

Relatório Final de Pesquisa de Iniciação Científica

Título do Projeto:

**Controle de Um Levitador Eletromagnético
com Três Graus de Liberdade**

Identificação

UERJ

Faculdade de Engenharia — FEN

Departamento de Eletrônica e Telecomunicações — DETEL

Período deste Relatório: outubro de 2006 a julho de 2007

Equipe:

Bolsista PIBIC/UERJ: Cláudia Lopes Gonçalves — Matrícula: 2004.1.02928-11

Professor Orientador: José Paulo Vilela Soares da Cunha — Matrícula: 32.640-5

Local de desenvolvimento do projeto: Laboratório de Controle e Automação do Laboratório de Engenharia Elétrica

Local e data: Rio de Janeiro, 12 de setembro de 2007

1 Introdução

Neste projeto desenvolve-se o controle de um levitador com uma plataforma triangular e três eletroímãs.

A estrutura mecânica, o acionamento dos eletroímãs e parte da instrumentação do levitador foram desenvolvidos e contruídos no Projeto de Graduação (Silva, Cutin & Machado 2001).

O sistema utilizado para controlar o levitador, desenvolvido no Projeto de Graduação (Silva et al. 2001), não era rápido o suficiente para levitar a plataforma triangular nos três graus de liberdade (os três eletroímãs funcionando simultaneamente).

Este projeto visa o aperfeiçoamento do projeto anterior, no qual será implantado um circuito que faça o controle dos eletroímãs e que o sistema de controle seja capaz de manter a plataforma triangular equilibrada sujeita à perturbações externas, respeitando-se os limites disponíveis para o controle.

O trabalho está sendo realizado em um grau de liberdade, com a finalidade de se obter o controle deste, para posteriormente ser aplicado aos três graus de liberdade.

2 Descrição do Projeto

O Levitador Eletromagnético, apresentado na Figura 1 possui três eletroímãs em forma de "E", com núcleo de ferro-silício e enrolamento no centro, de fio de cobre esmaltado. A plataforma triangular foi construída em acrílico e em cada vértice há uma lâmina retangular de material ferromagnético, que são os pontos de atuação. A medição da posição vertical

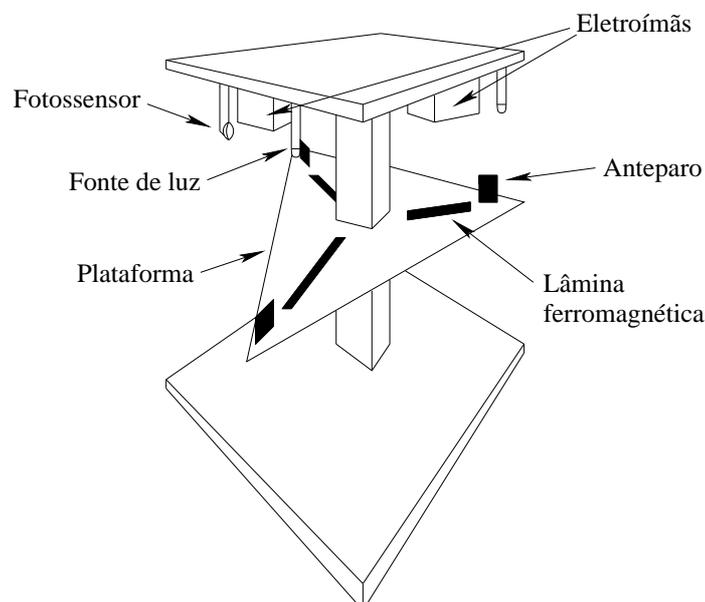


Figura 1: Esquema físico do levitador eletromagnético.

de cada vértice da plataforma é feita por fotossensores (fototransistores) e fontes de luz (lâmpadas incandescentes), no qual um anteparo opaco obstrui a passagem de luz, alterando o fluxo luminoso que incide no fotossensor.

Considerou-se somente o controle da posição vertical da plataforma. Os movimentos de rotação e translação no plano horizontal, foram reduzidos pela implementação de um eixo vertical que passa pelo centro da plataforma. Portanto, esses movimentos não interferem significativamente no posicionamento da plataforma.

