroviario de sustentación magnética. No obstante, dada su situación actual, es previsible que se posponga esa puesta en servicio.

5. COSTE ECONÓMICO DE CADA TIPO DE SUPERESTRUCTURA DE VÍA

La adopción de un tipo de superestructura de vía u otro, influye en el coste total de la línea. Se han ido realizando a lo largo de los últimos años diferentes estudios de coste y rentabilidad de las diferentes soluciones de vía sobre balasto, vía en placa y vía sin carril.

Básicamente la superestructura sin balasto se caracteriza por unos costes de construcción más elevados que la vía en placa, aunque éstos implican, posteriormente, ahorros en su mantenimiento.

The minimum radii of the curves on sections of the maximum speed of 500 kph shall be 4415 m while those for 400 kph sections will be 2825 m and those for 200 kph sections 705 m and with an absolute minimum radii of 350 m at stations. The maximum banking will be 16° and while the TRANSRAPID is capable of climbing 10% slopes, the route will be practically flat (figure 7).

The Hamburg-Schwerin-Berlin magnetic levitation railway line will be incorporated within the existing railway network with ease of connections and parallel fare systems. Given the location of the stations which are directly connected to the large railway stations at Hamburg and Berlin it will be possible to make fast connections to the high speed ICE railway system as well as to regional and suburban lines and the underground.

In the year 2005 it is estimated that 800 km of magnetic levitation railway will be available throughout the world. However, given the current situation it is possible that the commercial operation of these lines be somewhat delayed.

5. COST OF EACH TYPE OF TRACK SUPERSTRUCTURE

The selection of one type of track superstructure over another has an effect on the total cost of the line. In recent years various cost and profitability studies have been carried out on the different solutions of track on a ballast bed, track on slab and tracks without rails.

The construction cost of superstructure of track without a ballast bed is higher than that of track on road beds, though these do subsequently provide savings in maintenance.

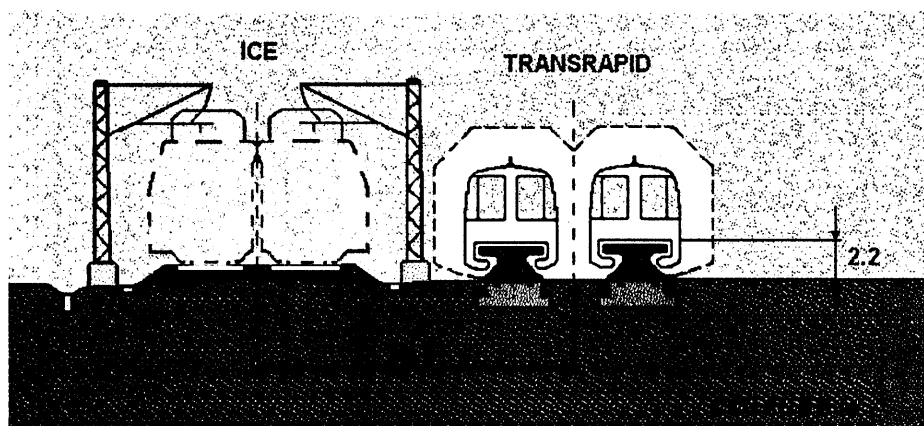
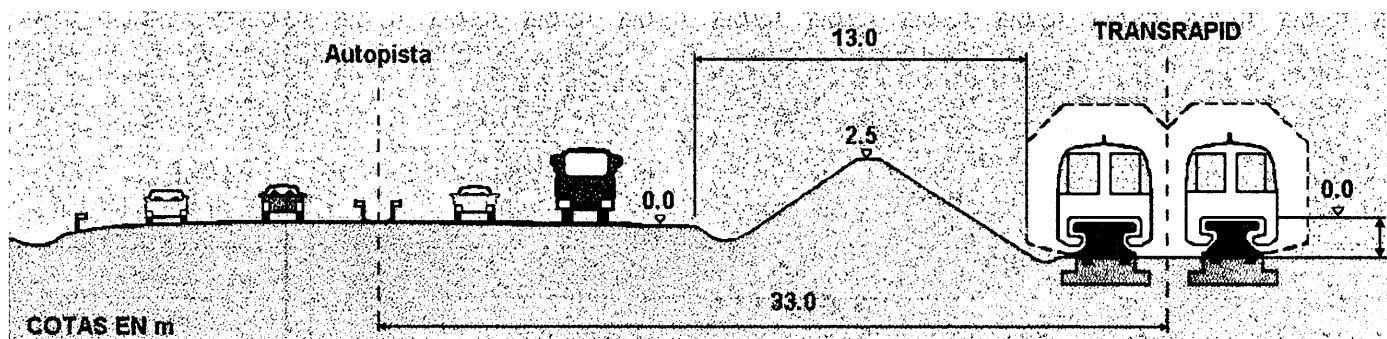


