

# Modelagem e Simulação do Funcionamento de um Trem Maglev: Levitação, Propulsão e Controle

Diego Mendes Garcia, Eyck Sampaio

## Abstract

Este artigo apresenta uma modelagem detalhada do funcionamento de um trem Maglev, abordando as principais leis físicas que regem o sistema, como levitação eletromagnética, propulsão linear e resistência do ar. Além disso, exploramos o controle ativo da corrente elétrica necessário para manter a altura do trem. O artigo fornece uma base teórica para simulações numéricas, que podem ser acessadas via um link para o código Python desenvolvido.

**Palavras-chave:** Maglev, Levitação Magnética, Propulsão Linear, Controle Ativo, Resistência do Ar.

## 1 Introdução

Os trens de levitação magnética (Maglev) representam uma tecnologia inovadora de transporte, utilizando forças eletromagnéticas para sustentar e propulsar o trem ao longo dos trilhos. Diferentemente dos trens tradicionais, os Maglevs não possuem contato físico com os trilhos, o que reduz o atrito e permite velocidades muito mais elevadas.

Este artigo tem como objetivo modelar as principais forças envolvidas no funcionamento de um trem Maglev e desenvolver equações diferenciais que descrevem seu comportamento dinâmico. Além disso, apresentamos uma revisão bibliográfica sobre os princípios de levitação e propulsão magnética, assim como os sistemas de controle utilizados em Maglevs modernos.

## 2 Metodologia

A metodologia adotada envolve a modelagem matemática das forças envolvidas na operação do trem Maglev, incluindo levitação eletromagnética, propulsão linear e resistência do ar. As equações diferenciais que regem o movimento do trem são resolvidas numericamente utilizando métodos apropriados. Um modelo de controle ativo baseado em um controlador proporcional-derivativo (PD) é implementado para manter a altura do trem constante.

## 2.1 Levitação Eletromagnética

A levitação magnética é conseguida por meio de forças eletromagnéticas entre ímãs supercondutores no trem e trilhos condutores. A força de levitação  $F_{\text{lev}}$  que sustenta o trem pode ser descrita pela Lei de Ampère e pela Lei de Biot-Savart. A força gerada depende da corrente elétrica que circula pelas bobinas do trilho e da altura  $z(t)$  do trem em relação ao trilho. A força de levitação é expressa como:

$$F_{\text{lev}} = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A \cdot I(t)^2}{2 \cdot z(t)^2}$$

onde:

- $\mu_0$  é a permeabilidade do vácuo,
- $N$  é o número de espiras do eletroímã,
- $A$  é a área da seção transversal do ímã,
- $I(t)$  é a corrente que passa pelo ímã,
- $z(t)$  é a altura do trem.

## 2.2 Propulsão Linear

A propulsão do trem é realizada por meio de motores lineares síncronos que utilizam campos magnéticos variáveis para gerar movimento. O campo magnético variável ao longo dos trilhos interage com os ímãs supercondutores no trem, gerando uma força de propulsão  $F_{\text{prop}}$  que move o trem ao longo do trilho. Esta força é dada por:

$$F_{\text{prop}} = \frac{B \cdot I(t) \cdot L \cdot \sin(\omega t)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda}$$

onde:

- $B$  é a densidade do fluxo magnético,
- $L$  é o comprimento do motor linear,
- $\omega$  é a frequência angular do campo magnético,
- $\lambda$  é o comprimento de onda do campo magnético.

## 2.3 Arrasto

O arrasto é uma força que se opõe ao movimento do trem e é proporcional ao quadrado da velocidade  $v(t)$ . Essa força é modelada pela seguinte equação:

$$F_{\text{resist}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v(t)^2$$

onde:

- $\rho$  é a densidade do ar,
- $C_d$  é o coeficiente de arrasto,
- $A$  é a área frontal do trem.

Essa resistência é um fator importante a ser considerado, especialmente em altas velocidades, pois impacta diretamente a eficiência energética e a necessidade de força propulsora.

### 3 Controle do Sistema

Para garantir a estabilidade do trem e manter a altura  $z(t)$  dentro de uma faixa desejada, é necessário um sistema de controle ativo. O controle ativo ajusta a corrente  $I(t)$  para corrigir desvios na altura do trem. Um controlador proporcional-derivativo (PD) é utilizado para essa finalidade:

$$\frac{dI(t)}{dt} = -k_p(z(t) - z_{\text{ref}}) - k_d \frac{dz(t)}{dt}$$

onde:

- $k_p$  é o ganho proporcional,
- $k_d$  é o ganho derivativo,
- $z_{\text{ref}}$  é a altura de referência desejada.

Esse controlador garante que qualquer desvio na altura seja rapidamente corrigido, mantendo o trem estável durante a operação.

### 4 Resultados

Os resultados das simulações numéricas são apresentados para ilustrar o comportamento dinâmico do trem Maglev. As variáveis de interesse, como posição, velocidade, altura e corrente, são exibidas em gráficos que mostram a evolução dessas quantidades ao longo do tempo. Esses resultados confirmam a eficácia do controle ativo e a influência das forças físicas modeladas no desempenho do sistema.

### 5 Discussão

Os resultados obtidos demonstram a importância do controle ativo na manutenção da altura do trem e na sua estabilidade durante o movimento. A análise da resistência do ar mostra que ela é um fator limitante para a velocidade do trem, requerendo um balanceamento cuidadoso entre a força de propulsão e a resistência. Comparações com outros modelos encontrados na literatura indicam que a modelagem desenvolvida neste estudo é consistente com as teorias estabelecidas e oferece uma base sólida para futuros aprimoramentos.

## 6 Conclusão

Este estudo apresentou uma modelagem detalhada do funcionamento de um trem Maglev, abordando as principais forças envolvidas e a dinâmica do sistema. As equações diferenciais desenvolvidas fornecem uma base sólida para simulações que podem ser utilizadas em futuras pesquisas e otimizações do sistema. A contribuição deste trabalho está na integração das forças físicas e controle ativo, oferecendo uma visão completa do comportamento dinâmico de trens Maglev.

## 7 Referências Bibliográficas

1. Cao, B., et al. "Dynamics Modeling and Control for Maglev System." *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 95, no. 3-4, 2019, pp. 647-664.
2. Tajima, H., et al. "Magnetic Levitation Technology of the High-Speed Superconducting Maglev." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 3, 2016, pp. 1-5.
3. Gieras, J.F., Piech, Z.J. *Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems*. CRC Press, 2000.

## 8 Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao grupo de pesquisa em sistemas magnéticos da Universidade XYZ pelo apoio técnico e às agências de fomento pela concessão de bolsas de estudo.

## 9 Anexos

### 9.1 Código Fonte

O código Python utilizado para simulações pode ser acessado através do seguinte link: <https://github.com/Diegomendes0706/maglev/blob/master/maglev.py>.