



MODELAGEM DE SISTEMA DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA POR ABORDAGEM ANALÍTICA BASEADA NO CONCEITO DE CIRCUITOS MAGNÉTICOS

Jefferson S. Costa – souza.jefferson91@gmail.com

Cleison D. Silva – cleison@ufpa.br

Raphael B. Teixeira – raphaelbt@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Campus de Tucuruí

Rodovia BR 422. Km 13, Canteiro de Obras da UHE, Vila Permanente

68455-655 – Tucuruí – Pará

Resumo: *Este trabalho descreve a modelagem dinâmica de um protótipo didático de levitação magnética, a fim de que seja possível utilizá-lo em aulas didáticas das disciplinas de controle ministradas no Campus Universitário de Tucuruí da UFPA, permitindo ao aluno projetar e testar técnicas de controle, tornando o ensino de engenharia de controle mais prático e objetivo. O sistema consiste em fazer uma massa de material ferromagnético levitar em pleno ar somente com a aplicação de uma força magnética gerada por um eletroímã. Utiliza-se um tratamento analítico para identificação da dinâmica de levitação magnética baseada no conceito de circuitos magnéticos, com finalidade de estimar um modelo matemático que explique a força magnética sobre a massa flutuante. Também se utilizou de alguns ensaios de resposta em frequência e estáticos para obtenção do modelo individual de outros elementos da bancada MAGLEV. A validação do modelo é realizada, comparando dados simulados com dados obtidos diretamente na bancada, no intuito de verificar se o modelo representa o comportamento da bancada de forma adequada.*

Palavras-chave: *Levitação Magnética, Modelagem de Sistemas, MAGLEV*

1. INTRODUÇÃO

O uso de protótipos didáticos para auxiliar em disciplinas teóricas e laboratoriais vem se tornando uma grande ferramenta na busca da melhoria da abordagem didática no ensino de engenharia (NEVES *et al.*, 2004). A aplicação desta metodologia na Faculdade de Engenharia Elétrica do Campus Universitário de Tucuruí da UFPA tem gerado resultados positivos para os alunos de graduação. Visto que contribui didaticamente para as aulas e tem feito surgir vários trabalhos de pesquisa e iniciação científica, tais como (CABRAL, 2010), (CASTRO, 2010), (MILHOMEN, 2010).

Um dos protótipos que tem contribuído para estes resultados é bancada didática MAGLEV (do inglês *Magnetic Levitation*). Uma planta clássica da engenharia de controle que consiste em fazer uma massa de material ferromagnético levitar. A bancada foi construída no intuito de permitir que alunos de graduação do curso de engenharia elétrica pudessem verificar a aplicação da teoria de controle clássica em uma planta real. Uma das características da bancada desenvolvida, é que esta apresenta três módulos de controle, um para controle

Realização:



Organização:





digital, outro para controle analógico, e o terceiro, possibilita que um circuito de controle externo possa ser acoplado a bancada. Logo circuitos controladores desenvolvidos externamente por alunos podem ser testados na bancada.

Embora os dois primeiros módulos permitam o desenvolvimento de experimentos com a bancada de controle, os algoritmos de controle são fixos. Apenas a sintonia dos controladores é permitida aos usuários. Esta sintonia, por sua vez, é realizada empiricamente, uma vez que não há uma representação matemática confiável para o sistema. Isso impede, por exemplo, que um circuito controlador externo possa ser projetado, uma vez é necessário o conhecimento do modelo matemático para possibilitar o projeto de controladores lineares. Este fato limita o potencial da bancada para ser utilizada em sala de aula.

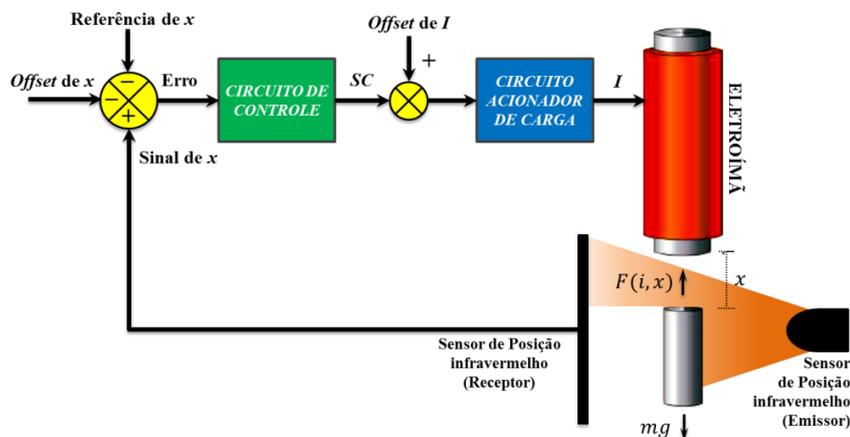
Tendo em vista o potencial pertencente à bancada MAGLEV, este trabalho descreve a modelagem dinâmica deste sistema de levitação. O objetivo é possibilitar a utilização deste protótipo em aulas das disciplinas de sistemas de controle. Assim cada discente poderá projetar técnicas de controle clássicas para testar em um sistema real, o MAGLEV. E também, possibilitar a utilização de recursos extras, como projetos de compensadores e análises da dinâmica via *software*. O que pode tornar o ensino de sistemas de controle mais atrativo para os alunos. Uma vez que o uso de um processo real instiga a curiosidade e fomenta a busca por informação, o que reforça a necessidade de integrar conhecimentos de diversas áreas do curso de graduação.