Figura 7. Sección transversal tipo de la nueva línea Hamburgo-Schwerin-Berlin del TRANSRAPID en paralelo con otras infraestructuras existentes.
Figure 7. Typical cross-section of the new Hamburg-Schwerin-Berlin TRANSRAPID line together with other existing infrastructure.



En una comparación de los costes anuales (incluyendo los de construcción y mantenimiento), los costes por kilómetro de vía en placa sobrepasan a los correspondientes a la vía con balasto para alta velocidad, en un factor inferior a 2.

La vía con balasto es más económica en su utilización sobre la explanación. Para la aplicación en túneles, la vía en placa es una buena solución (permite ganar 900 mm sobre la cota de colocación del carril), si se reducen un poco más sus costes de montaje, mediante una mayor racionalización y mecanización de su procedimiento constructivo.

Para facilitar el ilimitado uso del sistema de freno por corrientes de Foucault, resulta ventajosa la dotación de vía en placa en tramos largos de frenado y con una pendiente descendente. También resulta recomendable en trayectos con gran cantidad de obras de fábrica (túneles y viaductos), a fin de evitar continuos cambios de elasticidad de la vía al instalar diferentes soluciones estructurales (balasto-vía en placa). La diferencia de coste entre ambas soluciones se reducirá en el futuro, si se generaliza la tendencia actual de incrementar el espesor de balasto y de emplear capas aislantes blandas.

El porcentaje de obras de fábrica de las nuevas líneas de alta velocidad ha ido creciendo en todos los países. Así en Francia, el TGV Mediterráneo tendrá 27 km de túneles, zonas cubiertas, puentes y viaductos sobre 295 km en total, o sea, casi un 10% del kilometraje de la nueva línea, todo un récord en ese país. Los porcentajes en Alemania y en Italia ya llegan al 30% y la futura línea Bolonia-Florenia tendrá obras de fábrica en un 90%, un ré-

When comparing the annual costs (including construction and maintenance), the cost per kilometre of slab track surpasses that of track on ballast beds for high speed rail, by a factor of less than 2.

The ballasted track is more economical in roadbeds while in tunnels the slab track is a better solution (allowing a raising of 900 mm over the level of placement of the rail) providing the assembly costs are somewhat reduced by means of greater rationalisation and mechanisation of the construction process.

In order to aid the unlimited use of the eddy current breaking system, it is advantageous to place slab track in long braking stretches and those with a downward gradient. This type of track is also recommendable in stretches with a large number of structural works (tunnels and viaducts) as it prevents continuous changes in the elasticity of the track caused by differing structural solutions (ballast bed – slab bed). The difference in cost between both solutions will be reduced in the future if there is a generalisation of the current trend to increase the thickness of the ballast and to employ soft insulating layers.

