

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Levitación magnética aplicada al transporte

Magnetic levitation applied to transport

Marcelo Barone

Doctor en Ingeniería (UTN-UBA-CONICET), profesor investigador de la UTN (FRH). Coordinador del grupo de investigación en Tecnologías de Levitación Magnética.

marcelo.barone@conicet.gov.ar

Palabras clave: TRANSPORTE-SEGURIDAD OPERACIONAL-FERROCARRIL-SUSTENTABILIDAD-LEVITACIÓN MAGNÉTICA.

Keywords: TRANSPORT- SAFETY-RAILWAIL-SUSTAINABILITY-MAGNETIC LEVITATION.

Recibido: 12/12/22
Aceptado: 03/01/24

Resumen

El artículo ahonda en las características de los trenes de levitación magnética, que permiten mejorar los rendimientos generales al evitar la transmisión mecánica del movimiento en el par rueda-riel y, a su vez, aportan sustentabilidad al sistema. Según estudios recientes, los ferrocarriles en todo el mundo satisfacen el 60 % de su demanda total de energía con productos derivados del petróleo (IEA, UIC, 2017). Aquí se encuentra la principal motivación para fomentar el desarrollo de la levitación magnética y aplicarla al transporte ferroviario. Al tratarse de un sistema electrificado, lo hace congruente con el uso de recursos energéticos renovables, aportando sustentabilidad al sistema (UIC, 2018b).

Abstract

Magnetically levitated trains improve overall performance by avoiding the mechanical transmission of motion in the wheel-rail pair and, simultaneously, bring sustainability to the system. According to recent studies, railways worldwide meet 60 % of their total energy demand with petroleum products (IEA, UIC, 2017). This is the main motivation for promoting the development of magnetic levitation and applying it to rail transport. As it is an electrified system, it makes it congruent with the use of renewable energy resources, bringing sustainability to the system (UIC, 2018b).



Introducción

El incremento de la población mundial y la organización demográfica establecida ha dado lugar a una crisis de los sistemas de transporte, lo cual ha generado el deterioro del medio ambiente (UIC, 2018a). Según estudios recientes, los ferrocarriles en todo el mundo satisfacen el 60 % de su demanda total de energía con productos derivados del petróleo (IEA, UIC, 2017). Aquí se encuentra la principal motivación para fomentar el desarrollo de la levitación magnética y aplicarla al transporte ferroviario. Al tratarse de un sistema electrificado, lo hace congruente con el uso de recursos energéticos renovables, aportando sustentabilidad al sistema (UIC, 2018b).

La levitación magnética permite vincular dos cuerpos sin acople mecánico entre ellos. Es decir, los campos magnéticos son transformados en fuerzas para hacer levitar y orientar un objeto. Estos sistemas tienen aplicaciones diversas: AMB (*active magnetic bearing*), volantes de inercia, trenes de levitación magnética, entre otras.

Si se analiza en términos comparativos, mientras que las redes ferroviarias de alta velocidad –que están ampliamente difundidas en todo el mundo– han alcanzado a operar a velocidades del orden de 300 a 350 km h⁻¹ (Leboeuf, 2018; Lawrence *et al.*, 2019), los trenes de levitación magnética (MagLev), por su parte, han logrado performances de hasta 600 km h⁻¹ (CRRC, s.f.). Incluso, el 21 de abril de 2015, el tren SCMAGLEV de la Central Japan Railway Company, obtuvo el récord Guinness de 602 km h⁻¹ (JRC, s.f.).

Este trabajo tiene por objetivo principal hacer una revisión del estado del arte sobre la temática de los trenes MagLev. El documento proporciona una variedad de conceptos de los sistemas de levitación magnética e información sobre el nivel alcanzado en diferentes países. Con esto, se pretende introducir la temática en el ámbito científico-académico argentino y generar un acervo de conocimientos para poder definir a futuro los ejes de desarrollo de este tipo de sistema a nivel nacional.

Antecedentes

Los trenes MagLev comenzaron a probarse en julio de 1977 en la ciudad de Miyazaki, Japón. El ML-500 llegó a 517 km h⁻¹ en una guía con sección transversal T invertida en 1979. Luego, la guía se cambió a una tipo U, MLU001, y se logró una velocidad de 405 km h⁻¹ en 1987. Ese mismo año también se hicieron pruebas con un prototipo MLU002 (Takeda, 1989).

En 1979 comenzó a funcionar el primer tren magnético aprobado para el transporte de pasajeros, el Transrapid

05, en la exhibición internacional de transporte en Hamburgo (IVA 79). Este vehículo transportó más de 50.000 personas. Luego, en Birmingham, Inglaterra, entre 1984 y 1995, se puso en servicio un tren de levitación magnética, uniendo el aeropuerto con la estación ferroviaria de la ciudad (Money, 1984).

Principio de funcionamiento

Un vehículo MagLev levita sin contacto con cualquier estructura de tierra y solo genera ruido aerodinámico. La intensidad del campo magnético es de aproximadamente 2 mT en el piso en la cabina de pasajeros del MLU002 y alrededor de 0,6 mT a 600 mm del piso. El método utilizado para lograr la levitación puede ser un sistema basado en repulsión magnética o uno de atracción magnética (Thornton, 2009; Saied y Al-Shaher, 2009).