2. BANCADA DIDÁTICA MAGLEV

A bancada didática MAGLEV é uma planta de levitação magnética totalmente desenvolvida na Universidade Federal do Pará no Campus Universitário de Tucuruí. O objetivo foi o de consolidar conceitos de disciplinas do curso de engenharia elétrica. É constituída basicamente por: um eletroímã, responsável por gerar a força magnética sobre o corpo que se deseja levitar; um sensor ótico, que detecta a posição da massa; um circuito de controle que, baseado na posição do objeto, calcula o sinal de corrente a ser aplicado na bobina para correção da posição; e por fim, um circuito acionador de carga, que basicamente eleva a potência do sinal de controle. Uma visão frontal da bancada é mostrada na “Figura 1a” e na “Figura 1b” é mostrado um diagrama de blocos que simplifica o funcionamento do sistema.



(a)



(b)

Figura 1 – (a) Bancada MAGLEV e (b) Diagrama funcional da bancada



No diagrama de “Figura 1b” se pode destacar a inserção de *offsets* de posição e corrente. Estes *offsets* representam os pontos de equilíbrio do sistema.

Ao estudar o funcionamento da bancada MAGLEV foi possível notar que alguns elementos poderiam ser estudados de forma isolada. Assim cada elemento constituinte da bancada pode ser modelado separadamente. Esta característica tornou facilitou o objetivo de alcançar uma representação matemática para este sistema de levitação, pois permite fracionar o tratamento analítico e experimental de um sistema complexo como este.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática deste sistema de levitação terá como base o estudo individualizado de alguns elementos da bancada. E uma forma simples encontrada para representar o modelo geral é o tratamento na forma de diagrama de blocos, onde cada bloco representa o modelo de um elemento anteriormente isolado.

3.1. Circuito Acionador de Carga

O circuito acionador de carga aumenta a potência do sinal de controle. Para isso converte o sinal de controle somado ao *offset* de corrente (valores em tensão) em um sinal de corrente a circular pela bobina, conforme pode ser visto na “Figura 1b”. Assim, eletricamente, o circuito acionador também engloba o eletroímã. A “Figura 2” mostra o modelo elétrico para este circuito, onde é considerado o modelo em elementos concentrados para o atuador como um circuito RL série e a ligação entre o amplificador operacional (U) e o MOSFET (Q) é conhecida como conversor de tensão para corrente.

Tanto o amplificador operacional quanto o MOSFET apresentam efeitos capacitivos e/ou indutivos, então buscou-se avaliar o comportamento dinâmico do circuito por meio de um ensaio de resposta em frequência. Assim, ao variar a frequência do sinal senoidal de amplitude unitária aplicada à entrada do circuito e coletar o sinal de saída, a amplitude da corrente na bobina, é possível esboçar a curva de magnitude em função da frequência, mostrada na “Figura 3”.

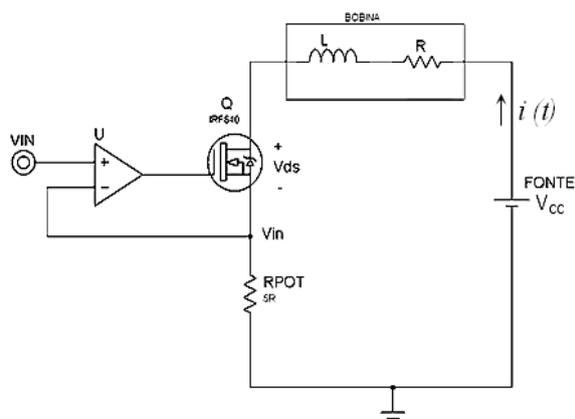


Figura 2 – Circuito acionador de carga

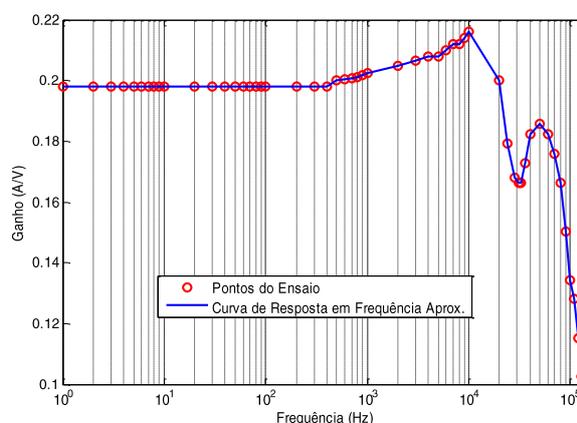


Figura 3 – Resposta em frequência (acionador)

