

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

Engenharia Mecânica Linha de Formação Mecatrônica

Alessandra Batista Diniz

Felipe Tadeu Carneiro Lorenzeto

Felipe Vital Cacique

**LEVITAÇÃO MAGNÉTICA DE UM OBJETO COM CONTROLE DE POSIÇÃO
VERTICAL**

Belo Horizonte

2014

Alessandra Batista Diniz

Felipe Tadeu Carneiro Lorenzeto

Felipe Vital Cacique

LEVITAÇÃO MAGNÉTICA DE UM OBJETO COM CONTROLE DE POSIÇÃO VERTICAL

Trabalho apresentado à disciplina Controle de Processo
Mecânicos do curso de Engenharia Mecânica com
ênfase em Mecatrônica da Pontifícia Universidade
Católica de Minas Gerais.

Professor: Cláudio Dias Campos

Belo Horizonte

2014

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de explorar a teoria que envolve a levitação magnética, a qual envolve o eletromagnetismo e a teoria de controle de sistemas. Essa última será o enfoque do trabalho. Utilizando tal teoria, é possível realizar uma simulação do sistema e construir um protótipo que faça a levitação de um objeto, por meio de atração magnética, bem como o controle da sua posição vertical.

O trabalho será dividido em 3 passos, que se consistem na construção do protótipo, na utilização do MATLAB/SIMULINK para a realização da simulação do sistema e do projeto do controlador, e por último a implementação prática do controlador.

Palavras chave: Protótipo. Levitação magnética. Controle de posição. Bobina. Controle de sistemas.

ABSTRACT

This project aims to explore the theory that involves magnetic levitation, which involves electromagnetism and the theory of control systems. The latter will be the focus of the work. Using this theory, it is possible to perform a simulation of the system and build a prototype that makes the levitation of an object by means of magnetic attraction, as well as control its vertical position.

The project is divided into three steps, which consist in building the prototype, the use of the Matlab / Simulink simulation for the performance of the system and the controller design, and finally the practical implementation of the controller.

Keywords: Prototype. Magnetic levitation. Position control. Coil. Control systems.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Levitação eletromagnética por repulsão.....	11
FIGURA 2: Levitação eletromagnética por atração: forças atuantes.....	12
FIGURA 3: Levitação eletromagnética por atração.....	12
FIGURA 4: Levitação supercondutora.....	13
FIGURA 5: Microprocessador.....	14
FIGURA 6: Efeito Hall.....	14
FIGURA 7: Encapsulamento do sensor de Efeito Hall comercial.....	15
FIGURA 8: Amplificador não inversor.....	15
FIGURA 9: Amplificador subtrator.....	16
FIGURA 10: Transistor.....	17
FIGURA 11: Montagem.....	18
FIGURA 12: Diagrama em blocos.....	20
FIGURA 13: Amplificador diferencial de instrumentação com alto ganho.....	21
FIGURA 14: Circuito amplificador de corrente.....	23
FIGURA 15: Placa de amplificação.....	24
FIGURA 16 – Gráfico posição X B.....	25
FIGURA 17 – Curva PWM x Posição.....	26
FIGURA 18 – Condicionamento de Sinal.....	29
FIGURA 19 – Conversor sensor em posição.....	30
FIGURA 20 – Malha de Controle.....	31
FIGURA 21 – Levitação Magnética.....	32
FIGURA 22 – Levitação Magnética com alteração de massa.....	33

SUMÁRIO

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2 INTRODUÇÃO.....	9
2.1 Objetivo.....	9
3 DESENVOLVIMENTO.....	10
3.1 Levitação Magnética.....	10
3.2 Microcontrolador.....	13
3.3 Sensor de Efeito Hall linear.....	14
3.4 Amplificador Operacional.....	15
3.5 Transistor.....	16
4 METODOLOGIA.....	18
4.1 Montagem e equipamentos.....	18
4.2 Análise geral do sistema de levitação magnética.....	19
4.3 Sensor efeito Hall e circuito filtro e amplificador.....	20
4.4 Circuito amplificador de corrente utilizando transistores de alto ganho.....	22
4.5 Montagem do circuito amplificador.....	23
4.6 Curva PWM x B e equação do sistema.....	24
4.7 Controle PID.....	26
4.8 Implementação no SimuLink.....	27
5 CONCLUSÃO.....	31
6 REFERÊNCIAS.....	32

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Há várias aplicações do magnetismo no mundo atual. Ele está nos meios de transporte, onde os trens mais avançados tecnologicamente utilizam o magnetismo como princípio de funcionamento. HOBURG, James F. (2004) realizou um trabalho que mediu a força incidida sobre os passageiros dos trens que utilizam um arranjo especial de ímãs permanentes, chamados Halbach, e chegou a resultados que mostram magnitudes de campo de cerca de 1,5G no nível do chão, 0,5G a nível do banco, e 0,2G na cabeça dos passageiros.

Uma outra aplicação atual é retratada por KHAMESEE, Behrad; KATO, Norihiko; NOMURA, Yoshihiko; NAKAMURA, Tatsuya (2002) onde apresentaram um protótipo de micro robótica com um sistema baseado em princípios magnéticos. O objetivo foi de construir um sistema no qual itens em miniatura possam ser transportados e montados dentro de ambientes perigosos, com controle dos robôs a distância. Além disso, segundo Jung e BAEKO (2002), o movimento de objetos sem interação utilizando levitação magnética, eliminará a fricção, o principal fator limitante da micro fabricação. Eles propuseram a construção de um ímã móvel de seis graus de liberdade de posição usando forças de repulsão, e obteve resultados satisfatórios.

BERKELMAN e ZADOVSKY (2013), abordam a levitação magnética wireless a partir de uma plataforma com vários ímãs e várias bobinas, que estendem a amplitude de movimento em todos os 6 graus de liberdade, assim como o trabalho de JUNG e BAEKO (2002). A plataforma de levitação wireless elimina potenciais distúrbios da massa, fricção e tensão de todos os fios que ligam durante o movimento.

De acordo com SASAKI, YAGI e MURAKAMI (2004), uma bola de ferro pode flutua no ar, sem qualquer controle ativo. Isto é provavelmente devido à interação de várias bolas de ferro. No caso de materiais magnéticos esfera, eles podem ser magnetizados na mesma direção sem fechar contato, que pode ser a fonte de interação repulsiva de estabilização do equilíbrio de força ao longo de uma direção vertical. A estabilização horizontal é conseguida pelo posicionamento da bola no centro ímã, pelo menos em uma direção. A bola pode ser transportada de uma posição de equilíbrio para outra simplesmente girando o ímã de levantamento.

Já SAKURAI (2008), realizou um estudo experimental sobre a levitação magnética de esferas de ferro em uma caixa de plástico, onde o campo magnético era gerado por ímãs em forma de anel. Foi visto no experimento que as esferas flutuavam com mais estabilidade quando mais de uma esfera sofriam a ação do ímã, assim como no experimento de SASAKI, YAGI e

MURAKAMI (2004). E, além disto, foi verificado que há a possibilidade de infringir o teorema de Earnshaw, que estabelece que dois corpos com propriedades magnéticas permanentemente fixas não podem alcançar o equilíbrio estático.

Para que o equilíbrio estático seja alcançado, se faz necessário o uso de um sistema de controle em malha fechada, utilizando sensores e controladores. BACHLE, Thomas; HENTZELT, Sebastian; GRAICHEN, Knut implementaram o modelo de controle preditivo (MPC) para levitação magnética, que se consiste na utilização de um modelo do processo para prever seu comportamento futuro. Essa técnica de controle proporcionou o balanço estático de uma esfera metálica e o controle da sua posição vertical. Já LIN (2011) desenvolveu um controle proporcional-integrativo-derivativo (PID) juntamente com um controle de compensação de ruído, para controlar a posição de uma esfera metálica no ar, obtendo bons resultados.

