

**ESTUDIO DE LAS APLICACIONES PRÁCTICAS DE  
LA LEVITACIÓN MAGNÉTICA  
(TRENES MAGLEV)**

**Autor: Gabriel Perren**

**INDICE**

Introducción .....	3
Sistema de funcionamiento del tren de levitación magnética de alta velocidad.....	4
1. Principio de levitación magnética.....	4
1.1. EMS: Suspensión electromagnética.....	4
1.2. EDS: Suspensión Electrodinámica.....	6
2. Principio de guía lateral.....	8
3. Principio de propulsión.....	9
3.1. LSM: Motor Lineal Síncrono.....	10
4. Mecanismo de frenada.....	12
El último avance en tecnología Maglev: La Inductrack.....	13
Aplicación futura de la tecnología maglev: Lanzadera espacial de levitación magnética.....	15
Fuentes.....	16

## Introducción

Llamamos “levitación magnética” al fenómeno por el cual un dado material puede, literalmente, levitar gracias a la repulsión existente entre los polos iguales de dos imanes o bien debido a lo que se conoce como “Efecto Meissner”, propiedad inherente a los superconductores. La superconductividad es una característica de algunos compuestos, los cuales, por debajo de una cierta temperatura crítica, no oponen resistencia al paso de la corriente; es decir: son materiales que pueden alcanzar una resistencia nula. En estas condiciones de temperatura no solamente son capaces de transportar energía eléctrica sin ningún tipo de pérdidas, sino que además poseen la propiedad de rechazar las líneas de un campo magnético aplicado. Se denomina “Efecto Meissner” a esta capacidad de los superconductores de rechazar un campo magnético que intente penetrar en su interior; de manera que si acercamos un imán a un superconductor, se genera una fuerza magnética de repulsión la cual es capaz de contrarrestar el peso del imán produciendo así la levitación del mismo.

Hoy día el uso más extendido del fenómeno de levitación magnética se da en los trenes de levitación magnética. Un tren de levitación magnética es un vehículo que utiliza las ondas magnéticas para suspenderse por encima del carril (algunos de estos trenes van a 1 cm por encima de la vía y otros pueden levitar hasta 15 cm) e impulsarse a lo largo de un carril-guía. Si bien existen otras aplicaciones como, por ejemplo, las montañas rusas de levitación magnética o, lo que en la actualidad se encuentra bajo investigación, la propulsión de naves espaciales mediante este mismo fenómeno (lo que se menciona más adelante), estas se basan en los mismos principios que los trenes tanto para mantenerse levitando como para impulsarse a lo largo de un carril-guía. Por esta razón este trabajo se centrará en los trenes de levitación magnética y más aún, en el principio de funcionamiento de estos, dándole menos importancia a otros aspectos como: impacto ecológico, viabilidad económica (excepto en el caso de la propulsión de naves espaciales, donde se convierte en tema prioritario), confort, tendido estratégico de vías, diferentes diseños, etc.

## **Sistema de funcionamiento del tren de levitación magnética de alta velocidad**

A continuación se exponen los cuatro principios básicos por los cuales funciona un tren maglev.

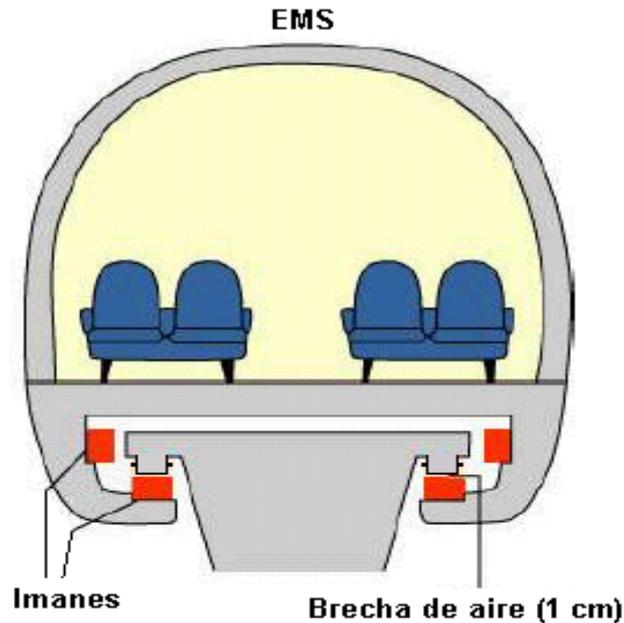
### **1. Principio de levitación magnética**

