

Ferrocarriles del futuro: evolución y perspectivas de la alta velocidad, del Maglev y del Hyperloop (parte 1)

Railways of the future: evolution and prospects of high-speed, maglev and hyperloop (1st part)



Esther González-González, Soledad Nogués
Universidad de Cantabria (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8269>

INTRODUCCIÓN

La Alta Velocidad Terrestre (AVT) constituye el nuevo gran modo de transporte de nuestro tiempo. Su aparición es resultado de un largo proceso que surge desde los primeros inicios del ferrocarril a comienzos del siglo XIX, como respuesta al deseo de transportar a velocidades cada vez más elevadas, y por consiguiente en el menor tiempo posible, al mayor número de pasajeros, con mayores frecuencias y de manera segura. Bajo estos objetivos, absolutamente presentes en la actualidad, se han desarrollado nuevas tecnologías con gran expectación y demanda a nivel mundial, como son los ya conocidos High-

Speed Rails (HSR o AVEs en su versión española), y otros sistemas más atractivos que parecen estar llamados a jugar un papel relevante en el futuro, como los más escasos *MAGLEV* y los flamantes *Hyperloop*. Aunque pronosticar su porvenir resulta muy complejo, a través del análisis de su evolución histórica, de su nivel de desarrollo actual y de las previsiones de la comunidad científica, se trata de constatar sus principales logros y obstáculos e identificar las posibilidades reales de estos sistemas y los retos a los que se enfrentan.

1. EVOLUCIÓN DE LOS FERROCARRILES DEL SIGLO XXI

1.1. LA ALTA VELOCIDAD FERROVIARIA (AVF-HSR)

El primer ferrocarril de Alta Velocidad, el *Tokaido Shinkansen*, surgió en Japón en 1964 con el objetivo de aumentar la capa-

cidad de transporte de viajeros entre Tokio y Osaka. Este ferrocarril, concebido con un ancho mayor al existente en el resto de la isla (1.435 mm en lugar de los 1.067 mm), introdujo uno de los aspectos que ha marcado la revolución en el desarrollo de la AVF, el cambio de tensión de electrificación respecto a la red convencional, 25kV de corriente alterna en lugar de los 1.500V de corriente continua [1]. Debido a la nueva velocidad de circulación, 210 km/h, se incorporaron otros aspectos fundamentales en su diseño, un nuevo sistema automático de protección y la introducción de la señalización en la cabina del maquinista. Respecto al vehículo rodante, se eligió un sistema flexible de estructura modular de vagones auto-propulsables, que permite añadir y quitar vagones en función de la demanda sin afectar a la aceleración del tren [2].

A principios de los cincuenta, Europa se encontraba reconstruyendo sus in-



Fig. 1: TGV.

Fuente: "TGV" por Eric Salard, 2015, Flickr, Acceso: 7 Febrero 2017, licencia CC BY 2.0

fraestructuras destrozadas por la guerra, en un momento en el que el tren estaba perdiendo cuota de mercado frente al avión y al coche. Para Francia, que soñaba con ser pionera en la creación de un sistema que revolucionara su economía, la aparición del *Shinkansen* supuso un verdadero reto por su capacidad de ofrecer un servicio de AVF de manera constante, nuevo hasta el momento. La respuesta de la *Société Nationale des Chemins de Fer* (SNCF) fue la fundación de un departamento de investigación que desarrolló una locomotora de turbina de gas, *Turbotrain à grande vitesse*, en 1969. Su éxito en varias pruebas, donde alcanzó los 300 km/h, respaldó la idea de construir una línea real entre Lyon y París; sin embargo, la crisis energética provocó su sustitución por trenes eléctricos, *Train à Grande Vitesse* (TGV) [3]. En 1981 se inauguró el primer TGV y con él, el primer tren de AVF de Europa, de uso exclusivo de viajeros. A diferencia del nipón, las líneas de ancho internacional son compatibles con el resto de la red, aminorando los costes de construcción al utilizar las existentes en el interior de las ciudades, y ofreciendo velocidades mayores de servicio en toda la red al adaptar éstas y conectarlas con las nuevas. Además, el tren consta de una estructura fija que facilita la aerodinámica, produce menores ruidos y vibraciones, y reduce los costes de mantenimiento, renunciando a su adaptabilidad [2].

Alemania fue el siguiente país en introducir la AVF, implantando en 1991 su *Inter-City Express* (ICE) entre Hannover y Würzburg. Su principal preocupación, dada su localización geográfica en el centro de Europa, era disponer de un modo de transporte que permitiera mover pasajeros y mercancías dentro de su propio territorio, así como a los países colindantes para asegurar su rentabilidad económica, aunque pronto se mostraron los inconvenientes del sistema mixto [4,5].

España inauguró en 1992 la Alta Velocidad Española (AVE) con la unión de



Fig. 2: Shanghai Transrapid MAGLEV.

Fuente: "Maglev" por Max Talbot Minkin, 2012, Flickr, Acceso: 7 Febrero 2017, licencia CC BY 2.0

Madrid y Sevilla, adoptando una mezcla de la tecnología francesa y alemana en un sistema de explotación similar al japonés. Se crea una nueva línea de ancho estándar compatible con el resto de países pero, al igual que en Japón, incompatible con la red nacional – compuesta por una red principal de ancho "ibérico" (1.668 mm) y una red estrecha (1.000 mm) –, que soporta un tren de tecnología TGV [5], capaz de circular también sobre la red convencional existente, y se elige una electrificación y señalización alemana.

Ante la diversidad de sistemas, la Unión Europea ha definido la AVF o HSR como el conjunto formado por una infraestructura especialmente diseñada para soportar material rodante de tecnología capaz de alcanzar velocidades iguales o superiores a los 250 km/h y líneas adaptadas para velocidades del entorno de los 200 km/h [6]. Cabe aclarar que en el ámbito español se realiza una distinción errónea entre ambos tipos de líneas, denominando a las últimas "Velocidad Alta" o "Altas Prestaciones". Adicionalmente, la *Union Internationale des Chemins de fer* (UIC) destaca

aspectos relativos a la percepción de los usuarios en términos de tiempo de viaje, frecuencia, confort, seguridad, etc. para completar esta definición de AVF [7].

1.2. LEVITACIÓN MAGNÉTICA (MAGLEV)

A comienzos de los setenta Alemania desarrolló el *Transrapid*, primer sistema ferroviario de levitación magnética (MAGLEV) del mundo. Este sistema, cuya idea había sido patentada por **Hermann Kemper** en 1934 [4,8], suponía la introducción de un transporte ambientalmente más sostenible y del que poder obtener beneficios económicos. Su tecnología se basa en la levitación de trenes sobre vías ferro-magnéticas mediante fuerzas electro-magnéticas atractivas (EMS), en un sistema de levitación y guía separado, ofreciendo una velocidad muy superior a los anteriores sistemas de AVF, de 400 a 500 km/h. El arranque y el freno del tren se realizan mediante unos motores síncronos localizados en el vehículo. Las fuerzas de atracción magnética se establecen entre unos electroimanes ubicados en el suelo del vehículo y los railes ferromagnéticos situados debajo del carril-guía, proporcionando una levitación muy escasa, de 10-15 mm, y un tanto inestable por lo que debe ser controlada [2,8,9]. Actualmente solo se encuentra en servicio una línea en China, la *Shanghai's Pudong Airport Transrapid*, inaugurada en 2003 (Fig.2).

Japón también siguió esta línea de estudio, aunque de manera algo diferente. En 1972, desarrolló el *High-Speed Surface Transport* (HSST), basado igualmente en la tecnología EMS. En este caso, se trata de un sistema de levitación y guía de tipo



Fig. 3: Diseño del Hyperloop.

Fuente: "HyperLoop 1" e "HyperLoop 2" por Hyperloop Transportation Technologies, 2015, Flickr, Acceso: 7 Febrero 2017, licencia CC BY 2.0

integrado cuya propulsión se realiza por motores de inducción lineal situados en el vehículo. Puesto que las fuerzas de levitación y guía pueden interferirse a altas velocidades, éstas son limitadas, entre los 200 y 400 km/h [2,8], lo que confina su uso al entorno urbano. La primera línea de HSST comercial del mundo es la japonesa *Linimo*, cerca de Nagoya, inaugurada en 2005 y la segunda, la llamada *Incheon Airport Maglev*, se ha abierto en Corea del Sur en 2016 [8,10].