“Según estudios recientes, los ferrocarriles en todo el mundo satisfacen el 60 % de su demanda total de energía con productos derivados del petróleo. Aquí se encuentra la principal motivación para fomentar el desarrollo de la levitación magnética y aplicarla al transporte ferroviario.”



Existen diferentes tipos de sistemas MagLev: el *electromagnetic suspension* (EMS) o suspensión electromagnética, el *hybrid electromagnetic suspension* (HEMS) o sistema híbrido suspensión electromagnética, el *electrodynamic suspension* (EDS) o suspensión electrodinámica, y el de imán permanente (PM-EDS).

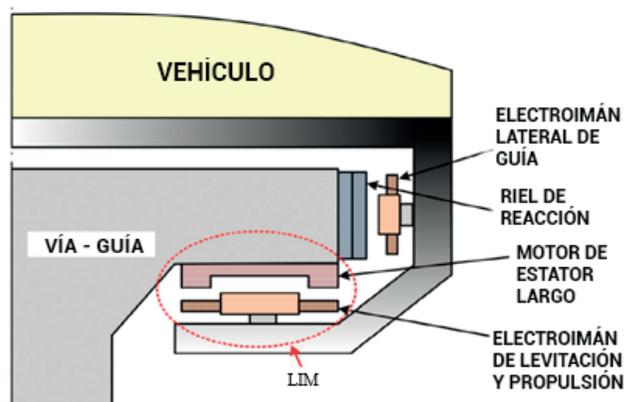
Suspensión electromagnética (EMS)

Este sistema utiliza la fuerza de atracción entre electroimanes instalados en el vehículo, ubicados en su parte inferior, debajo de la vía ferromagnética y de los rieles ferromagnéticos utilizados como guía. No posee magnetismo permanente (He, Rote y Coffey, 1992). Este diseño puede levitar incluso con velocidad cero (Holmer, 2003; Kaye y Masada, 2004). El vehículo posee núcleos ferromagnéticos con una bobina inductora y el núcleo magnetizado genera un campo de atracción con una guía ferromagnética (Eastham y Hayes, 1988).

El EMS utiliza electroimanes estándar, lo cual lo diferencia del sistema EDS, que utiliza materiales superconductores (Meins y Miller, 1988). Esto implica que los campos magnéticos resultantes sean de menor intensidad en el interior del habitáculo, haciendo el viaje más adecuado para los pasajeros.

El sistema descrito se usa en los modelos alemanes Transrapid y M-Bahn, el japonés de alta velocidad HSST, el sur coreano UTM y el británico Birmingham. El EMS fue desarrollado por el consorcio Magnetbahn Transrapid y por las líneas aéreas de Japón para ser implementado en el aeropuerto de Birmingham. Posee dos grupos de electroimanes ubicados en el vehículo. Las fuerzas de atracción del primer grupo permiten la levitación y las del segundo permiten el centrado en la vía (ver Figura 1).

Figura 1. Sistema EMS con guía lateral



Fuente: *Electrical Components of Maglev Systems: Emerging Trends*, 2019.

La vía es fija y los electroimanes se mueven en dirección a esta, elevando y centrando el tren completo. Posee sensores de posición que cierran un lazo de control que actúa regulando la corriente de las bobinas. El tren puede circular a una distancia (GAP) de aproximadamente 10 mm (He, Rote y Coffey, 1992). El GAP entre vehículo y vía depende de la potencia eléctrica utilizada en los electroimanes y no es conveniente que sea muy grande. El campo magnético se concentra en la zona del GAP entre el vehículo y la vía, por lo cual no necesita blindaje para los pasajeros.

Los trenes con sistema EMS tienen limitaciones, y la principal es la inestabilidad. Cuando el GAP disminuye, la fuerza de atracción crece, y aunque la corriente eléctrica en los electroimanes se puede regular, existe el peligro de que el tren toque la guía (Ahmadi et al., 2018). Esto hace que la precisión en la construcción de la vía sea milimétrica y los sistemas de control adquieran complejidad. Por lo dicho, este sistema es recomendable para aplicaciones de velocidad baja a media (Holmer, 2003). El tren EMS, cuando desciende de velocidad y se aproxima a 10 km h⁻¹, queda apoyado sobre patines de frenado. Sin embargo, puede mantenerse levitando estando detenido.

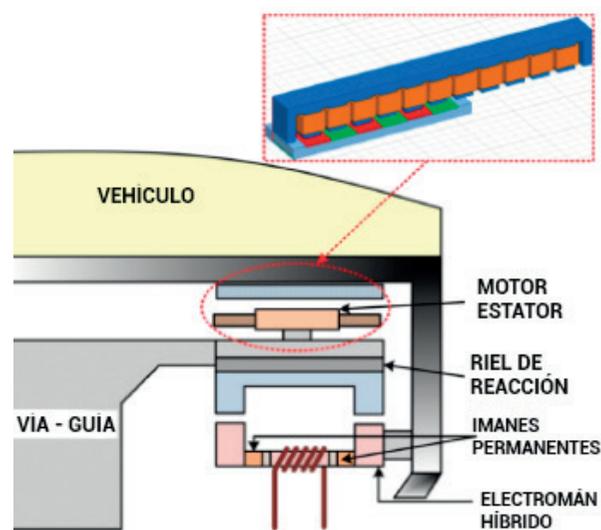
Sistema híbrido (HEMS)