La levitación en un tren maglev, se consigue mediante la interacción de campos magnéticos que dan lugar a fuerzas de atracción o repulsión, dependiendo del diseño del vehículo, es decir, según si el tren utilice un sistema EMS (electromagnetic suspension o suspensión electromagnética) o EDS (electrodinamic suspension o suspensión electrodinámica).

La principal diferencia entre un sistema EMS y un EDS es que en el primero la levitación del tren es producida por la atracción entre las bobinas colocadas en el vehículo y la vía, y en el segundo se consigue la levitación gracias a fuerzas de repulsión entre estas.

#### **1.1. EMS: Suspensión electromagnética**

En el caso del EMS, la parte inferior del tren queda por debajo de una guía de material ferromagnético, que no posee magnetismo permanente.



(Figura 1.1, esquema de la suspensión EMS)

Cuando se ponen en marcha los electroimanes situados sobre el vehículo, se genera una fuerza de atracción. Ya que el carril no puede moverse, son los electroimanes los que se mueven en dirección a éste elevando con ellos el tren completo. Sensores en el tren se encargan de regular la corriente circulante en las bobinas, como resultado el tren circulará a una distancia de aproximadamente un centímetro del carril guía. Unos electroimanes encargados de la guía lateral del vehículo serán colocados en los laterales del tren de manera que quede garantizado su centrado en la vía (esto se detalla en el punto **1.3**).

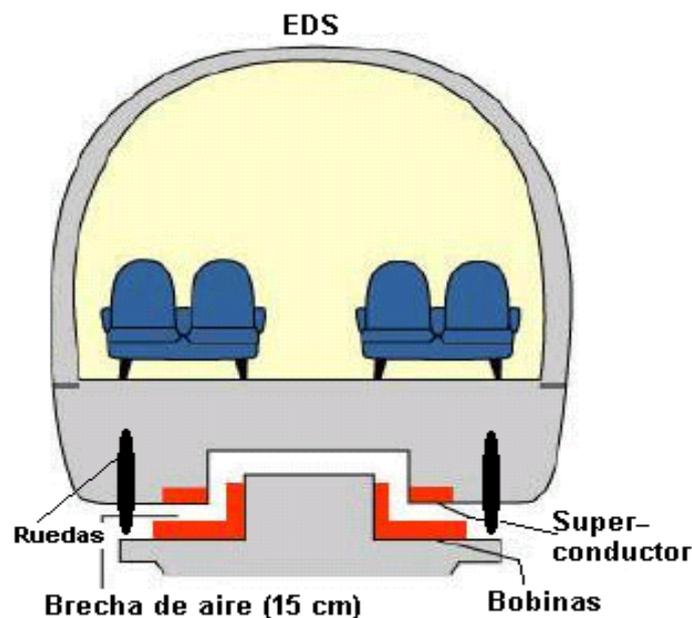
La principal ventaja de las suspensiones EMS es que usan electroimanes en vez de los complicados imanes superconductores que exige la suspensión EDS (de lo que se habla en el siguiente punto). Por no necesitar imanes superconductores, no son necesarios complicados y costosos sistemas de refrigeración. Aunque el consumo actual del EMS es inferior al del EDS, se espera que, con el avance de las investigaciones en superconductividad, los consumos de las suspensiones EDS bajen considerablemente.