La necesidad de encontrar un MAGLEV más sencillo y económico que los anteriores llevó a EE.UU. a diseñar el *Inductrack*, un sistema de levitación electro-dinámico de fuerzas repulsivas (EDS) [11], que no ha llegado a materializarse. Este diseño cuenta con una combinación de imanes permanentes en el tren, el cual puede reducir la velocidad a valores pequeños y pasar a circular sobre ruedas auxiliares antes de pararse ante un fallo del sistema.

Asimismo, Japón ha proyectado un nuevo EDS de superconducción dinámica, el *SCMAGLEV*. En este caso, el tren dispone de unos imanes superconductores localizados en sus *bogies*, que le permite elevarse unos 10 cm sobre las guías, contando con un motor síncrono libre de hierro para su propulsión [12]. El *Chuo Shinkansen*, primer SCMAGLEV comercial del mundo entre Tokyo y Nagoya, en construcción desde 2014, espera su apertura en 2027 y su ampliación hasta Osaka, en 2045. Mientras tanto, las pruebas de este sistema han logrado dos récords de velocidad, de 581 km/h en 2003 y de 603 km/h en 2015 [5,8,13].

La introducción de los MAGLEV ha generado una nueva denominación, *High-Speed Ground Transportation* (HSGT), o Alta Velocidad Terrestre (AVT), que incluye tanto los anteriores sistemas como estos nuevos, que prescinden de la configuración tradicional de tren rodante sobre vía férrea. Sin embargo, su menor desarrollo ha llevado al uso generalizado del término HSR para ambos sistemas.

1.3. EL QUINTO MODO DE TRANSPORTE (HYPERLOOP)

Elon Musk, el ingeniero director ejecutivo de *SpaceX* y *Tesla*, presentó en 2013 el diseño de *Hyperloop*, un nuevo modo de transporte "el quinto tras el avión, ferrocarril, coche y barco", pensado para transportar tanto personas como mercancías entre grandes ciudades separadas entre sí un máximo de 1.500 km [14]. Su tecnología se basa en el desplazamiento de cápsulas presurizadas, conducidas por motores de inducción lineales cuya fuente de

energía es solar, y compresores de aire en su cabeza, a través de tubos de aire a baja presión [14,15,16]. El diseño propuesto como alternativa a la AVF prevista entre Los Ángeles y San Francisco, distantes 560 km, plantea su conexión en un tiempo estimado de 35 minutos, lo que supone una velocidad media de 970 km/h y máxima de 1200 km/h, en contraposición a las 2 horas y 38 minutos de la AVF, o la hora y 15 minutos del avión [15,16].

Esta idea *a priori* revolucionaria supone una mejora conceptual de otros sistemas previos que se remontan hasta mediados del s. XIX, algunos de los cuales fueron objeto de pruebas reales, entre los que destacan el "*Atmospheric Railway*" de **Brunel** en 1847, el "*Pneumatic Transit*" de **Beach** en 1867 (precursor del metro de Nueva York), y especialmente el presentado en el libro "*Motion without friction*" de **Weinberg** en 1914, el "*Vacuum Tube Transportation System*" de **Goddard** en 1945 y el francés "*Aerotraine*" de **Bertin** en 1960 [3,17,18]. La mayoría de ellos definen también la propulsión de cápsulas levitadas en un tubo, aunque usando tecnología magnética y un tubo al vacío que parece imposible de mantener para largas distancias. En el novedoso Hyperloop, el tubo de acero o de fibra de carbono se construiría sobre enormes pilares de hormigón, y se despresurizaría a una presión de aire muy baja para permitir una menor resistencia al aire de la cápsula [14].