2 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo estabelecer a teoria necessária para a construção de um protótipo para a levitação magnética de um ímã com controle de posição vertical. Serão abordados temas relacionados a teoria de controle.

Desde milhares de anos, depois que o homem descobriu o poder do ímã sobre certos materiais, vários fenômenos foram descobertos, explicados e muitos se transformaram em equipamentos largamente utilizados no cotidiano. Exemplos disso são os motores elétricos, televisores, disco rígido, inclusive trens que levitam magneticamente.

A levitação é um processo pelo qual se consegue suspender um objeto numa posição estável, sem apoio aparente, devida a forças que contrariam o peso do material, sem contato direto. A levitação de alguns materiais pode ser propulsionada pelas forças repulsivas e atrativas do magnetismo. Esse é o fenômeno da levitação magnética, que aos poucos revela aplicações inovadoras, capazes de revolucionar diversas áreas. Um exemplo disso é a levitação magnética presente nos trens MAGLEV (Magnetic Levitation Transport), que levita numa linha elevada sobre o chão. Como consequência eles conseguem atingir velocidades enormes, com baixo consumo de energia e pouco ruído, devido a falta de contato entre o veículo e a linha, sendo que a única fricção existente ocorre entre o trem e o ar. O MAGLEV de Xangai é capaz de alcançar uma velocidade operacional de 430 km/hora e uma velocidade máxima de 500 km/hora.

2.1 Objetivo

Deseja-se construir um protótipo que promova a levitação de um ímã, por meio de atração magnética, bem como o controle da sua posição vertical. Utilizando uma bobina com núcleo de ferro-silício de grãos não orientados para a geração do campo magnético.

3 DESENVOLVIMENTO

Este item apresenta conceitos relacionados ao fenômeno da levitação magnética, cujo tema é o objetivo do trabalho. Também são apresentados conceitos relativos ao eletroímã, microcontroladores, amplificadores operacionais, transistores, que são componentes importantes para a implementação do projeto.

3.1 Levitação Magnética

A levitação é um processo pelo qual se consegue suspender um objeto numa posição estável, sem apoio aparente, devida a forças que contrariam o peso do material, sem contato direto. A levitação de alguns materiais pode ser propulsionado pelas forças repulsivas e atrativas do magnetismo.

Existem três tipos básicos de levitação magnética: levitação eletromagnética por repulsão, levitação eletromagnética por atração, levitação supercondutora.

A levitação eletromagnética por repulsão consiste na utilização de bobinas com uma baixíssima resistência elétrica, que provoca o surgimento de uma corrente elétrica induzida em um condutor, devido variação do campo nas proximidades do mesmo. Essas correntes, conforme as leis de Faraday e Lenz induzem um campo magnético no condutor que se opõe ao campo que criado pela bobina. A interação entre ambos gera uma força de repulsão capaz de suspender o objeto.

Figura 1: Levitação eletromagnética por repulsão



Fonte: SILVEIRA(2003

A levitação eletromagnética por atração é aquela em que o corpo ferromagnético é mantido suspenso pela força atrativa de um eletroímã ou bobina.

O eletroímã é posicionado acima do objeto metálico, e a passagem de corrente elétrica faz com que no corpo atuem duas forças verticais. O peso do objeto é dirigido para baixo, e a força magnética produzida pela bobina, dirigida para cima, forças opostas. Se ambas as forças tiverem a mesma intensidade $F_{mag} = P_{esf}$, então o objeto estará suspenso. No entanto, o equilíbrio é muito instável, e qualquer variação na corrente ou na posição do corpo, faz com que o objeto saia do equilíbrio, caindo ou pregando num dos polos do eletroímã. Logo, não há como levitar sem que haja um sistema de realimentação, Fazendo-se necessário o uso de um sensoriamento da posição do objeto e um controle do campo gerado.

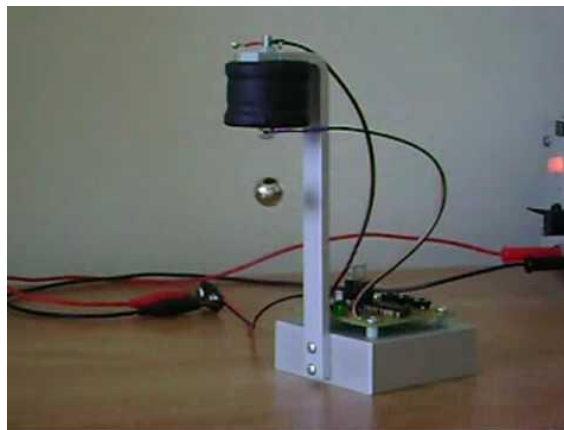
Figura 2: Levitação eletromagnética por atração: forças atuantes



Fonte: SILVEIRA, 2003

Existem inúmeros tipos de sensores de posição, com os indutivos, capacitivos, óticos, bem como vários tipos de controladores, como os amplificadores, PID, controle por computador, microcontrolador, e outros, usados durante muito tempo com a finalidade de controlar eficientemente a força eletromagnética necessária para o equilíbrio do sistema. O sistema dinâmico de um levitador magnético é um sistema não-linear, onde o controle deve atuar no balanço dinâmico do objeto levitado, no sentido de manter em equilíbrio as forças atuantes no sistema.

Figura 3: Levitação eletromagnética por atração



Fonte: GUERRERO, 2007

Outro método de levitação é a levitação supercondutora, que se baseia na propriedade diamagnética dos supercondutores para exclusão do campo magnético do interior dos supercondutores. As pastilhas supercondutoras, figura 4, operam a altas temperaturas, sendo resfriados com nitrogênio líquido ou hélio líquido.

Figura 4: Levitação supercondutora



Fonte: CLICKCIÊNCIA, 2012

3.2 Microcontrolador

De acordo com SOUZA (2005), o microcontrolador é definido como um pequeno componente eletrônico dotado de uma inteligência programável, utilizado no controle de processos lógicos. Afirma ainda que “em uma única pastilha de silício encapsulada, existem todos os componentes necessários ao controle de um processo”. Assim, o microcontrolador está provido internamente de memória de programa, memória de dados, portas de entradas, saída paralela, timers, contadores, comunicação serial, conversores analógicos-digitais, PWM, entre outros.

Através da programação em uma linguagem específica, em um dispositivo que permite a comunicação serial com o microprocessador, como é o caso do computador, é possível programar o microcontrolador, a fim de que ele empenhe uma determinada função ou realize algum processo.

Figura 5: Microprocessador



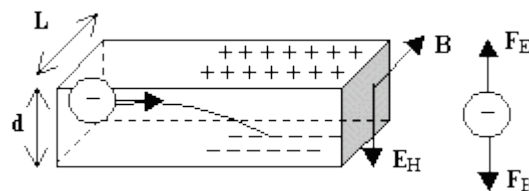
Fonte: MICROSHIP, 2012

Segundo MARTINS (2005) os microcontroladores estão presentes em quase tudo o que envolve eletrônica, diminuindo o tamanho, facilitando a manutenção e gerenciando tarefas internas de aparelhos eletrônicos, contribuindo para inovações tecnológicas.

3.3 Sensor de Efeito Hall linear

Segundo HALLIDAY (2012), quando uma fita condutora de espessura e , percorrida por uma corrente i , é submetida a um campo magnético B , alguns portadores de carga se acumulam em um dos lados da fita, criando uma diferença de potencial V entre os lados da fita. As polaridades dos lados indicam o sinal dos portadores de carga.