Aún así los trenes de suspensión EMS sufren ciertas limitaciones, la principal es su inestabilidad. Cuando la distancia entre la guía y los electroimanes disminuye, la fuerza de atracción crece y, aunque la corriente eléctrica circulante en los electroimanes puede ser regulada inmediatamente,

existe el peligro de que aparezcan vibraciones o de que el tren toque la guía. Otra de las limitaciones de este diseño es la enorme precisión necesaria en su construcción, lo cual encarece su producción. Una pequeña desviación de unos pocos milímetros a lo largo de la estructura del tren puede provocar un desastre. Además, con unas tolerancias tan pequeñas un simple terremoto podría destruir completamente todo un sistema de líneas maglev. Por otro lado la amplitud del hueco entre vehículo y guía no puede ampliarse porque el costo de esto haría al sistema prohibitivo.

### 1.2. EDS: Suspensión Electrodinámica

La levitación EDS se basa en la propiedad de ciertos materiales de rechazar cualquier campo magnético que intente penetrar en ellos. Esta propiedad se da en superconductores y es llamada Efecto Meissner, como se explicó con anterioridad. La suspensión, por tanto, consiste en que el superconductor rechazará las líneas de campo magnético de manera que no pasen por su interior, lo que provocará la elevación del tren. En diversos prototipos de suspensión EDS se ubica un material superconductor a los lados de la parte inferior del vehículo, tal como puede observarse en la figura:

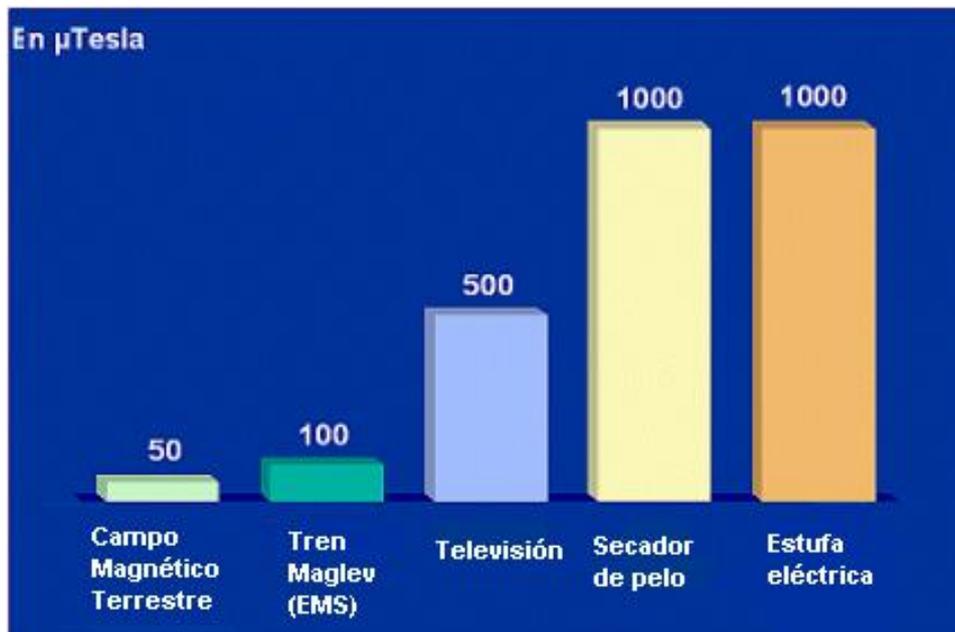


(Figura 1.2.1, esquema de la suspensión EDS)

Este pasa a unos centímetros de un conjunto de bobinas situadas sobre el carril guía. Al moverse el vehículo a lo largo del carril se inducirá una corriente en las bobinas de este, las cuales actuarán entonces como electroimanes. Al interactuar con los superconductores montados en el tren, se producirá la levitación. Debido a esto, la fuerza de levitación será cero cuando el vehículo se encuentre parado; para esto el tren tiene incorporadas unas ruedas neumáticas. Estas funcionan de la siguiente manera: como la fuerza de levitación aumenta con la velocidad, cuando la velocidad alcanzada por el tren es la suficiente para que este se eleve, las ruedas quedan entonces “en el aire” y por lo tanto, inutilizadas. De la misma manera, cuando la velocidad empieza a disminuir, lo que hace que disminuya la fuerza repulsiva, el tren comienza a descender hasta que las ruedas quedan apoyadas, y así se detiene.