The percentage of works on the new high speed lines has been increasing everywhere. In France the Mediterranean TGV will have 27 km of tunnels, covered areas, bridges and viaducts in the total 295 km of line, that is to say almost 10% of the length of the line, which is certainly a record in this country. The percentages in Germany and Italy already reach

cord europeo. En España, la nueva línea "Y Vasca" que unirá las tres ciudades más importantes del País Vasco, presentará una proporción del 54%. En Japón, sus porcentajes son todavía más elevados que en Europa.

El incremento del número de obras de fábrica ha provocado un aumento de los costes de construcción de las nuevas líneas de alta velocidad en Europa. Es el caso de la futura línea de 177 km de Colonia a Francfort, con vía en placa en su totalidad. Su coste ascenderá a 24×10^6 euros/km, superior al previsto para el TGV-Mediterráneo. Como orden de magnitud conviene resaltar que el coste de construcción de la nueva línea Hamburgo-Schwerin-Berlín de 284 km para el TRANSRAPID, está previsto en 27×10^6 euros/km.

No obstante, se deben tomar estas cifras con carácter orientativo, dado que el coste depende especialmente del movimiento de tierras, del número y dimensión de los túneles y viaductos, y de las estructuras de ingeniería especiales, que suelen ser muy diferentes de unos trayectos a otros.

Los estudios económicos existentes de los costes de la vía y el sistema de explotación, así como los costes de energía y mantenimiento, para el ferrocarril de sustentación magnética a 500 km/h, se mueven en el mismo entorno que los costes del ferrocarril de alta velocidad con rueda-carril a 300 km/h.

La gran ventaja del sistema de sustentación magnética, es que su gran velocidad de cruce permite pendientes de hasta un 10% frente a un máximo del 5% para el sistema rueda-carril. Asimismo, admite peraltes mucho mayores, permitiendo a los trenes tomar las curvas un 40% más rápido.

Otro de los factores que influye en el coste de la línea es la distancia entre ejes de las vías, lo que influye decisivamente en el valor de la anchura mínima necesaria de la explanación.

Éste es un problema técnico todavía por resolver de forma definitiva en el sistema de sustentación magnética. Los ensayos que se realizan en la actualidad en Japón (línea experimental de Yamanashi) tratan de resolverlo. Para una velocidad máxima de 500 km/h se prevé adecuada una distancia entre ejes de vía de 5,10 m, para una anchura del vehículo de 3,70 m. No obstante, la sección experimental de Yamanashi, se construyó con una distancia entre ejes de vía de 5,80 m. A título orientativo, la línea París-Lille del TGV Norte, para una velocidad máxima de 300

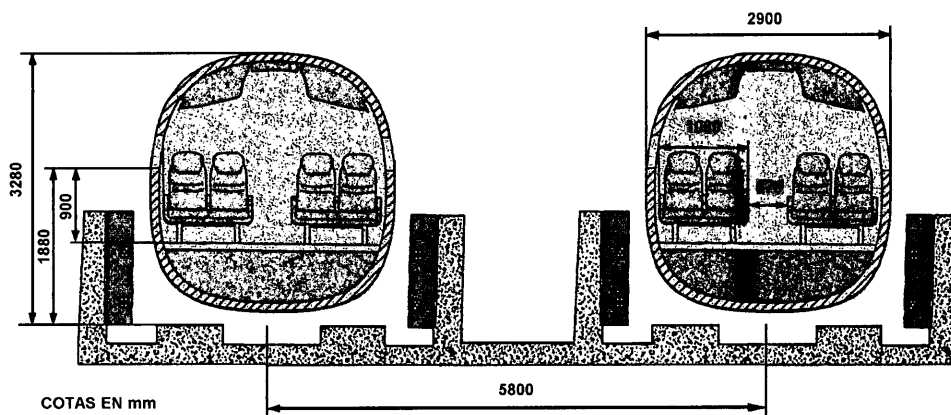


Figura 8. Sección transversal de la línea experimental del MAGLEV en Yamanashi (Japón).
Figure 8. Cross-section of the MAGLEV test track at Yamanashi (Japan).

