



# Desenvolvimento de um sistema de levitação magnética de baixo custo para ensaios de projetos de controle

## Development of a low-cost magnetic levitation system for testing control projects

Ana Letícia Delalibera Romero<sup>1</sup>, Emerson Ravazzi Pires da Silva<sup>2</sup>

### RESUMO

A levitação magnética desperta grande interesse entre pesquisadores acadêmicos e da indústria devido às suas inúmeras vantagens. Isso inclui a eliminação do atrito mecânico e da poluição ambiental, juntamente com a redução do desgaste de componentes de contato, resultando em uma maior eficiência e durabilidade dos equipamentos. Além disso, é evidente que os sistemas de controle exercem uma importância primordial na sociedade moderna, já que estão presentes em uma variedade de aplicações no cotidiano. Nesse contexto, este trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de um módulo didático de baixo custo relativo, incorporando técnicas do controlador clássico PID (Proporcional Integral Derivativo). Logo, o propósito é sustentar um objeto em suspensão por meio de um campo magnético, contrabalançando a força da gravidade através da aplicação de um controlador PID. O desempenho e os resultados deste controlador são minuciosamente avaliados por meio de excessivos testes na prática. Como o intuito do projeto também é auxiliar no aprendizado de estudantes, destaca-se que o módulo é de fácil uso e foi considerado em sua construção e comunicação a utilização de materiais acessíveis e software amigável.

**PALAVRAS-CHAVE:** controlador PID; impressão 3D; levitação magnética.

### ABSTRACT

Magnetic levitation generates significant interest among both academic researchers and industry professionals due to its numerous advantages. These advantages encompass the elimination of mechanical friction and environmental pollution, as well as the reduction of wear and tear on contact components, resulting in increased equipment efficiency and durability. Furthermore, is evident the primary importance of control systems in modern society, as they are present in a variety of everyday applications. In this context, this work's main objective is the development of a relatively low-cost teaching module, incorporating classic PID (Proportional Integral Derivative) controller techniques. The purpose is to suspend an object within a magnetic field, counterbalancing the force of gravity through the application of a PID controller. The performance and results of this controller are meticulously evaluated through an extensive series of practical tests. As the project also aims to assist student learning, it is important to contrast that the module is easy to use and designed with the use of accessible materials and user-friendly software.

**KEYWORDS:** PID controller; 3D printing; magnetic levitation.

### INTRODUÇÃO

O sistema de levitação magnética é descrito por um objeto mantido suspenso por um campo magnético, e se opõe à força gravitacional (AGUILAR-FIGUEROA et al., 2020). Desde os anos de

<sup>1</sup> Bolsista da UTFPR. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: romero@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 6589628416764428.

<sup>2</sup> Docente no DAELE-CP. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: emersonr@utfpr.edu.br. ID Lattes: 0797649979829091.



1930 é de considerável interesse a suspensão estável em um campo magnético. Essa suspensão é utilizada para demonstrar diversos princípios fundamentais da engenharia elétrica e eletrônica, como eletromagnetismo, eletrodinâmica e teoria de controle (HURLEY; WOLFLE, 1997).

Atualmente, observa-se um amplo desenvolvimento de produtos que utilizam o princípio da levitação magnética. Um exemplo, é o projeto de transporte urbano baseado em levitação magnética, nomeado de MagLev Cobra apresentando uma tecnologia promissora (SOUSA et al., 2016). Essa aplicação oferece vantagens como baixo consumo de energia, redução de emissões gasosas, custos de construção mais baixos e soluções para problemas de transporte em grandes cidades.

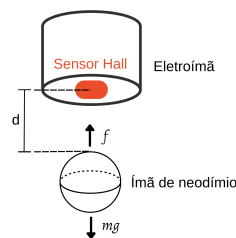
No entanto, o que mais desperta atenção é a aplicação no campo de controle industrial, devido ao desafio do conceito de estabilidade e do projeto de controladores para esses sistemas (AGUILAR-FIGUEROA et al., 2020).

Com base nesse contexto, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento e a construção de um módulo didático de baixo custo, quando comparado com um kit comercial análogo ao construído, para possibilitar os estudos e ensaios acerca da levitação magnética, proporcionando a aplicação dos conceitos teóricos exercitados em sala de aula. O projeto desenvolvido é apoiado na idealização apresentada em (MAGNET... , s.d.).

