

Um experimento para ilustrar o sistema de levitação eletromagnética utilizado em trens MAGLEV

Rafael Ramos Gomes, Richard Magdalena Stephan

Departamento de Eletrotécnica / Universidade Federal do Rio de Janeiro
Cidade Universitária – Ilha do Fundão
21.945-970 – Rio de Janeiro, RJ
{ramos, rms}@ufrj.br

Palavras-chave: Levitação Eletromagnética, Eletrônica de Potência, Controle Automático, Sistemas de Transporte em Alta Velocidade.

Este trabalho descreve os cálculos e procedimentos adotados na elaboração de um experimento de laboratório para ilustrar o funcionamento do sistema de levitação eletromagnética utilizado em trens de alta velocidade. A idéia básica consiste no desenvolvimento de um sistema de controle de posição vertical de uma esfera de aço. Esta esfera levita a poucos milímetros do núcleo de um eletroímã em uma posição estável. Serão apresentados o projeto de um controlador PD, que estabiliza a posição da esfera, os gráficos e os circuitos eletrônicos utilizados na confecção deste sistema de controle.

Keywords: Electromagnetic Levitation, Power Electronics, Automatic Feedback Control System, High Velocity Transportation System.

This work describes the calculations and procedures adopted to build a laboratory experiment to illustrate the operation of the electromagnetic levitation system applied in high velocity trains. The basic idea consists in the development of the vertical position control of a levitating steel ball. This steel ball levitates a few millimeters of the core of an electromagnetic coil in stable position. The design of a PD controller, witch stabilizes the ball position, and the electronic circuits used in the control system will be presented.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Sistemas de Transporte em Alta Velocidade

Os estudos de transporte ferroviário empregando levitação remontam mais de meio século. A eliminação, pela levitação, do atrito entre rodas e trilho permite atingir velocidades superiores a 450km/h, o que é bastante atraente até como alternativa para conexões aéreas de média distância.

Para efeitos de entendimento, as técnicas de levitação podem ser classificadas como eletromagnéticas, elétricas e mecânicas [1, 2].

Dentre as técnicas mecânicas, estão as que usam força pneumática, como é explorado no conhecido 'hovercraft', ou ainda forças aerodinâmicas, como usado nos aviões.

Como elétrica, pode-se conceber uma situação em que cargas elétricas de mesma polaridade estão dispostas frente a frente e.g. [3,4].

Finalmente, podem ser citados os métodos fundamentados na intensidade de um campo magnético. Neste ponto, vale ainda registrar a levitação com materiais diamagnéticos, mas cuja força resultante é bem menor do que as que serão vistas agora [5].

As técnicas de levitação magnética, devido à

intensidade da força que produzem, podem ser empregadas em sistema de transporte de alta velocidade.

1.2 Métodos de Levitação Magnética

Os métodos de levitação magnética podem ser subdivididos em três grupos, descritos abaixo:

A. Levitação Eletrodinâmica (EDL)

Este tipo de levitação necessita do movimento de um campo magnético nas proximidades de um material condutor. A proposta japonesa de trem de levitação, LEVMAG (<http://www.rtri.or.jp/index.html>), está calcada neste princípio [6].

Se um material magnético realizar um movimento relativo a uma lâmina condutora (alumínio, por exemplo), correntes parasitas serão induzidas no condutor. Estas correntes, por sua vez, gerarão um outro campo magnético o qual, pela lei de Lenz, opor-se-á ao campo criado pelo material magnético. A interação entre ambos gerará uma pressão magnética e, por conseguinte, uma força repulsiva no material magnético. Esta força é a responsável pela levitação do corpo.

B. Levitação Supercondutora (SQL)

Este tipo de levitação baseia-se no efeito Meissner de exclusão de campo magnético do interior dos supercondutores [7, 8]. No caso dos supercondutores do tipo II, esta exclusão é parcial, o que diminui a força de levitação mas conduz à estabilidade da levitação. Este fenômeno só pôde ser devidamente explorado a partir do final do século XX com o advento de novos materiais magnéticos e pastilhas supercondutoras de alta temperatura crítica, que se tornam supercondutoras a temperaturas muito mais elevadas que os supercondutores convencionais. Os supercondutores de alta temperatura crítica podem ser resfriados com nitrogênio líquido (temperatura de ebulição -196°C) enquanto que os supercondutores convencionais precisam ser refrigerados com hélio líquido (temperatura de ebulição -269°C), o que torna o custo da refrigeração muito elevado.

