

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

Engenharia Mecânica Linha de Formação Mecatrônica

Felipe Tadeu Carneiro Lorenzeto

Felipe Vital Cacique

Marcio Antônio Mutunda

Natália Cristina Borges de Lima

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

Belo Horizonte

2013

Felipe Tadeu Carneiro Lorenzeto

Felipe Vital Cacique

Marcio Antônio Mutunda

Natália Cristina Borges de Lima

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

Trabalho apresentado à disciplina de TIC do curso
de Engenharia Mecânica com ênfase em
Mecatrônica da Pontifícia Universidade Católica de
Minas Gerais

Professora: Cristiana Brasil Maia

Belo Horizonte

2013

Felipe Tadeu Carneiro Lorenzeto

Felipe Vital Cacique

Marcio Antônio Mutunda

Natália Cristina Borges de Lima

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

Trabalho apresentado à disciplina de TIC do curso
de Engenharia Mecânica com ênfase em
Mecatrônica da Pontifícia Universidade Católica de
Minas Gerais

Cristiana Brasil Maia

Cristiana Brasil Maia - PUC Minas

Belo Horizonte, 03 de outubro de 2013

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de explorar a teoria que envolve a levitação magnética, a qual envolve, principalmente, a teoria do eletromagnetismo. Aproveitando tal teoria, é possível construir um protótipo que faça a levitação de um ímã, por meio de atração magnética, bem como o controle da sua posição vertical. O trabalho foi dividido em 3 passos, como a seguir: 1) o protótipo foi concebido e construído, 2) medições foram realizadas para definir a corrente que gera o campo magnético suficiente para atrair o ímã, em relação à distância do ímã a bobina 3) com base nos dados, foi gerado o controle de posição, que envolve o circuito eletro-eletrônico conectado a um controlador programável, que irá enviar o sinal de controle para a bobina. A variável controlada será a corrente que circula na bobina, porque o campo magnético gerado pela bobina é diretamente proporcional à corrente, e o campo magnético é o responsável pela atração do ímã. O trabalho foi bem sucedido, e o ímã levitou estaticamente e possuindo o controle de sua posição, tendo esta uma faixa de variação de poucos centímetros.

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

ABSTRACT

The present work intends to explore the theory involved in magnetic levitation, which mainly involves the theory of electromagnetism. Taking advantage of such theory it is possible to build a prototype that allows the levitation of a magnet by means of magnetic attraction, as well as the control of its vertical position. The experiment will be conducted in 3 steps, as following: 1) the prototype was designed and constructed; 2) measurements were conducted to determine the current that generates the magnetic field sufficient to attract the magnet in relation to the distance of the magnet coil; 3) based on the data, was generated the control position, which involves electro- electronic circuit connected to a programmable controller , which will send the control signal to the coil . The controlled variable is the current flowing in the coil, because the magnetic field generated by the coil is directly proportional to the current and the magnetic field is responsible for the attraction of the magnet. The work was successful, and the magnet levitated statically and having the control of its position, and this having a range of variation about a few centimeters.

Keywords: Prototype. Magnetic levitation. Position control. Magnet. Coil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Levitação eletromagnética por repulsão.....	20
Figura 2: Levitação eletromagnética por atração: forças atuantes	21
Figura 3: Levitação eletromagnética por atração	21
Figura 4: Levitação supercondutora	22
Figura 5: Linhas de campo magnético.....	23
Figura 6: Atração e repulsão do ímã	25
Figura 7: Campo magnético produzido por um elemento infinitesimal em um fio condutor.....	26
Figura 8: Campo magnético produzido por corrente elétrica.....	27
Figura 9: Representação de um eletroímã	27
Figura 10: Ângulo θ de um eletroímã	28
Figura 11: Linhas de campo no eletroímã.....	29
Figura 12: Microprocessador	30
Figura 13: Efeito Hall.....	31
Figura 14: Encapsulamento do sensor de Efeito Hall comercial	31
Figura 15: Amplificador não inversor	32
Figura 16: Amplificador subtrator	32
Figura 17: Transistor	33
Figura 18: Montagem.....	36
Figura 19: Diagrama em blocos	37
Figura 20: Amplificador diferencial de instrumentação com alto ganho	39
Figura 21: Circuito amplificador de corrente.....	41
Figura 23: Placa de amplificação e sensor hall	42
Figura 22: Layout da placa.....	42
Figura 24: Estrutura para levitação	43
Figura 25: Bobinas	44
Figura 26: Curvas no processing.....	49
Figura 27: Ímã em levitação	50
Figura 28: Arduino e placa amplificadora em funcionamento	51