Figura 6: Efeito Hall



Fonte: HALLIDAY, 2012

O sensor de Efeito Hall linear é um sensor que utiliza o fenômeno físico do Efeito Hall para detectar a presença do campo magnético e a sua magnitude, fornecendo uma tensão proporcional ao valor do campo magnético.

Figura 7: Encapsulamento do sensor de Efeito Hall comercial



Fonte: Honeywell, 2012

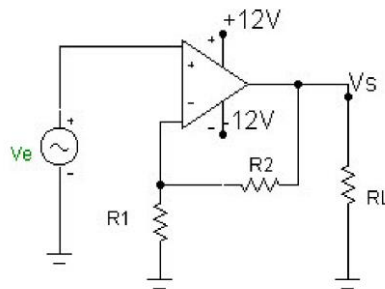
3.4 Amplificador Operacional

O amplificador operacional é um dispositivo em circuito integrado que possui inúmeras aplicações em todas as áreas de eletrônica. O amplificador operacional é um amplificador de tensão com ganho muito elevado. Ele possui dois terminais de entrada: um terminal designado por um terminal inversor (-) e outro por um terminal não inversor (+). A tensão de saída é a diferença entre as entradas + e -, multiplicado pelo ganho. Os circuitos com OPs, geralmente utiliza uma realimentação negativa, permitindo o controle de ganho do amplificador. Há várias formas de se utilizar um AO, entre elas:

Amplificador não inversor:

O sinal amplificado está da entrada não inversora:

Figura 8: Amplificador não inversor



Fonte: Elaborado pelos autores

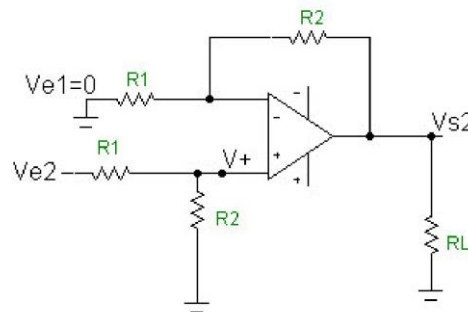
O ganho desse amplificador é:

$$A_{vf} = 1 + \frac{R_2}{21}$$

Amplificador subtrator ou diferencial:

Esse circuito subtrai a tensão ligada no terminal positivo, da tensão ligada no terminal negativo.

Figura 9: Amplificador subtrator



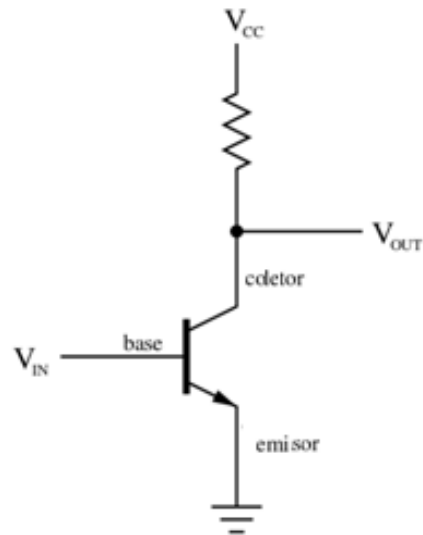
Fonte: Elaborado pelos autores

A fórmula para esse amplificador é:

$$V_{S1} = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_{e2} - V_{e1})$$

3.5 Transistor

O transistor é um componente eletrônico à base de silício muito utilizado para amplificar correntes, sinais e como chaveamento. O tipo mais comum é o transistor bipolar de junção (BJT), podendo se formada por uma junção NPN ou PNP. A corrente que entra na base do transistor causa uma corrente maior do coletor para o emissor, dado pela relação $i_c = B \cdot i_b$, sendo B o ganho do transistor. O transistor pode trabalhar na região ativa, região cuja corrente de base é amplificada seguindo a relação $i_c = B \cdot i_b$; ou então na região saturação, região no qual o transistor atinge o seu limite, não conseguindo mais amplificar a corrente de base, e na região de corte, na qual não há corrente no coletor. A região de trabalho do transistor depende do dimensionamento do circuito a que ele faz parte, dependendo principalmente da tensão V_{cc} , do resistor colocado na entrada coletor, e da corrente de base.

Figura 10: Transistor

Fonte: Elaborado pelos autores

O ganho depende do tipo de transistor. No entanto B sofre variações com a variação da temperatura de trabalho.

4 METODOLOGIA

Primeiramente foi necessário construir a estrutura do levitador e escolher a bobina utilizada, juntamente com o seu núcleo, pois é a corrente elétrica que passa por ela que irá gerar o campo magnético que será utilizado para levantar o objeto.

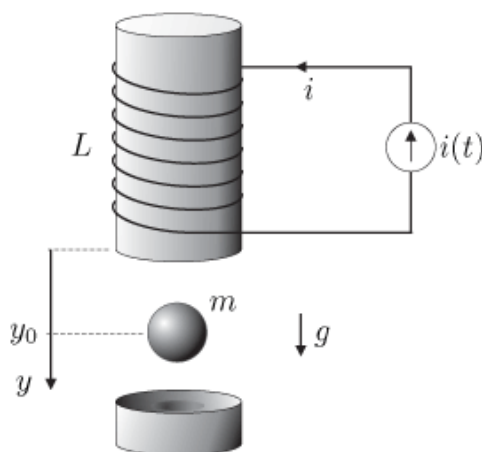
Por conveniência, foi escolhida uma fonte linear de 12V para a alimentação da bobina. A partir destes parâmetros foi possível dimensionar o circuito eletrônico, que tem papel de condicionador de sinais e amplificador da corrente que circula na bobina. Como se deseja controlar a posição vertical do ímã se faz necessário um controlador, o Arduino foi escolhido para tal tarefa.

Portanto, é necessário um sinal de entrada para este controlador, este sinal deve retratar a posição vertical do ímã, é preciso então de um sensor que forneça este sinal. O sensor escolhido foi o sensor de efeito hall, que detecta o campo magnético gerado pelo ímã.

4.1 Montagem e equipamentos

A idéia inicial da montagem foi então definida como sendo uma bobina solenóide atraindo o ímã por cima, como na figura abaixo:

Figura 11: Montagem



Fonte: Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica, 2008.

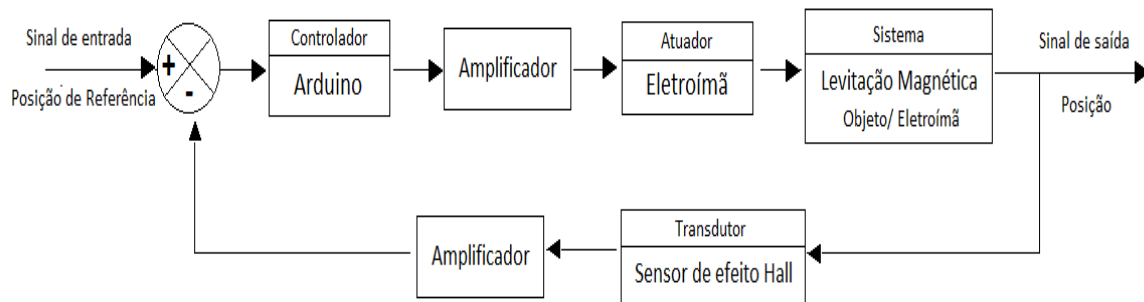
Sabe-se que o campo magnético diminui com o aumento da distância do ponto em que é gerado, logo podemos perceber se o ímã variou a sua posição se o campo magnético percebido pelos sensores também vaiar, e para que seja percebido apenas o campo magnético do ímã serão colocados dois sensores, um encima e um embaixo da bobina, para que um subtraia o campo do outro e o campo resultante seja apenas o campo do ímã.

Para a construção do protótipo, são necessários os seguintes equipamentos:

- 02 sensores de efeito Hall;
- 01 transistores de potência TIP112;
- 01 Amplificadores operacionais LM324;
- 01 bobinas;
- 01 núcleos de ferro-silício;
- 01 controlador Arduino;
- 01 placa de fenolite;
- 01 base para a bobina;
- 1 ímã de neodímio;

4.2 Análise geral do sistema de levitação magnética

O sistema de levitação magnética proposto é composto por um eletroímã localizado acima do objeto, capaz de gerar um campo magnético controlado pela corrente que sai do Arduino. O campo criado provoca uma força magnética no corpo, com direção vertical e sentido oposto ao seu peso, a fim de que anule com este. Um sensor de efeito hall detecta a posição do objeto, enviando um sinal elétrico ao controlador, que por sua vez ajusta o valor do campo magnético produzido, para que o objeto se mantenha estável, na posição de referência. A figura abaixo ilustra o processo.

Figura 12: Diagrama em blocos

Fonte: Próprio autor

4.3 Sensor efeito Hall e circuito filtro e amplificador

Foi usado o sensor de Efeito Hall linear SS495A que converte o valor do campo magnético em tensão elétrica. Deve-se, primeiramente, polarizar o sensor com 5v. Quando ele não está na presença de campo magnético, o valor da sua tensão de saída é de 2.5v (zero do sensor). Ela varia de 0 a 5 v quando há campo magnético ao redor.

É importante observar que o campo gerado na bobina influencia no valor lido pelos sensores. Para anular o efeito da bobina, optou-se por utilizar dois sensores, um em baixo do eletroímã e outro em cima. Teoricamente, o campo gerando na face inferior é igual ao gerado na face superior, com sentidos contrários. Um dos sensores S1 sofre influencia da bobina e do ímã, e o outro S2 sofre apenas o efeito da bobina.

Então:

$$S1 = B \text{ ímã} + B \text{ bobina}$$

e

$$S2 = B \text{ bobina}$$

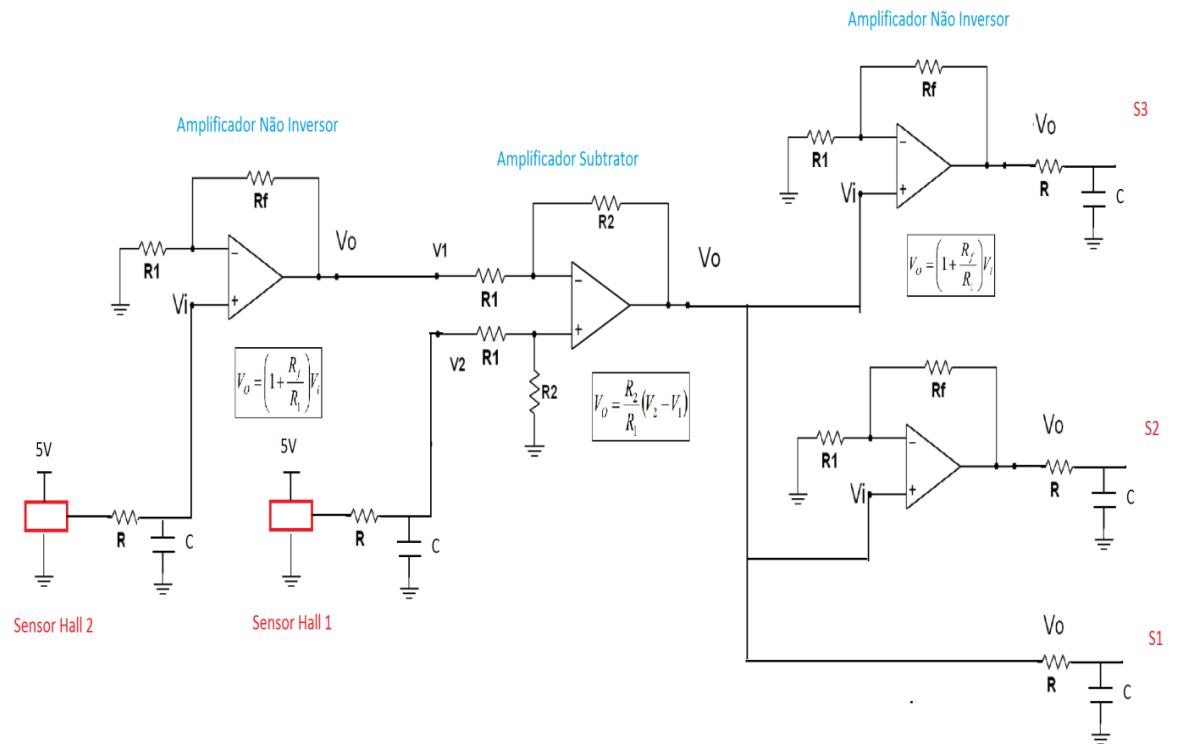
Fazendo a diferença dos dois, temos:

$$S1 - S2 = B \text{ ímã} + B \text{ bobina} - B \text{ bobina} = B \text{ ímã}$$

Além disso, para visualizar o sinal do sensor com maior resolução no Arduino, é necessário que sua saída seja amplificada, pois o Arduino não consegue perceber pequenas variações de tensão. Então foi ligado pino de saída do SS495A a um amplificador operacional

que, primeiramente funciona como um subtrator, fazendo $B_{ímã} = S1 - S2$. Este mesmo circuito também funciona como um amplificador de tensão, com o valor do ganho podendo ser variado através de um potenciômetro, e ajustado de acordo com as necessidades do projeto. A montagem do circuito de instrumentação se encontra abaixo:

Figura 13: Amplificador diferencial de instrumentação com alto ganho



Fonte: Elaborado pelos autores

Sendo que para o circuito:

$+V_1$ = sinal do sensor inferior

$+V_2$ = sinal do sensor superior

$R2 = 100K$ variável

V_o = saída do amplificador para o conversor A/D do arduino

O ganho do amplificador é $B = Avf = 1 + 2 \frac{R1}{R2} (V_2 - V_1)$

O circuito amplificador diferencial de instrumentação garante uma grande precisão, e menor ruído.

4.4 Circuito amplificador de corrente utilizando transistores de alto ganho

A corrente de saída do Arduino é limitada, e neste projeto é importante que haja uma corrente elevada passando pelas bobinas. Portanto é necessário o uso de um amplificador de corrente. Utilizamos para tal 1 transistor de alto ganho TIP112, cuja $I_{ce\ max} = 2A$, um para cada eletroímã, e cujo ganho é $\beta = 1000$.

O circuito é representado pela figura 1. Deseja-se que os transistores trabalhem na região de corte e saturação, funcionando como um amplificador do PWM, mais precisamente como um amplificador de corrente, e que a corrente $i_{ce\ max}$ do circuito seja $i_{ce\ max} = \frac{v_{cc}}{r_c} = \frac{12V}{14,1\ \Omega} = 850mA$, que corresponde à corrente de saturação i_{sat} .

Essa corrente deverá ser atingida quando $V_{PWM} = 5V$. A partir disso, foi calculado o valor do resistor r_b .

Temos que

$$i_b \times \beta = i_c$$

$$i_b \times 1000 = 850mA$$

Logo:

$$i_b = 0,85mA$$

Analisando a malha de entrada para quando V_{pwm} for máximo, e aplicando a Lei das Tensões de Kirchoff, temos:

$$V_{pwm} = 100\Omega \times 2i_b + r_b i_b + V_{be}$$

Sabe-se que V_{be} do TIP112 é 1,4V.