O tipo de comportamento verificado na “Figura 3” geralmente implica uma representação complexa na forma de função de transferência. No entanto esta representação somente é necessária para frequências superiores a 1kHz. Uma vez que para frequências inferiores, a



curva é praticamente constante. Devido à atenuação de resposta por parte da dinâmica de levitação magnética, a frequência de trabalho global não ultrapassa 1kHz. Logo o comportamento do circuito acionador de carga pode ser considerado constante na faixa de frequências na qual o sistema opera, portanto a função de transferência do circuito pode ser dada pela “Equação (1)”.

$$\frac{I(s)}{U(s)} \approx 0,2 A/V \quad (1)$$

3.2. Malha de Levitação Magnética

A “Figura 4” mostra o diagrama de forças que agem sobre o corpo flutuante.

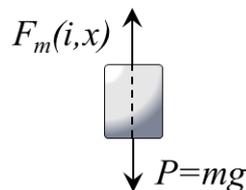


Figura 4 – Diagrama de força sobre o corpo flutuante

Ao aplicar a segunda lei de Newton no diagrama de forças da “Figura 4”, obtém-se a “Equação (2)”.

$$m\ddot{x} = mg - F_m(i, x) \quad (2)$$

De acordo com (SADIKU, 2004), a força magnética pode ser determinada calculando a variação da energia magnética entre a situação em que o corpo está colado ao núcleo da bobina e quando são separados a uma determinada distância de entreferro x . O entreferro é o espaço de ar entre o núcleo da bobina e a borda superior do cilindro, como pode ser visto na “Figura 1”. Ao supor que a dispersão do fluxo magnético no núcleo da bobina e no cilindro pode ser desprezada, a força magnética pode ser calculada na forma da “Equação (3)”. Onde S_g representa a área das linha de fluxo magnético no entreferro, B_g é a densidade de fluxo magnético no entreferro e μ_0 é a permeabilidade magnética do entreferro que é aproximadamente igual a do ar.

$$F = \frac{S_g B_g^2}{2\mu_0} \quad (3)$$

Uma vez que apenas o termo B_g não é conhecido, o modelo da força pode ser determinado ao tratar o sistema por meio da abordagem de circuitos magnéticos. O que consiste basicamente em analisar o sistema de forma análoga a um circuito elétrico. No qual o fluxo magnético é visto como corrente elétrica. Assim as mesmas leis e princípios de circuitos elétricos podem ser utilizados. O fluxo é equivalente à corrente elétrica, os meios por onde este flui são relutâncias e a fonte é dada pelo produto da corrente com o números de enrolamentos da bobina ($\mathcal{F} = NI$), chamada de força magnetomotriz.



Na “Figura 5a” é ilustrado o fluxo magnético no sistema de levitação da bancada MAGLEV. Observa-se que o espraiamento das linhas de fluxo no entreferro é considerado. O que representa o aumento da área S_g do fluxo magnético no entreferro. A “Figura 5b” mostra o circuito magnético equivalente que considera as relutâncias do núcleo da bobina (\mathcal{R}_{l_1}), do entreferro (\mathcal{R}_x), do corpo flutuante (\mathcal{R}_{l_2}) e a relutância de retorno do fluxo para a bobina (\mathcal{R}_r).

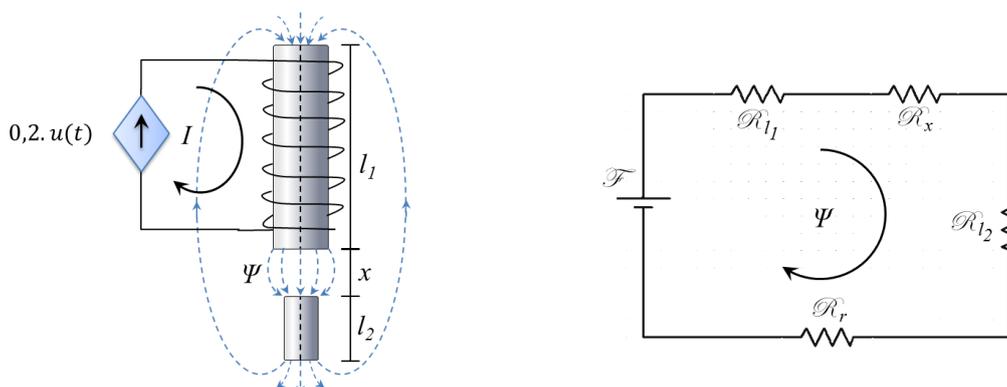


Figura 5 – (a) Malha de levitação magnética. (b) circuito magnético equivalente.