Quando o corpo sobe e começa a obstruir a passagem da luz, a corrente que passa no eletroímã diminui, fazendo com que a força magnética também diminua e o corpo comece a cair, devido à gravidade. Entretanto, ao começar a cair, a base do fotossensor torna a ficar mais iluminada, aumentando a corrente no eletroímã e, assim, atraindo o corpo novamente. Este é o princípio de funcionamento do levitador. Quando o sistema de controle em malha fechada for ajustado adequadamente, o corpo estabilizará.

Inicialmente neste projeto, será implantado um circuito que controle um único eletroímã do levitador, tomando como base o modelo matemático de atuação e o posicionamento da plataforma, de acordo com a distância do vértice da plataforma a ser levitada ao eletroímã e a tensão de saída do fotossensor.

3 Modificações no Levitador

Nesta primeira parte do projeto foram planejadas e executadas as modificações necessárias no levitador para melhorar o desempenho, facilitar a calibração do fotossensor e obter parâmetros necessários para o controle de um grau de liberdade.

3.1 Redução dos efeitos da luz externa no fotossensor

Nesta etapa foi necessário pensar em algo que impedisse que a luz ambiente influenciasse no sinal de saída do fotossensor, pois observou-se no laboratório que quando se aproxima do levitador com uma roupa clara, a luz reflete da roupa no fotossensor, fazendo com que o sinal gerado varie sensivelmente.

O fotossensor e a lâmpada foram cobertos por uma caixa de papel cartão preto, como mostra a Figura 2, para reduzir a incidência de luz ambiente no fotossensor, a fim de melhorar a medição de posição. A caixa foi presa na base superior do levitador por parafusos, para possibilitar a sua remoção, caso seja necessário. Tomou-se o cuidado de criar ranhuras na parte superior da caixa para encaixar os fios que alimentam a lâmpada e o fotossensor, pois estão presos na base superior do levitador. Na Figura 2, as dobras estão indicadas por linhas tracejadas e os cortes estão indicados por traços e pontos. As abas 4, 5, 6, 7 e 8 devem ser coladas e as 1, 2 e 3 devem ser dobradas para fora.