Este sistema permite levitaciones de hasta 15 cm, lo cual supera por mucho al sistema EMS. Esto permite hacer guías menos precisas para este tipo de Maglevs y los protege de los daños que pequeñas deformaciones en terremotos pudieran producir. Además, un tren con suspensión EDS se amolda a las curvas compensando la aceleración lateral inclinándose, de manera que ninguna perturbación es sentida dentro del vehículo.

Una desventaja de este sistema es que la utilización directa de superconductores provoca grandes campos magnéticos dentro del vehículo, o sea la zona donde se encuentran los pasajeros, por lo que se deben utilizar complejos sistemas de aislamiento de la radiación magnética (sobre los superconductores) para no perjudicar la salud de los pasajeros, ya que es sabido que una continua exposición a campos magnéticos muy intensos puede contribuir al desarrollo de ciertas enfermedades como el cáncer. Esto contrasta con el sistema EMS, en el cual el campo magnético usado para la levitación, guía y propulsión del tren, se concentra en la brecha entre el vehículo y el carril-guía. Fuera de esta brecha, la intensidad del campo magnético disminuye de manera tal que en la cabina donde viajan los pasajeros su intensidad es comparable con la del campo magnético terrestre. Esto se muestra en la siguiente gráfica (datos del tren de levitación magnética alemán):



(Figura 1.2.2, campo electromagnético producido por el sistema EMS)

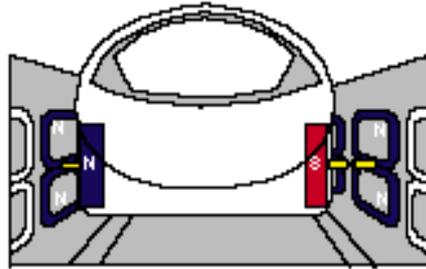
Otra desventaja son los grandes costos de los materiales superconductores y de los potentes sistemas de refrigeración necesarios para mantener a estos a una baja temperatura.

## 2. Principio de guía lateral

Los maglev necesitan, además del sistema de levitación magnética un sistema de guía lateral que asegure que el vehículo no roce el carril guía como consecuencia de perturbaciones externas que pueda sufrir.

En la suspensión EMS, se instalan unos imanes en los laterales del tren los cuales, a diferencia de los ubicados para permitir al tren levitar y moverse, solamente actuarán cuando este se desplace lateralmente, ejerciendo fuerzas de atracción del lado que más se aleje de la vía.

En el sistema EDS son los superconductores y las bobinas de levitación los encargados del guiado lateral del tren. Las bobinas de levitación están conectadas por debajo del carril-guía formando un lazo:



(Figura 2, principio de guía lateral)

Así, cuando el vehículo se desplaza lateralmente, una corriente eléctrica es inducida en el lazo, lo que da como resultado una fuerza repulsiva del lado más cercano a las bobinas de levitación, obligando al vehículo a centrarse.

Si el tren por alguna causa se hundiese en el carril-guía este respondería con un aumento de la fuerza repulsiva, lo cual equilibraría este acercamiento; en contraste con el sistema EMS en el cual la fuerza atractiva aumenta si el vehículo se acerca a la guía.