Estes novos supercondutores estão sendo usados na pesquisa de um novo tipo de trem de levitação em diferentes países, incluindo Brasil (<http://www.lasup.dee.ufrj.br/>), China (<http://asclab.swjtu.edu.cn>) e Alemanha (<http://ifw-dresden.de>). Esta solução tecnológica ainda não foi implementada em escala real.

C. Levitação Eletromagnética (EML)

Este tipo de levitação tem na proposta alemã de trem de levitação, Transrapid (<http://www.transrapid.de>), que está atualmente implementado na China numa conexão de 30km entre Pudong Shanghai International Airport e Shanghai Lujiazui, um distrito financeiro, e na proposta japonesa HSST (<http://www.meitetsu.co.jp/chsst>) grandes exemplos de sucesso. A Suíça também, no seu projeto Swissmetro, emprega esta tecnologia (<http://www.swissmetro.com>).

O fundamento físico básico, nesta aplicação, explora a força de atração que existe entre um ímã ou eletro-ímã e um material ferromagnético. A estabilização, neste caso, só é possível com uma malha de realimentação e regulador devidamente sintonizado.

1.3 O Espaço COPPE de Tecnologia e Desenvolvimento Humano

Com o intuito de tornar as tecnologias de levitação magnética compreensíveis para estudantes do segundo grau, estudantes de cursos técnicos e jovens universitários, foram preparadas três experiências ilustrando as técnicas de levitação descritas acima. Estas experiências fazem parte da exposição do Espaço COPPE Miguel de Simoni de Tecnologia e Desenvolvimento Humano, inaugurado em 26 de Julho de 2002 com o objetivo de ser uma vitrine dos

trabalhos desenvolvidos no Centro de Tecnologia da UFRJ. O nome Miguel de Simoni foi escolhido em homenagem a este professor, baluarte do desenvolvimento humano, prematuramente falecido como consequência de um aneurisma cerebral nas proximidades da inauguração da mostra. No estágio atual, estão montadas 10 experiências:

- 1) Ecos do Petróleo – como a propagação de ondas sísmicas auxilia na busca do petróleo,
- 2) Raios Artificiais – uma breve viagem por antigas máquinas eletrostáticas e geração de raios elétricos,
- 3) Engenharia: Projetos feitos para os seres humanos? – uma aula de ergonomia,
- 4) Balança mas não vira – sobre a força de empuxo e outros conceitos físicos relacionados com o equilíbrio de embarcações,
- 5) Falando pela Luz – uma explicação da fibra ótica em benefício da qualidade de transmissão de voz,
- 6) Realidade Virtual – ambientes artificiais gerando sensações reais,
- 7) Viagem ao Fundo do Mar – a exploração submarina em profundidades variadas,
- 8) A Água nos Três Estados – sobre o projeto de gestão do rio Paraíba do Sul,
- 9) O Quarto Estado da Matéria – sobre o plasma e
- 10) Voando Baixinho – sobre as propostas de transporte de alta velocidade com trens que levitam.

Cada apresentação concretiza as teorias científicas na vida prática.

O presente trabalho apresentará de modo detalhado a experiência de levitação eletromagnética, presente no módulo Voando Baixinho.

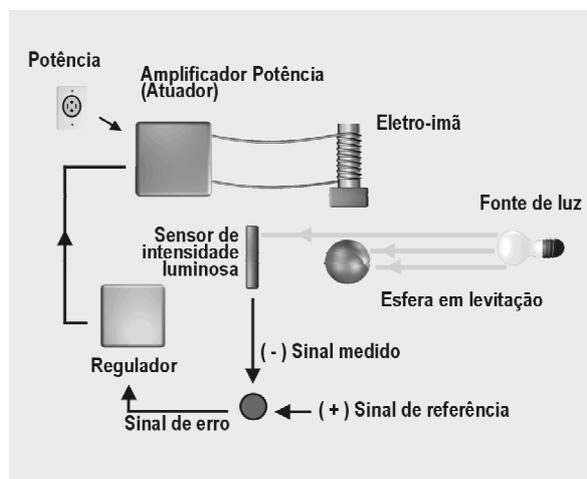


Fig.1 Experiência de levitação eletromagnética.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

2.1. O Modelo Físico

A planta do sistema em questão consiste em um eletroímã que produz um campo eletromagnético com a finalidade de atrair uma esfera de aço, conforme descrito na Fig.2.