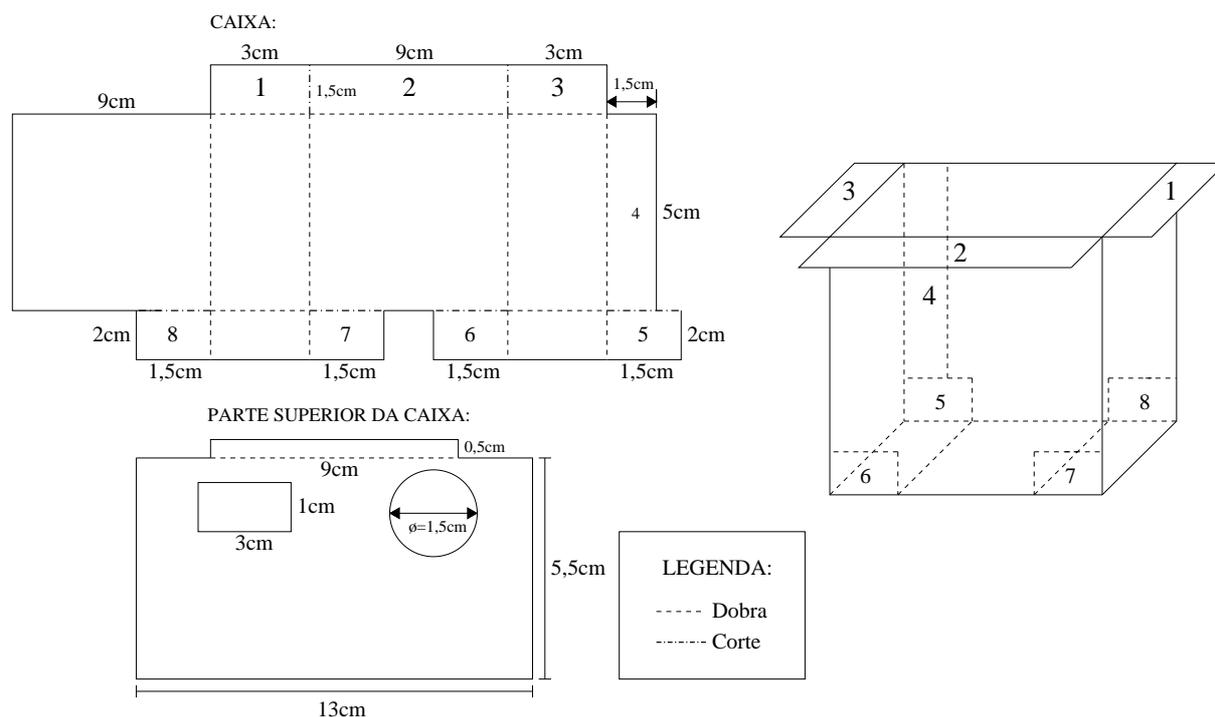


Figura 2: Esquema para a montagem da caixa que cobre o fotossensor e a lâmpada.

3.2 Suportes para a calibração do fotossensor

A calibração do fotossensor foi realizada em um dos eletroímãs, em que o vértice da plataforma onde foi feita a calibração estivesse livre e os outros dois estivessem impedidos de se deslocar verticalmente.

No levitador foram acrescentados dois suportes que auxiliaram na calibração do fotossensor: o **Suporte em L** e o **Suporte em C**.

Nos vértices da plataforma apresentada na Figura 1 foi acrescentado um suporte de alumínio em forma de L (**Suporte em L**), com um furo em uma das extremidades, conforme a Figura 3. Na base superior do levitador, foram colocados pequenos ganchos (pitões) alinhados com o furo do Suporte em L. Dois vértices da plataforma ficaram presos por um fio fino de aço, ligando o gancho preso na base superior do levitador ao respectivo furo no Suporte em L. Tomou-se o cuidado de amarrar o fio de forma que a aresta superior do anteparo opaco, que obstrui a passagem de luz, ficasse no meio da área de captação de luz do fotossensor, a fim de que a calibração seja realizada na região de operação normal do levitador.

No vértice da plataforma onde foi feita a calibração foi colocado o **Suporte em C** conforme a Figura 3, que permitiu variar a distância entre o eletroímã e a lâmina ferromagnética através de um parafuso ajustável.

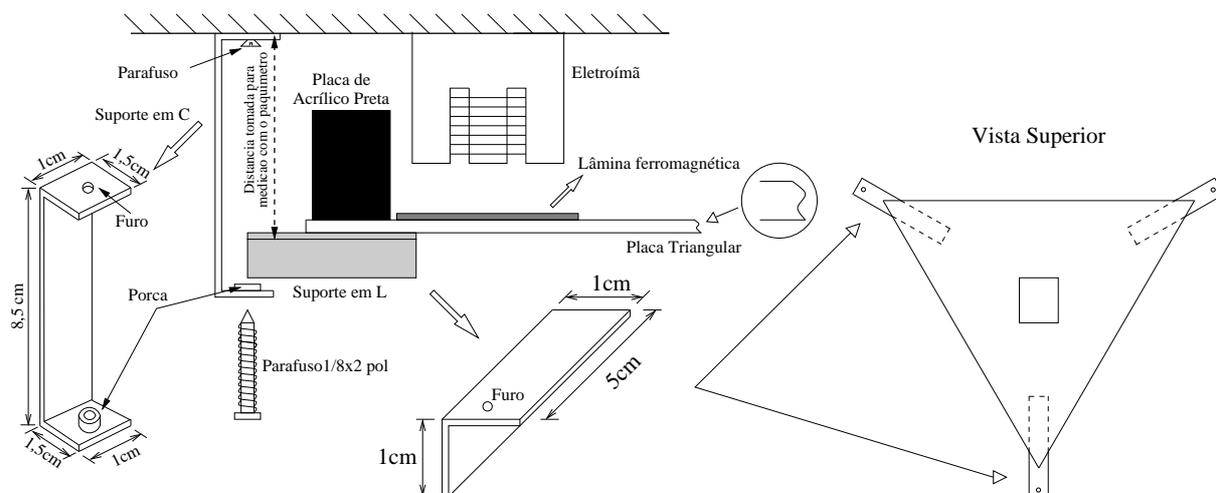


Figura 3: Esquema da plataforma triangular e da base superior do levitador mostrando o Suporte em L e o Suporte em C que foram utilizados na calibração do fotossensor.