30% and the future Bologna-Florence line will have works on 90% of the line, which will be a European record. In Spain the new "Y Vasca" line which will connect the three major cities in the Basque Country, will have a 54% proportion of

constructed works. In Japan these percentages are even higher than in Europe.

The increase in the number of works has led to a rise in the construction costs of the new high speed lines in Europe. This is the case of the future 177 km long Cologne-Frankfurt line which entirely runs on slab track. This line will cost 24×10^6 euros/km which is higher than that forecasted for the TGV - Mediterranean. On an order of scale it may be indicated that the construction cost of the new 284 km Hamburg-Schwerin-Berlin line for the TRANSRAPID is forecasted at 27×10^6 euros/km.

However, these figures should be taken as guidelines as the cost basically depends on the earthworks required, the number and size of tunnels and viaducts and special engineering works, which are normally very different from one route to another.

Current economic studies of track and operational costs as well as those regarding energy and maintenance show that the cost of a magnetic levitation railway serving speeds of 500 kph are around the same level as those of a high-speed wheel rail line for speeds of 300 kph.

The great advantage of the magnetic levitation system is that its high cruising speeds allow gradients of up to 10% as opposed to the maximum 5% gradients permitted in the wheel-rail system. The system also allows much higher banking permitting trains to take curves at 40% higher speeds.

Another factor which affects the cost of the line is the distance between the axes of the lines, which has a decisive influence on the necessary minimum width value of the roadbed.

This is a technical problem which has yet to be solved in the magnetic levitation system. The tests currently being carried out in Japan (Yamanashi test track) are attempting to solve this problem. At maximum speeds of 500 kph it has been predicted that a distance between axes of 5.10 m would be sufficient for a

Tabla 5. La superestructura de vía en función del sistema ferroviario y de la velocidad de las circulaciones.
Table 5. Track superstructure in accordance with the railway system and operational speeds

**LA SUPERESTRUCTURA DE VÍA EN EL SISTEMA FERROVIARIO DE RUEDA-CARRIL/
TRACK SUPERSTRUCTURE IN THE WHEEL-RAIL SYSTEM**

VÍA SOBRE BALASTO BALLASTED TRACK	• LÍNEAS CLÁSICAS MEJORADAS O NUEVAS LÍNEAS CON TRÁFICO DE VIAJEROS Y MERCANCÍAS, DIURNOS Y NOCTURNOS, CON $V < 250$ km/h Y 22 t/eje. • <i>IMPROVED TRADITIONAL LINE OR NEW LINES FOR TRANSPORT OF PASSENGERS AND GOODS, DAY AND NIGHT TRAINS, WITH $V < 250$ kph and 22 t/axle</i> • NUEVAS LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD CON TRÁFICO DE VIAJEROS CON 250 km/h $< V < 350$ km/h Y DE MERCANCÍAS A $V > 120$ km/h Y 17 t/eje, TRÁFICOS EN SU MAYORÍA DIURNOS. • <i>NEW HIGH SPEED LINES FOR PASSENGER TRAINS OF 250 kph < 350 kph AND GOODS TRAINS OF > 120 kph AND 17t/axle, GENERALLY DAYTIME CIRCULATION</i>
VÍA EN PLACA SLAB TRACK	• TÚNELES DE GRAN LONGITUD (> 1000 m) Y TRAMOS CON MUCHAS OBRAS DE FÁBRICA (VIADUCTOS Y TÚNELES), EN LÍNEAS CLÁSICAS MEJORADAS Y EN LAS NUEVAS DE ALTA VELOCIDAD. • <i>LONG TUNNELS (> 1000m) AND STRETCHES WITH MANY STRUCTURAL WORKS (VIADUCTS AND TUNNELS) ON IMPROVED TRADITIONAL LINE AND IN NEW HIGH SPEED LINES</i> • NUEVAS LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD (250 km/h $< V < 350$ km/h) CON TRÁFICO MIXTO (VIAJEROS Y MERCANCÍAS) Y CON ABUNDANTE CIRCULACIÓN NOCTURNA. • <i>NEW HIGH SPEED LINES (250 KPH < 350 KPH) WITH COMBINED TRAFFIC (GOODS AND PASSENGER TRAINS) WITH FREQUENT NIGHT TRAFFIC</i>