### 3. Principio de propulsión

Un tren maglev es propulsado mediante un motor lineal. El funcionamiento de un motor lineal deriva de un motor eléctrico convencional donde el estator es abierto y “desenrollado” a lo largo del carril-guía en ambos lados, como se ve en la figura:



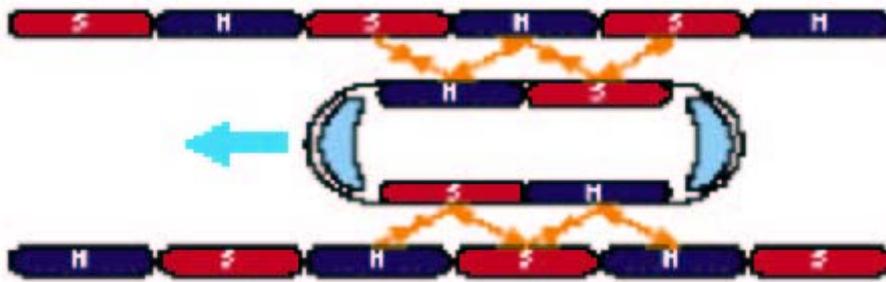
(Figura 3, esquema de un motor lineal en un tren Maglev)

La propulsión, tanto en EDS como en EMS, se logra generalmente mediante la utilización del LSM, linear synchronous motor o motor lineal síncrono.

### 3.1. LSM: Motor Lineal Síncrono

Este sistema de propulsión utiliza como estator un circuito de bobinas sobre la vía, por el cual circula una corriente alterna trifásica controlada. El rotor esta compuesto por los electroimanes del tren, en el caso de un EMS, o las bobinas superconductoras en un EDS.

El campo magnético que crea la corriente alterna del estator interactúa con el rotor (electroimanes o bobinas superconductoras) creando una sucesión de polos norte y sur que empujarán y tirarán del vehículo hacia delante, como muestra la figura:



(Figura 3.1.1, propulsión de un tren Maglev)

Este campo magnético (también llamado "onda magnética") viajará junto al tren a través del carril-guía, permitiéndole a este acelerar. Así, el rotor viajará a la misma velocidad que el campo magnético.

La regulación de la velocidad del tren se logra bien regulando la frecuencia de la onda magnética (o sea, variando la frecuencia de la corriente alterna) o bien variando el número de espiras por unidad de longitud en el estator y el rotor.

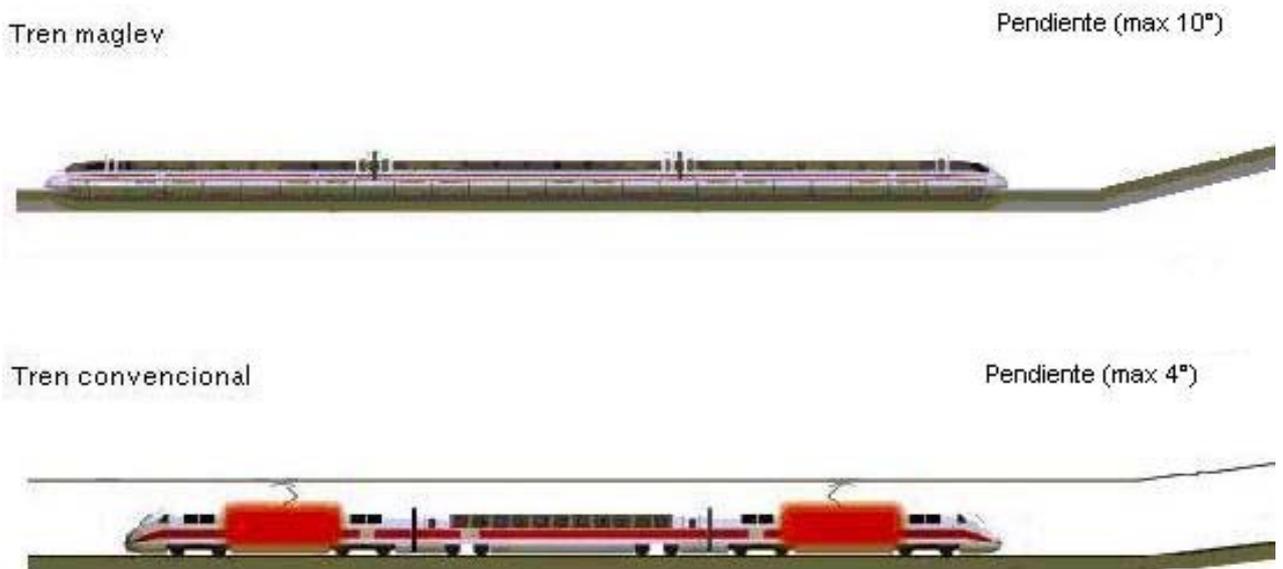
Una característica importante de este sistema es que la energía que mueve al tren no la provee el mismo tren, sino que esta es proveída por las vías. Esto permite evitar un malgasto de energía fraccionando la vía en secciones, de

