

“Viajar sin tocar las vías: Así funcionan los trenes que levitan”

Juan Garrido Ponce, Escarlata D. Blandón Cumberras

Resumen— Los trenes de levitación magnética representan una aplicación avanzada del electromagnetismo y la superconductividad al transporte ferroviario. Su funcionamiento permite alcanzar altas velocidades, reducir la fricción y el desgaste mecánico, aunque todavía enfrenta importantes desafíos técnicos y económicos.

Palabras Claves— Trenes Maglev, superconductividad, electromagnetismo, levitación magnética, alta velocidad, transporte ferroviario, motores lineales

1. INTRODUCCIÓN: CUANDO EL TREN DESAFÍA A LA GRAVEDAD

Durante más de dos siglos el transporte ferroviario se basó en unas simples ruedas de acero rodando por raíles metálicos. Este diseño permitió la Revolución Industrial, que se expandan las ciudades y la conexión entre diferentes regiones. Sin embargo, los avances en física e ingeniería del siglo XX permitieron imaginar un medio de transporte radicalmente distinto: trenes que no tocan las vías, sino que flotan sobre ellas gracias a las leyes del electromagnetismo.

Estos trenes, conocidos como trenes de levitación magnética, representan una de las aplicaciones más sofisticadas del electromagnetismo moderno. Al eliminar la fricción mecánica, permitiendo alcanzar altas velocidades, reducir el desgaste de materiales y disminuir el ruido. En este artículo veremos cómo funcionan, los principios físicos que hacen esto posible y cuáles son sus ventajas y desafíos tecnológicos.



Figura 1. Tren Maglev de Shanghai

2. EL ELECTROMAGNETISMO COMO BASE DEL MOVIMIENTO

El electromagnetismo es una parte importante de la física. Se encarga de estudiar cómo interactúan las cargas

eléctricas y los campos magnéticos. Un científico llamado James Clerk Maxwell lo explicó todo en el siglo XIX con sus ecuaciones. Estas ecuaciones combinan la electricidad, el magnetismo y la luz.

Una de las cosas básicas del electromagnetismo es que cuando hay una corriente eléctrica, se crea un campo magnético. Este campo magnético puede ejercer fuerzas sobre las cargas eléctricas que se mueven. A esta fuerza se le llama fuerza de Lorentz. Gracias a estas fuerzas, podemos hacer que las cosas se muevan, se estabilicen o incluso leviten. En los trenes *Maglev* (levitación magnética), el electromagnetismo se aplica a gran escala mediante corrientes intensas y campos magnéticos controlados, generando fuerzas de atracción o repulsión capaces de contrarrestar el peso del tren y mantenerlo suspendido de forma estable.

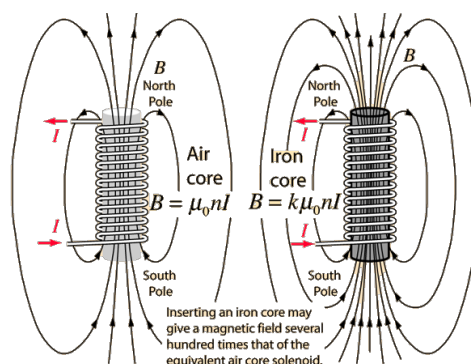


Figura 2. Comparación del campo magnético de un solenoide con núcleo de aire y con núcleo de hierro

3. ¿QUÉ ES LA LEVITACIÓN MAGNÉTICA?

La levitación magnética consiste en mantener un objeto suspendido en el aire sin contacto físico mediante el uso de campos magnéticos. Estos campos no anulan la

gravedad, sino que la compensan mediante fuerzas electromagnéticas. Para que la levitación sea estable, la fuerza magnética generada debe ser igual o mayor que el peso del objeto.