3.3 Circuito de alimentação das lâmpadas

Havia a necessidade de manter constante a luminosidade gerada pelas lâmpadas a fim de se melhorar a exatidão da medida de posição realizada pelos fotossensores.

Foi montado um circuito de alimentação das lâmpadas utilizando um Regulador de Tensão Fixa (7808) apresentado na Figura 4, cuja saída gerará uma tensão fixa de 8V para alimentar as lâmpadas.

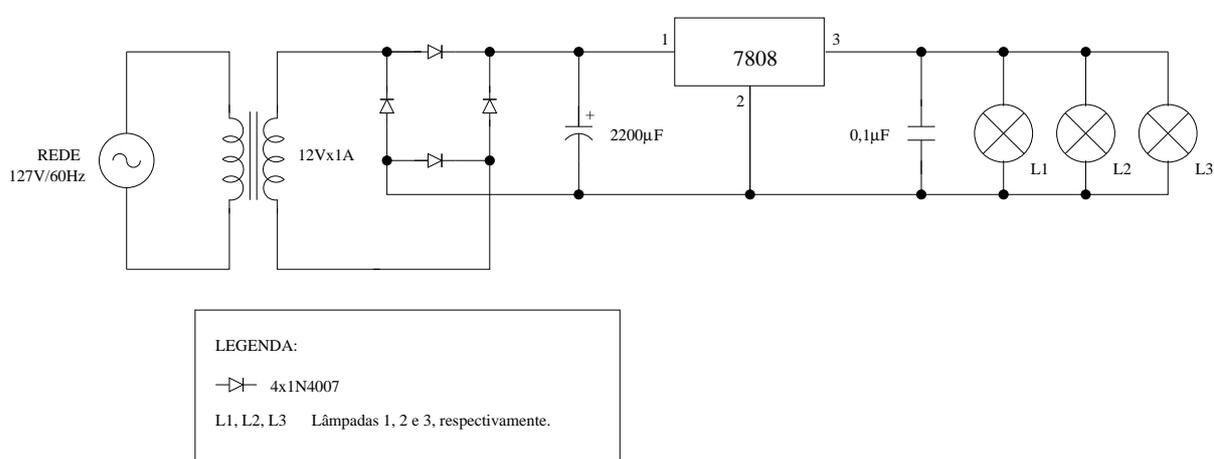


Figura 4: Circuito de alimentação das lâmpadas.

4 Procedimentos de Calibração do Fotossensor

Foi acrescentado no levitador o Suporte em C e o Suporte em L para obter a relação da distância entre o eletroímã e a lâmina ferromagnética (largura do entreferro) e a tensão de saída do fotossensor. Foram utilizados como instrumentos de medição um paquímetro e um multímetro.

Embaixo do Suporte em L fixado na plataforma de acrílico foi feito um pequeno furo, não vazado, com a punção. Foi feita uma ponta fina no parafuso ($1/8'' \times 2''$) utilizado no Suporte em C. Esta ponta deve ser acoplada no furo feito com a punção, formando um pivô. O parafuso permite um ajuste fino de posição.

Foi ligado o circuito do levitador, tomando-se o cuidado de manter os eletroímãs desligados.

Ligou-se no cabo do fotossensor que será calibrado (referenciado como verde) o multímetro, colocando-o no modo para medir tensão DC.

A princípio, teve-se a idéia de que cada vez que fossem dadas voltas com o parafuso, variando a posição entre o eletroímã e a lâmina ferromagnética, fosse medida a distância entre a base superior do levitador e a base do Suporte em L, como mostra a Figura 3 (cota tracejada) e, depois, faziam-se os cálculos para obter a largura do entreferro. Foi realizado isto, porém, foram observados os seguintes problemas: devido as dimensões do paquímetro, foi necessário colocá-lo por dentro da caixa de papel cartão preto, o que causou uma diferença na medida, pois o teto desta caixa tem uma espessura significativa; o sistema balançava muito ao se obter as medidas com o paquímetro, o que causava muito ruído no sinal de saída do fotossensor.

Depois, obteve-se outra idéia — calibrar o parafuso do Suporte em C e, com ele, obter a largura do entreferro.

A calibração do parafuso foi realizada buscando-se reduzir os erros observados anteriormente. Para o paquímetro tocar na base superior do levitador, foi feito um pequeno furo na maior aba de fixação da caixa de papel cartão preto, tomando-se o cuidado de o paquímetro ficar perpendicular na medição. Fez-se uma marca com tinta preta no parafuso, para auxiliar na contagem de voltas dadas com ele.

Colocou-se, com o auxílio do Suporte em C, uma distância entre o eletroímã e a lâmina ferromagnética, de forma que a aresta superior do anteparo opaco ficasse no limite inferior da área de captação do sensor fotoelétrico. Tomou-se a medida entre a base superior do levitador e a base do Suporte em L (distância total), conforme a cota tracejada na Figura 3. Depois, foram dadas dez voltas com o parafuso e tomada a medida da mesma forma descrita acima. O procedimento acima foi repetido quatro vezes.

Para se obter a largura do entreferro, utiliza-se a equação

$$l_e = d_t - (h + s), \quad (1)$$

onde d_t é a distância entre a base superior do levitador e a base do Suporte em L (distância total), $h = 51,36mm$ é a altura do eletroímã e $s = 6,34mm$ é a espessura da plataforma triangular com a lâmina ferromagnética e o Suporte em L. Assim, calibrou-se o parafuso

Tabela 1: Medidas utilizadas na calibração do parafuso.

Número de voltas	$d_t(mm)$	$d_t - (h + s)(mm)$	Medida a cada dez voltas (mm)
0	81,6	23,9	$23,9 - 17,8 = 6,1$
10	75,5	17,8	$17,8 - 11,7 = 6,1$
20	69,4	11,7	$11,7 - 5,4 = 6,3$
30	63,1	5,4	Média = 6,2

através das medidas sumarizadas na Tabela 1. Obteve-se 6,2mm a cada dez voltas, então, uma volta resultará num deslocamento de 0,62mm. Agora, tendo-se o passo do parafuso, pode-se fazer a calibração do fotossensor.

Colocando o parafuso na distância máxima $d_t = 81,6mm$ e anotando o valor da tensão de saída do fotossensor, fez-se variar a distância entre o eletroímã e a lâmina ferromagnética, fazendo o parafuso subir, dando de uma em uma volta e, a cada volta dada, foi anotado o valor da tensão de saída do fotossensor. Este procedimento foi realizado até o sinal do fotossensor apresentar muito ruído. A largura do entreferro foi obtida da mesma forma descrita anteriormente, pela equação (1).

Apesar de se ter melhorado a medição da largura do entreferro com a utilização do parafuso do Suporte em C, foi observado um erro que poderá causar uma grande diferença nos parâmetros a serem calculados: ao se girar o parafuso, a plataforma triangular inclina-se um pouco em relação ao plano horizontal. Para compensar este problema, foi acrescentado 1mm à distância máxima d_t e, na medida seguinte, foi acrescentado 1,16mm, na próxima medida, 1,32mm e assim por diante, até que a última medida tenha um acréscimo de 7mm. Este procedimento tomou como referência o centro da base de atuação do eletroímã.

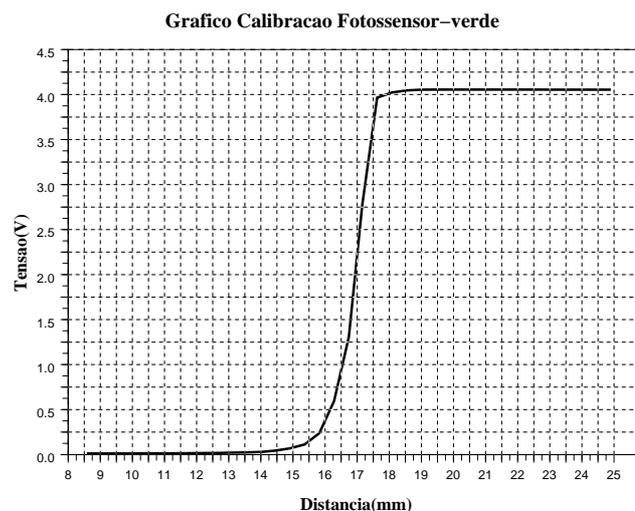


Figura 5: Gráfico da tensão gerada pelo fotossensor verde em função da distância.

Foi feito um gráfico relacionando a largura entreferro e a tensão da saída do fotossensor, no *software* Scilab, conforme a Figura 5, para se obter a curva de calibração do fotossensor.

5 Modelagem da Dinâmica do Levitador

Na Figura 6, há um esquema simplificado da levitação com um grau de liberdade, como vem sendo feito o trabalho. Sabe-se que a força magnética é dada por:

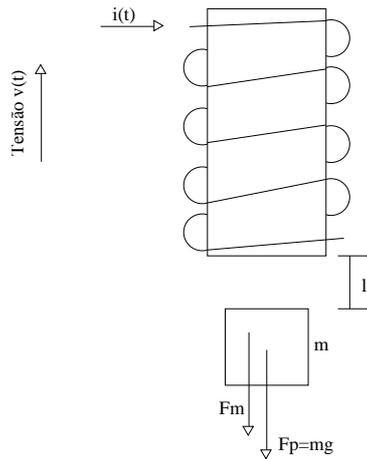


Figura 6: Diagrama simplificado da levitação com um grau de liberdade.

$$F_m = \frac{-i^2}{l_e^2} K_m ,$$

onde K_m é uma constante e l_e é a largura do entreferro.

$$v = \frac{dl_e}{dt} \text{ e } a = \frac{d^2l_e}{dt^2} .$$

Pela figura,

$$\sum F = F_P + F_m . \quad (2)$$

De acordo com o Princípio da Quantidade de Movimento:

$$p := mv ,$$

onde m é a massa e v é a velocidade. De acordo com a Segunda Lei de Newton tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= \sum F \\ \sum F &= m \frac{dv}{dt} + \frac{dm}{dt} v , \end{aligned} \quad (3)$$

onde a derivada $\frac{dm}{dt}$ será nula uma vez que neste levitador assume-se que a massa é constante. Portanto:

$$m \frac{dv}{dt} = \sum F$$

$$m \frac{d^2 l_e}{dt^2} = F_P + F_m \rightarrow m \frac{d^2 l_e}{dt^2} = mg - K_m \frac{i^2}{l_e^2}$$

$$\frac{d^2 l_e}{dt^2} = g - \frac{K_m i^2}{m l_e^2}$$

O ponto de equilíbrio ocorre quando

$$\frac{dl_e}{dt} = 0 \text{ e } \frac{d^2 l_e}{dt^2} = 0 \quad (4)$$

então:

$$0 = g - \frac{K_m i^2}{m l_e^2} \rightarrow \frac{K_m i^2}{m l_e^2} = g \rightarrow l_e^2 = \frac{K_m i^2}{mg}$$

$$l_e = |i| \sqrt{\frac{K_m}{mg}} \quad (5)$$

6 Parâmetros da Posição de Equilíbrio

O gráfico mostrado na Figura 5 nos permite obter o valor l_e na posição central:

$$l_e = 17,20mm,$$

onde l_e é medido no centro da base de atuação do eletroímã.

Nesta posição pode-se determinar os parâmetros necessários para o controle de um grau de liberdade do levitador. Porém, esta medida foi encontrada após o ajuste de valor devido à inclinação da plataforma triangular em relação ao plano horizontal, ao se calibrar o fotossensor. Então, foi feito o cálculo para se obter a medida sem este ajuste, obtendo-se:

$$l_{ep} = 13,24mm,$$

l_{ep} é a medida obtida com o parafuso. Portanto, colocando a plataforma triangular na distância $13,24mm$ com o parafuso, obtém-se em relação ao centro da base de atuação do eletroímã $17,20mm$.

6.1 Cálculo da corrente no eletroímã na posição de equilíbrio

Há uma corrente que, ao passar nos enrolamentos do eletroímã, faz a força magnética anular a força gravitacional da plataforma triangular e, assim, esta estará em equilíbrio.

Para se calcular esta corrente, denominada i_0 , utilizou-se a equação obtida no Projeto de Graduação (Silva et al. 2001):

$$F_m = -1,782\pi \times 10^{-5} \times \frac{i^2}{l_e^2} \quad (6)$$

onde

$$|i| = \sqrt{\frac{mg \times l_e^2}{1,782\pi \times 10^{-5}}}, \quad (7)$$

m é a massa da plataforma triangular, em quilograma, dividida por três, considerando cada vértice um corpo isolado; l_e é a medida da posição de equilíbrio em relação ao centro da base de atuação do eletroímã, em metros; i é a corrente no eletroímã em ampères; $g = 9,788m/s^2$ é o valor da gravidade medida na UERJ, fornecida pelo Professor José Umberto Cinelli Lobo De Oliveira do Instituto de Física. Assim:

$$i_0 = 1,41A. \quad (8)$$

6.2 Medição da corrente no eletroímã na posição de equilíbrio

Para medir a corrente no eletroímã na posição de equilíbrio, ligou-se somente o eletroímã do fotossensor calibrado (referenciado como verde) numa fonte de corrente ajustável. A plataforma foi colocada na posição de equilíbrio considerada ($l_e = 17,20mm$), apoiada no parafuso do Suporte em C. Devagar e cuidadosamente, girou-se o botão da fonte, aumentando-se progressivamente a corrente que passa no enrolamento do eletroímã, observando o valor da corrente que faz a plataforma sair do equilíbrio e prender-se no eletroímã, obtendo-se:

$$i_{0m} = 1,54A, \quad (9)$$

que difere em cerca de 9% do valor calculado (8).

6.3 Cálculo da indutância do eletroímã

No diagrama esquemático do eletroímã, na Figura 7, pode-se observar o gap_1 , o gap_2 e o gap_3 (gap — entreferro: pequeno espaço de ar no circuito magnético), representados por g_1 , g_2 e g_3 , respectivamente.

Obteve-se o circuito elétrico equivalente do eletroímã, representado na Figura 8.

$$S_1 = S_2 = 1,82 \times 10^{-4}m^2,$$

são as áreas do gap_1 e do gap_2 , respectivamente.

$$S_3 = 2S_1 = 3,64 \times 10^{-4}m^2,$$

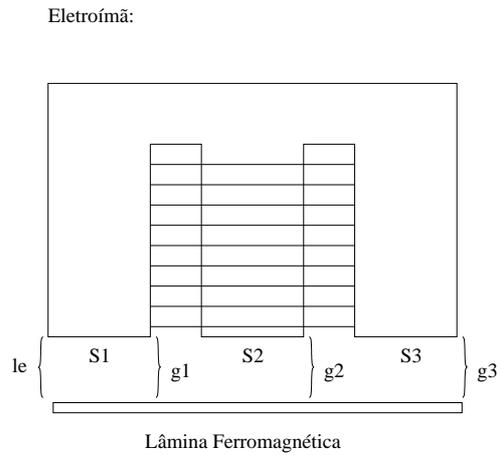


Figura 7: Diagrama esquemático do eletroímã

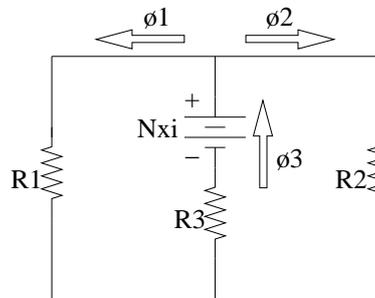


Figura 8: Circuito equivalente do eletroímã

é a área do gap_3 . De acordo com (Quevedo 1982),

$$R_1 = \frac{g_1}{\mu_0 S_1} = R_2 = \frac{g_2}{\mu_0 S_2} \text{ e } R_3 = \frac{g_3}{\mu_0 S_3}$$