manera que cada una tenga su alimentación, de esta manera solamente estarán activos aquellos tramos de la vía por los que en ese momento esté transitando el tren.



(Figura 3.1.2, suministro de energía a la vía)

Los trenes maglev, gracias a su sistema de propulsión, son capaces de circular por desniveles de hasta 10 grados, en contraste con los trenes convencionales que sólo pueden circular por pendientes con desniveles de hasta 4 grados.



(Figura 3.1.3, ascenso de pendientes)

Además la velocidad que alcanzan los trenes maglev es muy superior a la alcanzada por los trenes convencionales (inclusive los trenes eléctricos), llegando hasta 500 Km/h (hasta el momento) y su consumo es de solamente un 40 % del combustible usado por un automóvil por pasajero y milla, debido a la reducción del rozamiento con la vía.

#### 4. Mecanismo de frenada

El frenado del tren maglev se consigue, como la propulsión, gracias al motor lineal. Esto se logra invirtiendo la polaridad de la corriente trifásica en la vía (estator) de manera que se cree una fuerza en sentido contrario al avance del tren. Bajo condiciones normales, la desaceleración límite sería la misma que la aceleración límite:  $1,8 \text{ m/s}^2$  (este límite de aceleración se escoge de manera que no sea molesto para los pasajeros). En condiciones de emergencia, el motor lineal puede desacelerar al tren a  $3,5 \text{ m/s}^2$  aproximadamente.

Es posible aumentar aún la capacidad de frenada, en situaciones de extrema emergencia, mediante el uso de un sistema de frenado aerodinámico, el cual amplía la superficie frontal del tren, como se ve a continuación:



(Figura 4, mecanismo de frenado aerodinámico)

Este sistema se reserva solamente para situaciones de extrema emergencia ya que la desaceleración producida es muy elevada (alrededor de  $12 \text{ m/s}^2$ ), razón por la cual los pasajeros deberían ser avisados unos segundos antes de ser utilizado, cosa que no siempre sería posible. No obstante los frenos

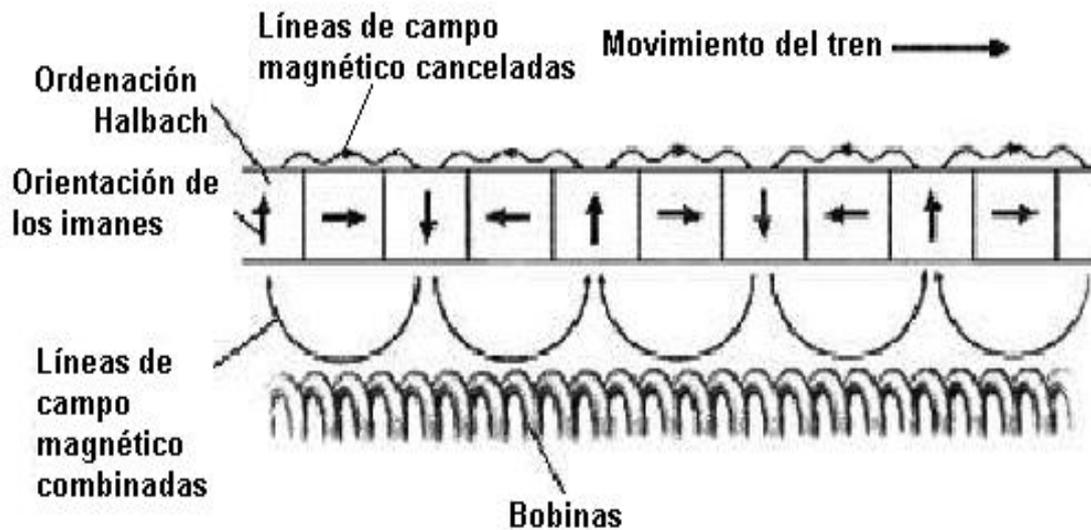
aerodinámicos también podrían ser utilizados en ocasiones donde no haría falta una gran desaceleración, simplemente para ayudar al motor de manera de no tener que forzarlo demasiado.