El HEMS es una forma modificada del EMS convencional, como se muestra en la Figura 2. Utiliza imanes permanentes junto con electroimanes para reducir el consumo de energía eléctrica y permite lograr mayo-

res GAP's de aire (Chin y Soulard, 2003; Zhang et al., 2013). En el inicio del movimiento utiliza electroimanes e imanes permanentes (PM) en conjunto para lograr la levitación. Después de lograr un GAP estable, los PM hacen levitar el vehículo, anulándose los electroimanes. Los PM generan un flujo magnético constante; por lo tanto, el ajuste de la excitación del electroimán proporciona el control necesario del entrehierro (Chin y Soulard, 2003). Debido a esta situación, se hace necesario el uso de una fuente de entrada variable para excitar los electroimanes (Zhang et al., 2013).

Este sistema se utiliza actualmente por un MagLev experimental, el CMS04, diseñado por la Universidad Nacional de Tecnología de Defensa, en la ciudad de Tangshan, China. El sistema requiere una velocidad baja a media para lograr levitación estable. Además, la utilización de imanes híbridos requiere un sistema de control sofisticado. Sin embargo, esta tecnología está bajo investigación por su robustez y alta estabilidad. Su aplicación muestra muchas perspectivas de futuro en el campo de la tecnología sin contacto, para sistemas de transporte de alta velocidad (Zhang et al., 2013).

Figura 2. Sistema HEMS



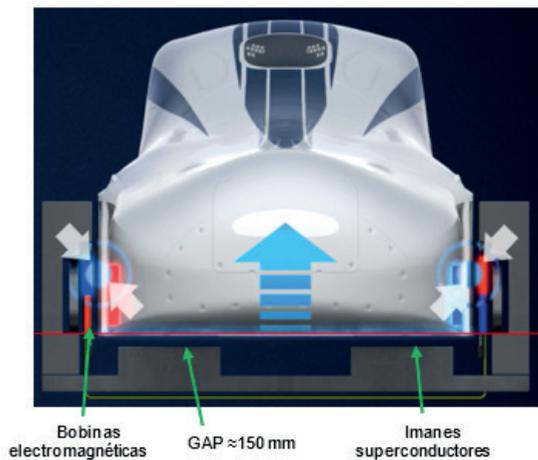
Fuente: *Electrical Components of Maglev Systems: Emerging Trends*, 2019.

Sistema electrodinámico (EDS)

Este sistema MagLev utiliza el efecto magnético de imanes superconductores para la levitación y guía. Se basa en la repulsión entre la fuerza magnética inducida por corriente, en bobinas de conductores no ferromagnéticos y en la fuerza magnética de imanes superconductores ubicados en el vehículo (efecto Meissner). Consiste en la desaparición del flujo del campo magnético en el interior de un material superconductor por debajo de su temperatura crítica, es decir, el imán superconductor rechaza las líneas de campo magnético de manera que no pasen por su interior.

El término superconductividad se refiere a la propiedad de algunos materiales que cuando se enfrían cerca de cero absoluto, su resistencia eléctrica tiende a cero. En el sistema EDS, desarrollado por la Japanese National Railways, los vehículos poseen los imanes superconductores en un ambiente criogénico con temperaturas del orden de 4 K. Los mismos se ubican en los laterales, en la parte inferior del vehículo, y las bobinas se ubican en la vía. Los campos magnéticos producidos por estas interactúan con los imanes superconductores del tren y producen la fuerza de levitación y guía (ver Figura 3).

Figura 3. Sistema EDS



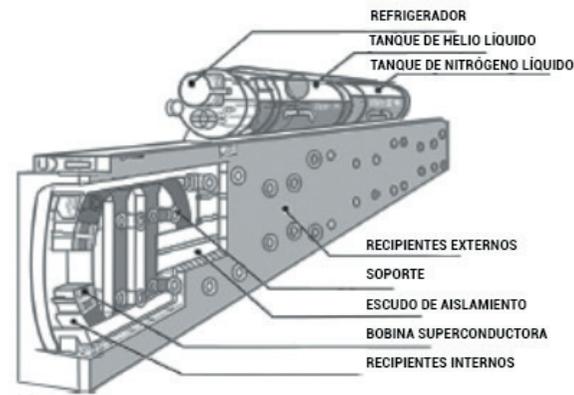
Fuente: Japanese Superconducting Maglev: Present State and Future Perspective, 1989.

El EDS se caracteriza por un GAP de 100 a 150 mm a alta velocidad; por ende, las guías son menos precisas y resulta más estable. La fuerza para la levitación depende de la velocidad. Tiene que alcanzar el orden de 100 km h⁻¹ para generar la separación (Prasad et al., 2019). A menor velocidad, se utiliza un sistema retráctil de ruedas.

Una desventaja es la utilización de grandes campos magnéticos cerca de la cabina de pasajeros. Esto hace necesaria la instalación de sistemas de aislamiento para protección de la salud. Otra desventaja que debe mencionarse es el uso de equipos de refrigeración para mantener a los superconductores a baja temperatura.