A relutância magnética \mathcal{R} pode ser dada por $l/(\mu S)$, onde l é comprimento do meio S é a área ocupada pelo fluxo magnético e μ é a permeabilidade do meio. Ao calcular a relutância de cada meio, mostrado na “Figura 4a”, pode-se aplicar a Lei de Kirchoff das tensões sobre o circuito magnético, obtendo-se a “Equação (4)”.

$$NI = \Psi \left(\frac{l_1}{\mu_N S_1} + \frac{l_2}{\mu_N S_2} + \frac{x}{\mu_0 S_g} + \frac{l_1 + l_2 + x}{\mu_0 S_r} \right) \quad (4)$$

Como idealmente a área utilizada pelo fluxo magnético para retornar à bobina é infinita, a relutância de retorno pode ser desprezada. O termo μ_N da “Equação (4)” representa a permeabilidade do núcleo da bobina e também do corpo levitante, pois são ambos feitos de ferro fundido, e de acordo com (EDMINISTER, 1985), a permeabilidade deste material é aproximadamente igual a $\mu_N = 4,52297 \cdot 10^{-4} \text{ Wb/Am}$.

A densidade de fluxo magnético em cada meio é diferente, no entanto o fluxo magnético é o mesmo, por isso pode-se utilizar as relações lineares com o fluxo magnético para escrever a densidade de fluxo em cada meio em função da densidade B_g , assim é possível reescrever a “Equação (4)” como mostra a “Equação (5)”.

$$NI = \frac{B_g \cdot S_g \cdot l_1}{\mu_N \cdot S_1} + \frac{B_g \cdot S_g \cdot l_2}{\mu_N \cdot S_2} + \frac{B_g x}{\mu_0} \quad (5)$$

Ao isolar o termo B_g da “Equação (5)”, tem-se a relação para a densidade de fluxo que se objetiva determinar, como mostrado na “Equação (6)”.

$$B_g = \frac{I \mu_0 N}{\left[\frac{\mu_0 (l_1 S_2 + l_2 S_1)}{\mu_N S_1 S_2} S_g + x \right]} \quad (6)$$



Segundo (FITZGERALD, 2006), uma boa aproximação para área ocupada pelo fluxo magnético no entreferro pode ser dada como na “Equação (7)”, onde o termo $x_{méd}$ é o valor médio do tamanho do entreferro.

$$S_g = \pi(r_1 + x_{méd})^2 \quad (7)$$

Ao considerar que as variações de posição são muito pequenas em torno do ponto de operação configurado, o valor médio do tamanho do entreferro pode ser aproximado como o valor em milímetros x_0 correspondente ao próprio *offset* de posição, o qual é determinado na secção 3.4. Sendo assim, ao substituir a relação da densidade de fluxo da “Equação (6)” na “Equação (3)”, a força magnética pode ser dada pela “Equação (8)”, onde as constantes k e μ' são dadas pelas “Equações (9) e (10)”, respectivamente.

$$F(x, I) = \frac{kI^2}{(x + \mu')^2} \quad (8)$$

$$k = \frac{\pi\mu_0 N^2 (r_1 + x_{méd})^2}{2} \quad (9)$$

$$\mu' = \frac{\mu_0 \pi (l_1 S_2 + l_2 S_1) (r_1 + x_{méd})^2}{\mu_N S_1 S_2} \quad (10)$$

Desta forma, pode-se substituir a expressão da força magnética da “Equação (8)” na equação geral do equilíbrio de forças dada pela “Equação (2)”, resultando na “Equação (11)”. A simulação do diagrama de forças mostrado na “Equação (11)” foi realizada na forma de diagrama de blocos dinâmicos no ambiente SIMULINK/MATLAB como mostra a “Figura 6”.

$$\ddot{x} = g - \frac{kI^2}{m(x + \mu')^2} \quad (11)$$

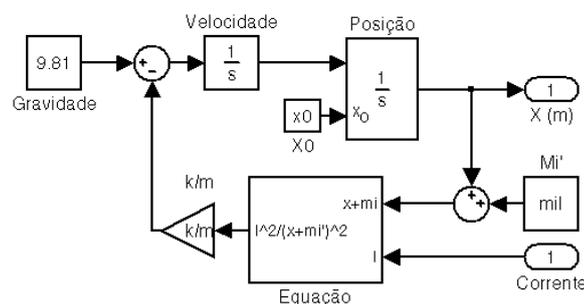


Figura 6 – Diagrama de simulação do diagrama de forças na levitação magnética

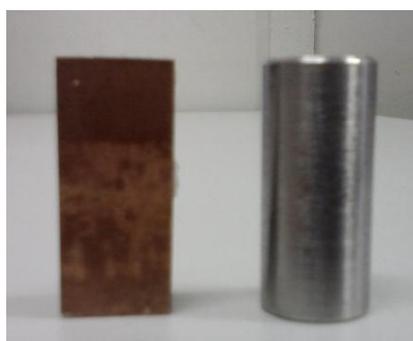
3.3. Sensor Ótico

O sensor ótico é fundamentalmente composto por um circuito emissor de luz infravermelho e um circuito receptor composto por um fototransistor. Como pode ser visto na “Figura 1b” o corpo flutuante é posto entre o emissor e o receptor. Assim a variação na



distância de entreferro implica também em uma variação na quantidade de luz que chega ao receptor e, portanto, implica em uma variação da tensão que surge no circuito receptor.