En un tren con EMS, en condiciones normales, este deja de levitar cuando su velocidad se aproxima a los 10 Km/h (esto se hace de manera voluntaria, ya que con suspensión EMS el tren puede mantenerse levitando aún estando parado). En ese momento se desprenden unos patines incorporados al tren, con un coeficiente de fricción determinado, que hacen que el tren se detenga por completo.

En un tren con EDS, el tren dejará de levitar también aproximadamente a unos 10 Km/h (aunque no de manera voluntaria), momento en que las ruedas neumáticas entran en funcionamiento y el tren utiliza entonces frenos hidráulicos para detenerse.

### **El último avance en tecnología Maglev: La Inductrack**

En una investigación publicada hace varios años, el doctor Richard Post del Lawrence Livermore National Laboratory desarrolló un sistema maglev que evita las mayores fallas de los sistemas EMS y EDS explicados más arriba. La Inductrack es esencialmente un sistema EDS que, en vez de materiales superconductores, utiliza imanes permanentes. Antes que el Dr. Post idease esto, se creía que los imanes permanentes proveerían una fuerza de levitación demasiado pequeña como para ser útil en cualquier diseño maglev. La solución encontrada por el equipo de Livermore fue emplear una distribución especial de poderosos imanes permanentes, conocida como una ordenación Halbach ("Halbach array"), para crear una fuerza de levitación lo suficientemente poderosa para hacer funcionar un maglev. En esta ordenación, barras magnéticas con grandes campos son dispuestas de manera que el campo magnético de cada barra esté orientado en un ángulo correcto con la barra adyacente. La combinación de las líneas de campo magnético de esta ordenación resulta en un poderoso campo debajo de esta y prácticamente ningún campo arriba.



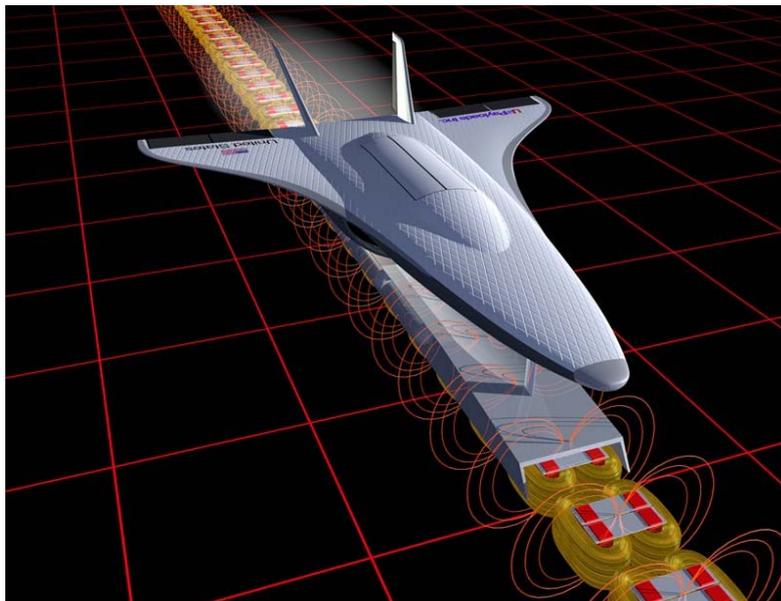
### Ordenación Halbach (Halbach array)