**LA SUPERESTRUCTURA DE VÍA EN EL SISTEMA FERROVIARIO DE SUSTENTACIÓN MAGNÉTICA/
TRACK SUPERSTRUCTURE FOR THE MAGNETIC LEVITATION RAILWAY SYSTEM**

VÍA SIN CARRIL TRACK WITHOUT RAIL	• NUEVAS LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD EN LAS QUE SE REQUIEREN VELOCIDADES SUPERIORES A LOS 450 km/h. • <i>NEW HIGH SPEED LINES REQUIRING SPEEDS GREATER THAN 450 kph.</i>
--------------------------------------	--

km/h y una anchura de los vehículos de $2,92$ m, posee una distancia entre ejes de vía de $4,50$ m (figura 8).

A la vista de lo anterior, en la tabla 5 se presentan las circunstancias en las que se recomienda el proyecto de cada tipo de superestructura de vía.

6. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha presentado la importante evolución experimentada en la superestructura de vía, a lo largo de la segunda mitad del siglo XX.

Las exigencias provocadas por el incremento de la velocidad máxima de circulación de las ramas de alta velocidad del sistema rueda-carril hasta los 400 km/h en el futuro, así como los condicionantes de impacto ambiental (ruido, especialmente) obligan a seguir desarrollando investigaciones para la mejora del comportamiento del sistema rueda-carril.

Por tanto, las mejoras en los elementos de la superestructura de vía (sobre balasto o en placa) deberán producirse necesariamente para poder conseguir el reto propuesto.

3.70 m wide vehicle. However, the Yamanashi test track was built with a 5.80 m distance between track axes. By way of example, the Paris-Lille line for the TGV North, with running speeds of 300 kph and 2.92 m wide vehicles, has a 4.50 m spacing between the axes of the double tracks (figure 8).

6. CONCLUSIONS

The present article has considered the important developments seen in track superstructure throughout the second half of the 20th century.

The requirements arising from the future increase in maximum operational speed on high speed stretches of the wheel-rail system of up to 400 kph, as well as the conditioning aspects of environmental impact (particularly noise) force the ongoing investigation in order to improve the performance of the wheel-rail system.

As such, improvements in the elements of track superstructure (on ballast bed or on slab) will have to be made in order to meet the proposed challenge.

La implantación de nuevas soluciones estructurales no va a incrementar sustancialmente el coste de las nuevas superestructuras. En todo caso, si se produce un aumento en su fase de construcción, éste podrá compensarse con la reducción del coste del posterior mantenimiento de la superestructura de vía resultante.

A lo largo del siglo XXI se irá implantando progresivamente el ferrocarril de sustentación magnética, con unos costes no muy superiores a los del ferrocarril de alta velocidad con la técnica rueda-carril. De esta forma, al situarse la velocidad máxima actual de 350 km/h por encima de los 500 km/h, se prolongará la oferta ferroviaria a mayores distancias. Ello permitirá ampliar la actual competencia del ferrocarril de alta velocidad, de las distancias inferiores a los 900 km hasta los 2000 km, desplazando a la aviación para servir los recorridos superiores a esa distancia.

Por tanto, el sistema de sustentación magnética constituirá en el futuro la tercera variante a tener en cuenta en la planificación de nuevas líneas ferroviarias de alta velocidad.