Para mapear o comportamento da transdução da posição do cilindro em tensão na saída do sensor, o cilindro foi substituído por um anteparo, cuja área de bloqueio de luz é igual à do cilindro, preso em um suporte. O suporte foi colocado na mesma posição do cilindro em relação ao sensor. Na sua extremidade inferior pequenas lâminas de papel foram adicionadas de forma que apenas a altura fosse modificada. A “Figura 7a” mostra a comparação da área lateral de bloqueio de luz do anteparo em relação ao cilindro e a “Figura 7b” mostra a disposição do anteparo preso ao suporte durante a realização do ensaio.



(a)



(b)

Figura 7 – (a) Anteparo de mesma área de bloqueio de luz do cilindro e (b) Disposição do anteparo durante o ensaio.

A posição inicial do anteparo corresponde à distância máxima em relação à bobina. Assim, uma após a outra, as lâminas foram adicionadas sob a base do suporte. A tensão respectiva para cada valor de posição assumido pelo anteparo foi registrada. Procedimento semelhante é descrito por (GRIMM, 2002). Desta forma a curva característica de tensão do sensor ótico *versus* a posição do anteparo é mostrada na “Figura 8”.

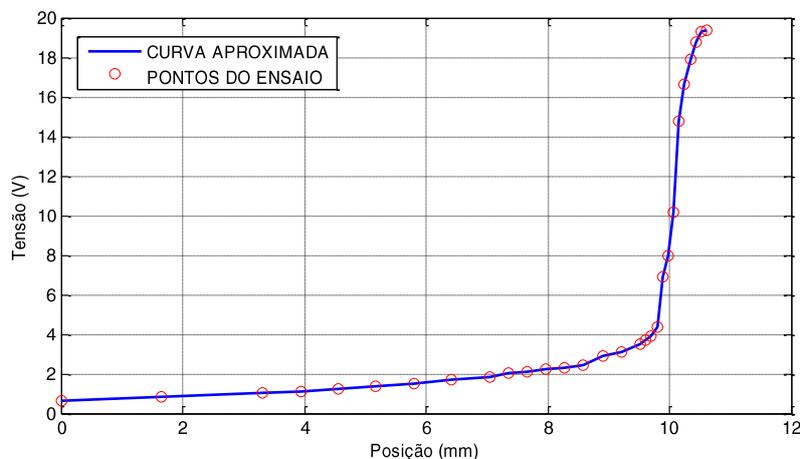


Figura 8 – Curva de tensão do sensor ótico versus posição em mm

A curva característica apresentada pela “Figura 8” mostra que o comportamento da transdução de posição em tensão é não linear e de difícil aproximação. Assim, a abordagem



adotada foi dividir a curva em duas regiões distintas. Para cada uma das regiões, foi estimada uma curva utilizando mínimos quadrados. A região no intervalo entre 0 a 9,7 mm, apresenta variações suaves de tensão em relação à posição. Para esta região a função estimada é apresentada na “Equação (12)”. A segunda região corresponde ao intervalo entre 9,7 mm a 10,6 mm, apresenta grandes variações de tensão em relação à posição. Logo a curva de transdução estimada é mostrada na “Equação (13)”.

$$v_1(x) = 0,6096e^{0,16x} + 1,1371 \cdot 10^{-9} \cdot e^{2,128x}; 0 \leq x < 9,7 \quad (12)$$

$$v_2(x) = \frac{16,1}{1 + e^{-9(x-10,07)}} + 3,425; 9,7 \leq x \leq 10,6 \quad (13)$$

A simulação da curva de transdução completa foi realizada no ambiente SIMULINK/MATLAB na forma de diagrama de blocos utilizando uma chave que seleciona a região de trabalho da curva em função do valor da posição dada em milímetros, como mostrado na “Figura 8”.

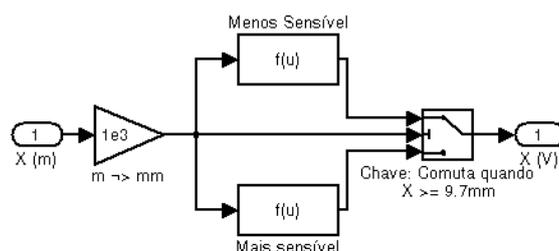


Figura 8 – Diagrama de simulação da curva de transdução de posição do sensor ótico

3.4. Pontos de Operação do Sistema MAGLEV

Os pontos de operação do sistema MAGLEV caracterizam-se por serem os valores do par corrente e posição, em que a massa permanece levitando em equilíbrio. Para determinar o ponto de operação considerado neste trabalho, foi realizado um ensaio estático. Neste a medição da corrente é realizada quando a massa permanece em uma posição conhecida e fixa.