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA	19
4.1. Levitação Magnética	19
4.2. Campo Magnético	22
4.3. Propriedades magnéticas do material	23
4.4. Ímã	24
4.5. Lei de Biot-Savat	26
4.6. Eletroímã	27
4.7. Lei de Faraday	29
4.8. Lei de Lenz	29
4.9. Microcontrolador	30
4.10. Sensor de Efeito Hall linear	30
4.11. Amplificador operacional	31
4.12. Transistor	33
5. DESENVOLVIMENTO	35
5.1. Montagem e equipamentos	36
5.2. Análise geral do sistema de levitação magnética	37
5.3. Sensor de efeito Hall e circuito de filtro e amplificador	38
5.4. Circuito amplificador de corrente utilizando transistores de alto ganho	40
5.5. Montagem dos circuitos amplificadores	41
5.6. Montagem da estrutura e experimentos	42
5.7. Curva $PWM \times B$ e equação do sistema	46
5.8. Controle PID	47
5.9. Interface gráfica utilizando o Processing	49
5.10. Colocação do sistema em operação	50
6. CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	53
ANEXO	Error! Bookmark not defined.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo estabelecer a teoria necessária para a construção de um protótipo para a levitação magnética de um objeto com controle de posição vertical. Serão abordados temas como a geração de campo magnético, efeito hall, ciência dos materiais, teoria de controle etc.

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.

Outro exemplo de levitação magnética está na área da energia eólica. É um projeto que foi apresentado pela empresa MagLeve que poderá ser uma solução tecnológica que faltava para a viabilização econômica da energia eólica. A turbina MagLev utiliza levitação magnética para oferecer um desempenho muito superior em relação às turbinas tradicionais. Ela possui um design diferente dos tradicionais cata-ventos. As pás verticais da turbina de vento são suspensas no ar, acima da base do equipamento. Ao invés de se sustentarem e de girarem sobre rolamentos, essas pás ficam suspensas, sem contato com outras partes mecânicas e, portanto, podem girar sem atrito, o que aumenta muito seu rendimento. As maiores turbinas atuais geram 5 MW de potência. Já uma MagLev gigantesca poderia gerar cerca de 1 GW, o suficiente para abastecer 750.000 residências.

2. OBJETIVOS

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 duas bobinas com núcleo de ferro-silício para a geração do campo magnético. Definir, através de medições experimentais, a corrente que gera o campo magnético suficiente para atrair o ímã, em relação à distância do ímã a bobina. E com base nestes dados, gerar o controle de sua posição, utilizando a placa programável Arduino.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a realização deste trabalho, foi feita uma revisão bibliográfica em artigos para um melhor embasamento dos conhecimentos sobre eletromagnetismo e levitação, assim como as suas aplicações práticas.

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 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 (sem fio) a partir de uma plataforma com vários ímãs e várias bobinas, que estendem a amplitude de movimento em todos os 6 DOF (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.

4. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

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

4.1. 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 podem ser propulsionados 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, Fernando Lang (2003)

A levitação eletromagnética por atração ou EML (Eletromagnetic levitation) 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 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 pólos do eletroímã (no caso do objeto ser um ímã). 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, Fernando Lang (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 (compensador) deve atuar no balanço dinâmico do objeto levitado, no sentido de manter em equilíbrio as forças atuantes no sistema.

A figura é resultado de um projeto no qual foi utilizado esse método de levitação.

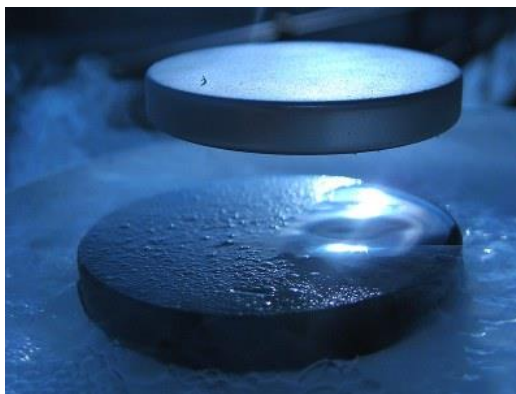
Figura 3: Levitação eletromagnética por atração



Fonte: GUERRERO, Francisco (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, operam a altas temperaturas, sendo resfriados com nitrogênio líquido ou hélio líquido.