## MATERIAIS E MÉTODOS

O protótipo do levitador magnético tem como elemento atuador do sistema um eletroímã, posicionado no topo da estrutura. Logo abaixo dele está o sensor de efeito Hall, que realiza medições em tempo real da posição do objeto que será levitado. Ou seja, o sensor informa a distância  $d$  entre o eletroímã e o objeto, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Esquemático da dinâmica do levitador magnético.



Fonte: Autoria Própria.

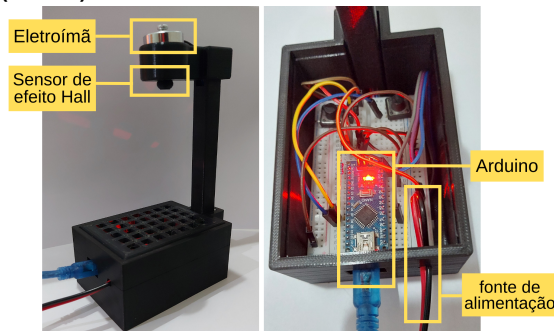
Para alcançar a ação de levitação, o sistema possui um algoritmo responsável por controlar a corrente no eletroímã. Assim, a partir da leitura da distância,  $d$ , pelo sensor de efeito Hall, o microcontrolador calcula, via algoritmo embarcado, e envia o comando de controle no formato de um sinal PWM (*Pulse Width Modulation*). Esse comando gera uma tensão correspondente fornecida ao atuador, que por sua vez gera a força eletromagnética,  $f$ , de modo que neutralize a força gravitacional,  $mg$ , sobre o objeto, possibilitando sua levitação (WOODSON; MELCHER, s.d.).

Para a seleção dos materiais foram considerados dois principais fatores, a facilidade de adquirir o produto no mercado especializado e com valor acessível. Portanto, os principais materiais são: o microcontrolador Arduino<sup>®</sup>, a fonte de alimentação de 12V e 1A, o sensor de efeito Hall 49E, e o

eletroímã de 12V com 25mm de diâmetro.

A estrutura física do protótipo foi produzida em filamento do tipo PLA em uma impressora 3D, o que possibilitou a modelagem das peças, apresentando alta resistência e precisão. Com todas as peças impressas e os componentes eletrônicos alocados, a construção do módulo didático foi finalizada, como registrado na Figura 2.

**Figura 2 – Módulo didático construído e finalizado (esquerda), e visão interna de alguns componentes acoplados dentro da caixa-base (direita).**

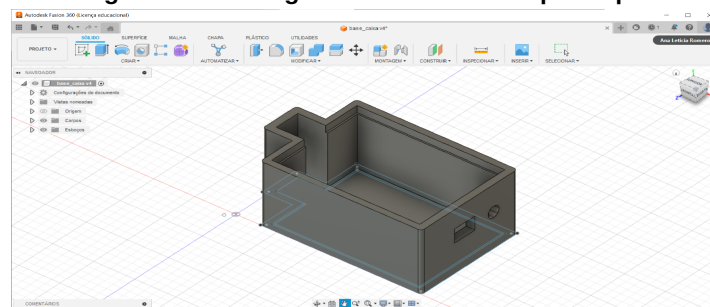


Fonte: Autoria Própria.

## Impressora 3D

A estrutura do protótipo foi modelada no software Fusion 360®, como mostra a Figura 3, com o objetivo de imprimir o projeto com certa precisão utilizando uma impressora 3D. O desenho foi feito com base no modelo disponibilizado no site Thingiverse.com levando em conta algumas adaptações e aprimoramentos (THINGIVERSE. . . , s.d.).

**Figura 3 – Modelagem da caixa-base do protótipo.**



Fonte: Autoria Própria.

Após obter a modelagem, gera-se o arquivo no formato STL (*Standard Triangle Language*) devido a capacidade de transmitir a composição geométrica de um desenho em 3D. Feito isso, com o software UltiMaker Cura é possível abrir o arquivo e configurar os parâmetros de impressão como, por exemplo, ajuste de precisão e quantidade de preenchimento interno.

Ao terminar a configuração, é gerado um arquivo do tipo GCode, sendo a linguagem de programação que a impressora 3D utiliza para interpretar os comandos de posicionamento e liberação de material. Com esse arquivo, a impressora inicia a impressão do objeto.



