

## DISEÑO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN PROTOTIPO DE TREN MAGLEV DE BAJO COSTO A PEQUEÑA ESCALA CON FUTURO POTENCIAL DE IMPLEMENTACIÓN EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE FERROVIARIO

Esteban, Roa<sup>1</sup>; Carlos, Valderrama<sup>2</sup>; Jorge, Herrera<sup>3</sup>

1 Fundador y CEO Grupo Empresarial Rise S.A.S, eroa@rise.io

2 Ingeniero Físico, Investigador en Grupo Empresarial Rise S.A.S c.valderrama@rise.io

3 Ingeniero Físico, Investigador en Grupo Empresarial Rise S.A.S [jherrera@rise.io](mailto:jherrera@rise.io)

### Resumen

El presente artículo aborda la evolución histórica y el fundamento teórico de los sistemas de transporte basados en levitación magnética (Maglev), enfocándose en el desarrollo de esta tecnología en Colombia por parte del Grupo Empresarial Rise S.A.S. Se presenta una revisión detallada de los principios físicos subyacentes, tales como el uso de arreglos Halbach y motores lineales de inducción, así como los avances alcanzados mediante la implementación de prototipos a pequeña escala. Se discuten los desafíos experimentales, configuraciones ensayadas y resultados preliminares que evidencian el potencial de esta tecnología para revolucionar la movilidad urbana sostenible en el país.

**Palabras clave:** Maglev, levitación magnética, arreglo Halbach, motor lineal de inducción, movilidad urbana, transporte sostenible, Grupo Empresarial Rise.

### INTRODUCCIÓN

La historia de los sistemas de transporte con tecnología de levitación Magnética (Maglev), se remonta a finales del siglo XIX, cuando Schuyler S. Wheeler y Charles S. Bradley, presentaron las primeras patentes sobre motores lineales para aplicaciones ferroviarias, luego entre 1935 y 1941, Hermann Kemper presentó diversas patentes sobre sistemas levitación magnética ferroviarias, dentro de las cuales se destaca la patente 643316 “Pista flotante con vehículos sin ruedas que flotan sobre rieles de hierro utilizando campos magnéticos”.

Para la década de 1940, el profesor Eric Laithwaite, presentó un modelo funcional de tamaño real de un motor lineal de inducción y en la década de 1960 se desarrolló el primer vehículo funcional de levitación magnética.

Durante los años 70's, Estados Unidos, Alemania y Japón, se centraron en los estudios de imanes superconductores y comenzaron a crear prototipos de transporte terrestre de alta velocidad con levitación magnética, dentro de los cuales se pueden encontrar el MLU System (Japón), HSST01 (Japón), Transrapid 01 (Alemania), entre otros.

*Roa, Esteban; Valderrama, Carlos; Herrera, Jorge DISEÑO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN PROTOTIPO DE TREN MAGLEV DE BAJO COSTO A PEQUEÑA ESCALA CON FUTURO POTENCIAL DE IMPLEMENTACIÓN EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE FERROVIARIO*

(Pág. 75 – 91)



*Figura 1. Sistema de tren HSST. Tomado de: Folleto HSST  
<http://tsushima-keibendo.a.la9.jp/HSST/HSST-pamph.html>*



*Figura 2. TRANSRAPID 01 1970. Tomado de Transrapid Design History.  
<https://www.maglev.net/transrapid-design-history>*

En los años 90, entraron en operación los primeros sistemas de transporte con levitación magnética en Japón y para el año 2004, en China, empezó a operar el primer Maglev totalmente automatizado. [1]

En la década del 2000, Richard F. Post, presentó varias patentes como “INDUCTRACK MAGNET CONFIGURATION”, “LAMINATED TRACK DESIGN FOR INDUCTRACK MAGLEV SYSTEMS”, en los cuales se proponen diferentes diseños para sistemas Maglev a partir de Arreglos de imanes Halbach.

En América del Sur, Brasil se encuentra desarrollando un sistema de levitación Magnética para transporte urbano “MagLev-Cobra”. Para el año 2016 dentro de la Universidad Federal de Río de Janeiro contaba con una línea de 200 metros de demostración y un vagón con una capacidad aproximada de 30 pasajeros. [2]



*Figura 3. Maglev-cobra. Tomado de: Maglev Company Brazil.(s.f).  
<https://www.maglevcompanybrazil.com/>*

### **Investigación y Desarrollo Maglev Grupo Empresarial Rise S.A.S.**

En Colombia, **Grupo Empresarial Rise S.A.S.** Dentro de su línea de investigación desde 2022, se encuentra desarrollando un tren de levitación magnética a pequeña escala. Este prototipo busca generar datos en condiciones reales para comprender las variables críticas en la implementación de esta tecnología en el país, especialmente en el contexto de la reactivación de las vías férreas nacionales.