Fig.2 Sistema mecânico a ser controlado (eletroímã + esfera).

Com a passagem de uma corrente I pelo eletroímã, a esfera está sobre a ação de duas forças: A força gravitacional (peso) e a força eletromagnética produzida pela bobina, que atuam em sentidos opostos. O comportamento dinâmico deste sistema é descrito pela Eq.1:

$$F_R = F_{mag} - P_{esf} = m \frac{d^2 y(t)}{dt^2}. \quad (1)$$

Na situação de equilíbrio, a força resultante é igual a zero, visto que a posição da esfera não varia em relação ao tempo. Então:

$$F_{0mag} = P_{esf}. \quad (2)$$

onde,

F_{0mag} é a força eletromagnética produzida pelo eletroímã suficiente para equilibrar o peso da esfera ou força produzida pela corrente de "off-set".

A força resultante apresentada na equação 1 pode ser decomposta em duas componentes como mostra a Eq.3:

$$F_{mag} = F_{0mag} + \Delta F_{mag}. \quad (3)$$

De acordo com a Eq.1 e Eq.2:

$$F_R = F_{0mag} + \Delta F_{mag} - P_{esf} = m \frac{d^2 y(t)}{dt^2}, \quad (4)$$

$$F_{0mag} = P_{esf}. \quad (5)$$

Então:

$$F_R = \Delta F_{mag} = m \frac{d^2 y(t)}{dt^2}. \quad (6)$$

Aplicando a transformação de Laplace na Eq.6, a função de transferência da dinâmica da esfera pode ser determinada. Então:

$$\frac{Y(s)}{F_R(s)} = \frac{1}{ms^2}. \quad (7)$$

Rigorosamente falando, a força eletromagnética produzida pelo campo do eletroímã sobre a esfera é proporcional ao quadrado do valor da corrente e à derivada da indutância com a posição[12].

Este modelo pode ser simplificado se for linearizado em torno de um ponto de operação, que será o ponto de equilíbrio. Então:

$$F_R = \kappa_1 \Delta I + \kappa_2 \Delta Y. \quad (8)$$

O diagrama que relaciona a posição da esfera em torno do ponto de equilíbrio é:

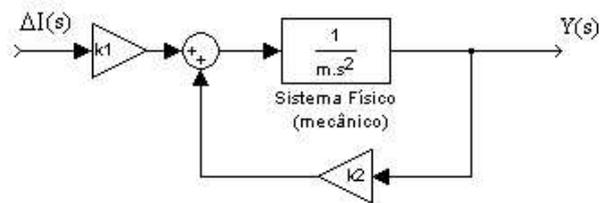


Fig.3 Diagrama de controle da planta a ser controlada.

A partir do diagrama acima, pode-se notar que a função de transferência relacionando a variação da corrente e a posição da esfera é:

$$\frac{Y}{\Delta i} = \frac{\kappa_1}{ms^2 - \kappa_2}. \quad (9)$$

O diagrama de lugar das raízes para um controle em malha fechada puramente proporcional terá a configuração mostrada na Fig.4.

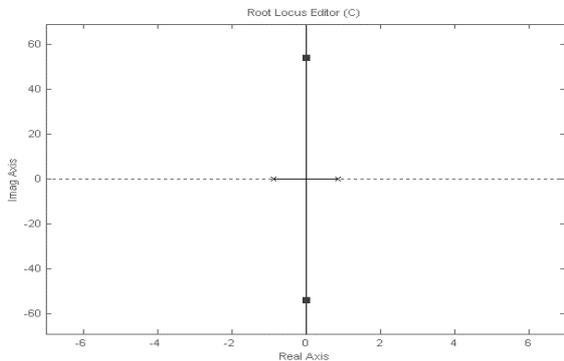


Fig.4 Diagrama de lugar das raízes para um controle puramente proporcional.