## Controlador PID

A estratégia de controle adotada e implementada para estabelecer a levitação no módulo didático foi a utilização do controlador Proporcional-Integrativo-Derivativo (PID), cuja função de transferência é mostrada na Equação 1.

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (1)$$

sendo  $K_p$  o ganho proporcional,  $K_i$  o ganho integrativo e  $K_d$  o ganho derivativo. O controlador PID é bem difundido na literatura especializada e pode ser visto com mais detalhes, por exemplo, em (OGATA, 2010).

O sistema de controle PID foi desenvolvido e implementado na plataforma de prototipagem Arduino® a partir de um código fundamentado e disponibilizado em Arduino Project Hub (MAGNET... , s.d.). Esse código executa repetidamente a ação de controle, ou seja, realiza os cálculos necessários para obter a saída desejada a partir de um *setpoint* estipulado.

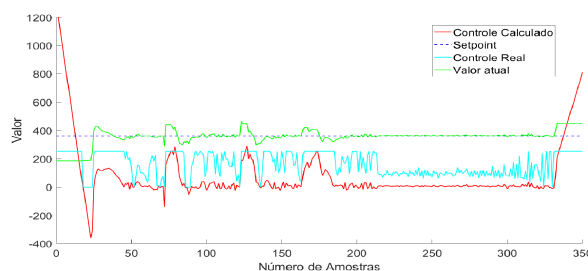
Através do método de sintonia empírica e realizando uma série de testes práticos, os parâmetros dos ganhos  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  foram ajustados, com o propósito que a ação de controle mantivesse o ímã levitando. Deste modo, o controlador age para minimizar o erro entre o *setpoint* e a posição real do objeto, ajustando a intensidade da corrente e, conseqüentemente, controlando o campo magnético gerado pelo atuador, que nesse sistema é o eletroímã.

A análise dos resultados foi realizada com o auxílio da ferramenta Matlab®, utilizada para gerar os gráficos e armazenar os dados por amostra. Neste contexto, estabeleceu-se que as amostras fossem coletadas a cada intervalo de 0,1 segundos. A partir das variáveis adquiridas, foram apresentadas informações referentes ao valor de controle calculado, isto é, sem a consideração da saturação, bem como o controle real levando em conta a saturação do sinal, o *setpoint* e o valor atual de saída (posição do ímã).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante os testes, três discos de ímã de neodímio com dimensões de 10x4mm foram utilizados, posicionados no *setpoint* definido, que representa a distância entre o ímã e o sensor de efeito Hall. Inicialmente, foram definidos os seguintes parâmetros:  $K_p = 2$ ,  $K_i = 0,01$  e  $K_d = 0,5$ . Pela Figura 4, é possível observar o comportamento do sistema para essa sintonia.

Figura 4 – Respostas transitórias para os ganhos  $K_p = 2$ ,  $K_i = 0,01$  e  $K_d = 0,5$ .



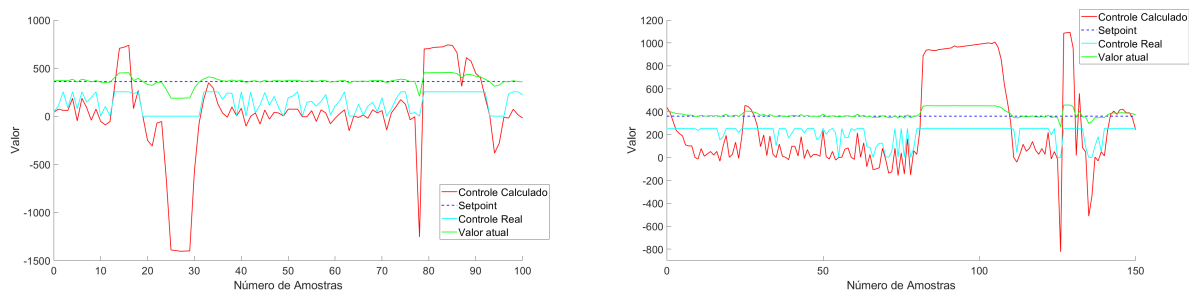
Fonte: Autoria Própria.



Nota-se que o sistema se manteve em estabilidade e com erro de regime permanente próximo a zero no intervalo de amostras entre 200 a 330, o que equivale a 13 segundos, já que as amostras são lidas a cada 0,1 segundos. Ou seja, o ímã de neodímio ficou levitando durante esse período de tempo com poucas oscilações, e em seguida foi atraído pelo eletroímã.