El sistema de imán superconductor utilizado en el MLU002 (ver Figura 4) consiste en recipientes exteriores de aleación de aluminio e internos de acero inoxidable, lo cual permite intercambiar calor con tuberías con nitrógeno. Las bobinas superconductoras instaladas están hechas con aleaciones Nb-Ti [8] y agregado de Cu (1 % at), lo que contribuye a la disminución del peso de las bobinas. El nitrógeno intercambia calor con helio, y el helio líquido evaporado se vuelve a licuar para su reutilización en un refrigerador. Existen dos conjuntos de bobinas: las de propulsión y las de levitación y guía.

Figura 4. Imán Superconductor del MLU002



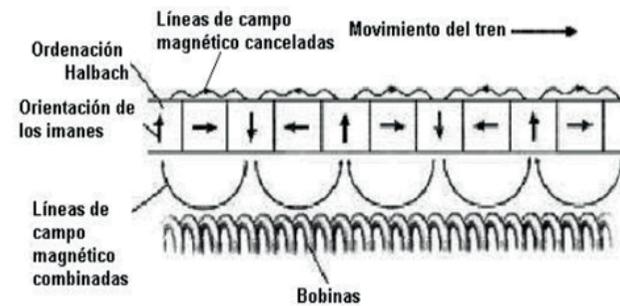
Fuente: SCMAGLEV. <https://scmaglev.jp-central-global.com/about/>

Electrodinámica de imán permanente (PM-EDS)

En 2000, Richard Post y Dmitri Ryutov publicaron una novedad para la tecnología MagLev: el Inductrack. Se trata de un EDS que, en vez de materiales superconductores, utiliza imanes permanentes a temperatura ambiente, dispuestos en forma de matriz Halbach (ver Figura 5). Esta distribución especial de imanes permanentes permitió generar fuerzas de levitación suficientes para el tren MagLev.

El ordenamiento Halbach consta de imanes colocados de manera que el campo magnético de cada imán esté orientado con el imán adyacente. Esta disposición produce un campo magnético sinusoidal en el lado inferior de la matriz, mientras lo cancela completamente en el lado superior. A diferencia de un sistema EDS, este sistema no utiliza imanes superconductores, evitando la utilización del enfriamiento criogénico (Uzuka, 2013; Schultz et al., 2005).

Figura 5. Ordenamiento Halbach



Fuente: Estudio de las aplicaciones prácticas de la levitación magnética, 2003

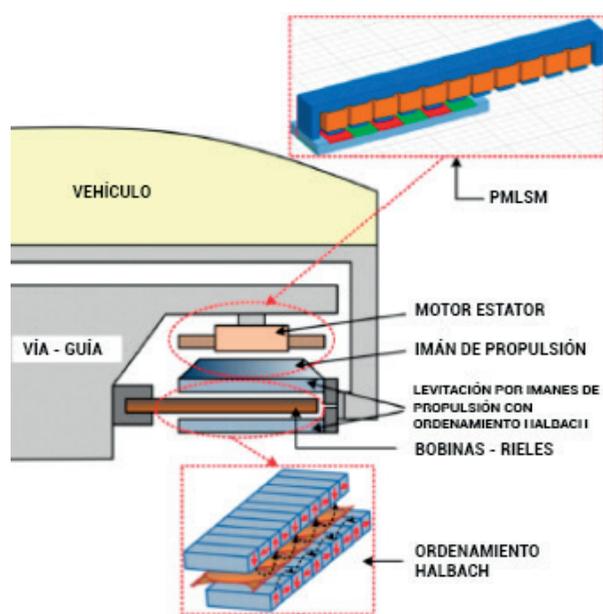
Sin embargo, requiere ruedas auxiliares para acelerar el vehículo hasta que adquiera la fuerza de levitación (Long, He y Xue, 2011). Sí se puede decir que es de menor costo.

Esta tecnología ha sido probada en el General Atomics de EE. UU., con los imanes de suspensión separados de los de propulsión (Saied y Al-Shaher, 2009). La vía Inductrack

posee bobinas que actúan como rieles. Cada uno de estos rieles está rodeado por dos ordenamientos Halbach de imanes ubicados en la zona baja del vehículo, uno posicionado sobre el riel y el otro debajo del mismo (ver Figura 6). En este caso, las bobinas de los rieles se encuentran en cortocircuito y la inducción la aportan los imanes al moverse sobre la vía (inducen una corriente en las bobinas, luego el campo magnético de estas repele los imanes). Como el efecto es electrodinámico, es necesario usar ruedas para soportar el peso hasta que el tren logre levitar.

Las principales pérdidas serían las ocasionadas por la fricción con el aire y por la resistencia eléctrica en las bobinas en cortocircuito.

Figura 6. Vía Indutrack con ordenamiento Halbach



Fuente: *Electrical Components of Maglev Systems: Emerging Trends*, 2019.