2.2. A Corrente de *off-set*

Do mesmo modo que a força eletromagnética foi decomposta em uma componente estática (*off-set*) e outra dinâmica, a corrente no eletroímã será dividida. Então:

$$I = I_0 + \Delta I. \quad (10)$$

Logo,

$$\Delta I = I - I_0. \quad (11)$$

A implementação da corrente de *off-set* é mostrada na Fig.5, que corresponde ao diagrama completo da planta a ser controlada.

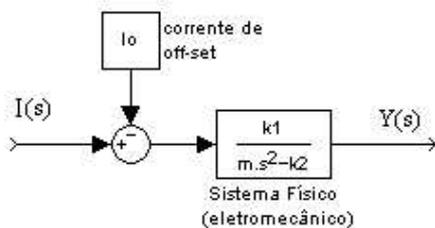


Fig.5 Implementação da corrente de *off-set*.

2.3. O Controlador PD

A partir da função de transferência da planta descrita na Fig.5 pode ser concluído que um controle em malha fechada puramente proporcional não estabiliza o sistema, visto que um de seus pólos está

situado à direita do semi-plano complexo. Conforme já mostrado na Fig.4.

Para alterar o lugar das raízes de forma que as raízes fiquem localizadas à esquerda do semi-plano complexo, é necessário o uso de um controlador PD. Com o uso de um controlador PD um novo diagrama de lugar das raízes é determinado, conforme mostrado na Fig.6.

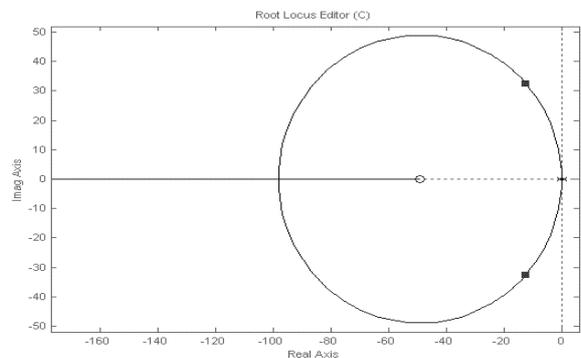


Fig.6 Diagrama de lugar das raízes com um controlador PD.

2.4. O Sensor

O sensor de posição da esfera consiste em um par de LED's infravermelhos e um par de fototransistores, formando dois feixes de luz conforme mostrado na Fig.7.

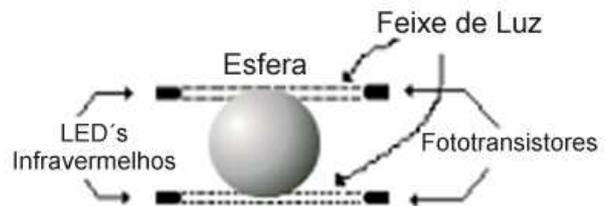


Fig.7 Montagem e disposição dos sensores de posição.

De acordo com Santisteban e Stephan [9] este sensor apresenta uma característica linear, dentro da faixa de $-0,4\text{mm}$ a $0,4\text{mm}$, conforme mostrado na Fig.8.

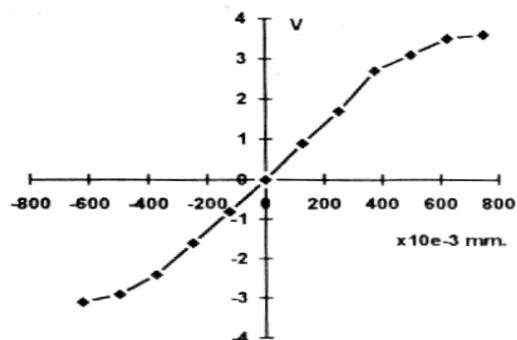


Fig.8 Resposta do sensor em função da posição da esfera.

2.5. O Modelo Completo

O modelo completo do sistema é apresentado na Fig.9. O sensor transforma a informação sobre a posição da esfera em níveis de tensão que será comparado com a informação para a posição desejada para a esfera. Em seguida é realizado a diferença entre a informação sobre a localização da esfera e a posição desejada, gerando um sinal de erro na saída do somador. Este sinal de erro será processado pelo controlador PD que excitará o sistema de acordo com a resposta desejada.