Como a experiência não teve um comportamento desejado, outros testes foram realizados ajustando apenas o ganho proporcional, chegando no valor de  $K_p = 8$ , mantendo os mesmos valores para os ganhos  $K_i$  e  $K_d$ . Posteriormente, foram realizados outros testes, agora ajustando todos os ganhos, atingindo os seguintes valores:  $K_p = 10$ ,  $K_i = 0,001$  e  $K_d = 0,4$ . Assim, obteve-se novos transitórios, demonstrados na Figura 5.

**Figura 5 – Respostas transitórias para os ganhos  $K_p = 8$ ,  $K_i = 0,01$  e  $K_d = 0,5$  (esquerda) e  $K_p = 10$ ,  $K_i = 0,001$  e  $K_d = 0,4$  (direita).**



Fonte: Autoria Própria.

Nota-se que o sistema da esquerda se manteve estável e com erro de regime permanente próximo a zero apenas no intervalo de amostras entre 35 a 77, aproximadamente, o que equivale a 4,2 segundos. Enquanto o sistema da direita, apresenta o mesmo comportamento no intervalo de 30 a 80, aproximadamente, o que equivale a 5 segundos. Logo, o controlador mostrou-se menos eficiente quando comparado aos resultados obtidos com os ganhos anteriormente definidos, constatando que, de fato, trata-se de um controle eficiente gerando uma resposta satisfatória, porém não duradoura, causando a atração do ímã.

## CONCLUSÃO

O trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de um módulo didático de baixo custo relativo de um sistema de levitação magnética, a partir da aplicação de um controlador PID, sendo o desempenho e resultados do controlador analisados por meio de excessivos testes na prática. Além da técnica de controle e configuração de software, foram aplicados conhecimentos de modelagem de peças para desenvolver a estrutura externa do módulo. Também, abrange a área de impressão 3D, já que as peças foram produzidas por uma impressora, através de técnicas e configurações apuradas.

Por meio do método empírico de sintonia, foram ajustados os parâmetros do controlador PID em busca de resultados satisfatórios. Esse método foi adotado, embora não seja o ideal, devido a complexidade de obtenção de um modelo matemático fiel ao sistema construído. A partir de diversos ensaios práticos, com distintas combinações de ganhos para o controlador, não foi possível alcançar



uma sintonia refinada e satisfatória para o PID.

Por fim, há expectativas para o aperfeiçoamento do projeto em futuros trabalhos como, por exemplo, obter uma modelagem confiável do sistema construído, aplicar técnicas de controle robusto, objetivando auxiliar na definição dos parâmetros que estabilizem o sistema de forma adequada.

### Agradecimentos

Agradeço à UTFPR pela concessão de bolsa e suporte para a realização deste projeto. Gostaria também de estender os agradecimentos ao Prof. Dr. Emerson Ravazzi Pires da Silva pelo apoio e por me proporcionar essa experiência de realizar uma pesquisa científica.

### Disponibilidade de Código

O código utilizado pode ser encontrado em (MAGNET... , s.d.).

### Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

## REFERÊNCIAS

AGUILAR-FIGUEROA, Bryan. A. et al. Electromagnetic Levitation System Based on a PID Controller. In: 2020 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV). [S.l.: s.n.], 2020. P. 1–5.

HURLEY, W.G.; WOLFLE, W.H. Electromagnetic design of a magnetic suspension system. **IEEE Transactions on Education**, v. 40, n. 2, p. 124–130, 1997.

MAGNET Levitation with Arduino. Disponível em:

<https://projecthub.arduino.cc/jsirgado/magnet-levitation-with-arduino-233746>. Acesso em: 10 ago. 2023. [S.l.].

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno, 5.ed.** [S.l.]: Ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2010.

SOUSA, Wescley T. B. de et al. Projeto MagLev Cobra - Levitação Supercondutora para Transporte Urbano. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Sociedade Brasileira de Física, v. 38, n. 4, e4308, 2016.

THINGIVERSE. Thingiverse - Digital Designs for Physical Objects. Disponível em:

<https://www.thingiverse.com/make:201394>. Acesso em: 10 ago. 2023. [S.l.].

WOODSON, Herbert H.; MELCHER, James R. **Electromechanical Dynamics, 3 vols.** [S.l.]: Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare.