

ESTUDO DA ESTABILIDADE DE UMA ESTRUTURA COM LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

Letícia Gomes, gomes.leticia1@aluno.ifsp.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Acesso Heitor de Souza Pinheiro S/N, Araraquara, SP, 14801-600 ~1,2 km

Fábio Roberto Chavarette, fabio.chavarette@unesp.br

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Rua Prof. Francisco Degni S/N, Araraquara, SP, 14800-060 ~3,6 km

Resumo. Nesse trabalho abordou-se o estudo da estabilidade de um trem de levitação magnética. Por meio de um modelo numérico de equações diferenciais ordinárias foi desenvolvido um banco de dados através do método runge-kutta de 4ª ordem simulando os comportamentos estáveis e instáveis do modelo do trem de levitação magnética. Através do uso desse banco de dados, foi realizada uma análise dos comportamentos dinâmicos e desenvolveu-se o diagrama de estabilidade. O resultado demonstrado nesse trabalho demonstra ser possível determinar as condições em que o trem MAGLEV é funcional.

Palavras chave: Dinâmica não-linear. MAGLEV. Estabilidade.

Abstract. In this work, the study of the stability of a magnetic levitation train was approached. Using a numerical model of ordinary differential equations, a database was developed using the 4th order runge-kutta method, illustrating the stable and unstable behavior of the magnetic levitation train model. Through the use of this database, an analysis of the dynamic behaviors was carried out and the stability diagram was developed. The result demonstrated in this work demonstrates that it is possible to determine the conditions under which the MAGLEV train is functional.

Keywords: Non-linear dynamics. MAGLEV. Stability.

1. INTRODUÇÃO

Um dos sistemas de engenharia que mais chamam a atenção de pesquisadores é a chamada tecnologia de trens com levitação magnética, mais conhecido como MAGLEV [7]. A principal razão de apresentarem grande interesse nestes sistemas deve-se ao fato de que demonstram ser uma importante alternativa de transporte, pois com a tecnologia empregada o torna mais rápido, confortável, seguro e ajuda com o descongestionamento do tráfego urbano. Logo, como é um meio de transporte, esse sistema do trem MAGLEV é considerado um sistema dinâmico, que foi estudado nesse trabalho [13].

Existem diversos tipos de métodos de levitação magnética de trens, mas neste trabalho levaremos em conta o sistema Transrapid Alemão, que possui o método de levitação eletromagnética (EML). [4] Esse sistema já é implementado na China desde 2004, e liga o Aeroporto Internacional de Pudong à Estação de Metrô de Long Yang, em Shanghai, por meio de duas vias de 30km. Esse veículo é capaz de partir do repouso até a velocidade de 300km/h em 5km [10].

Por essa razão, quando se analisa um sistema dinâmico, é importante saber se o seu comportamento é estável ou instável [1, 2]. Diante disso, realizar a classificação da estabilidade envolvendo o estudo de sistemas lineares e não lineares, de tempo contínuo ou discreto. Para isso, os métodos utilizados são os que nos possibilitam encontrar os autovalores do sistema ou de uma região em que estão no plano complexo, assim podendo definir a estabilidade do sistema [9].

Para entender melhor o porquê se analisam sistemas dinâmicos, é preciso saber o que é um. Por isso um sistema dinâmico é definido como “um conjunto de objetos agrupados por alguma interação ou interdependência, de modo que existam relações de causa e efeito nos fenômenos que ocorrem com os elementos desse conjunto.” [11].

O sistema utilizado neste trabalho é um sistema de tempo contínuo, em que o tempo t é um número real positivo e a sua evolução é determinada por uma ou mais equações diferenciais (EDO) [5,6]. Logo, é definindo esses conceitos que também é possível construir o retrato de fase do sistema, tornando possível ver os pontos de estabilidade [8].

2. METODOLOGIA

Inicialmente é preciso apresentar a descrição do modelo matemático com a finalidade de dar início as simulações da estabilidade do trem de levitação magnética - MAGLEV. Com a simulação encaminhada é possível retirar um banco de dados das condições em que o seu comportamento é estável ou instável, podendo assim fazer as análises necessárias para o seu desenvolvimento.

2.1. Modelo Matemático

Nesse caso, é considerado o modelo simplificado para sistema Alemão Transrapid [3,4], ilustrado na Figura 1. Este modelo utiliza forças magnéticas para contrabalançar as forças gravitacionais. Esse tipo de levitação acontece por meio de eletroímãs que ficam posicionados de forma estratégica em um suporte, de modo que os mesmos exercem uma força de atração nas placas ferromagnéticas instaladas na aba de uma viga do tipo T. Essa configuração permite que o trem obtenha a sustentação e estabilidade lateral. [3,4]

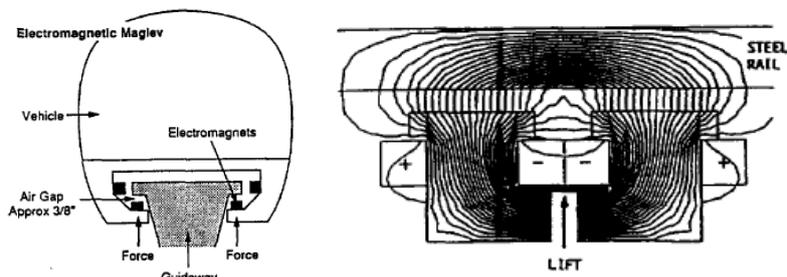


Figura 1. Sistema Alemão Transrapid

As equações diferenciais de estado simplificadas para o veículo de levitação magnética e seu trilho ilustrados na Figura 1 são definidas a seguir [3,4]:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{z(V_i - Rx)}{L_0 Z_0} + \frac{xy}{z} \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dt} = g - \frac{L_0 Z_0 x^2}{2mz^2} \quad (2)$$

$$\frac{dz}{dt} = y \quad (3)$$

onde as variáveis de estado x , y , e z representam a corrente da bobina no ímã, a velocidade vertical do veículo, e o ganho vertical entre o caminho guia e o veículo, respectivamente. O parâmetro de controle é a tensão de entrada na bobina, V_i . Os outros parâmetros são a massa do veículo, m , a resistência da bobina, R , a indutância da bobina, L_0 , o ganho vertical z_0 no equilíbrio, e a aceleração gravitacional g .

3. RESULTADOS

Primeiramente, de modo a resolver as equações diferenciais não lineares (Eq.1-3) foi feita a troca de variável, para então dar início ao processo de calcular os autovalores por meio da matriz jacobiana [5,6].

Analisou-se a estabilidade estrutural do sistema por meio dos autovalores encontrados e, fazendo-se variar a tensão inicial aplicada e tomando os demais parâmetros como fixos foram obtido um diagrama de estabilidade [9].

Os parâmetros e as condições iniciais utilizadas estão presentes na Tab.1 apresentada abaixo.

V_i	m	R	L_0	Z_0	g
A	10000	1	0.1	0.01	9.8

Tabela 1. Parâmetros utilizados

Observação: A = parâmetro variado de -100 a 300
{ Volt}
Vi = tensão de entrada da bobina { Pa}
m = massa do veículo { kg}

R = resistência da bobina { ohm}
L₀ = indutância da bobina { henry}
Z₀ = ganho vertical no equilíbrio
g = aceleração gravitacional { m/s² }

Para dar continuidade nas simulações foi preciso pegar as equações iniciais e manipular uma troca de variáveis, para então montar a matriz Jacobiana e continuar com as simulações necessárias. Com os valores dos autovetores dados pela matriz é possível analisar a estabilidade estrutural do sistema [9]. Por essa razão $\dot{X} = x_1, \dot{Y} = x_2, \dot{Z} = x_3$.

Dado os parâmetros, foi desenvolvido uma programa para entender como se comporta o funcionamento do trem

MAGLEV com as condições impostas, e com isso foi gerado um plano de fase em função de x_1, x_2 e x_3 para cada valor de tensão inicial ($-100 \leq Vi \leq 0$.)

Utilizando os parâmetros da Tabela1, pôde-se executar o algoritmo desenvolvido utilizando o método de Runge-Kutta de 4ª ordem [6] para o sistema do trem de levitação magnética, por meio do software MATLAB, a fim de fazer as análises dos gráficos gerados. A seguir temos algumas imagens para ilustrar o plano de fase gerado para as tensão de - 100 (Fig.2), -90 (Fig.3) e -80 (Fig.4). Podemos notar as diferenças causadas quando muda-se a condição inicial.

Podemos notar nessas imagens que a maior mudança ocorrida é no estado $-x_2$ que representa a velocidade vertical do veículo, por isso é preciso fazer as análises da estabilidade, com a finalidade de evitar riscos durante o funcionamento.

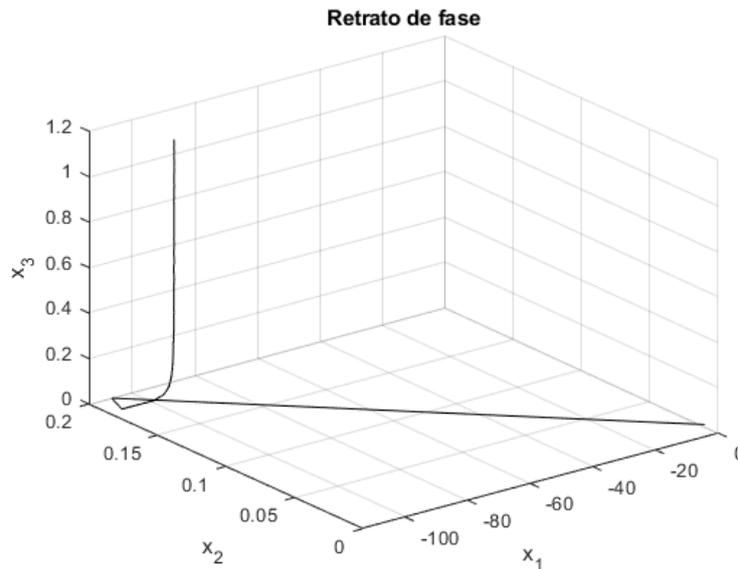


Figura 2. Retrato de fase Vi = -100

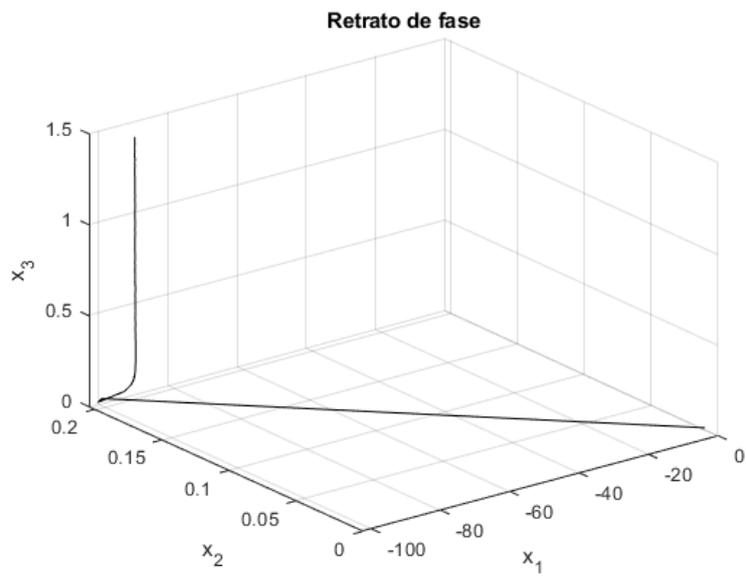


Figura 3. Retrato de fase $V_i = -90$

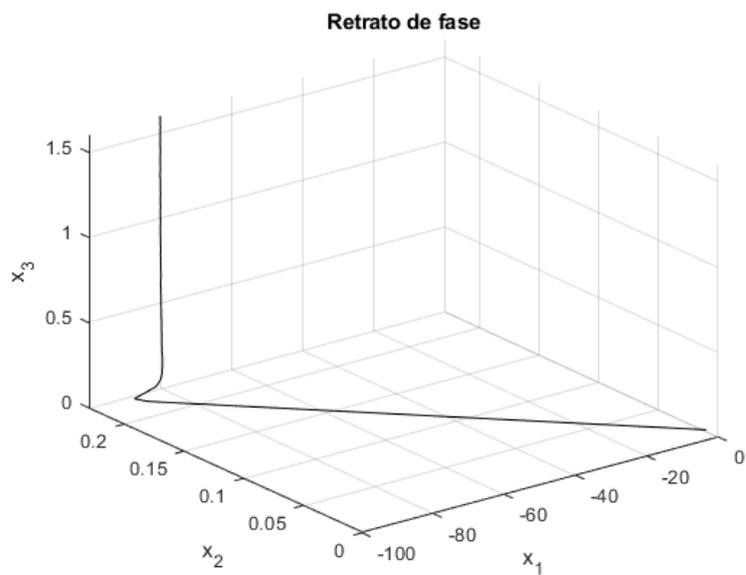


Figura 4. Retrato de fase $V_i = -80$

Ao gerar o diagrama de estabilidade pode-se analisar que o trem MAGLEV é estável (°) apenas quando a tensão inicial (parâmetro variado) aplicada varia de -100 a 0. (Fig.5) e instável (*). Dado essa análise, foi gerado gráficos que apresentam a magnitude em função de \dot{X} , \dot{Y} , \dot{Z} para entender melhor o comportamento do mesmo nessas condições mostradas. (Fig.6)

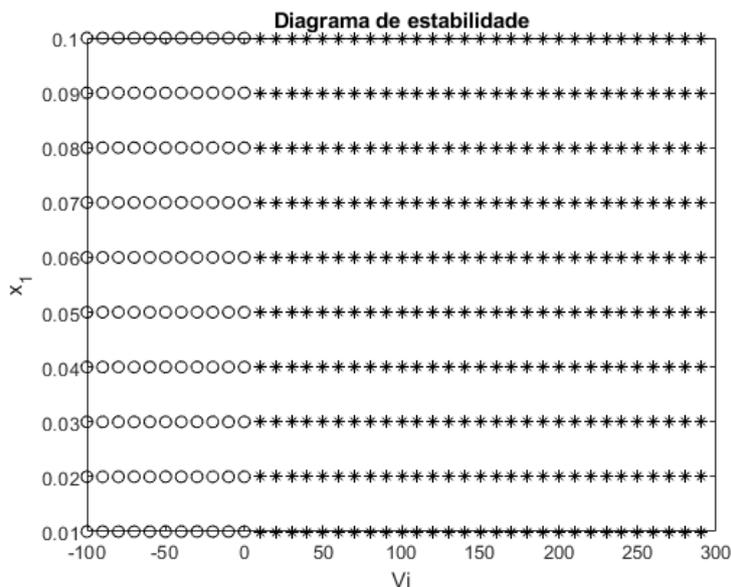


Figura 5. Diagrama de Estabilidade do MAGLEV

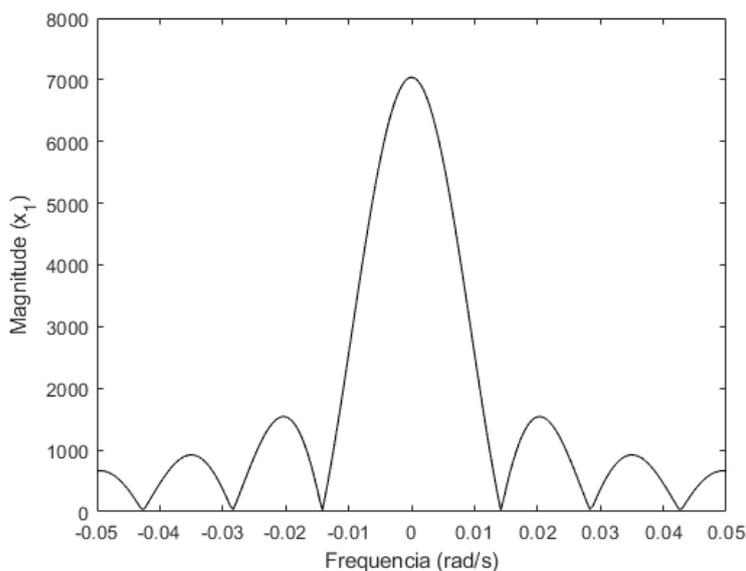


Figura 6. Magnitude(x_1) X frequência(rad/s) quando $V_i = -100$

Assim como esses gráficos, foram gerados outros idênticos para cada variação da tensão inicial (V_i), ou seja, para os 11 casos têm situações parecidas, mas com valores diferentes. Com a finalidade de realizar a análise física desses dados e tabelar os mesmos.

Analisando a figura 6, pode-se inferir que não se aplica o caos, visto que o caos verifica-se pelo pico de frequência acima de 3, e nesse caso encontra-se apenas 1, garantindo a estabilidade do sistema do trem MAGLEV. [12]

Para tabelar os dados, visto que no gráfico temos muitos picos, foi realizado uma modificação na programação para gerar os máximos e mínimos e facilitar a análise do comportamento.

$x_1 = \text{CORRENTE DA BOBINA [A]}$	
pico min	pico máx
-113,8702615001110	0,0100000000000
-102,7910953377430	0,0100000000000
-91,5618662419823	0,0100000000000
-80,2082850795490	0,0100000000000
-68,8005588324686	0,0100000000000
-57,3446280721441	0,0100000000000
-45,8759909765081	0,0100000000000
-34,4102653996012	0,0100000000000
-22,9315465182777	0,0100000000000
-11,4664303279964	0,0100000000000
-8,4121190566613	0,0100000000000

Tabela 2. Picos em função de x_1

$x_2 = \text{VELOCIDADE [mm/s]}$	
pico min	pico máx
0,0100000000000	0,1940067690479
0,0100000000000	0,2043893489315
0,0100000000000	0,2297875095783
0,0100000000000	0,2512532484151
0,0100000000000	0,2686516861128
0,0100000000000	0,2826598058845
0,0100000000000	0,2936963022046
0,0100000000000	0,3020368213154
0,0100000000000	0,3078736953352
0,0100000000000	0,3113284560769
0,0100000000000	0,3124760292802

Tabela 3. Picos em função de x_2

$x_3 = \text{GANHO VERTICAL [mm]}$	
pico min	pico máx
0,0100000000000	1,1960234171619
0,0100000000000	1,4221028435646
0,0100000000000	1,6015114170041
0,0100000000000	1,7469394178784
0,0100000000000	1,8652004507366
0,0100000000000	1,9606284891566
0,0100000000000	2,0359281246962
0,0100000000000	2,0928935029598
0,0100000000000	2,1327874996256
0,0100000000000	2,1564103839107
0,0100000000000	2,1642593787599

Tabela 4. Picos em função de x_3

Com base nessas tabelas (Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4) pode-se inferir que o sistema não apresenta o caráter caótico, visto que a tabela apresenta dados correspondentes às situações de estabilidade do sistema. Contudo, vale lembrar que só é garantido a característica de estabilidade deste sistema de levitação magnética, quando são respeitados os parâmetros fixos e dado o parâmetro variável, sendo ele a tensão inicial, usando os valores apontados pelo diagrama de estabilidade.

4. CONCLUSÃO

Como o trem MAGLEV tem como objetivo o transporte das massas, é de extrema importância que nós como pesquisadores garantirmos que o trem não entre em caráter de caos (instabilidade), pois caso isto ocorra o próprio entra em colapso e pode causar acidentes sérios.

Por essa razão, conclui-se que de acordo com os dados analisados até o presente momento, percebe-se que o trem bala MAGLEV tem a capacidade de tornar seu movimento estável dado os parâmetros de condições iniciais certos para alcançar tal objetivo. Uma observação é que devido a não-linearidade das equações base do sistema, ele é extremamente sensível às condições iniciais. Portanto, mantendo-se os parâmetros iguais aos apresentados nesse trabalho e variando-se as condições iniciais levemente, podem-se obter condições melhores de estabilidade.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UNESP – Univ. Estadual Paulista, Instituto de Química e ao IFSP – Campus Araraquara pelo suporte técnico e acadêmico. Os autores também agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Processo Nº 2022/10282-2 pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- [1] BLANCHARD P., DEVANEY R.L. e HALL, G.R., Differential Equations (Brooks-Cole), 1998.
- [2] BOYCE, W. E.; DIPRIMA, R. C. Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno. 9. ed. [S.l.]: LTC Editora, 2010.
- [3] CABRAL, T. D. F., Dinâmica e Controle de um Sistema MAGLEV. Tese (Pós-graduação) - Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP, 2015
- [4] DAVID, E. O futuro das estradas de ferro no Brasil. 1. ed. [S.l.]: Portifolium, 2009.
- [5] FIEDLER-FERRARA N. e PRADO C. P. C., Caos – Uma introdução, Editora Edgard Blucher, 1994. [6] FRANCO, N. M. B., Cálculo Numérico, Editora Pearson, 2006.
- [7] KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. Frankfurt, 2013.
- [8] KELLEY A., The stable, center-stable, center, center-unstable, unstable manifolds. J. Diff. Equat. 3, 546-570, 1967. [9] MONTEIRO, L.H.A, Sistemas Dinâmicos. São Paulo, Brasil, Editora Livraria da Física, 2002.
- [10] MOTTA, E. S. Otimização de trilha magnético de um sistema de levitação supercondutora para veículo Maglev. Tese (Doutorado)—Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Novembro 2011.
- [11] ORSINI, L.Q., Introdução aos Sistemas Dinâmicos, Editora Guanabara Dois, 1985.
- [12] SAVI, M.A., Dinâmica Não-Linear e Caos. Rio de Janeiro, Brasil, Editora e-papers, 2006
- [13] ZHAO, F.; THORNTON, R. Automatic design of a maglev controller in state space. p. 2562–2567, 1992.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.