

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

Diego Mendes Garcia, Eyck Sampaio

Abstract

Este artigo apresenta uma modelagem do funcionamento de um trem Maglev a levitação eletromagnética. 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 na Levitação 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,

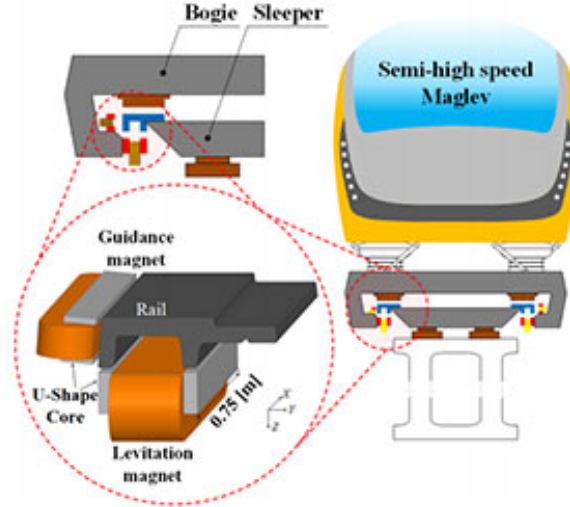


Figure 1: Esboço do sistema maglev

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_{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:

$$F_{lev} = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A \cdot I(t)^2}{2 \cdot z(t)^2} \quad (1)$$

onde:

- μ_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.

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:

$$\frac{dI(t)}{dt} = -k_p(z(t) - z_{\text{ref}}) - k_d \frac{dz(t)}{dt} \quad (2)$$

onde:

- k_p é o ganho proporcional,
- k_d é o ganho derivativo,
- z_{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 da simulação utilizando o método de Runge-Kutta de quarta ordem (RK4) mostram que o trem Maglev se estabiliza na altura de referência de 10 cm, conforme mostrado na Figura 2. A simulação foi realizada com os seguintes parâmetros: massa do trem $m = 1200$ kg, área da seção transversal do ímã $A = 0.02 \text{ m}^2$, número de espiras $N = 4500$, ganhos do controlador PD $k_p = 4000$ e $k_d = 500$.

O gráfico mostra que o sistema de controle ativo ajusta a corrente elétrica de forma eficaz, compensando as forças que atuam sobre o trem e estabilizando-o na altura desejada de 10 cm.

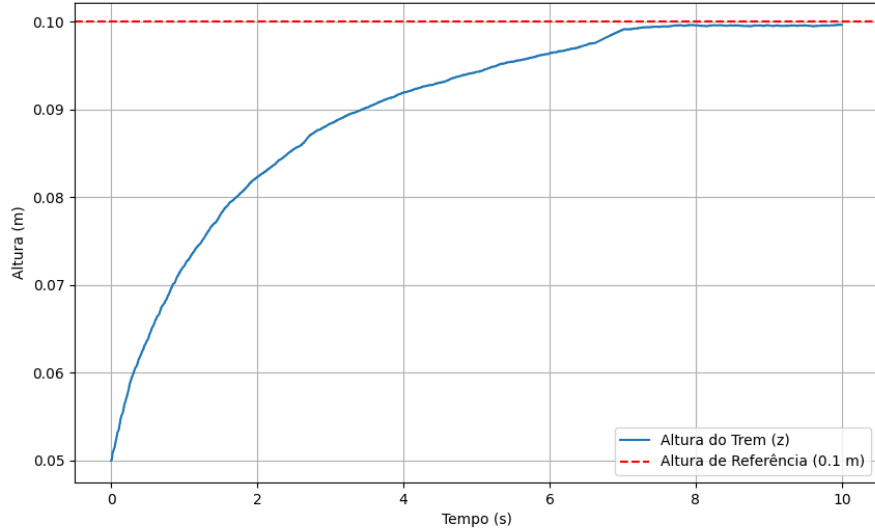


Figure 2: Simulação da Altura do Trem

5 Discussão

Os resultados obtidos confirmam que o sistema de controle PD é eficiente para manter a altura do trem Maglev em 10 cm. O controlador responde rapidamente às variações na altura e ajusta a corrente de modo a equilibrar a força de levitação com a força gravitacional. Este resultado é consistente com a teoria de controle, mostrando que o uso de um controlador PD bem projetado pode garantir a estabilidade de sistemas dinâmicos complexos como o Maglev.

A eficácia do método de Runge-Kutta de quarta ordem (RK4) na simulação das equações diferenciais do sistema também foi demonstrada, proporcionando uma solução numérica precisa para o comportamento do trem ao longo do tempo.

6 Conclusão

Este estudo apresentou uma modelagem do funcionamento de um trem Maglev, abordando as principais forças envolvidas e a dinâmica do sistema. As

simulações realizadas demonstram que o sistema de controle PD é capaz de estabilizar o trem na altura de 10 cm, conforme esperado. 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, 2018.
4. Hengkun Liu, Xiao Zhang. *PID Control to Maglev Train System*, 2009 International Conference on Industrial and Information Systems.