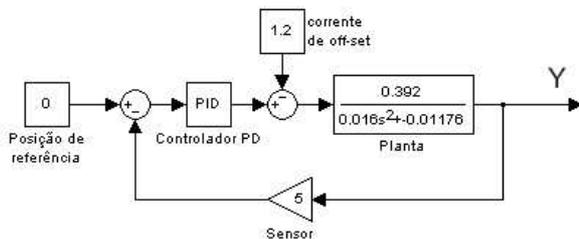


Fig.9 Modelo do Sistema Completo.

3. VALIDAÇÃO DO MODELO

3.1. Determinação das Constantes e Parâmetros do Modelo

De acordo com análise descrita no item anterior, o sistema pode ser estabilizado com o uso de um controlador PD, localizando as raízes do sistema no lado esquerdo do plano complexo. Para isso, as constantes do modelo linearizado da planta a ser controlada são determinadas experimentalmente.

Primeiramente é ajustado a corrente de *off-set* para compensar o peso da esfera nas proximidades do ponto de equilíbrio. Para isso, aumentamos o valor de ajuste da corrente de off-set até o limiar da esfera ser atraída ao núcleo do eletroímã.

A partir deste ajuste, o modelo linearizado se torna válido para pequenas variações de I e Y. De acordo com a Eq.8 já apresentada.

Com a finalidade de obter valores aproximados para as constantes κ_1 e κ_2 do modelo apresentado anteriormente, o sistema de controle em malha fechada foi montado com um controlador puramente proporcional.

Para o cálculo de κ_1 , a posição da esfera foi mantida constante (Y constante) e o peso foi variado através do uso de duas esferas com pesos diferentes.

| | Massa | Peso | Corrente |
|-------|-------|----------|----------|
| M_1 | 16 g | 0,1568 N | 1,2 A |
| M_2 | 32 g | 0,3136 N | 1,6 A |

Tab.1 Corrente em função do peso da esfera.

O valor do coeficiente angular da reta que liga os pontos dados é o valor de κ_1 . Então:

$$\kappa_1 = 0,392. \text{N/A} \quad (12)$$

Para a determinação da constante κ_2 , a posição da esfera é variada em relação ao ponto de equilíbrio para os dois extremos de sensibilidade do sensor (0,4mm e -0,4mm). Com os valores de corrente medidos em cada uma das posições, podemos calcular a força associada pelo conhecimento da constante κ_1 . Os valores de corrente e força em função da posição, encontram-se na Tab.2.

| Posição (Y) | Corrente | ΔI | ΔF |
|-------------|----------|------------|------------|
| 0,4mm | 0,2 A | -1A | -0,392N |
| 0 | 1,2 A | 0 | 0 |
| -0,4mm | 2,6 A | 1,4A | 0,549N |

Tab.2 Corrente e força em função da posição.

O valor da constante κ_2 será o valor da constante angular da reta que passa próximo aos pontos de Y, ΔF . Usando uma ferramenta de regressão linear:

$$\kappa_2 = 0,01176. \text{N/mm} \quad (13)$$

E a função de transferência da planta é:

$$\frac{Y}{I} = \frac{0,392}{0,016 \cdot s^2 - 0,01176} \quad (14)$$

Para a determinação dos parâmetros do controlador PD foi utilizado a ferramenta "rltool" disponível no MATLAB. O novo diagrama de lugar das raízes terá a configuração já mostrada na Fig.4 e a função determinada para o compensador PD é:

$$T(s) = 50(1 + 0,02s). \quad (15)$$

Os valores dos parâmetros proporcional e derivativo são respectivamente: 50 e 1s.

Na Fig.10 é mostrado a resposta do sistema para um degrau de referência de posição.

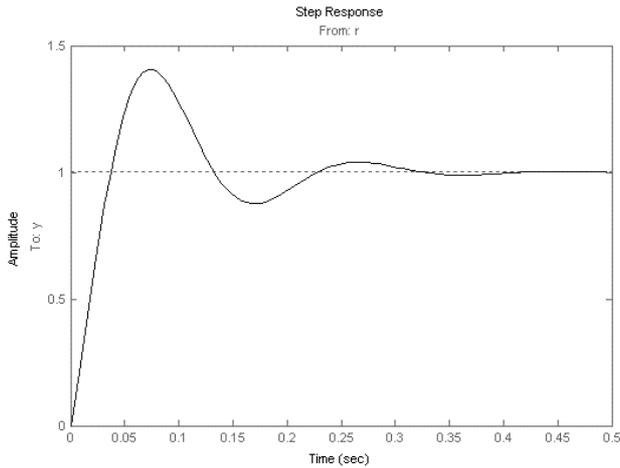


Fig.10 Resposta ao degrau.

4. IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL

4.1. O Sensor de Posição

Conforme já explicado anteriormente, o sensor de posição consiste em um par de LED's infravermelhos e um par de fototransistores, como já mostrado na Fig.7.

O circuito elétrico é apresentado na Fig.11. O amplificador operacional, na configuração de amplificador diferencial, faz a diferença dos valores encontrados sobre cada um dos fototransistores, linearizando a resposta de saída.

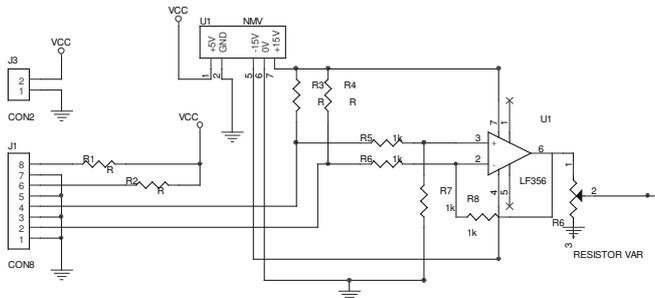


Fig.11 Diagrama Elétrico do Circuito do Sensor.

4.2. Módulo de Controle de Corrente

No modelo apresentado foi considerado que a força realizada pelo campo do eletroímã sobre a esfera é proporcional a corrente no eletroímã. Então, para isso, é necessário um controle sobre a corrente que flui na bobina do eletroímã. O diagrama em blocos do circuito utilizado é mostrado na Fig.12.

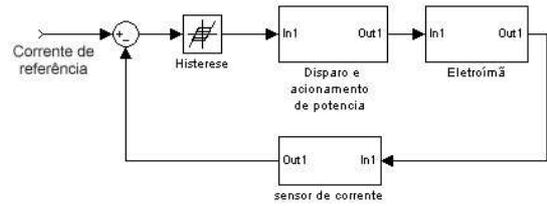


Fig.12 Diagrama em blocos do circuito de controle de corrente com histerese.

O primeiro bloco após o somador promove um chaveamento com histerese. Sua função é limitar o intervalo de amostragem de forma a impedir que o sistema oscile em alta frequência.

O acionamento de potência é baseado no disparo simultâneo de dois MOSFET's acionados através de optoaclopadores de forma a garantir o isolamento elétrico entre a etapa de potência e o circuito de controle. A corrente não pode variar instantaneamente no indutor então podemos controlar a corrente no eletroímã com pulsos de tensão. No momento do corte dos MOSFET's, a corrente no indutor precisa de um caminho para descarregar, visto que, caso contrário, seria gerada uma sobre-tensão no indutor danificando os MOSFET's. Este caminho é promovido pela adição de dois diodos ligados em paralelo com os MOSFET's, como mostra a Fig.13.

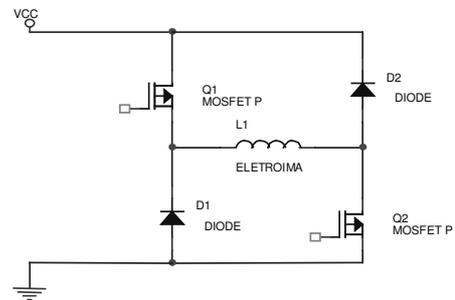


Fig.13 Esquema de ligação dos MOSFET's, diodos e o eletroímã.

O sensor de corrente consiste em um LEM LA 55P que transforma a corrente medida no eletroímã em níveis de tensão. Esta informação é comparada com a corrente de referência fazendo com que a corrente no eletroímã seja rastreada com o valor da corrente desejada.

O diagrama elétrico do módulo de controle de corrente, compreendendo no comparador de corrente, sensor de corrente e histerese é mostrado na Fig.14.