Na bancada os parâmetros do módulo de controle analógico foram ajustados empiricamente. Os valores utilizados são mostrados na “Tabela 1”. Este módulo de controle utiliza um controlador Proporcional, Integral e Derivativo – PID. A função de transferência deste controlador é mostrada na “Equação (14)”.

Os valores de *offsets* obtidos foram 6,7V para posição e 1,09A para a corrente. O valor de 6,7V corresponde a 9,913 mm conforme pode ser observado na “Figura 8”.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{R_P}{R} \left(1 + R_D \cdot C_D \cdot s + \frac{1}{R_I \cdot C_I \cdot s} \right) \quad (14)$$

Tabela 1 – Parâmetros da via de controle analógica para medição do ponto de operação

R (kΩ)	R _P (kΩ)	R _D (kΩ)	R _I (kΩ)	C _D (nF)	C _I (μF)	Offset de I	Offset de x
10	7,7	28	5,1	330	4,7	6,7V	2,5V



3.5. Modelo do Sistema de Levitação Magnética

Os valores das constantes k e μ' da força magnética podem ser determinados por meio das “Equações (9) e (10)” utilizando os dados mostrados na “Tabela 2”. Os valores encontrados foram: $k = 9,55 \cdot 10^{-6} \text{ Nm}^2/\text{A}^2$ e $\mu' = 2,19 \text{ mm}$. Com essas constantes o modelo no ponto de equilíbrio das forças da “Equação (11)” pode ser dado numericamente. Uma representação em espaço de estados é apresentada na “Equação (15)”, onde a entrada é a corrente na bobina $I(t)$ e os estados x_1 e x_2 são, respectivamente, posição e velocidade.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= 9,81 - \frac{3,293 \cdot 10^{-4} I(t)^2}{(x_1 + 2,19 \cdot 10^{-3})^2} \end{aligned} \quad (15)$$

Tabela 2 – Parâmetros da bancada para cálculo das constantes k e μ' da força magnética

l_1 (mm)	l_2 (mm)	D_1 (mm)	D_2 (mm)	μ_N (H/m)	μ_0 (H/m)	N	S_1 (mm^2)	S_2 (mm^2)	m (g)
140	33	26	14	$4,523 \cdot 10^{-4}$	$4\pi \cdot 10^{-7}$	96	531	154	29

Uma representação linear foi obtida na forma de função de transferência da “Equação 14”. Ao aplicar linearização por série de Taylor e considerando o ponto de operação determinado na secção 3.4, como mostra a “Equação (16)”.

$$G(s) = \frac{-4,9}{(s^2 - 441,36)} \quad (16)$$

Com o modelo individual de cada elemento da bancada, é possível apresentar um modelo global do sistema na forma de diagrama de blocos. O diagrama da “Figura 9” representa o sistema de levitação magnética da bancada MAGLEV, tendo como entrada o sinal de controle e como saída a tensão correspondente ao sensor ótico.

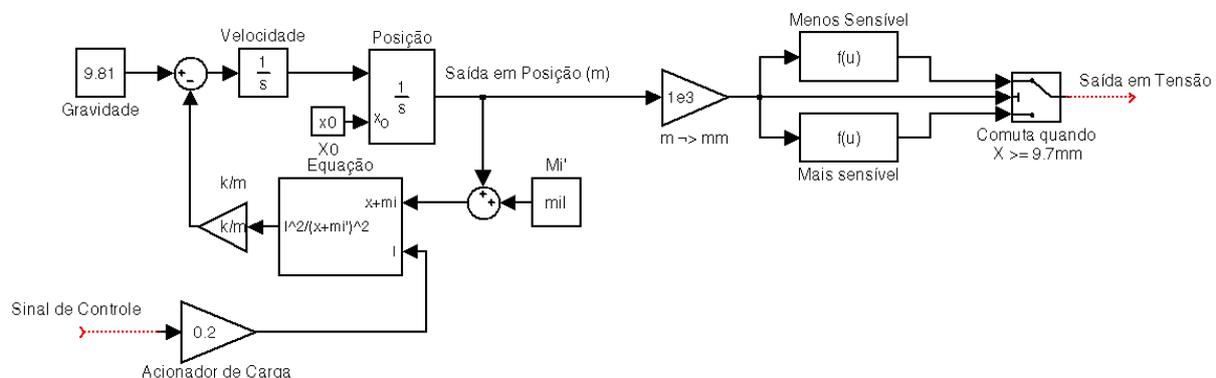


Figura 9 – Modelo do sistema de levitação magnética em diagrama de blocos



4. AVALIAÇÃO DO MODELO OBTIDO

Com o objetivo de verificar se as representações encontradas captaram a dinâmica do sistema, ensaios de validação foram realizados. Assim a “Figura 10”, itens “a”, “b” e “c” mostram a simulação do sistema confrontado com dados coletados do sistema real.