Sistemas de guía

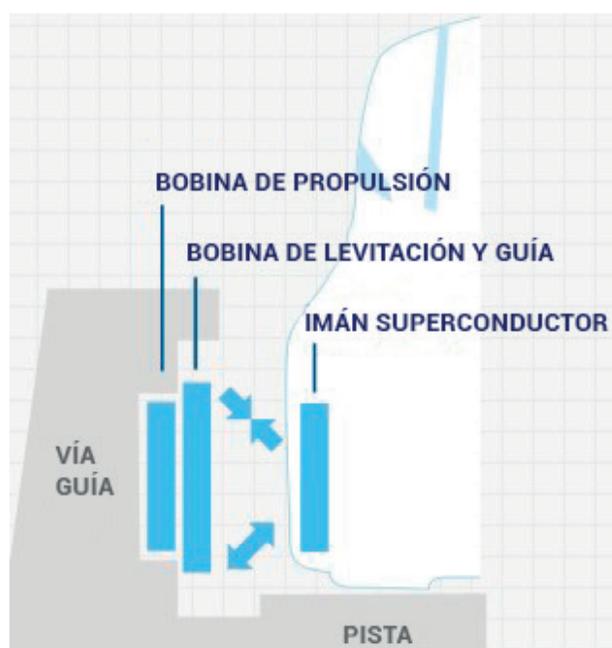
Los vehículos MagLev están guiados para evitar desplazamientos laterales (Boldea et al., 2018). Dicho mecanismo de orientación generalmente utiliza fuerza magnética-repulsiva o atractiva (Schultz et al., 2005).

Se utiliza el sistema *null-flux* que consta de una guía producida por un acoplamiento en cruz, utilizado como armadura del estator del motor lineal, montado en ambos laterales. Las bobinas a ambos lados de la guía están conectadas entre sí. Entonces, la fuerza electromotriz (fem) neta inducida en las bobinas es cero, si es el caso de desplazamiento lateral nulo (Cassat y Jufer, 2002).

Si el tren se desplaza hacia un lado, la magnitud neta de la fem inducida aumenta y genera una fuerza repulsiva en el lado más cercano a las bobinas de guiado, obligando al vehículo a centrarse (Takeda, 1990). La

tecnología japonesa MLU integra el sistema de guiado con la propulsión, mientras que la MLX integra el sistema de guía con el sistema de levitación. En esta última aplicación, apreciable en el SCMaglev, existen dos conjuntos de bobinas: las de propulsión y las de levitación y guía. Las bobinas de propulsión dan fuerza de avance al tren, mientras que las bobinas de levitación y guía sirven para hacer levitar el tren y guiarlo al centro de la vía-guía (ver Figura 7).

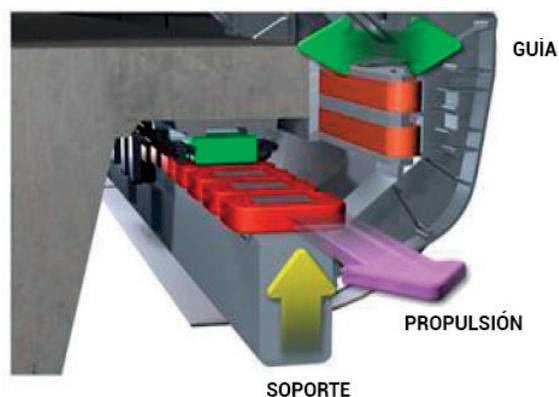
Figura 7. Propulsión, guía y levitación



Fuente: SCMaglev. <https://scmaglev.jp-central-global.com/about/>

El Transrapid alemán también utiliza fuerza repulsiva entre los electroimanes del vehículo y las bobinas laterales para cumplir con la función de guía. Los sistemas de levitación y propulsión permanecen separados para evitar interferencias magnéticas (ver Figura 8).

Figura 8. Propulsión, guía y levitación del Transrapid



Fuente: Transrapid. <http://www.siemens.com/transportation>

Sistema de suministro de potencia

En un MagLev la transferencia de energía eléctrica desde la tierra es crucial para producir la levitación, propulsión y otros servicios de a bordo (Uzuka, 2011). Para velocidades de hasta 300 km h⁻¹, se puede utilizar un pantógrafo para transferir la potencia requerida (Long, He y Xue, 2011), pero para velocidades mayores a 300 km h⁻¹ se utilizan motores y generadores lineales (Mundrey, 2010; Powell y Danby, 2007). En conjunto forman el sistema de suministro de energía sin contacto.

La provisión de energía de la red pública de 110 kV pasa por transformadores de potencia de 110/20 Kv (He, Rote y Coffey, 1992). Luego se procede a una etapa de transformación de 20kV/1,2 kV y rectificación a CC. Se utilizan inversores y dispositivos asociados para obtener 0 a ≈ 1.500 V y una frecuencia variable de 0 a 215 Hz. Este sistema trifásico está conectado directamente a los devanados de la armadura del estator largo. Los transformadores de salida sirven para aumentar la tensión a un máximo de 7.800 V. La corriente máxima del motor es 1.200 A.

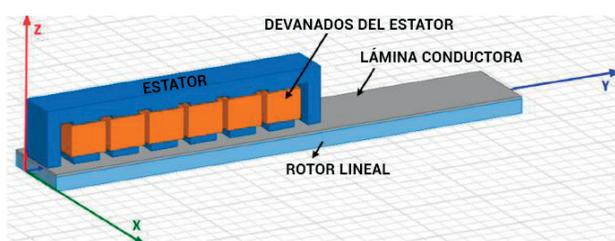
Propulsión

Para impulsar un tren MagLev se utiliza un motor lineal. El mismo puede ser DC o AC asíncrono (Hellinger, Mnich, 2009; Boldea *et al.*, 2018). El uso de motores lineales D aún está en la etapa de investigación y ensayos, ya que posee desventajas en los sistemas de esbillas utilizados para la alimentación (Rivera, 2007).