PARA SABER MÁS

- [1] Smith R.A. "The Japanese Shinkansen: Catalyst for the renaissance of rail". *The Journal of Transport History*, September 2003, Vol. 24-2, p. 222-237. DOI: <http://dx.doi.org/10.7227/TJTH.24.2.6>.
- [2] Najafi F.T., Nassar F.E. "Comparison of High-speed rail and MAGLEV systems". *Journal of Transportation Engineering*, July 1996, Vol. 122: 4, p. 276-281. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1996\)122:4\(276\)#sthash.3dEPrv5n.dpuf](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1996)122:4(276)#sthash.3dEPrv5n.dpuf)
- [3] Meunier J. *On the fast track: French railway modernization and the origins of the TGV 1944-1983*. Westport (USA): Ed. Praeger Publishers, 2002, 255p. ISBN 0-275-97377-8
- [4] Ebeling K. "High-speed railways in Germany". *Japan Railway & Transport Review*, March 2005, Vol. 40, p. 36-45. ISSN 1342-7512.
- [5] Givoni M. "Development and impact of the modern High-Speed Train: A review". *Transport Reviews*, 2006, Vol. 26: 5, p.593-611. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01441640600589319>
- [6] European Council. *Council Directive 96/48/EC*, 23 July 1996, on the interoperability of the trans-European high-speed rail system. *Official Journal of the European Communities*, 17th September 1996, n. 235, p. 6-24. ISSN 0378-6978.
- [7] UIC. *High Speed rail: Fast track to the sustainable mobility*. Paris: Union

Internationale des Chemins de fer, 2010. ISBN 978-2-7461-1887-4.

- [8] Lee H-W., Kim K.C., Lee J. "Review of MAGLEV train technologies". *IEE Transactions on Magnetics*, June 2006, Vol. 42: 7, p.1917-1925. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2006.875842>
- [9] Vuchic V.R., Casello J.M. "An evaluation of Maglev technology and its comparison with high speed rail". *Transportation Quarterly*, March 2002, Vol. 56: 2, p. 33-49. ISSN 0278-9434.
- [10] Medimorec N. "Incheon Airport maglev line opens" [en línea]. *International Railway Journal*. 3 Febrero 2016. Disponible en: <http://www.railjournal.com/index.php/asia/incheon-airport-maglev-line-opens.html> [consulta: 7 Febrero 2017]
- [11] Post R.F., Ryutov D.D. "The Inductrack: A Simpler Approach to Magnetic Levitation". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, March 2000, Vol.10: 1, p. 901-904. DOI: <https://doi.org/10.1109/77.828377>
- [12] Cassat A., Jufer M. "MAGLEV projects technology aspects and choices". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, March 2002, Vol. 12: 1, p. 915-925. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2002.1018549>
- [13] JRCentral. *Central Japan Railway Company -Annual Report 2016* [en línea]. 45p. Disponible en: <http://english.jr-central.co.jp/company/ir/annualreport/> [consulta: 7 Febrero 2017]
- [14] Musk, E. *Hyperloop Alpha*. Informe inédito. Disponible en: http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf [consulta: 10 Noviembre 2016]
- [15] Chin J.C., Gray J.S., Jones S.M., Berton J.J. "Open-Source Conceptual Sizing Models for the Hyperloop Passenger Pod". En: *Actas del 56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Florida: 5-9 Enero 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2015-1587>
- [16] Ross P.E. "Hyperloop: No Pressure: The vacuum train project will get its first test track this year". *IEEE Spectrum*, January 2016, Vol. 53: 1, p. 51-54. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MSPEC.2016.7367468>.
- [17] Janić M. *Advanced Transport Systems: Analysis, modelling and evaluation of performances*. London: Springer-Verlag, 2014, 408p. ISBN 978-1-4471-6287-2
- [18] Miller C. *The Historical Hyperloop: an examination of the technological ancestry of alternative High Speed Rail* [en línea]. Abril 2015. Disponible en: <https://coolhyperloop.wordpress.com/> [consulta: 10 Noviembre 2016]

AGRADECIMIENTOS

Parte de este trabajo se basa en la Tesis Doctoral "Los impactos territoriales en la elección del modelo ferroviario: El caso de las conexiones de Cantabria" realizada por Esther González-González y dirigida por Soledad Nogués y Luigi dell'Olio, cuya elaboración fue financiada por la beca pre-doctoral FPI del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España (referencia BES-2008-00436).