Además, es fundamental garantizar la estabilidad del sistema, evitando desplazamientos laterales o vibraciones. Esto resulta difícil de lograr, ya que el **teorema de Earnshaw** establece que no es posible obtener una levitación estable utilizando únicamente imanes permanentes en reposo. Por esta razón, en aplicaciones reales como los trenes Maglev se emplean **electroimanes**, sensores y **sistemas de control activo en tiempo real**, y en algunos casos **superconductores**, para mantener la suspensión de manera estable.

4. TIPOS DE TRENES MAGLEV

Existen dos tecnologías principales de levitación magnética, cada una con sus propias características. La levitación magnética es un método que utiliza campos magnéticos para hacer que los objetos floten en el aire.

Las dos tecnologías principales de levitación magnética son:

La levitación magnética electromagnética, que utiliza electromagnetos para crear los campos magnéticos necesarios.

La levitación magnética superconductora, que utiliza materiales superconductores para crear los campos magnéticos necesarios. Cada una de estas tecnologías de levitación magnética tiene sus propias ventajas y desventajas. La levitación magnética es un tema de investigación que sigue avanzando. La levitación magnética es una tecnología que puede ser utilizada en diferentes campos, como el transporte y la industria. Características particulares:

4.1. Suspensión Electromagnética (EMS)

En este sistema, el tren levita gracias a la atracción entre electroimanes ubicados en el vehículo y en los rieles ferromagnéticos que están en la vía, los imanes tiran del tren hacia adelante. Esto hace que el tren se mueva debido a la fuerza que ejercen los imanes. Los imanes son fundamentales en este sistema porque tiran del tren hacia adelante, permitiendo su movimiento arriba, manteniéndolo suspendido a pocos milímetros de la guía.

Este método requiere un control extremadamente preciso, ya que la estabilidad depende de ajustar continuamente la corriente eléctrica para evitar el contacto con la vía. Los sensores detectan la distancia entre tren y riel miles de veces por segundo.

Un ejemplo de esta tecnología fue el sistema Transrapid, desarrollado en Alemania.

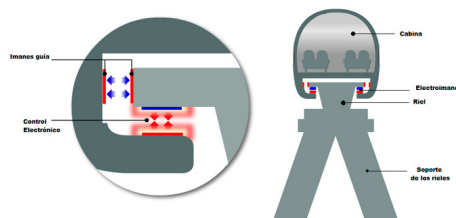


Figura 3. Funcionamiento sistema EMS

4.2. Suspensión electrodinámica (EDS)

El tren puede levitar gracias al uso de campos magnéticos que se repelen entre sí. En este sistema, el tren incorpora imanes superconductores que generan un campo magnético intenso. Al desplazarse, estos imanes inducen corrientes eléctricas en bobinas situadas en la vía, las cuales producen campos magnéticos opuestos. La interacción entre ambos campos genera una fuerza de repulsión que eleva el tren y lo mantiene suspendido.

La principal ventaja del sistema de suspensión electrodinámica es su estabilidad natural. No obstante, requiere que el tren alcance una velocidad mínima para lograr la levitación completa. Este es el sistema utilizado en el SCMaglev japonés.

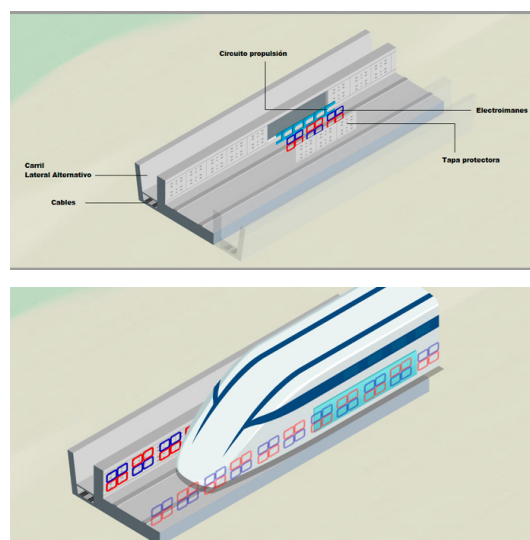


Figura 4. Funcionamiento sistema EDS

5. EL PAPEL DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

La superconductividad es un fenómeno cuántico que ocurre cuando ciertos materiales se enfrían a temperaturas extremadamente bajas, momento en el cual pierden completamente su resistencia eléctrica. Esto permite que circulen corrientes eléctricas muy intensas sin pérdidas energéticas.