Un motor lineal AC funciona con el mismo principio de los motores de inducción convencionales, pero produce movimiento rectilíneo. A diferencia de los rotativos, pueden dar un efecto de levitación (Vijayvargiya, *et al.*, 2018). Existen dos tipos de motor: el *linear induction motor* (LIM) y el *linear synchronous motor* (LSM).

El LIM utiliza campos magnéticos de pulsos a alta frecuencia y se lo conoce como de estator corto. Se compone de un estator que contiene bobinados de excitación y un rotor lineal (LR) compuesto por una lámina metálica colocada sobre una capa ferromagnética (ver Figura 9).

Figura 9. Motor lineal de inducción (LIM)



Fuente: *Electrical Components of Maglev Systems: Emerging Trends*, 2019.

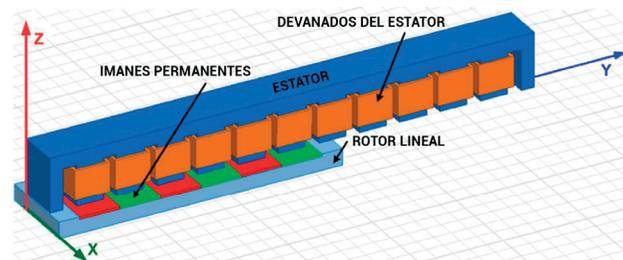
El LR se utiliza en el vehículo como parte móvil, mientras que el estator conforma la vía-guía fija (Kaye, Masada, 2004). Los sistemas de propulsión basados en LIM son ampliamente aceptados para aplicaciones en MagLev. Este motor ofrece buena confiabilidad, robustez y bajo mantenimiento. Además, poseen muy buena respuesta en el rango de velocidad y capacidad para operar en condiciones severas. Tiene un peso elevado, lo que reduce la capacidad de carga del vehículo (Vijayvargiya, *et al.*, 2018).

El LIM tiene menos respuesta y eficiencia en comparación con el LSM para velocidades superiores a 300 km h⁻¹. Esto se debe a mayores pérdidas por corrientes parásitas. Por ende, tiene menor densidad de fuerza de propulsión y menor factor de potencia (Cho *et al.*, 2008).

Al motor LSM se lo conoce como estator largo, y es el sistema de propulsión más usado para las aplicaciones en trenes. Se utiliza como estator un circuito de bobinas por el cual circula una corriente alterna trifásica controlada (ver Figura 10). Se asemeja al estator de un LIM.

El LR incorpora una fuente magnética, por lo tanto, el motor está doblemente excitado. En sistemas de propulsión de alto rendimiento, la excitación se proporciona con la incorporación de imanes permanentes (PM) (Cho *et al.*, 2008).

Figura 10. LSM con de imanes permanentes



Fuente: *Electrical Components of Maglev Systems: Emerging Trends*, 2019.

Algunos MagLev también utilizan electroimanes. En el caso de un sistema EMS, el motor LR está compuesto por los electroimanes en el tren y, en un sistema EDS, por imanes superconductores. El campo magnético que produce la corriente alterna en el estator crea una sucesión de polos norte y sur. A su vez, el LR también se energiza, generando flujo magnético. La interacción entre estos dos flujos magnéticos obliga al vehículo a moverse con una velocidad sincrónica (Vijayvargiya *et al.*, 2018; Cho *et al.*, 2008).

Debido a su mayor densidad de fuerza, mayor eficiencia y factor de potencia más alto, este motor ha sido el más utilizado para aplicaciones de levitación magnética (El-Refaie, 2013; Lee *et al.*, 2013), con las bobinas del estator utilizadas como vía-guía (Park *et al.*, 2013). Esta

configuración es adecuada para aplicaciones de alta velocidad, ya que no se requiere colector de corriente.

La energía que mueve al tren es suministrada por las vías, lo cual permite energizar la vía en secciones, de manera que cada sección tenga su alimentación. Así solamente estarán activos aquellos tramos de vía por los que esté transitando el tren (Kuntz, Burke y Slemmon, 1978).

La utilización de estos motores permite que los trenes MagLev puedan circular por pendientes de hasta 10°, en contraste con los ferrocarriles convencionales que solo pueden transitar pendientes de hasta 4°.

El motor lineal también es utilizado para el frenado del tren. Para ello, se debe invertir la polaridad de la corriente en el estator de manera que se genere una fuerza en sentido contrario al avance. La desaceleración es la misma que la aceleración: 1,8 m s⁻² (límite apto para pasajeros). En emergencia, puede alcanzar 3,5 m s⁻².

El vehículo MagLev fue frenado de 300 km h⁻¹, usando zapatas deslizantes hechas con una aleación de Molibdeno actuando en la vía-guía. El freno con paneles aerodinámicos instalados en la carrocería también demuestra alto rendimiento (Barone, González y Vilella, 2018; Prasad, Jain y Gupta, 2019).



CONCLUSIONES

La necesidad de incrementar la capacidad del transporte, la mejora en eficiencia energética y su impacto en el ambiente han permitido hacer avances en la tecnología MagLev. Esta se propone como una alternativa sostenible y más limpia. En el artículo se ha presentado una vista panorámica de la tecnología MagLev, con un enfoque especial en los componentes del sistema electromagnético. Las diferentes tecnologías de levitación, orientación y propulsión tienen sus capacida-

des y limitaciones. La tecnología del SCMAGLEV se postula como la más adecuada para funcionar por encima de 350 km h⁻¹, ya que el GAP es de aproximadamente 150 mm. No obstante, presenta una limitación fundamental porque utiliza imanes superconductores. Estos imanes requieren de los sistemas criogénicos. Además, generan elevados campos magnéticos que podrían producir incomodidad dentro del vehículo. Es por esto que los sistemas híbridos, con la incorporación de imanes permanentes, están siendo el foco de las presentes investigaciones.

El avance tecnológico de los sistemas MagLev hace posible la competencia con el transporte ferroviario. El desarrollo de un sistema de levitación magnética es una tarea desafiante, que debe abordarse para proyectar un futuro sostenible en nuestro país.

Referencias bibliográficas

- Ahmadi, S., Dastfan, A., Mohsen, Assili, M. (2018). Energy saving in metro systems: Simultaneous optimization of stationary energy storage systems and speed profiles. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 8 (1), pp. 78-90. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2018.03.003>
- Barone, M., González, S., Vilella, D. (2018). Introducción a los sistemas de Levitación Magnética para ferrocarriles. Primer Congreso sobre Medios de Transporte y sus Tecnologías Asociadas, (26-28 de septiembre). UTN-FRH, Haedo, Buenos Aires, Argentina.
- Boldea, I. (2013). *Linear electric machines, drives and Maglevs handbook*. Boca Raton: CRC Press.
- Boldea, I., Tutelea, L.N., Xu, W., Pucci, M. (2018). Linear electric machines, drives, and MAGLEVs: an overview. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65 (9), pp. 7504- 7515. 10.1109/TIE.2017.2733492.
- Cassat A., Jufer, M. (2002). MAGLEV projects technology aspects and choices. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 12 (1), pp. 915-925. 10.1109/TASC.2002.1018549.
- Chin, Y.K., Soulard, J. (2003). A permanent magnet synchronous motor for traction applications of electric vehicles. IEEE Conference on Electric Machines and Drives Conference (IEMDC 1-4 de junio), Madison, Wisconsin, Estados Unidos. <https://www.academia.edu/18315117/>
- China Railway Rolling Stock Corporation (CRRC), (s.f).
- Cho, H.W., Sung, H.K., Sung, S.Y, You, D.J., Jang, S.M. (2008). Design and characteristic analysis on the short-stator linear synchronous motor for high-speed Maglev propulsion. *IEEE Transactions on Magnetics* 44 (11), pp. 4369-4372.
- Eastham, A.R., Hayes, W. F. (1988). Maglev Systems Development Status. *IEEE AES Magazine*, pp. 21-30.
- El-Refaie, A.M. (2013). Motors/generators for traction/propulsion applications: a review. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 8 (1), pp. 90-99. 10.1109/MVT.2012.2218438.