$$g_1 = g_2 = g_3 = l_e$$

$$R_1 = R_2 = \frac{l_e}{\mu_0 \times 1,82 \times 10^{-4}}$$

$$R_3 = \frac{l_e}{\mu_0 \times 3,64 \times 10^{-4}}. \quad (10)$$

Como R_1 está em paralelo com R_2 e R_3 está em série com ambos, temos que a relutância equivalente é dada por:

$$R_{eq} = R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_{eq} = \frac{l_e}{\mu_0 \times 3,64 \times 10^{-4}} + \frac{\left(\frac{l_e}{\mu_0 \times 1,82 \times 10^{-4}}\right)^2}{2\left(\frac{l_e}{\mu_0 \times 1,82 \times 10^{-4}}\right)}$$

$$R_{eq} = \frac{l_e}{\mu_0 \times 3,64 \times 10^{-4}} + \frac{l_e}{2\mu_0 \times 1,82 \times 10^{-4}},$$

$$R_{eq} = \frac{l_e}{\mu_0 \times 1,82 \times 10^{-4}} \quad (11)$$

Portanto, de acordo com (Del Toro 1994):

$$L = \frac{N^2}{R_{eq}} \quad (12)$$

$$L = \frac{N^2 \times \mu_0 \times 1,82 \times 10^{-4}}{l_e} = 6,5mH. \quad (13)$$

A resistência da bobina e dos fios de conexão do eletroímã foi medida com um multímetro, resultando em $R_L = 6,2\Omega$. Assim, a constante de tempo do eletroímã é:

$$\tau_L = \frac{L}{R_L} = 1,05ms. \quad (14)$$

7 Conclusões

Até o momento foram planejadas e realizadas as modificações necessárias no levitador para melhorar o desempenho e facilitar a calibração do fotossensor. Também foi realizada a modelagem da dinâmica e foram obtidos os valores dos parâmetros necessários para realizar o controle de um grau de liberdade do levitador.

Na Tabela 2, estão relacionados todos os parâmetros considerados na modelagem de um grau de liberdade do levitador, obtidos experimentalmente e/ou calculados.

Tabela 2: Parâmetros obtidos e calculados na posição de equilíbrio.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Aceleração da gravidade	g	9,788	m/s^2
Massa da plataforma	m	0,11491	kg
Força de atração do eletroímã na posição de equilíbrio	F_m	0,375	N
Largura do entreferro na posição de equilíbrio ¹	l_e	0,01720	m
Largura do entreferro na posição de equilíbrio ²	l_{ep}	0,01324	m
Corrente calculada na posição de equilíbrio	i_0	1,41	A
Corrente medida na posição de equilíbrio	i_{0m}	1,54	A
Constante da força de atração do eletroímã	K_m	$-1,782\pi 10^{-5}$	Nm^2/A^2
Número de espiras do eletroímã	N	700	—
Indutância do eletroímã	L	6,5	mH
Resistência do eletroímã	R_L	6,2	Ω
Constante de tempo do eletroímã	τ_L	1,05	ms
Permeabilidade magnética do vácuo	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m
Área do gap_1	S_1	$1,82 \times 10^{-4}$	m^2
Área do gap_2	S_2	$1,82 \times 10^{-4}$	m^2
Área do gap_3	S_3	$3,64 \times 10^{-4}$	m^2

¹medido no centro da base de atuação do eletroímã.

²medido com o parafuso.

Referências

Del Toro, V. (1994), *Fundamentos de Máquinas Elétricas*, LTC.

Quevedo, C. P. (1982), *Eletromagnetismo*, McGraw-Hill do Brasil.

Silva, A. L. M., Cutin, M. S. & Machado, S. G. (2001), ‘Sistema de levitação eletromagnético controlado por computador’, Projeto de Graduação em Engenharia Eletrônica — UERJ, Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.lee.eng.uerj.br/~jpaulo/trabalhos-orientados.html>.