La futura creación de la "Unión Internacional de la Sustentación Magnética" dará un carácter institucional al impulso de la implantación en el mundo de este nuevo sistema de transporte ferroviario.■

The introduction of new structural solutions will not substantially increase the cost of the new superstructures. In any case, if there is an increase in cost during the construction stage, this may be offset by the reduction in costs of subsequent maintenance of the new track superstructure.

The magnetic levitation railway will be progressively introduced throughout the 21st century with costs not that much higher than that of high speed railway with wheel-rail systems. The current maximum speed of 350 kph will be increased to over 500 kph and will improve the railway option for long distance travel. This will broaden the current competitiveness of high speed train between distances below 900 km and up to 2000 km, thereby displacing the aeroplane to routes of longer distance.

As such, in the future the magnetic levitation system will form the third variant to be considered in new high speed railway lines.

The future creation of the "International Union of Magnetic Levitation" will provide institutional backing for the world-wide introduction of this new railway transport system.■

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- Andersen S.- "Betrieblicher Systemvergleich zwischen Rad/Schiene-Schnellbahn und TRANSRAPID Berlin-Hamburg", *Schweizer Eisenbahn Revue*, (10), 424-32 (1996).
- Arnold G.- "New Hannover-Berlin HS Line Has Rigid Track Bed", *International Railway Journal*, 38(9), 15-9 (1998).
- Baur L, Friedrich HP.- "Die TRANSRAPID Versuchsanlage Emsland (TVE) - Brücke zwischen Systementwicklung und Systemanwendung", *ETR*, 46(12), 810-5 (1997).
- Becker S, Lier KH.- "Bewertung und Variantenvergleich von Bauarten der Festen Fahrbahn", *Der Eisenbahningenieur*, 50(2), 52-7 (1999).
- Estradé JM.- "La superestructura de vía en placa en las nuevas líneas de alta velocidad de nuestro país", *Revista de Obras Públicas*, 3372(1), 63-73 (1998).
- Estradé JM.- "La superestructura de vía en placa en las nuevas líneas de alta velocidad a proyectar en el futuro", *III Congreso de Ingeniería del Transporte: El Transporte en el siglo XXI*, Barcelona, (2), 938-45 (1998).
- Fechner H.- "TRANSRAPID in der Relation Hamburg-Berlin", *Der Eisenbahningenieur*, 49(4), 10-5 (1998).
- Goto H.- "Etat du développement des trains à lévitation magnétique à supraconduction", *Rail International*, (11), 22-7 (1998).

- Hellinger R, Marschollek M.- "Projektierungssoftware für den M-Bahn-Antrieb", *ZEV + DET Glasers Annalen*, 118(6), 309-14 (1994).
- Komori H.- "Construction of the Yamanashi MAGLEV Test Line and its New Technologies", *Japanese Railway Engineering*, 139(9), 14-7 (1997).
- Kopecky M.- "La sustentation magnétique", *Transports*, 394, 114-29 (1999).
- López Pita A., Estradé J.M.- "Il progetto di nuove infrastrutture ferroviarie per l'Alta Velocità: il tracciato e la sovrastruttura della linea", *Ingegneria Ferroviaria*, (8), 1-12 (1997).
- López Pita A.- "L'avenir des trains à grande vitesse: le marché a la réponse", *Rail International*, (9-10), 145-8 (1998).
- Mignauw T.- "La grande vitesse en Europe et au Japon", *Rail International*, (9-10), 61-4 (1998).
- Mnich P.- "Die Bahnen und die Magnetfahrtechnik in Japan und Deutschland", *ETR*, 46(12), 816-24 (1997).
- Najafi FT, Nassar FE.- "Comparison of High-Speed Rail and MAGLEV Systems", *Journal of Transportation Engineering*, (7-8), 276-80 (1996).
- Sakamoto K, Furukawa A.- "Construction Technology of Beam Type MAGLEV Guideway", *Quarterly Reports of the RTRI*, 37(2), 84-9 (1996).
- Sato Y.- "La voie au Japon", *Le Rail*, (5-6), 31-4 (1996).