Además, los superconductores presentan el efecto Meissner, por el cual expulsan los campos magnéticos de su interior, generando fuerzas de repulsión magnética muy intensas. Gracias a estas propiedades, los imanes superconductores utilizados en los trenes Maglev pueden producir campos magnéticos mucho más potentes que los electroimanes convencionales.

Si bien el uso de refrigeración criogénica incrementa la complejidad del sistema, los beneficios obtenidos en términos de eficiencia energética y estabilidad hacen que esta tecnología resulte especialmente adecuada para aplicaciones de levitación magnética.

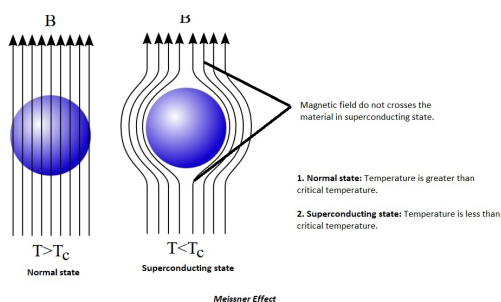


Figura 5. Efecto Meissner

6. PROPULSIÓN ELECTROMAGNÉTICA: MOTORES LINEALES

A diferencia de los trenes tradicionales, los trenes Maglev no utilizan motores rotativos convencionales. En su lugar, emplean motores lineales, que son motores eléctricos capaces de generar movimiento directo en línea recta (o a lo largo de trayectorias curvas) mediante fuerzas electromagnéticas.

En este sistema, el campo magnético avanza a lo largo de la vía y el tren es impulsado mediante fuerzas electromagnéticas. La velocidad del tren se controla ajustando la frecuencia de la corriente eléctrica, lo que permite un control preciso y eficiente del movimiento.

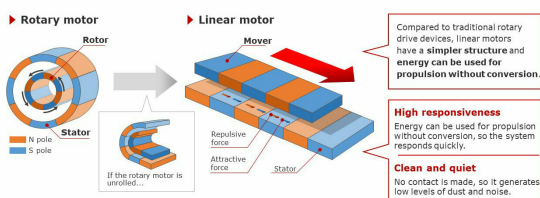


Figura 6. Comparación entre un motor rotativo y un motor lineal

7. VENTAJAS Y DESAFÍOS TECNOLÓGICOS

La tecnología Maglev aplicada al transporte ferroviario presenta ventajas significativas frente a los trenes tradicionales. Sin embargo, también plantea importantes desafíos técnicos, económicos y logísticos que actualmente limitan su expansión a gran escala. Esta combinación de beneficios y obstáculos convierte a los trenes Maglev, al mismo tiempo, en una promesa de futuro y en un verdadero reto tecnológico.

7.1. Ventajas

Las ventajas más destacadas son las siguientes:

En primer lugar, se alcanzan **altísimas velocidades**, ya que, al no existir contacto físico entre el tren y la vía, se elimina la fricción, uno de los principales factores que limitan la velocidad en los trenes convencionales. Gracias a esto, los trenes Maglev han alcanzado experimentalmente velocidades cercanas a los 600 km/h, comparables a las del transporte aéreo.

Por otro lado, la ausencia de ruedas en contacto con los rieles **reduce** considerablemente el **desgaste mecánico** de los componentes. Esto se traduce en una menor necesidad de mantenimiento, un aumento de la vida útil del sistema y una mayor confiabilidad operativa.

Además, estos trenes resultan **más silenciosos**, ya que el ruido generado durante la marcha se debe principalmente al desplazamiento del aire. Esto los convierte en una alternativa de transporte más confortable y menos invasiva, especialmente en entornos urbanos.