- Gerada, D., Mebarki, A., Brown, N.L., Gerada, C., Cavagnino, A., Boglietti, A. (2014). High-speed electrical machines: technologies, trends, and developments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61 (6), pp. 2946-2959. 10.1109/TIE.2013.2286777.
- He, J. L., Rote, D. M., Coffey, H. T. (1992). *Survey of foreign maglev systems*. Estados Unidos. <https://doi.org/10.2172/10134413>.
- Hellinger, R., Mnich, P. (2009). Linear motor-powered transportation: history, present status, and future outlook. *Proceedings of the IEEE*, 97(11), pp. 1892-1900. 10.1109/JPROC.2009.2030249.
- Holmer P. (2003). Faster than a speeding bullet train. *IEEE Spectrum*, 40 (8), pp. 30-34. <https://acortar.link/GmJ5s3>
- Hur, J., Toliyat, H.A., Hong, J.P. (2001). Dynamic analysis of linear induction motors using 3-D equivalent magnetic circuit network (EMCN) method. *Electric Power Components and Systems*, 29 (6), pp. 531-541. <https://doi.org/10.1080/153250001300338763>.
- Internacional Energy Agency (IEA), International Union of Railways (IUC) (2017). *Railway Handbook Energy consumption and CO2 emissions focus on passenger rail services*. uic.org/IMG/pdf/handbook_iea-uic_2017_web3.pdf
- Central Japan Railway Company (JRC), (s.f). <https://scmaglev.jr-central-global.com/future/>
- Kaye, R.J., Masada, E. (2004). *Comparison of linear synchronous and induction motors*. Urban Maglev Technology Development Program. Colorado Maglev Project. codot.gov/programs/research/pdfs/2004/inductionmotors.pdf.
- Kuntz, S., Burke, P.E., Slemon, G.R. (1978). Active damping of maglev vehicles using superconducting linear synchronous motors. *Electric Machines & Power Systems*, 2 (4), pp. 371-384. <https://doi.org/10.1080/03616967808955318>.
- Lawrence, M., Bullock R., and Liu Z. (2019). *China's High-Speed Rail Development*. World Bank. <https://acortar.link/EXC3a0> <https://acortar.link/EXC3a0>
- Leboeuf, M. (2018). *High Speed Rail*. International Union of Railways. https://uic.org/IMG/pdf/uic_high_speed_2018_ph08_web.pdf.
- Lee J, Jo J, Han Y, Lee C (26-29 de octubre de 2013). Development of the linear synchronous motor propulsion testbed for super speed Maglev. International Conference on Electrical Machines and Systems, Busan, Corea del Sur.
- Lee, H.W., Kim, K.C., Lee, J. (2006). Review of Maglev train technologies. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42 (7), pp. 1917-1925. 10.1109/TMAG.2006.875842.
- Long, Z., He, G. and Xue, S. (2011). Study of EDS & EMS hybrid suspension system with permanent-magnet Halbach array. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47 (12), pp. 4717-4724. 10.1109/TMAG.2011.2159237.
- Maglev technology (s.f.) Shanghai Maglev Transportation Development Co. Ltd. <http://www.smtdc.com/en/index.html>.
- Meins, J., L. Miller (1988). The High-Speed Maglev Transportation System Transrapid. *IEEE Transactions on Magnetics* MAG, 24 (2), pp. 808-811.
- Money, L. J. (1984). The saga of Maglev. *Transportation Research Part A: General*, 18 (4), pp. 333-334. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(84\)90171-7](https://doi.org/10.1016/0191-2607(84)90171-7).
- Mundrey JS (2010). Tracking of high-speed trains in India. *Rites Journal*, 12 (1), 7.1-7.16.
- Park, C.B., Lee, B.S., Lee, J.H., Lee, S.K., Kim, J.H., Jung, S.M. (2013). Design of coreless-typed linear synchronous motor for 600 km/h very high-speed train. International Conference on Electrical Machines and Systems, (26-29 de octubre) Busan, Corea del Sur.
- Post, R., Ryutov, D.D. (6- de junio de 2000). The Inductrack: A Simpler Approach to Magnetic Levitation. 16th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Río de Janeiro, Brasil. <https://www.osti.gov/servlets/purl/791522>.
- Powell, J., Danby, G. (15-16 de septiembre de 2007). MAGLEV. the new mode of transport for the 21st century. Schiller Institute Conference on the Eurasian land-bridge becomes a reality, Kiedrich, Alemania.
- Prasad, N., Jain, S., Gupta, S. (2019). Electrical Components of Maglev Systems: Emerging Trends. *Urban Rail Transit*, 5 (2), pp. 67-79. <https://doi.org/10.1007/s40864-019-0104-1>.
- Rivera, N. (2007). Permanent Magnet DC traction motor with reconfigurable winding control. *Transportation Research Board of the National Academies*. http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/studies/idea/finalreports/highspeedrail/hsr-44final_report.pdf.
- Saied, M. y Al-Shaher, M. (2009). Harmonic Distortion Assessment and Minimization for Railway Systems. *Electric Power Components and Systems*, 37 (8), pp. 832-846. 10.1080/15325000902817168.
- Schultz, L., Haas, O., Verges, P., Beyer, C., Rohlig, S., Olsen, H., Kuhn, L., Berger, D., Noteboom, U., Funk, U. (2005). Superconductively levitated transport system: the SupraTrans project. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15, pp. 2301-2305. 10.1109/TASC.2005.849636.
- SCMAGLEV. <https://scmaglev.jr-central-global.com/about/>
- Takeda, H. (1989). Japanese Superconducting Maglev: Present State and Future Perspective. SAE Technical Paper. <https://doi.org/10.4271/891718>.
- Thornton, R. (2009). Efficient and affordable maglev opportunities in the United States. *Proceedings of the IEEE*, 97 (11), pp. 1901-1921. 10.1109/JPROC.2009.2030251.
- Transrapid. www.siemens.com/transportation.
- International Union of Railways (IUC) (2018a). Passenger activities at IUC. uic.org/IMG/pdf/brochure_passagers.pdf.
- International Union of Railways (IUC) (2018b). *High speed rail fast track to sustainable mobility*. uic.org/IMG/pdf/uic_high_speed_2018_ph08_web.pdf.
- Uzuka, T. (2013). Faster than a speeding bullet: an overview of Japanese high-speed rail technology and electrification. *IEEE Electrification Magazine*, 1, pp.11-20.
- Uzuka, T. (23-26 de mayo de 2011). Trends in high-speed railways and the implications on power electronics and power devices. IEEE 23rd international symposium on power semiconductor devices and ICs, San Diego, California, Estados Unidos.
- Vijayvargiya, A., Naruka, S. N., Bee, A., Saxena, A., Kumar Tak, D. and Verma, H. (2018). Linear Induction Motor Based Rapid Human Transportation System. *International Journal of Advanced in Management. Technology and Engineering Sciences*, 8 (5), pp. 9-13.
- Zhang, W., Li, J., Zhang, K., Cui, P. (2013). Design of magnetic flux feedback controller in hybrid suspension system. *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 712764, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2013/712764>