Como en el sistema EDS, la levitación es generada por las fuerzas repulsivas entre el campo magnético de los imanes en la ordenación Halbach y el campo magnético inducido en la vía conductora por el movimiento de los imanes (ya que estos ocupan el lugar de los superconductores en el sistema EDS). La vía Inductrack contendría dos filas de bobinas que actuarían como rieles. Cada uno de estos "rieles" estaría rodeado por dos ordenaciones Halbach de imanes (las cuales estarían ubicadas debajo del vehículo): una posicionada directamente sobre el "riel" y la otra a lo largo del lado interior del mismo.

Los imanes sobre las bobinas proveerían de levitación al vehículo, mientras que los imanes a los lados de las bobinas se encargarían del guiado lateral. Como en el sistema EDS esta levitación sería muy estable, ya que las fuerzas de repulsión aumentan exponencialmente al disminuir la distancia entre el vehículo y la guía. La Inductrack posee una considerable ventaja en eficiencia sobre los otros sistemas. Como resultado de utilizar imanes permanentes, la levitación en un tren Inductrack es independiente de cualquier fuente de energía, en contraste con los complejos electroimanes en el sistema EMS o los costosos equipos criogénicos en el EDS. Por lo tanto, los trenes Inductrack sólo requerirían energía para propulsión y las únicas pérdidas serían la ocasionada por la fricción con el aire y la ocasionada por la resistencia eléctrica en los circuitos de levitación (bobinas).

Como los otros sistemas maglev, la propulsión sería proveída por un LSM. Modelos que utilizan este sistema se encuentran en estudio en la NASA. Esto se detalla a continuación.

### **Aplicación futura de la tecnología maglev: Lanzadera espacial de levitación magnética**



La NASA esta estudiando la utilización de tecnología maglev para crear un sistema que asista en el despegue de una nave espacial.

Una pista operacional tendría unos 2400 metros de longitud y sería capaz de acelerar al vehículo a unos 1000 Km/h en 9,5 segundos, el que luego debería cambiar a motores a bordo para completar la salida al espacio.

La parte más costosa de una misión a una órbita terrestre baja son los primeros segundos, el despegue. La mayor parte de este gasto se debe al peso del propergol, y como un vehículo maglev utiliza electricidad para acelerarse, el peso de la nave espacial al momento del despegue podría ser de hasta un 20% menos que en un cohete normal. Además este sistema es reutilizable, ya que la pista que se usa para acelerar al vehículo se queda en el suelo. Otros beneficios son que la electricidad no contamina y es mucho más barata. Cada lanzamiento realizado utilizando tecnología maglev (con vehículos a escala

real) consumiría cerca de \$75 (75 dólares) de electricidad en el mercado actual. Un sistema maglev de este tipo sería no necesitaría (idealmente) ningún tipo de mantenimiento, ya que no hay partes móviles y no existe contacto entre el vehículo y la pista. Tanto es así que se espera que un sistema maglev funcione durante 30 años.

Se espera que alrededor del 2007 un sistema maglev sea utilizado para mandar al espacio pequeños satélites de comunicación por sólo unos miles de dólares por libra. Dentro de 20 años esta tecnología sería utilizada para poner vehículos mucho más grandes en órbita por sólo cientos de dólares por libra, un gran contraste con el valor actual de \$10 000 (diez mil dólares) por libra. Pruebas con naves a escala se realizan en la actualidad en la NASA.

**Fuentes:**

<http://www.biada.org>

<http://hcs.harvard.edu/>

***Magnetic levitation: Transportation for the 21st Century? (Jonathan Jacobs)***

<http://www.transrapid.de>

<http://www.mvp.de/tr/eigen.html>

[http://www.rtri.or.jp/rd/maglev/html/english/maglev\\_frame E.html](http://www.rtri.or.jp/rd/maglev/html/english/maglev_frame_E.html)

<http://www.msfc.nasa.gov/>

<http://www.o-keating.com/hsr/maglev.htm>