**Grupo Empresarial Rise S.A.S.** es una compañía colombiana que nace inicialmente con el propósito de desarrollar soluciones de software. Con el tiempo, la compañía ha diversificado

*Roa, Esteban; Valderrama, Carlos; Herrera, Jorge DISEÑO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN PROTOTIPO DE TREN MAGLEV DE BAJO COSTO A PEQUEÑA ESCALA CON FUTURO POTENCIAL DE IMPLEMENTACIÓN EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE FERROVIARIO  
(Pág. 75 – 91)*

su portafolio reinvertiendo sus utilidades en el desarrollo de soluciones de ingeniería innovadoras. Hoy en día, el Grupo Empresarial Rise a través de Rise Automóvil S.A.S se enfoca en transformar la movilidad y la infraestructura tecnológica en Colombia, a través de dos líneas estratégicas centradas en resolver los principales desafíos de la movilidad sostenible.



*Figura 4. Equipo Grupo Rise*

1. Fabricación nacional de vehículos eléctricos, incorporando baterías propias, estandarizadas e intercambiables, contribuyendo al fortalecimiento de la industria automotriz eléctrica en Colombia.
2. Investigación y desarrollo Sistemas Maglev para aplicaciones de movilidad contribuyendo al avance de tecnologías de transporte de alta eficiencia en el país.

Estas iniciativas reflejan el compromiso de Grupo Empresarial Rise S.A.S. con la innovación y el desarrollo de soluciones de ingeniería vanguardistas, orientadas a transformar la movilidad y la infraestructura tecnológica en Colombia.

## MARCO TEÓRICO

### ● Sistema de Levitación

El sistema de levitación se basa en el concepto de Inductrack , en el cual se tienen en cuenta dos aspectos clave:

1. Arreglos Halbach en movimiento que producen un campo magnético espacialmente periódico y altamente concentrado en una sola cara.

*Roa, Esteban; Valderrama, Carlos; Herrera, Jorge DISEÑO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN PROTOTIPO DE TREN MAGLEV DE BAJO COSTO A PEQUEÑA ESCALA CON FUTURO POTENCIAL DE IMPLEMENTACIÓN EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE FERROVIARIO*

*(Pág. 75 – 91)*

2. Una "vía conductora" fabricada con un material no ferromagnético en el cual se inducen corrientes por el movimiento del campo magnético. Estas corrientes inducidas generan un campo magnético opuesto que produce una fuerza de repulsión sobre el arreglo Halbach, permitiendo la levitación del sistema.

#### ❖ Arreglo Halbach

El concepto de Inductrack, se basa en el uso del arreglo de imanes ideado por Klaus Halbach [3]. El objetivo de este arreglo es maximizar la densidad de campo magnético ubicado en una de las caras, a expensas de anular el campo magnético en la cara opuesta del arreglo.

El arreglo Halbach, consiste en la disposición sucesiva de imanes, cada uno con una rotación infinitesimal en la dirección de magnetización, de forma que al completar un ciclo completo de 360°, se obtiene un patrón de magnetización que concentra el flujo en una sola dirección, generando un campo magnético unidireccional altamente eficiente.

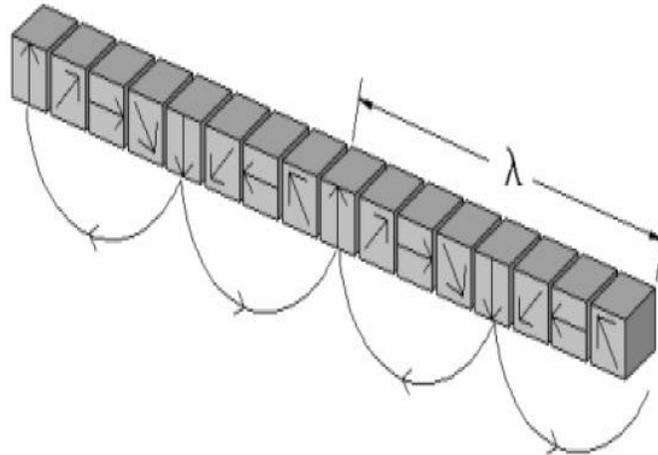


Figura 5. Arreglo Halbach. Tomado de [5]

El campo magnético predicho para este arreglo por [4], en el lado aumentado, es el siguiente:

$$B_x = B_o \sin(kx) \exp(-k(y-x))$$

$$B_y = B_o \cos(kx) \exp(-k(y-x))$$

$$B_o = B_r [1 - \exp(-kd)] \frac{\sin(\pi/M)}{\pi/M}$$

Donde M es el número de imanes por arreglo, Br es el campo magnético residual, valor que depende del material, k es el número de onda del arreglo y d es el grosor del arreglo.

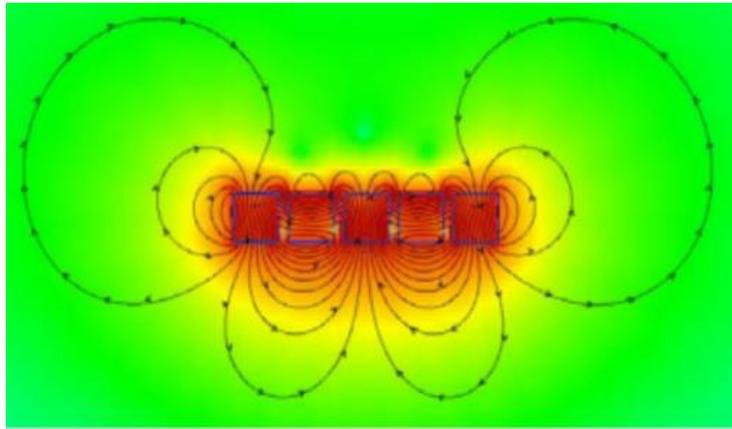


Figura 6. Campo Magnético de un arreglo Halbach. Tomado de [5]

#### ❖ Interacción Arreglo Halbach- Sistema de Riel

Para producir la levitación, los arreglos Halbach se posicionan sobre una lámina de un material no ferromagnético y conductor como el aluminio, la cual llamaremos (riel). La cara del arreglo Halbach con mayor intensidad de campo magnético debe orientarse hacia el riel.

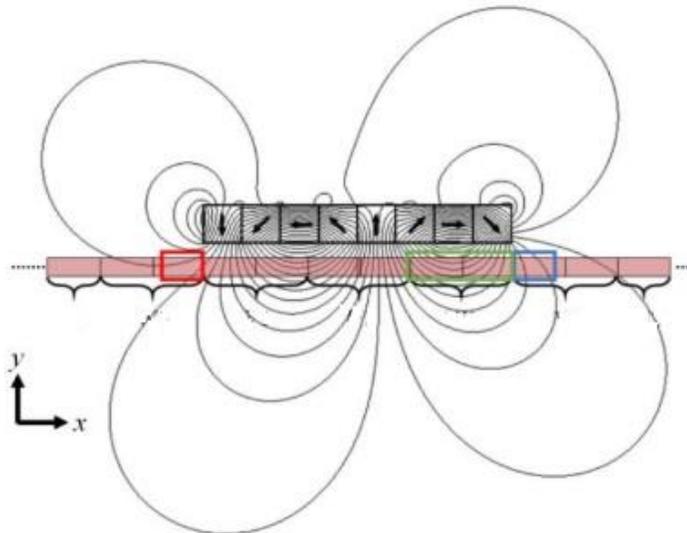


Figura 7. Trayectorias de corrientes de Foucault en la placa de reacción (riel). Adaptado de [6].

Cuando el arreglo Halbach se desplaza longitudinalmente a lo largo del riel, se induce una corriente eléctrica en la superficie conductora. Dicha corriente genera un campo magnético que se opone al campo del arreglo Halbach, produciendo una fuerza de repulsión magnética que da lugar al fenómeno de levitación.

La magnitud de la corriente inducida depende del flujo magnético y de la velocidad de desplazamiento del arreglo Halbach.

La corriente inducida puede expresarse como:

$$I(v) = \frac{\lambda B_0 w}{2\pi L} \left[ \frac{1}{1 + (R/kv)^2} \right] \exp(-k(y + l/2))$$

Donde L es la inductancia, R la resistencia, w y l representan el ancho y el grueso de la sección transversal de cada sección ranurada del riel.

La fuerza de levitación y la fuerza de arrastre producidas son:

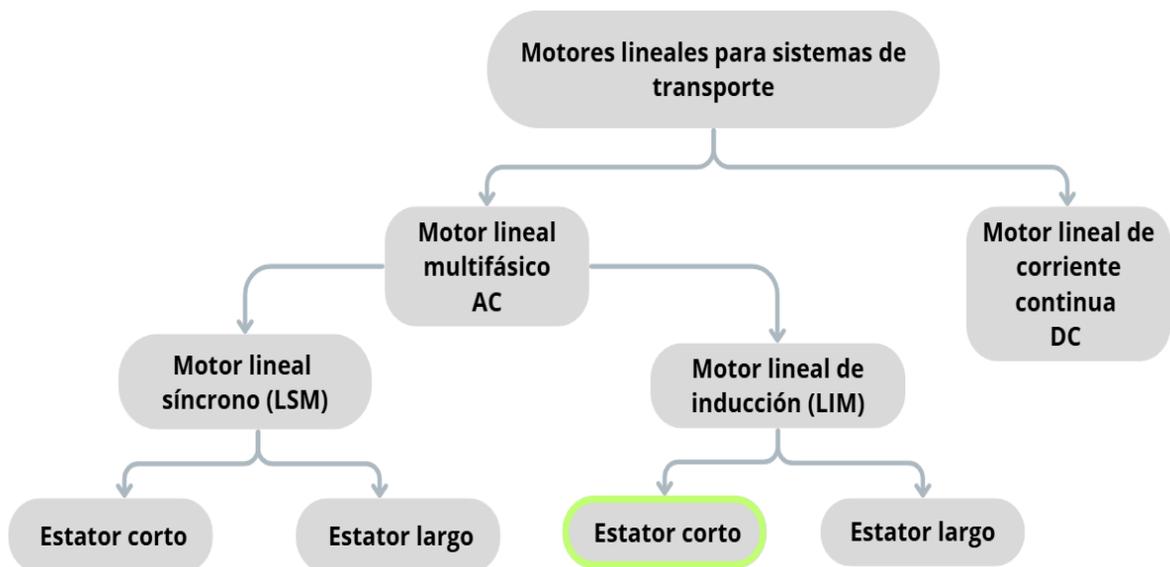
$$F_{lift}(v) = \frac{B_0^2 w}{2kLd_c} \left[ \frac{1}{1 + (R/kvL)^2} \right] \exp(-2k(y + l/2))$$

$$F_{drag}(v) = \frac{B_0^2 w}{2kLd_c} \left[ \frac{(R/kvL)^2}{1 + (R/kvL)^2} \right] \exp(-2k(y + l/2))$$

[3], [4],[5]

- **Sistema de Propulsión**

Para la propulsión en sistemas de transporte Maglev, se emplean distintos tipos de motores lineales, cuya selección depende del diseño, velocidad y aplicación específica del sistema. Para sistemas Maglev de transporte urbano, de baja velocidad (< 100 km/h), es recomendable utilizar Motores Lineales de Inducción de estator corto.



**Figura 8.** Tipos de motores lineales.

El motor lineal de inducción opera bajo el mismo principio que un motor rotacional de inducción, pero con un desplazamiento lineal en lugar de rotatorio.

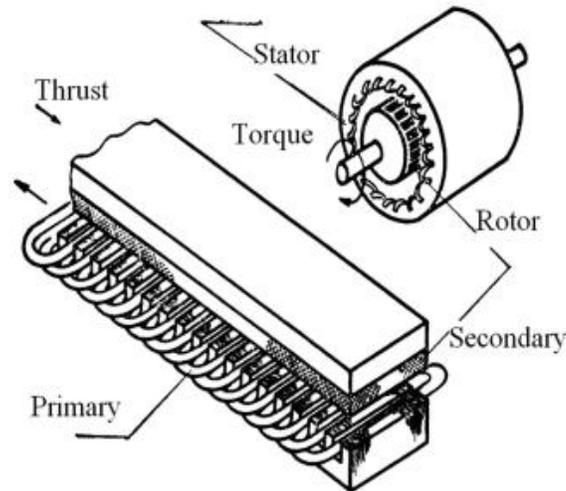


Figura 9. Motor rotacional y motor lineal. Tomado de [8]

En el motor lineal de inducción de estator corto (Short-Stator LIM), el sistema activo (primario) se encuentra montado en el tren, el cual consiste en un bobinado trifásico que produce un campo electromagnético viajero.

Este campo induce corrientes en la parte pasiva (secundario) que es la propia vía conductora (generalmente de aluminio o cobre).

La interacción entre el campo magnético y las corrientes inducidas produce una **fuerza de Lorentz** ( $F = I \times B$ ), impulsando el vehículo en la dirección del campo magnético móvil.

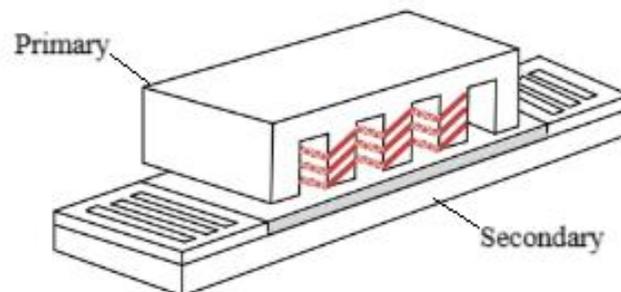


Figura 10. Motor lineal con riel ranurado. Adaptado de [9]

En este tipo de sistemas se tiende a utilizar un secundario ranurado, para mejorar la eficiencia del motor lineal. Esta configuración ofrece dos ventajas clave: [8],[9],[10]

- Las ranuras guían y concentran las corrientes inducidas en el secundario, reduciendo pérdidas por dispersión y mejorando la densidad de flujo magnético.
- Mantiene un campo constante en la zona de interacción primario-secundario, evitando fluctuaciones que reduzcan la fuerza de empuje.

## METODOLOGÍA

En el proceso de desarrollo del prototipo de tren Maglev, se encuentran descritos dos sistemas (Levitación y Propulsión), los cuales al terminar las investigaciones y pruebas se unirán para formar en conjunto el prototipo de Maglev

- **Sistema de Levitación.**

Para el estudio del sistema de levitación se desarrollaron 2 prototipos de sistema Vagón-Riel para análisis y caracterización.

### ❖ **Prototipo para Riel Lineal.**

Un prototipo de vagón que cuenta con arreglos Halbach para generar la levitación y la construcción de un riel de 10 metros de longitud para el desplazamiento del vagón.

Durante las pruebas, se observaba que la parte trasera del vagón experimentaba un movimiento oscilante lo que daba la sensación de que intentaba levitar, pero sin alcanzar la estabilidad necesaria. Esta inestabilidad en el movimiento se debía a que la longitud de la pista era insuficiente y no se lograba una velocidad constante para permitir una generación de campo magnético estable y uniforme.

Estas variaciones generaban **efectos de borde** y **efectos finales** [6][9][11], los cuales comprometerían la estabilidad del sistema y reducía su eficiencia de manera significativa.



*Figura 11. Prototipos Vagón - Vía Lineal*

### ❖ Riel Circular

A partir de los resultados con el prototipo inicial, se desarrolla un segundo prototipo de vía circular, que permite simular una longitud “infinita” de riel. En este diseño el vagón se confina en la parte superior de la vía, mientras el riel se “desplaza” al girar sobre su eje central.

En las primeras pruebas se logró evidenciar la levitación del vagón, aunque la parte trasera se levantaba mucho más que la parte delantera.



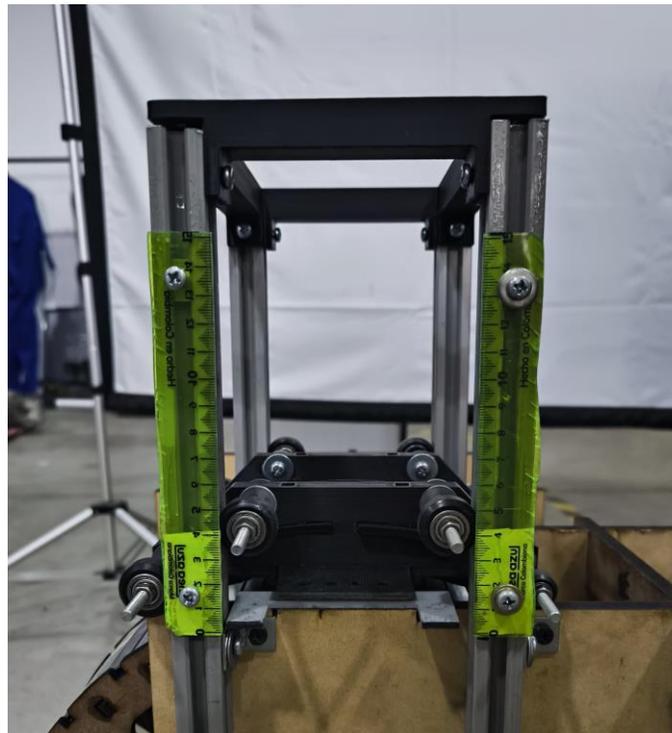
*Figura 12. Levitación en prototipo V 1.0 con desnivel en la altura de levitación en los extremos del vagón.*

El efecto de borde y efecto final aún seguían presentes en el sistema. Para minimizar estos efectos no deseados, se realizaron modificaciones en el diseño del prototipo.

1. Prototipo más robusto.
2. Disposición curva de los arreglos Halbach para adaptarse a la geometría del riel
3. Mayor longitud de los arreglos Halbach con el fin de minimizar los efectos de borde y efectos finales.



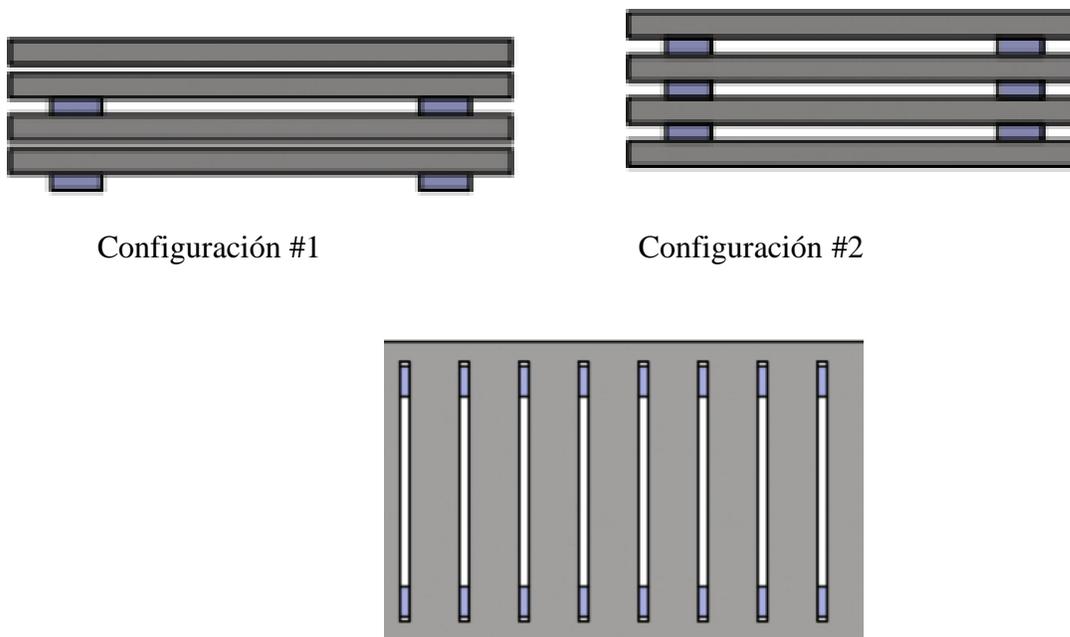
*Figura 13. Arreglo Halbach curvo*



*Figura 14. Montaje prototipo robusto con arreglo Halbach curvo.*

## Configuración de Rieles

Los rieles se componen de láminas de aluminio ranuradas alternadas con láminas de níquel, con el fin de optimizar la conductividad de la corriente inducida. En la siguiente figura se puede observar algunas de las configuraciones de los rieles, donde las láminas de aluminio están representadas en gris y las de níquel en azul.



*Figura 15. Tipos de configuración de riel, vistas frontales y superiores.*

## RESULTADOS

Se tomaron datos de Velocidad y Altura de levitación, utilizando diferentes cargas en el vagón (0 gramos, 500 gramos, 750 gramos) y diferentes combinaciones de rieles.

- Durante las pruebas se logra una altura máxima de 9 mm a una velocidad de 100 Km/h, utilizando el vagón sin carga.
- Se necesita una velocidad mínima de 30 Km/h para el vagón sin carga en el cual se logra levitación.



Figura 16. Vagón con diferentes cargas (a) Vagón sin carga y (b) Vagón cargado con 750g

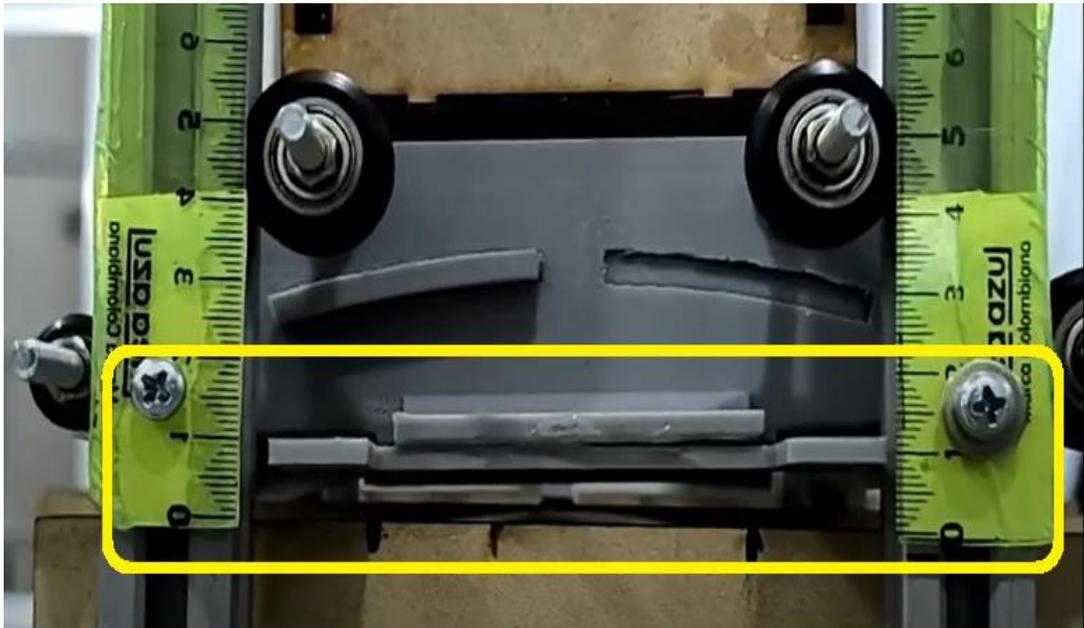
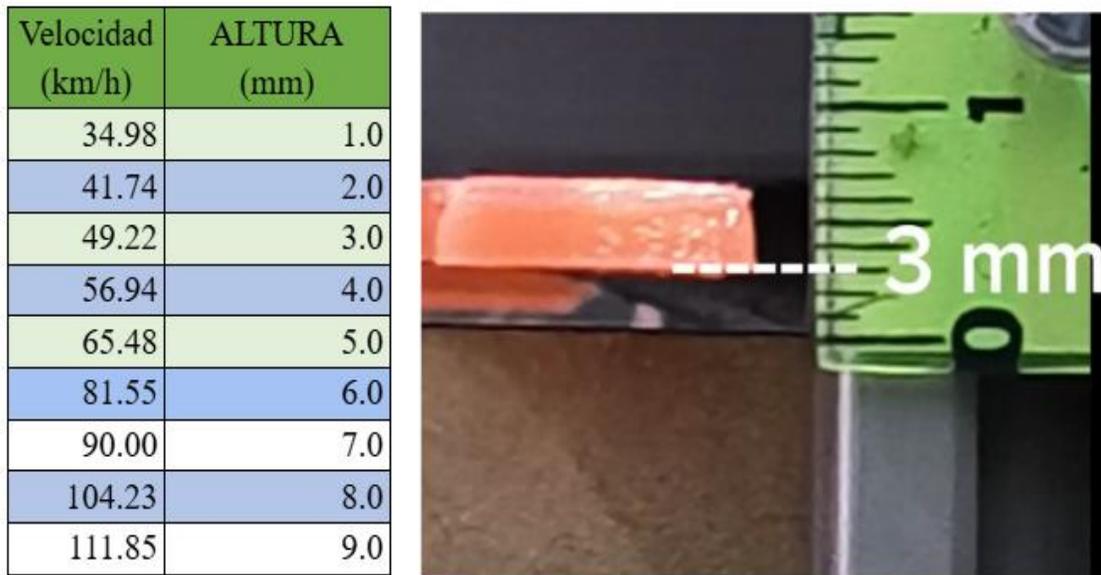


Figura 17. Prototipo de Tren levitando

A continuación, se muestran los datos obtenidos para la prueba utilizando el tren sin carga y una configuración de 3 rieles superpuestos con 3 láminas de material conductor (Níquel).



*Figura 18. Prototipo de Tren levitando a una altura de 3 mm y toma de datos de velocidad vs altura*

- **Sistema de Propulsión.**

Para el sistema de propulsión se decide utilizar un motor lineal de inducción (LIM) de estator corto como lo sugiere la literatura para aplicaciones en transporte urbano donde se requieren bajas velocidades (menores a 100 Km/h) [12][13]

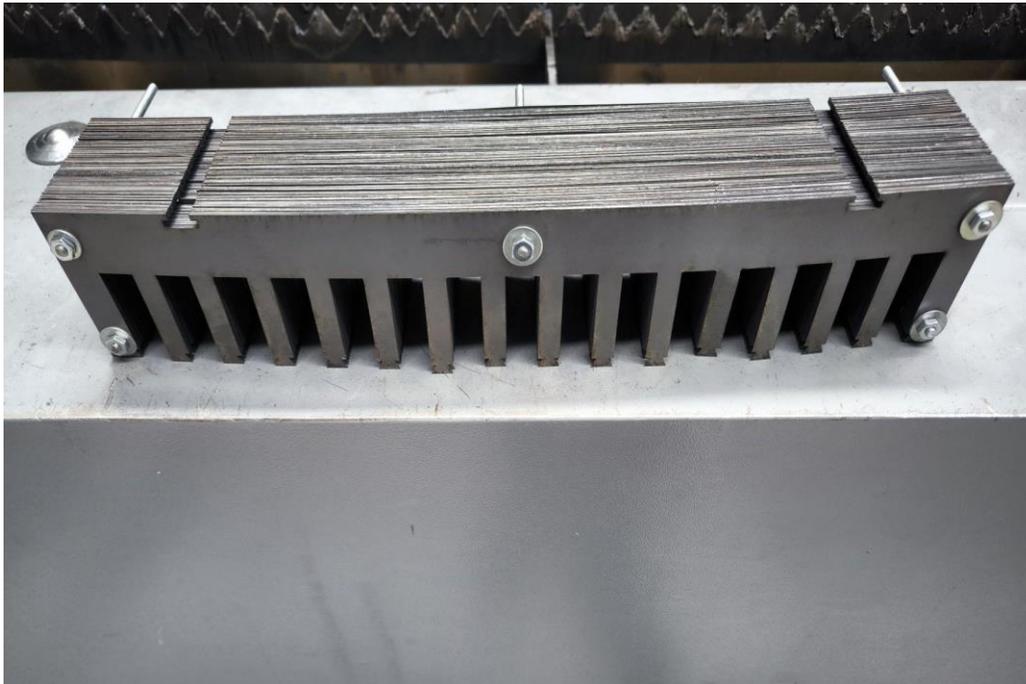
Para las primeras pruebas se diseña un prototipo de motor lineal con las siguientes características:

- Longitud del primario: 0.4 metros
- Número de fases: 3
- Número de polos: 5
- Longitud de la vía: 5 metros.
- Velocidad máxima esperada = 60 km/h
- Empuje máximo esperado = 50 N

A la fecha, el motor se encuentra en fase de construcción, mientras que la vía se encuentra en fase de ensamble.



*Figura 19. Secundario motor lineal "Via"*



*Figura 20. Fabricación de motor lineal*

## CONCLUSIONES

El desarrollo de sistemas de levitación magnética en Colombia, liderado por el Grupo Empresarial Rise S.A.S., representa un paso significativo hacia la innovación en movilidad urbana. Los resultados preliminares obtenidos con los prototipos demuestran la viabilidad de aplicar principios como el arreglo Halbach y motores lineales de inducción para lograr levitación efectiva en sistemas de transporte.

Los ensayos realizados, aunque aún en fase experimental, han permitido identificar variables clave como la velocidad mínima para lograr levitación, la influencia de las cargas y los efectos de borde.

Se espera continuar con las pruebas de propulsión del motor lineal, para combinar los sistemas y crear un circuito cerrado de 7 metros de radio para continuar con las investigaciones e implementar sistemas de control.

## REFERENCIAS

- [1]. R. Hellinger and P. Mních, "Linear Motor-Powered Transportation: History, Present Status, and Future Outlook," in Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 11, pp. 1892-1900, Nov. 2009
- [2]. L. S. Mattos, E. Rodriguez, F. Costa, G. G. Sotelo, R. de Andrade and R. M. Stephan, "MagLev-Cobra Operational Tests," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, no. 3, pp. 1-4, April 2016.
- [3]. K. Halbach, "Applications of permanent magnets in accelerators and electron storage rings (invited)," J. Appl. Phys., vol. 57, no. 1, pp. 3605-3608, Mar. 1985.
- [4]. R. F. Post and D. D. Ryutov, "The Inductrack concept: A new approach to magnetic levitation," Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, UCRL-ID-136199, 1999.
- [5]. P. Friend, "Magnetic Levitation Train Technology 1," Tesis de pregrado, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Bradley University, Peoria, IL, EE.UU., May 2004.
- [6]. Yamaguchi, Hiroto & Morishita, Mimpei. (2023). End Effects of Halbach Field Magnet Type Linear Motor. IEEJ Transactions on Industry Applications. 143. 570-578. 10.1541/ieejias.143.570.
- [7]. L. Zhang and H. Wang, "Application of Linear Motor in the Urban Rail Transit System (URTS)," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 21, no. 4, pp. 1500-1515, 2020.
- [8]. Boldea, I. and Nasar, S.A., Linear Motion Electromagnetic Devices, Taylor & Francis Group, New York, 2001
- [9]. A. Mousaei and M. B. B. Sharifian, "Design and optimization of a linear induction motor with hybrid secondary for textile applications," 2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tabriz, Iran, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEE50131.2020.9260773.

- [10]. G. Lv, T. Zhou, D. Zeng and Z. Liu, "Design of Ladder-Slit Secondaries and Performance Improvement of Linear Induction Motors for Urban Rail Transit," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 2, pp. 1187-1195, Feb. 2018
- [11]. R. C. Creppe, J. A. C. Ulson and J. F. Rodrigues, "Influence of Design Parameters on Linear Induction Motor End Effect," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 2, pp. 358-362, June 2008, doi: 10.1109/TEC.2008.918594
- [12]. H. -T. Cho, Y. -C. Liu and K. A. Kim, "Short-Primary Linear Induction Motor Modeling with End Effects for Electric Transportation Systems," 2018 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), Taichung, Taiwan, 2018, pp. 338-341, doi: 10.1109/IS3C.2018.00092.
- [13]. Boldea, "Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs Handbook", 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2023.

**CONSULTORÍA Y ASESORAMIENTO  
ESTRATÉGICO**  
más rentabilidad y mejores procesos



**Grupo Pospin**  
Estrategia & Negocios



Calle 5 No. 76 A 115 Edificio Siempre Viva Local 403 - +57 3216369640 - [rodrigo.posada@grupopospin.com](mailto:rodrigo.posada@grupopospin.com)