Os parâmetros do módulo de controle analógico utilizados na validação foram estão na “Tabela 1”. Desta forma foram coletadas as respostas para uma entrada degrau, senoidal e trem de pulso tanto em simulação quanto na bancada, estas resposta são mostradas em comparação para cada referência nas curvas da “Figura 10”.

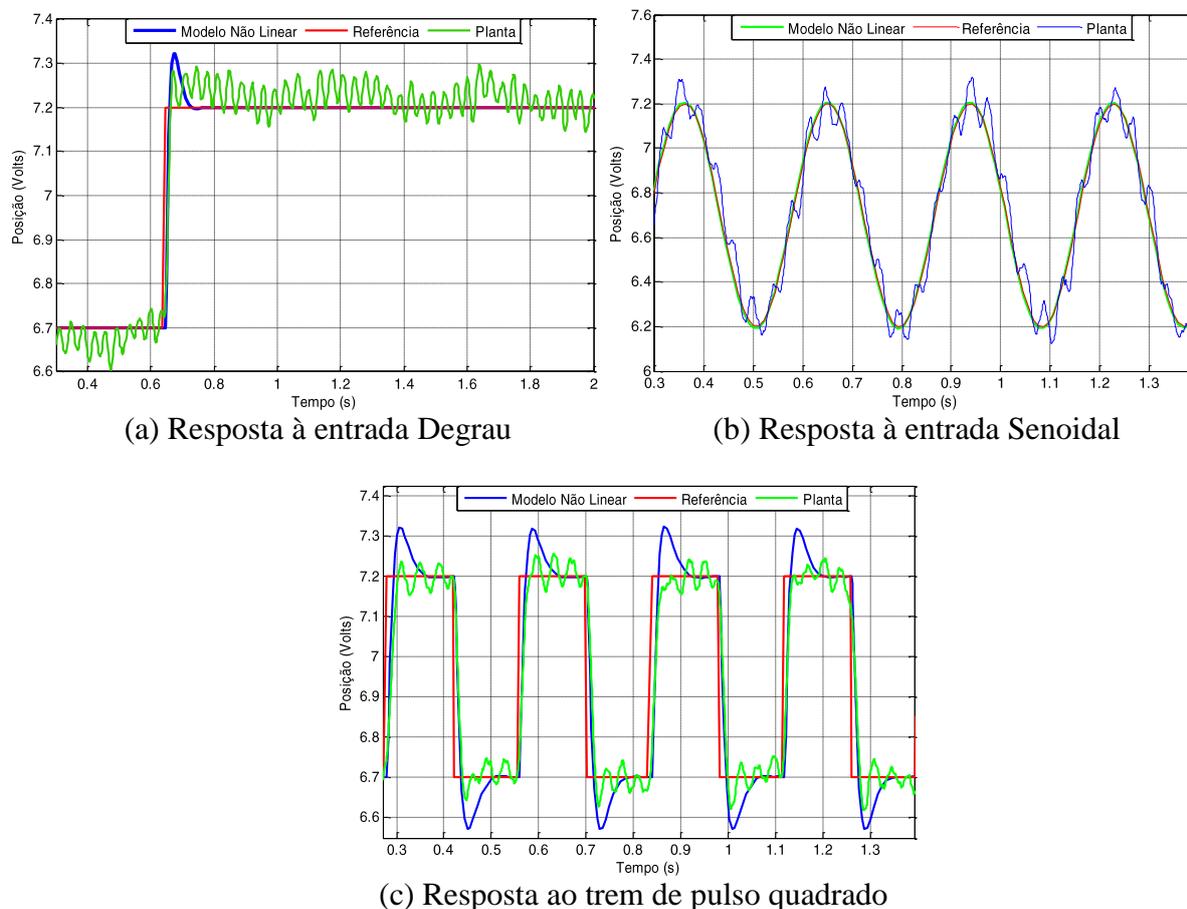


Figura 10 – Planta real e Modelo matemático em validação

Ao analisar as respostas apresentadas pelo modelo não linear mostrada na “Figura 10”, é possível verificar que o modelo obtido pelos procedimentos descritos na secção 3 representa a dinâmica da planta de forma satisfatória. Há diferenças entre as respostas que podem ser justificadas, pois simplificações na etapa de modelagem foram realizadas. Assim o modelo encontrado não é uma representação fiel do sistema real, mas pode ser classificado como uma representação adequada para a bancada MAGLEV.



5. RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O que se busca avaliar, para classificar o modelo como adequado ou não para representar o sistema real, é o grau de aproximação das respostas do modelo e da bancada. Para este caso é possível dizer que o modelo não linear representa a bancada MAGLEV de maneira satisfatória, visto que apresenta boa aproximação com o comportamento real. Com isso o objetivo de se obter uma representação matemática confiável para a bancada MAGLEV foi alcançado.

Embora haja distorções na representação do comportamento real da bancada, o grau de aproximação do modelo com os dados reais é suficiente para uma abordagem confiável em engenharia de controle. O que permite que um determinado algoritmo de controle, projetado com base neste modelo, seja implementado na bancada com grandes chances de apresentar sucesso em funcionalidade. Esta situação cria a oportunidade de inclusão de roteiro de trabalho e/ou simulações sobre a bancada MAGLEV em aulas de laboratório de sistemas de controle, bem como permite que a mesma seja utilizada como de forma complementar em disciplinas teóricas.

Em uma abordagem geral, os resultados obtidos com este trabalho contribuíram para o autor, pois possibilitou a consolidação dos conceitos de engenharia de controle e de outras disciplinas, como eletromagnetismo, circuitos elétricos, eletrônica, etc. Além disso, em ainda como resultado deste trabalho, outros discentes têm demonstrado interesse em ingressar em trabalhos de iniciação científica envolvendo protótipos didáticos disponíveis no Campus.

Os resultados positivos também puderam ser observados na própria equipe envolvida no desenvolvimento deste trabalho, uma vez que lida com os conceitos básicos que nortearam este trabalho foram quase diária. Além da consolidação destes conceitos básicos, outros conceitos importantes puderam ser conhecidos, como identificação dinâmica de sistemas, principalmente no sentido de aliar abordagem analítica ou física com a experimental que aborda os ensaios de resposta em frequência e outros ensaios estáticos. O conhecimento da utilização de vários *softwares*, como Proteus, MATLAB, PSpice, Maple, etc., necessários para o desenvolvimento deste trabalho, também foi um ganho positivo, tendo em vista que são muito utilizados não somente no ambiente acadêmico, mas também no próprio mercado de trabalho.

Em busca de aproveitar o grande potencial em pesquisa agora pertencente à bancada MAGLEV, está sendo iniciado um estudo de implementação de uma abordagem em controle chamada de controle robusto que além de considerar a dinâmica da própria bancada, seu projeto também se baseia na possibilidade de haver distúrbio na levitação, como correntes de ar, e erro na medição de posição pelo sensor, por exemplo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CABRAL, Andreia C., Desenvolvimento de Protótipo Didático para Ensino e Pesquisa: Sistema de Controle de Temperatura. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará, Tucuruí – PA, 2010.

CASTRO, Adjan M.; Modelagem e estratégias de controle digital aplicadas a um sistema de levitação magnética - MAGLEV. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará, Tucuruí - PA, 2010.



EDMINISTER, J. A.; Eletromagnetismo. 2 ed. São Paulo: ARTMED, 1985.

FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY, Charles Jr.; UMANS, Stephen D. – Máquinas Elétricas. 6 ed.; São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 2006.

GRIMM, Christian; INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁLTICA, Divisão de pós-graduação. Um controlador digitalmente assistido para um sistema de levitação magnética, 2002, 68p, Dissertação (Mestrado).

MILHOMEM, Rômulo L. Construção de uma Bancada Didática de Processo de Levitação Magnética - MAGLEV. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pará, Tucuruí - PA, 2010.

NEVES, Max R., SILVA, Orlando F., BARREIROS, José Augusto L.; Metodologia para a construção de protótipos didáticos para os cursos de controle e automação de sistemas; Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 2004.

SADIKU, Matthew N. O. Elementos de Eletromagnetismo. 3 ed. São Paulo: Bookman, 2004.

MODELING SYSTEM MAGNETIC LEVITATION FOR ANALYTICAL APPROACH BASED ON THE CONCEPT OF MAGNETIC CIRCUITS

Abstract: *This paper describes the dynamic modeling of a prototype didactic at magnetic levitation (MAGLEV). The objective is to make it available to be use in classes of control systems area. This prototype allows users to develop projects that would allow you to correlate theory and practice. Thus concepts in the control systems area are consolidated during the process of teaching and learning. The MAGLEV system consists to levitate a mass of ferromagnetic material. For do this a magnetic force is generated by an electromagnet to compensate for the weight of the mass. An analytical approach is used to modeling of the dynamics of magnetic levitation based on the concept of magnetic circuits. The purpose is to estimate a mathematical model to explain the magnetic force on the mass. Frequency response was used to obtain the model of each element of the MAGLEV system. The results are evaluated by comparing the simulated data with observe data directly on the MAGLEV system. The model obtained represents the dynamic behavior of the MAGLEV system.*

Key-words: *Magnetic levitation, Systems Modeling, MAGLEV*