Figura 4: Levitação supercondutora



Fonte: CLICKCIÊNCIA, 2012

4.2. Campo Magnético

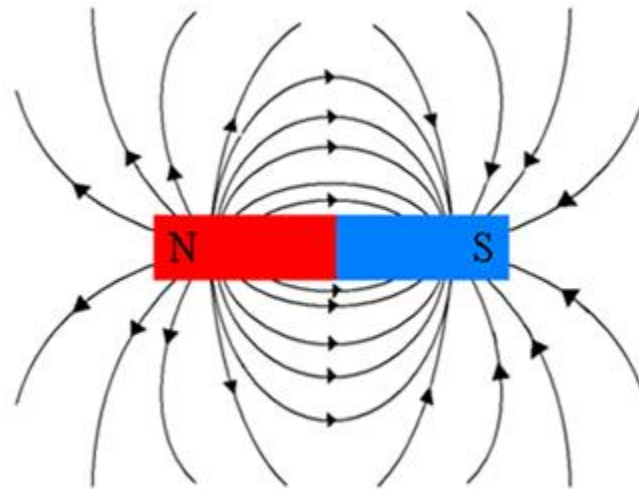
O campo magnético B é uma grandeza vetorial definida em termos de força Fb que age sobre uma determinada partícula de prova de carga q que está se movendo com velocidade v na presença do campo:

$$Fb = qv \times B$$

A unidade de B no Sistema Internacional é o tesla (T).

A direção do campo magnético B coincide aquela para o qual a força é zero. Um artifício útil para observar a direção do campo magnético é a sua representação em linhas de campo, como ilustrado na figura

Figura 5: Linhas de campo magnético



Fonte: HALLIDAY(2012)

A orientação das linhas de campo parte do pólo norte magnético e se dirige para o pólo sul magnético.

4.3. Propriedades magnéticas do material

Em todo material, o elétron possui um momento angular intrínseco denominado de spin, que na física clássica pode ser associado a um movimento de rotação do elétron; e um outro tipo de momento angular, conhecido como momento angular orbital.

As propriedades magnéticas dos materiais são o resultado da combinação dos momentos dipolares ao longo de todo o material. Essas propriedades podem ser classificadas em três tipos básicos. Eles são: diamagnetismo, paramagnetismo e ferromagnetismo.

HALLIDAY (2012) define essas propriedades como: Todo material diamagnético submetido a um campo magnético externo B_{ext} apresenta um momento dipolar magnético orientado no sentido oposto ao de B_{ext} . Se o campo B_{ext} é não uniforme, o material diamagnético é repelido da região onde o campo magnético é mais intenso para a região onde o campo magnético é menos intenso.

Todo material paramagnético submetido a um campo magnético B_{ext} apresenta um momento dipolar magnético orientado no mesmo sentido que B_{ext} . Se o campo B_{ext} é não

uniforme, o material paramagnético é atraído da região onde o campo magnético é menos intenso para a região onde o campo magnético é mais intenso.

Um material ferromagnético submetido a um campo magnético externo B_{ext} adquire um grande momento dipolar magnético na direção de B_{ext} . Se o campo é não uniforme, o material ferromagnético é atraído da região onde o campo magnético é menos intenso para a região onde o campo magnético é mais intenso.

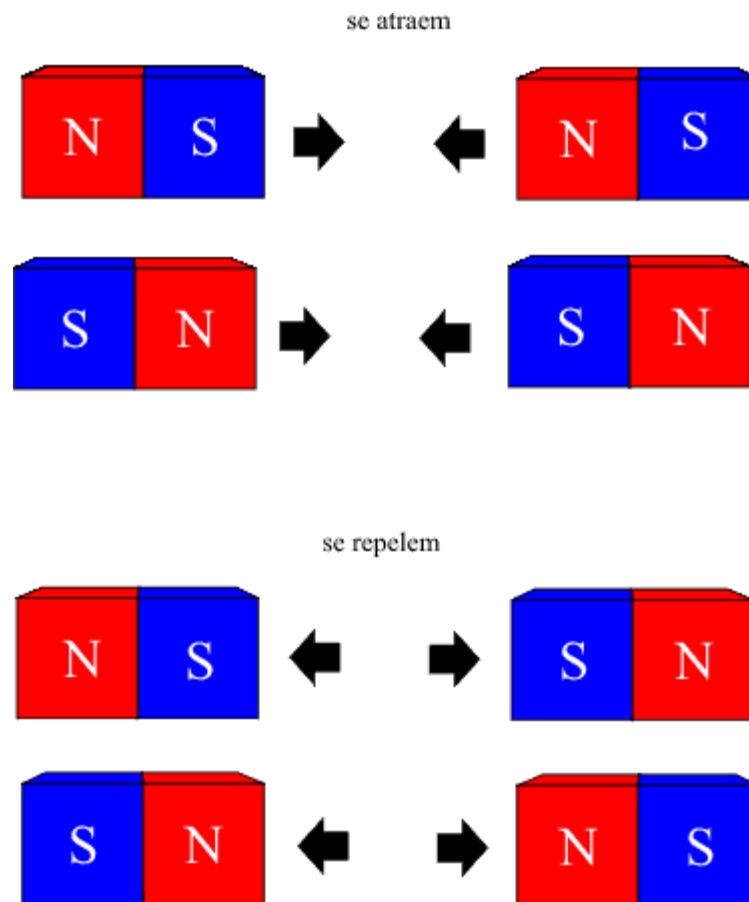
O ferromagnetismo é o mecanismo pelo qual certos materiais formam ímãs permanentes, ou são atraídos por ímãs.

4.4. Ímã

O ímã é definido como um objeto capaz de provocar um campo magnético em sua volta, podendo ser natural ou artificial.

O ímã natural é feito de materiais com propriedades magnéticas, como por exemplo, a magnetita, e um ímã artificial é feito de material sem propriedades magnéticas, mas que pode adquirir permanentemente ou temporariamente as características de um ímã natural. Um tipo de ímã artificial é o eletroímã, capaz de gerar um campo magnético à partir da corrente elétrica.

Um ímã é composto por duas regiões chamadas de pólos magnéticos, que são regiões em que o campo magnético é intensificado. Existem dois tipos distintos de pólo: pólo norte magnético e pólo sul magnético, presentes no mesmo ímã. Ao aproximar o pólo norte de um ímã, no pólo sul de outro, os pólos sofrem uma força de atração. No entanto, ao se aproximar o pólo norte de um ímã, no pólo norte de outro; ou o pólo sul de um ímã no pólo sul de outro, os pólos sofrem uma força de repulsão. Então pode-se relacionar que pólos de nomes opostos se atraem, e os de mesmo nome, se repelem.

Figura 6: Atração e repulsão do ímã

Fonte: HALLIDAY (2012)

Dois pólos se atraem ou se repelem, dependendo de suas características, à razão inversa do quadrado da distância entre eles. Ou seja, se uma força F é estabelecida a uma distância d , ao dobrar essa distância a força observada será igual a $\frac{F}{4}$, e assim sucessivamente.

Então:

$$F(x) \sim \frac{1}{x^2}$$

Sendo:

$F(x)$ – força magnética a uma distância igual a x

x – distância do ponto ao ímã

4.5. Lei de Biot-Savat

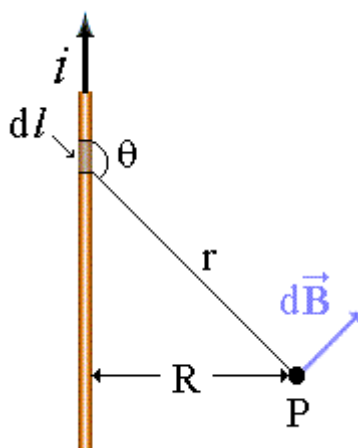
O campo magnético criado por um condutor percorrido por corrente pode ser calculado o auxílio da lei de Biot-Savart. De acordo com essa lei, a contribuição dB de um elemento de corrente idS para o campo em um ponto P situado a uma distância r é dada por

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{idS \times r}{r^2} \quad (\text{lei de Biot - Savart})$$

Onde r é o vetor unitário que liga o elemento de corrente ao ponto P . O valor da constante μ_0 , conhecida como constante de permeabilidade do ar, é:

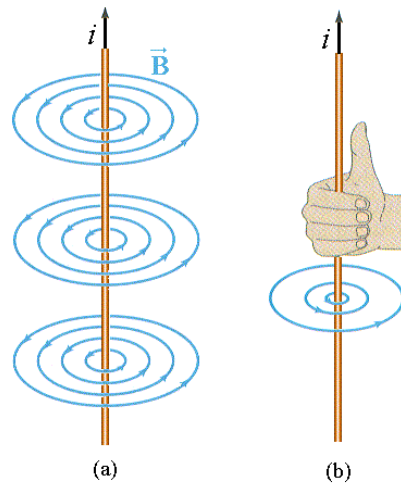
$$4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \frac{\text{m}}{\text{A}} \approx 1,26 \times 10^{-6} \text{ T} \cdot \frac{\text{m}}{\text{A}}$$

Figura 7: Campo magnético produzido por um elemento infinitesimal em um fio condutor



Fonte: HALLIDAY (2012)

Figura 8: Campo magnético produzido por corrente elétrica

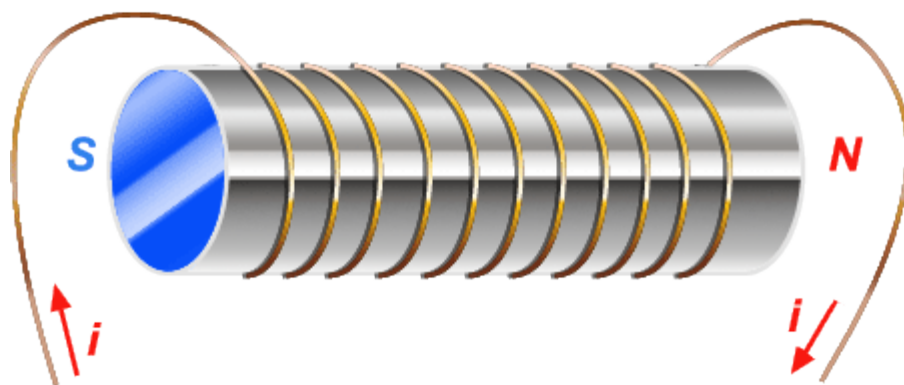


Fonte: HALLIDAY(2012)

4.6. Eletroímã

Eletroímã é um dispositivo que utiliza corrente elétrica para gerar um campo magnético. É geralmente construído enrolando fio em torno de um núcleo, como ferro, níquel, cobalto, ou qualquer outro material ferromagnético.

Figura 9: Representação de um eletroímã



Fonte: HALLIDAY (2012)

Ao aplicar uma tensão nas extremidades do eletroímã, uma corrente elétrica circula em seu interior. Essa, por sua vez, gera um campo magnético em torno das espirais, de acordo

com a lei de Biot-Savart, cujo valor total do campo depende do comprimento da bobina, do número de espiras, corrente e a permissividade do núcleo. A fórmula para o campo produzido é dada por:

$$B = \mu \frac{NI \cos\theta}{L}$$

E a força é:

$$W = \frac{1}{2} \mu INB(\pi r^2)$$

Sendo:

B - campo magnético

N - número de espiras

I- corrente

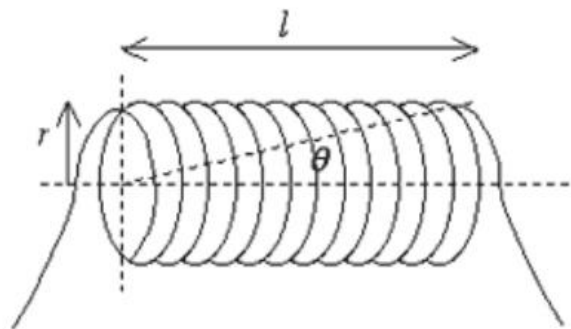
L – comprimento do eletroímã

θ – ângulo formado entre o eixo longitudinal passando pelo centro do eletroímã e a reta que liga o centro de uma face à extremidade da outra face (Figura)

r – raio da face transversal

W – força do eletroímã

Figura 10: Ângulo θ de um eletroímã



Fonte: SCHLUMBERGER (2003)