Finalmente, los trenes maglev pueden ser **más eficientes energéticamente a altas velocidades** que los trenes tradicionales, dado que la energía se destina casi por completo a vencer la resistencia del aire. Al funcionar con electricidad, también pueden integrarse con mayor facilidad a redes energéticas basadas en fuentes renovables.

7.2. Desafíos y limitaciones

Los desafíos y limitaciones más destacados son las siguientes:

En primer lugar, la construcción de líneas Maglev requiere el uso de **tecnologías avanzadas y materiales específicos**, lo que implica un **alto costo inicial de infraestructura**, muy superior al de los sistemas ferroviarios convencionales.

A esto se suma la **especificidad de las vías** necesarias para este tipo de trenes, ya que no pueden circular sobre rieles tradicionales. Esto incrementa tanto los costos como la complejidad de implementación y dificulta la integración de los trenes Maglev en las redes ferroviarias ya existentes.

Por último, estos sistemas presentan una **gran**

complejidad técnica, especialmente debido al uso de **imanes superconductores**, que deben mantenerse a temperaturas extremadamente bajas. Esto exige la incorporación de sistemas criogénicos y la disponibilidad de personal altamente especializado para su operación y mantenimiento.

8. APLICACIONES REALES

El caso más emblemático es el Shanghai Maglev, que conecta el Aeropuerto Internacional de Pudong con la ciudad en aproximadamente 8 minutos, alcanzando velocidades de hasta 431 km/h.

En China también operan otros sistemas de levitación magnética, como el Fenghuang Maglev, de carácter turístico; el Changsha Maglev Express, que enlaza el aeropuerto con el centro urbano; y la Beijing Subway Line S1, una línea urbana de 10,2 km que conecta distintas áreas de la ciudad.

En Japón, por su parte, se proyecta la expansión del SCMaglev entre Tokio y Osaka, con el objetivo de reducir drásticamente los tiempos de viaje entre ambas ciudades. Además, durante la Expo Aichi de 2005 se inauguró el Linimo, considerado el primer tren Maglev urbano y comercial del mundo, diseñado para operar a velocidades más bajas.

9. CONCLUSIONES

Estos trenes constituyen un ejemplo real y funcional de cómo la física fundamental, el electromagnetismo clásico y la física cuántica pueden converger en una misma tecnología, algo que hace apenas dos siglos habría resultado impensable.

Si bien todavía no pueden considerarse una solución universal, debido a los desafíos técnicos y económicos que presentan, los avances en materiales superconductores, en electrónica de control y en eficiencia energética indican que viajar sin tocar las vías ya no es una fantasía futurista, sino una demostración concreta del enorme potencial de la ciencia aplicada.

REFERENCIAS

- [1] Griffiths, D. J. *Introduction to Electrodynamics*. Cambridge University Press.
- [2] Tipler, P. A., Mosca, G. *Physics for Scientists and Engineers*. W. H. Freeman.
- [3] Hecht, E. *Physics: Calculus*. Cengage Learning.
- [4] Ross, P. E. "Maglev: The ultimate train". *IEEE Spectrum*.
- [5] Encyclopaedia Britannica – *Magnetic Levitation, Electromagnetism*.
- [6] Central Japan Railway Company – Informes técnicos sobre SCMaglev.
- [7] <https://eadic.com/blog/entrada/trenes-con-tecnologia-maglev/>

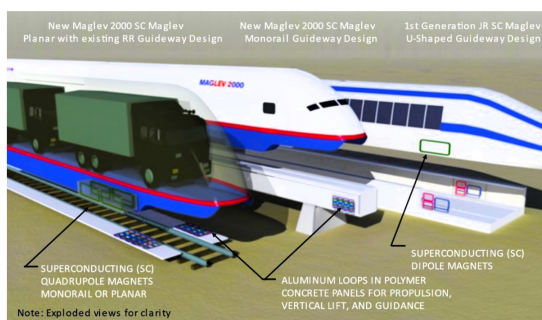


Figura 6. Sistema Maglev avanzado basado en imanes superconductores