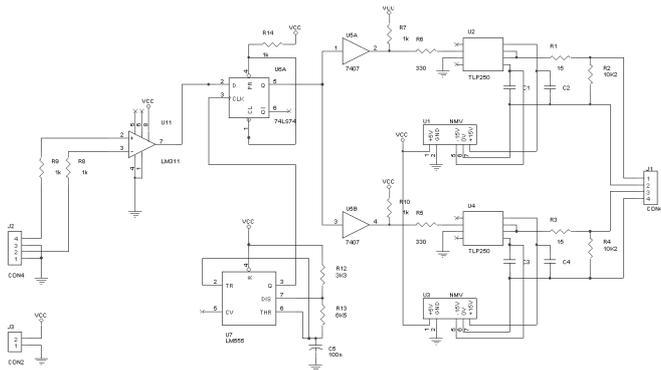


Fig.14 Diagrama elétrico da placa de disparo e controle de corrente

4.3. O Compensador PD

O compensador PD foi implementado a partir de um amplificador operacional LF356 e componentes passivos. Também neste bloco foi incluído um ajuste de off-set cuja função é compensar o peso da esfera na posição de equilíbrio e seu valor foi determinado experimentalmente. Os parâmetros proporcional e derivativo são dados através das Eq.13 e Eq.14. A implementação do PD em um amplificador operacional é mostrado na Fig.15.

$$P = -\frac{R_F}{R_I} \quad (13)$$

$$D = -R_F C \quad (14)$$

A partir dos valores de P e D calculados no item 3, os valores de R_F, R_I e C são respectivamente $100K\Omega$, $2K\Omega$ e $10\mu F$.

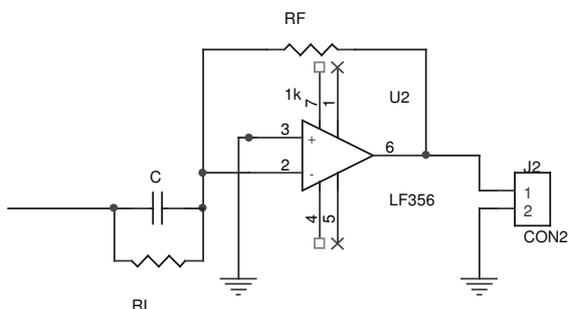


Fig.15 Circuito eletrônico do controlador PD.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com o circuito de controle em funcionamento e a consecutiva estabilização da posição da esfera, foi medido com o auxílio de um osciloscópio a forma de onda da saída do sensor de posição. A Fig.16 mostra uma fotografia do experimento com a levitação de uma esfera de aço.

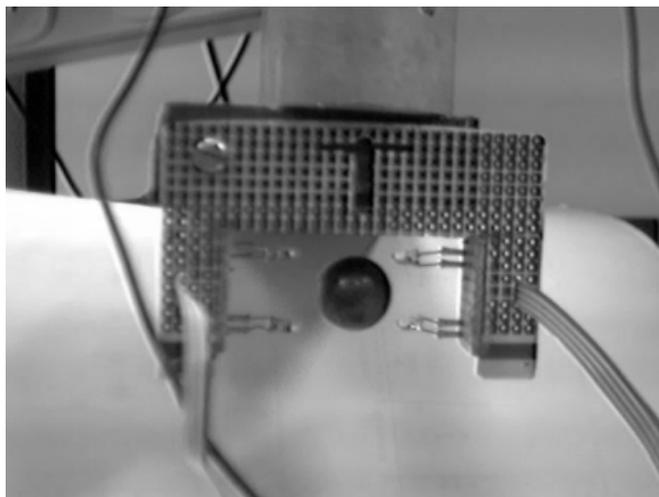


Fig.16 Fotografia da esfera em levitação.

Na Fig.17 é mostrado um gráfico de posição da esfera em função do tempo obtido pela leitura da tensão do sensor de posição utilizando um osciloscópio.