Então:

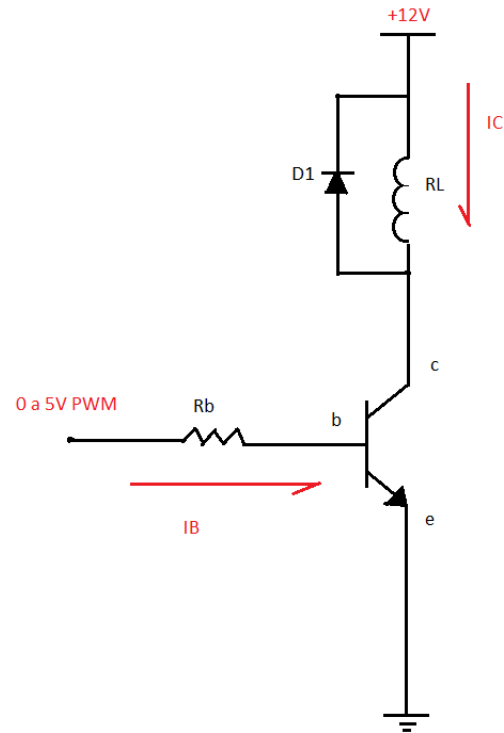
$$5V = 100\Omega \times 2 \times 0,85mA + r_b \times 0,85mA + 1,4V$$

Logo:

$$r_b = 4035\Omega$$

Então, para garantir que o transistor se mantenha na região de corte e saturação, foi utilizado um resistor com um valor inferior ao calculado.

Figura 14: Circuito amplificador de corrente



Fonte: Elaborado pelos autores

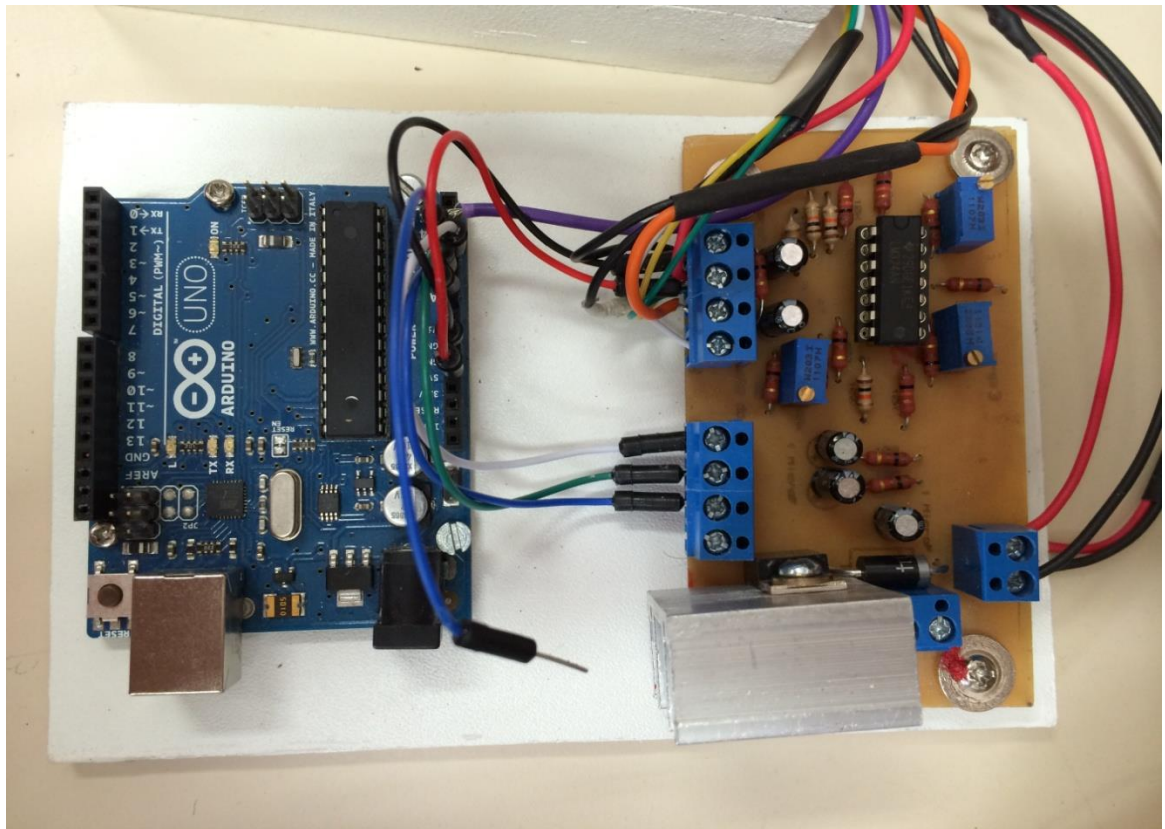
O diodo em paralelo com a bobina protege o circuito, pois quando cessa a corrente no eletroímã, este torna-se uma fonte, cuja corrente possui o mesmo sentido de i_c . A corrente de fuga, então, passa pelo diodo, evitando danos no transistor.

4.5 Montagem do circuito amplificador

Os circuitos amplificadores possuem um para o sinal de entrada e o outro para o sinal de saída, utilizando amplificadores operacionais e transistores, além do potenciômetro para controlar a posição, foram montados sobre uma placa de circuito impresso, e soldadas a esta.

O layout do circuito foi feito através do software Proteus, que posteriormente foi transferida para uma placa de fenolite e depois foi corroida.

Figura 15: Placa de amplificação

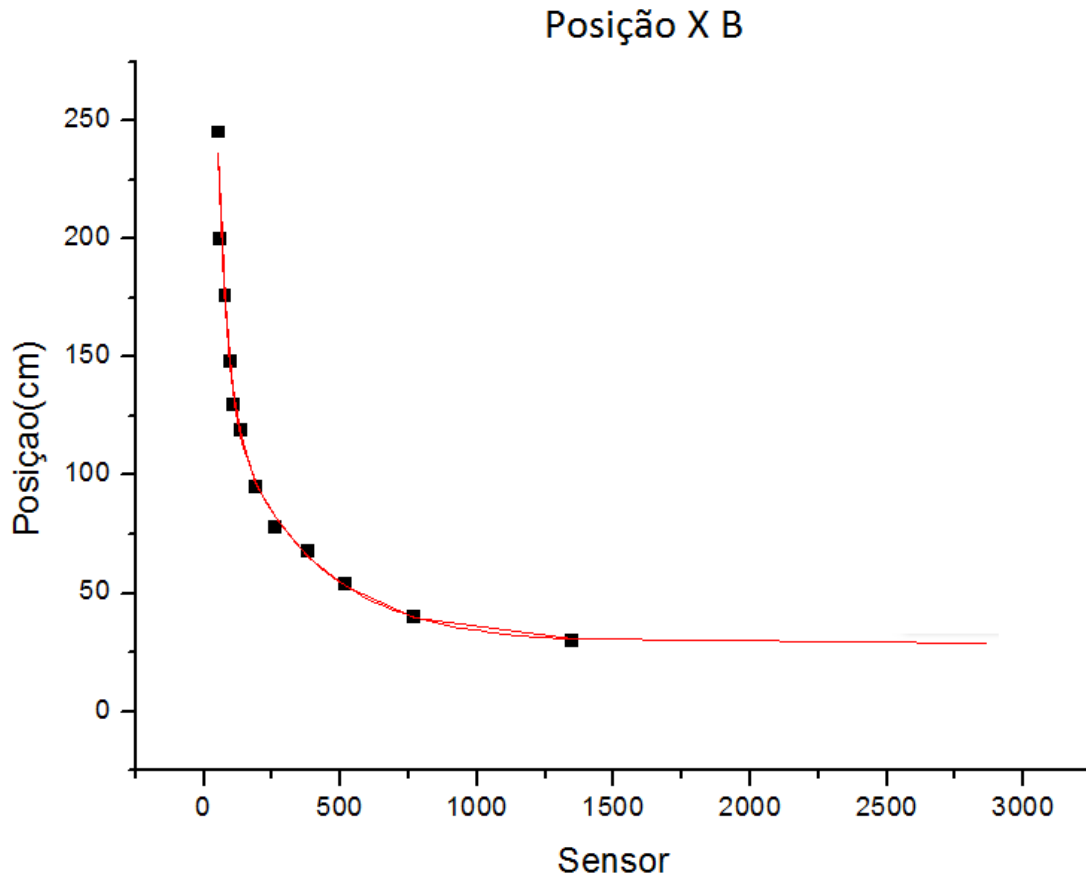


Fonte: Elaborado pelos autores

4.6 Curvas Posição x B e PWM x Posição e equação do sistema

O sensor de efeito hall utilizado recebe o sinal do campo magnético B do ímã que será levitado, então foi levantada uma curva que relaciona o valor do sensor com a posição do ímã, medido com uma régua. Através do software Origin foi obtida a equação Posição X B.

Figura 16 – Gráfico posição X B



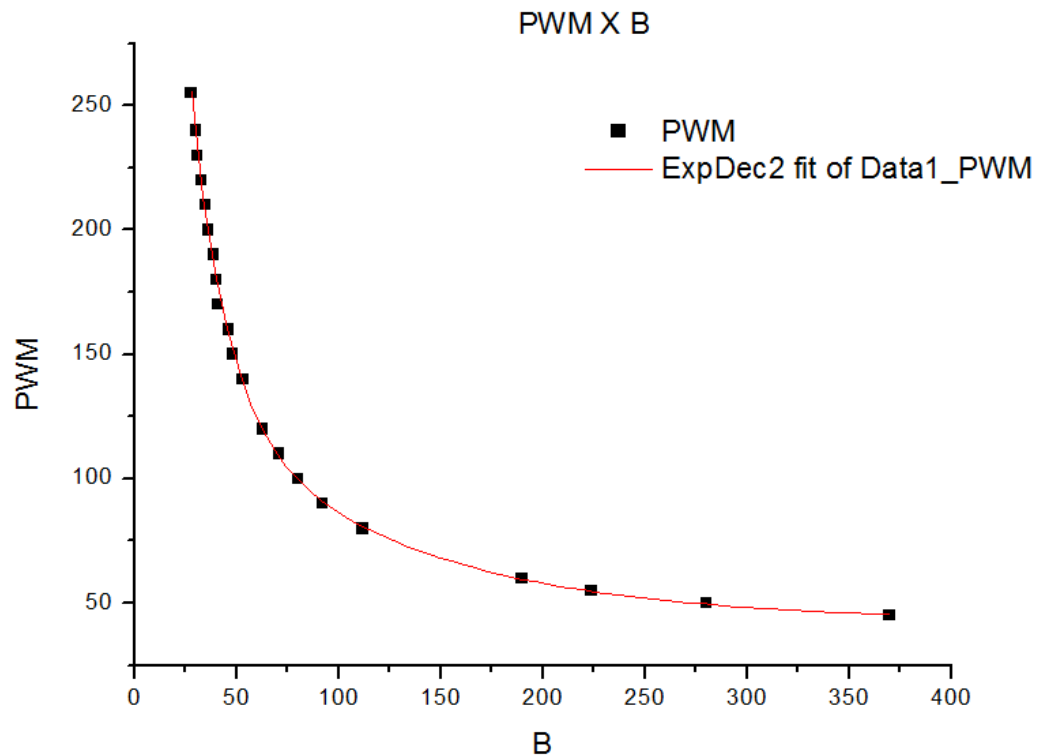
Fonte: Elaborado pelos autores

A equação da curva é:

$$Z = 28,62 + 111,16e^{-B/328,514} + 529,62e^{-B/9,849}$$

Sendo Z o valor da posição dado em centímetros.

Em seguida pensou-se numa equação do sistema em que tivesse o valor do campo magnético produzido pela bobina necessário para flutuação em função da posição desejada. O campo magnético do eletroímã é gerado pela corrente que circula nesse, e a corrente é gerada pelo PWM. Portanto, a fim de se obter maior precisão, foi feita uma curva do PWM em função da posição.

Figura 16 – Curva PWM x Posição

Fonte: Elaborado pelos autores

A equação da curva é:

$$PWM = 27,70 + 16,02 * Z + 11,55 * Z^2$$

Esta equação foi utilizada no algoritmo de controle, pois através dela pode-se conhecer o valor de PWM que deve ser enviada à saída do arduino, teoricamente, desprezando a instabilidade, para mantê-lo na posição desejada.

4.7 Controle PID

O controle proporcional, integrativo e derivativo (PID) é uma técnica relativamente simples que permite um controle eficaz de um sistema em malha fechada. O algoritmo implementado na plataforma arduino utilizou-se dessa teoria de controle para garantir a estabilidade do imã e o controle de sua posição. A equação geral do controle é:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Onde:

- $u(t)$: saída do controlador
- K_p : ganho proporcional
- K_i : ganho integral
- K_d : ganho derivativo
- e : erro
- t : tempo instantâneo
- τ : Variável de integração; assumindo os valores de tempo 0 até o atual t .

Para o sistema de levitação, a saída é o valor de PWM, no entanto o erro poderia ser tanto em relação a distância Z , quanto em relação ao próprio PWM. Caso fosse utilizado o erro como sendo $e(t) = Z_{referência} - Z(t)$, seria necessário calcular as constantes K_p, K_i e K_d para cada posição. Isto, pois verificou-se experimentalmente que as constantes de o valor do campo B no sensor são inversas, pois quanto mais distante o ímã estiver do eletroímã, maior serão os valores das constantes, e menor serão os valores de B .

Ao se utilizar o erro como sendo $e(t) = PWM(Z_{referência}) - PWM(Z(t))$, obtém-se uma relação diretamente proporcional entre a função PWM e as constantes, pois quando quanto mais distante o objeto da bobina, maior é o valor de PWM necessário para flutuar o ima nessa posição.

Os termos proporcional e derivativo são responsáveis por garantir o equilíbrio do objeto, mas não garantem o erro nulo. O integrativo tornaria o erro de posição praticamente zero, no entanto foi utilizado apenas o PD.

As constantes definem o comportamento da saída, podendo ser instável, amortecido, subamortecido, e outros. Foram encontradas as constantes K_p, K_i e K_d através de um potenciômetro, que tonaram o sistema subamortecido. Não foi necessário obter valores das constantes para cada posição, uma vez que o erro $e(t)$ calculado em função do PWM, corrige a expressão do sinal de controle.

Adicionalmente a equação de controle contando com uma peculiaridade. Imaginando um sistema de levitação ideal, desprezando os distúrbios do sistema, ruídos, etc, o controle utilizando apenas a equação PWM X Posição já seria suficiente para levitar o ímã numa posição desejada. Portanto a equação de controle foi modificada com a adição de um sinal de Bias, ou seja, um sinal fixo que corresponde ao valor que deve ser enviada na saída do arduino, para cada posição desejada. Sendo assim, o controle PID entraria apenas para corrigir os pequenos distúrbios. Isto torna o sistema mais preciso e estável. A equação de controle ficaria de acordo com a equação.

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + Bias$$

Sendo:

$$Bias = PWM(Posição\ de\ Referência)$$

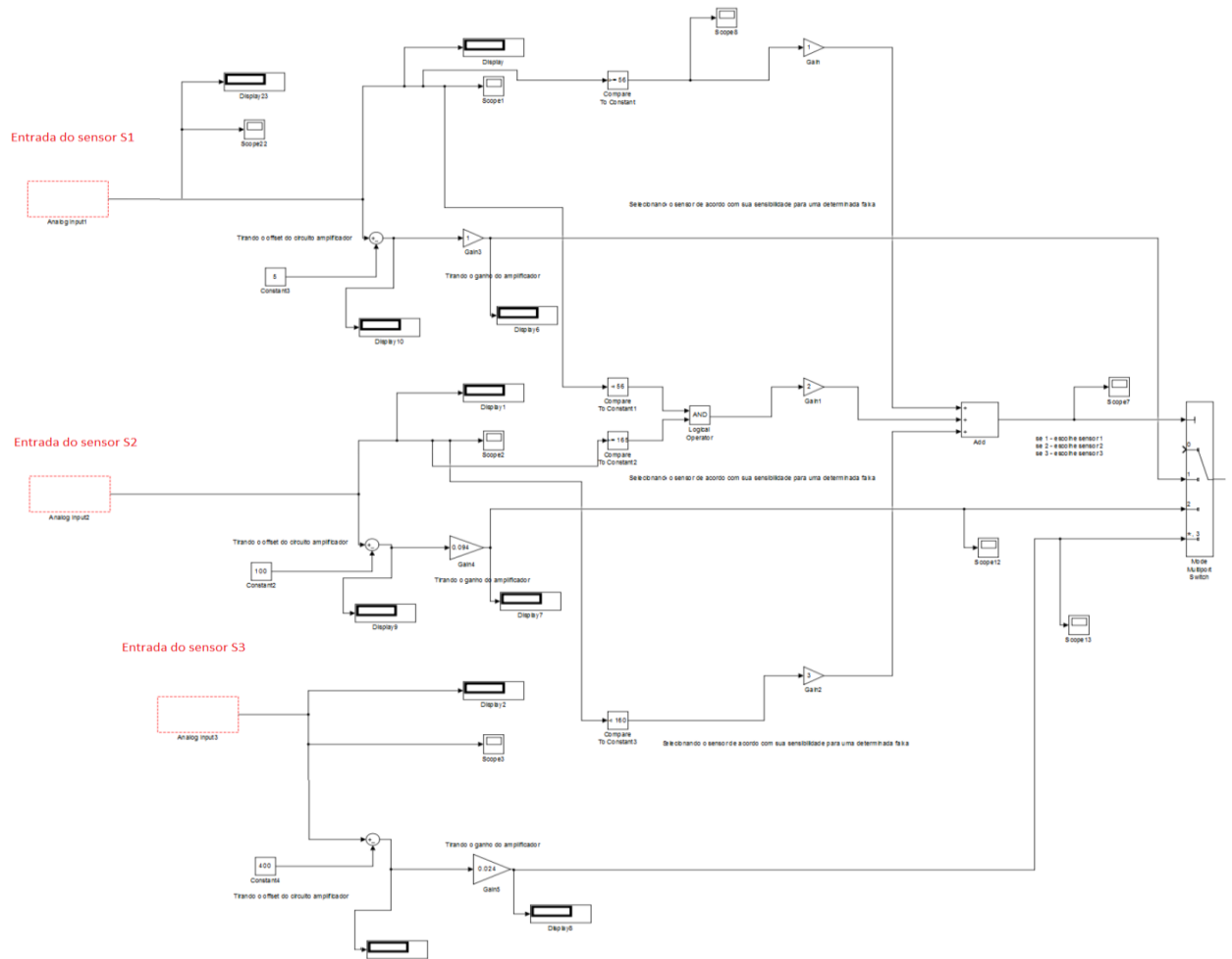
$$e(t) = PWM(Z\ referência) - PWM(Z(t))$$

O PWM está trabalhando numa frequência de 480Hz, e a saída é atualizada a cada período de oscilação, ou seja, 480 amostras de saída por segundo.

4.8 Implementação no SimuLink

Para a implementação do controle foi utilizado o SimuLink, junto a uma biblioteca do arduino, que permite que o Simulink receba, processe e envie dados para o arduino. Inicialmente foi implementado um condicionador de sinal. Ele é responsável por receber os sinais amplificados do sensor, de efeito hall S1, S2 e S3 e mixa-los em um único sinal. Dessa forma obteve-se um sinal S mais sensível, alcançando longas distâncias.

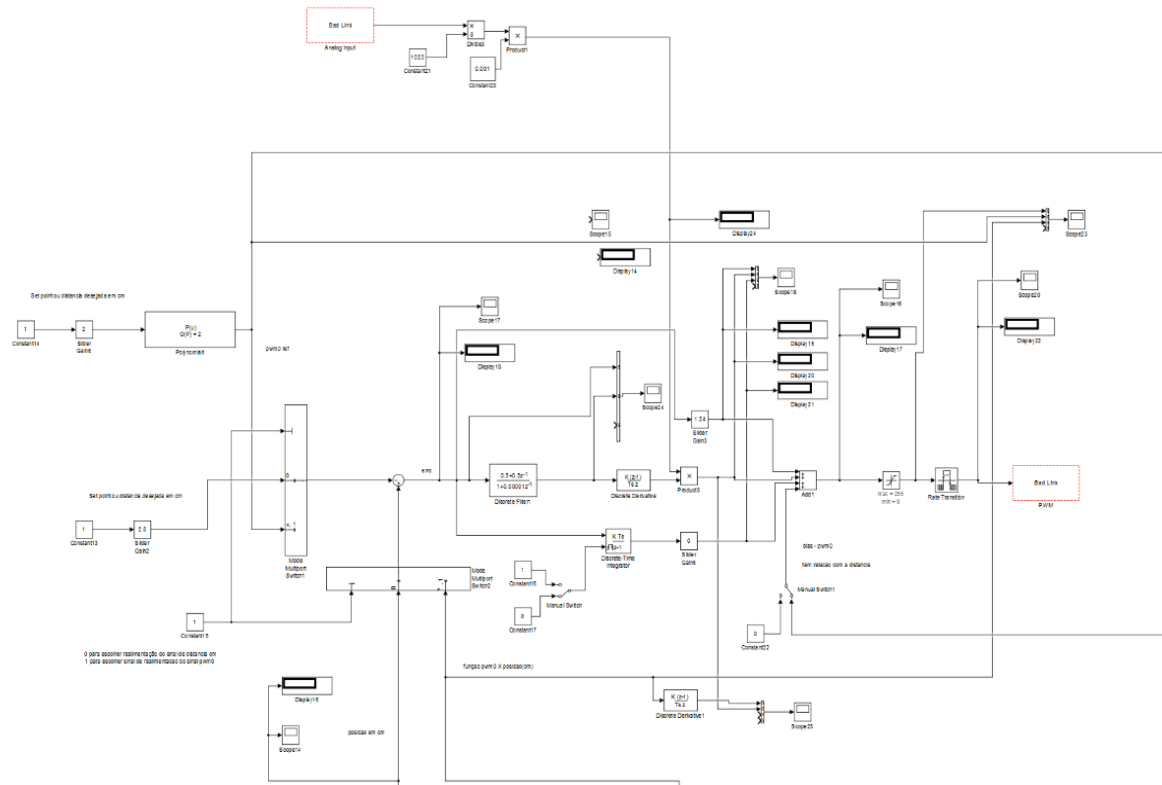
Figura 18 – Condicionamento de Sinal



Fonte: Elaborado pelos autores

O sinal S, saída do condicionador, é um sinal referente ao valor do campo magnético que o imã a ser levantado imprime sobre o sensor. Então foi levantada uma curva que relaciona o valor do sinal S com a posição do imã Z, de acordo com a figura 18. A saída desse circuito é a posição do imã em certo instante, dado em centímetros. Também foi adicionado um circuito que transforma o valor de distância em PWM, implementando assim a equação PWM X Posição Z.

Figura 20 – Malha de Controle

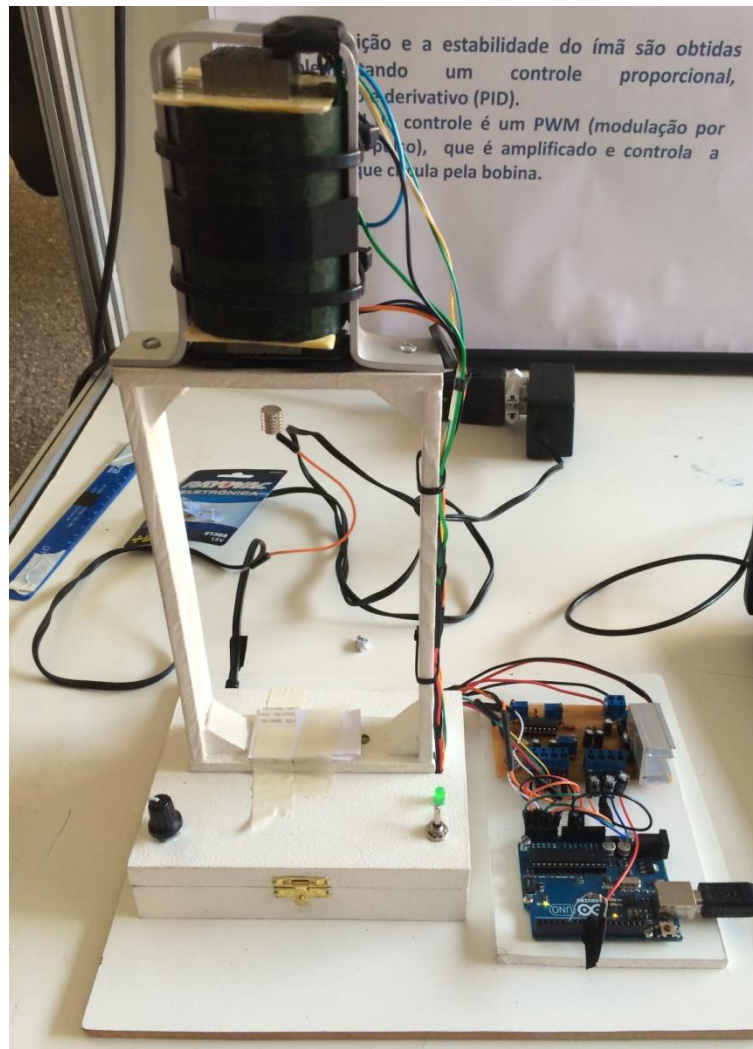


Fonte: Elaborado pelos autores

5 CONCLUSÃO

Explorando a teoria de controle de sistemas mecânicos foi possível construir um protótipo que promove a levitação de um ímã, por meio de atração magnética, bem como o controle da sua posição vertical. O protótipo foi construído e em seguida gerado o controle de posição, através da placa programável Arduino, utilizando um controle proporcional derivativo (PD). O trabalho cumpriu os objetivos, e o ímã levitou estaticamente e possuindo o controle de sua posição, porém tendo uma faixa de variação de poucos centímetros.

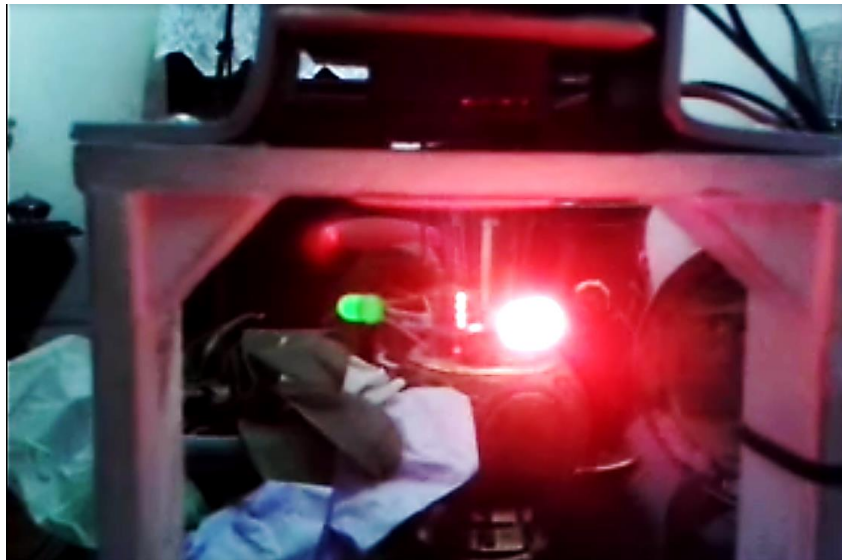
Figura 21 – Levitação Magnética



Fonte: Elaborado pelos autores

O sistema se mostrou muito estável a ruídos, vibrações, interferências mecânicas, inclusive à alteração na massa do objeto a ser levitado como mostra a figura 22.

Figura 22 – Levitação magnética com alteração de massa



Fonte: Elaborado pelos autores

6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. A. M. **Ensino da lei de Lenz: Uma proposta experimental**. Relatório Final, Unicamp. 2003. São Paulo.

BACHLE, Thomas; HENTZELT, Sebastian; GRAICHEN, Knut. Nonlinear model predictive control of a magnetic levitation system. **Control Engineering Practice**, [S.l.], v. 21, n. 9, p. 1250-1258, set. 2013.

BERKELMAN, Peter; DZADOVSKY, Michael. Magnetic Levitation Over Large Translation and Rotation Ranges in All Directions. **IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS**, vol. 18, n. 1, p. 44-52, fev. 2013.

GEIM, A. K.; SIMON, M. D.; BOAMFA, M. I.; HEFLINGER, L. O.. Magnetic levitation at your fingertips. **NATURE**, vol. 400, p. 223-224, jul. 1999.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo**. LTC (GRUPO GEN) vol.. 3, 9e.d. 2012 416 p.

HOBURG, James F. Modeling Maglev Passenger Compartment Static Magnetic Fields From Linear Halbach Permanent-Magnet Arrays. **IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS**, vol. 40, n. 1, p. 59, jan 2004.

JUNG, Kwang Suk; BAEK, Yoon Su. Contact-Free Moving-Magnet Type of Micropositioner With Optimized Specification. **IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS**, vol. 38, n. 3, p. 1539-1548, maio. 2002.

KHAMESEE, Behrad; KATO, Norihiko; NOMURA, Yoshihiko; NAKAMURA, Tatsuya. Design and Control of a Microrobotic System Using Magnetic Levitation. **IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS**, vol. 7, n. 1, p. 1, mar. 2002

LIN, Chih-Min; LIN, Ming-Hung; CHEN, Chun-Wen, SoPC-Based Adaptive PID Control System Design for Magnetic Levitation System. **IEEE SYSTEM JOURNAL**, vol. 5,n. 2, p. 278-287, jun. 2011.

MARTINS, Nardênio Almeida. **Sistemas Microcontrolados**: Uma abordagem com o Microcontrolador PIC 16F84. Editora Novatec Ltda, 1ª edição. 2005.

SAKURAI, Yuryo. Magnetic levitation of an iron ball. **Journal of Applied Physics**, [S.l.], v. 104, p. 044503, ago. 2008.

SASAKI, S.; YAGI, I.; MURAKAMI, M.. Levitation of an iron ball in midair without active control. **Journal of Applied Physics**, vol. 95,n. 4, p. 2090-2093, fev. 2004.

SEED. Desafio de Engenharia: Construindo um Eletroímã. SEED, Disponível em: <http://www.planetseed.com/files/uploadedfiles/f02_pt.pdf>. Acesso em 01 out. 2013.

SOUZA, David José. Desbravando o PIC: **Ampliado e Atualizado para PIC 16F628A**. 8ª ed. São Paulo, SP, Brasil: Érica, 2005.