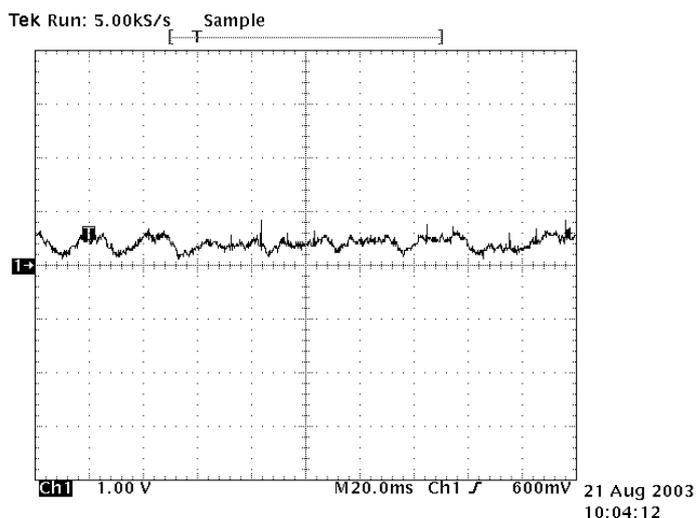


Fig.17 Posição da esfera em função do tempo.

6. CONCLUSÃO

A partir das análises apresentadas anteriormente, pode ser concluído que é possível o controle de posição de uma esfera levitando estavelmente no ar com o uso de um controlador PD. Algumas considerações podem ser feitas a partir do modelo simplificado utilizado. Apesar do comportamento dinâmico do sistema ser essencialmente não linear, o sistema pode ser linearizado em relação a um ponto (ponto de equilíbrio), desde que o tempo de resposta do controle eletrônico seja uma ordem de grandeza menor que a resposta do sistema mecânico a ser controlado.

O controle de posição vertical de um trem MAGLEV ou qualquer outro dispositivo baseado em levitação eletromagnética, por exemplo, mancais magnéticos, podem ser desenvolvidos a partir do trabalho aqui apresentado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem:

- Aos Professores: José Luiz da Silva Neto e Guilherme Barbosa Rolim, pela ajuda e conselhos na modelagem do sistema.
- A Sérgio Ferreira, pela montagem e confecção do eletroímã.
- A Ocione Machado, pelos conselhos e montagem dos aparatos mecânicos de fixação da bobina.
- Ao CNPq, pelo suporte financeiro que possibilitou a realização deste projeto.
- À VITAE pelo apoio ao Espaço COPPE de Tecnologia e Desenvolvimento Humano.

REFERÊNCIAS

- [1] R.M. Stephan, O.J. Machado, A. Jaconianni, Espaço COPPE de Tecnologia e Desenvolvimento Humano, um exemplo didático. *Estudos Tecnológicos UNISINOS Engenharia*, pp 19-25, no.23, 2002.
- [2] R.M. Stephan, O.J. Machado, I. Forain, R. Andrade Jr., Experiências de Levitação Magnética, *Congresso Brasileiro de Automática-CBA'2002*, Natal, pp. 309-312, 2002.
- [3] J.U. Jeon, T. Higuchi, Induction Motors with Electrostatic Suspension, *Journal of Electrostatics*, v. 45, pp 157-173, 1998.
- [4] A. Yamamoto, H. Yasui, N. Shimizu, T. Higuchi, Development of Electrostatic Levitation Motor for Vacuum Condition, *International Symposium on Industrial Electronics-ISIE*, Rio de Janeiro, CD, 2003.
- [5] M.D. Simon, L.O. Heflinger, A.K. Gein, Diamagnetically Stabilized Magnet Levitation, *Am.J.Phys.*, v.69, n.6, pp. 702-707, 2001.
- [6] P.K. Sinha, *Electromagnetic Suspension*, IEE Control Engineering Series, England., 1987.
- [7] F.C. Moon, *Superconducting Levitation*, John Wiley & Sons, USA, 1994.
- [8] A. Moises Luiz, *Aplicações de Supercondutividade*, Edgar Blücher, 1992.
- [9] J. A. Santisteban e R. M. Stephan, Sensor Ótico com Característica Linear, 11^o - *Seminário de Instrumentação do IBP*, 1996, pp.10-15.
- [10] R. R. Gomes, D. C. Silva, J. L. Neto, Electromagnetic Levitation Using MATLAB Real Time Control Toolbox, *International Symposium on Industrial Electronics-ISIE*, Rio de Janeiro, CD, 2003.
- [11] P. Holmer, *Faster Than a Speeding Bullet Train*, *IEEE Spectrum*, August 2003, pp. 30-34.
- [12] G.R. Slemon, *Magnetolectric Devices*, John Wiley and Sons, 1966.