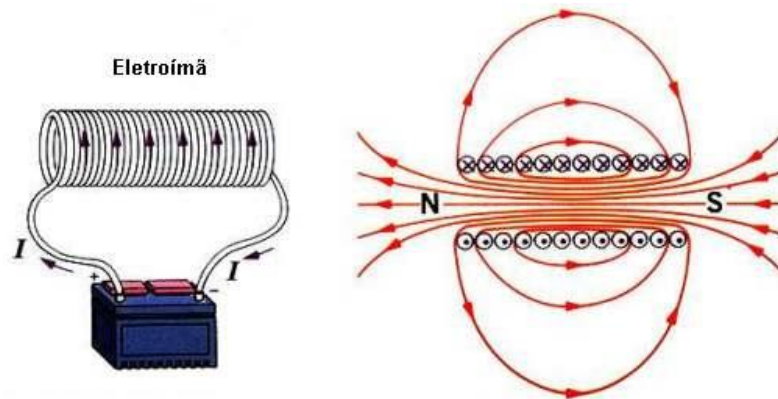
Para eletroímãs com grandes comprimentos, $\cos\theta$ é próximo de 1, e a equação do campo fica:

$$B = \mu \frac{NI}{L}$$

O núcleo apresenta características semelhantes a um ímã enquanto a corrente circular, e o valor do campo pode ser variado de acordo com a corrente. Ao interromper a corrente, o núcleo pode assumir características magnéticas ou não, dependendo do material.

A figura ilustra as linhas de campo produzidas no eletroímã percorrido por corrente.

Figura 11: Linhas de campo no eletroímã



Fonte: <http://br.geocities.com/saladefisica>

4.7. Lei de Faraday

Faraday, físico químico britânico demonstrou que a variação de um fluxo magnético através de uma espira fechada, produz uma corrente elétrica na mesma, fenômeno chamado de indução.

4.8. Lei de Lenz

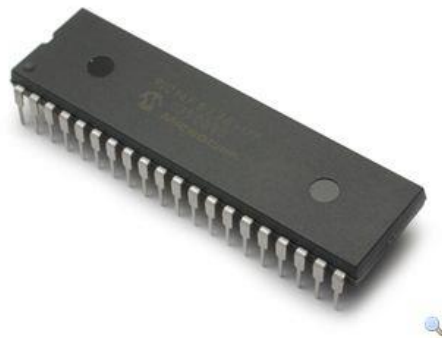
A lei de Lenz possibilita a determinação da corrente que percorre uma espira condutora fechada, devida à indução eletromagnética. Segundo ALMEIDA (2003) Lenz dizia que “Quando um fluxo magnético variável atravessar uma espira fechada aparecerá uma corrente na espira que se oporá à variação do fluxo que o produziu”.

4.9. 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 12: Microprocessador



Fonte: MICROSHIP(2012)

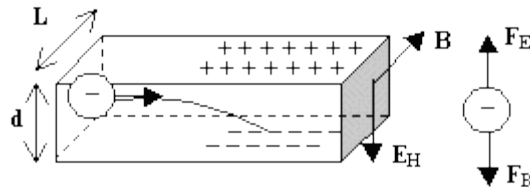
Segundo MARTINS (2005) os microcontroladores estão presentes em quase tudo o que envolve Eletrônica, diminuindo o tamanho, facilitando a manutenção e gerenciando tarefas internas de aparelhos eletrônicos, contribuindo para inovações tecnológicas.

4.10. 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 (de

carga e) 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 13: 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 14: Encapsulamento do sensor de Efeito Hall comercial



Fonte: Honeywell(2012)

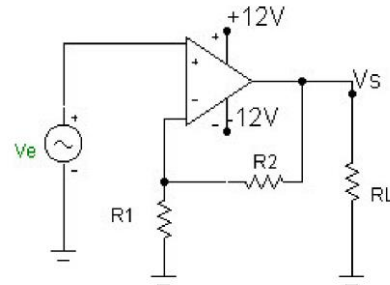
4.11. Amplificador operacional

O amplificador operacional (AO) é um dispositivo em circuito integrado que possui inúmeras aplicações em todas as áreas de eletrônica. O AO 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 mrealimentação 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 15: Amplificador não inversor



Fonte: Elaborado pelos autores

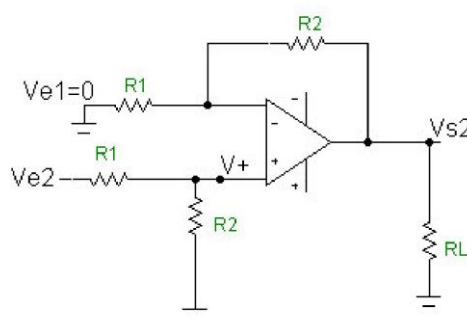
O ganho desse amplificador é:

$$Avf = 1 + \frac{R2}{R1}$$

Amplificador subtrator ou diferencial:

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

Figura 16: Amplificador subtrator



Fonte: Elaborado pelos autores

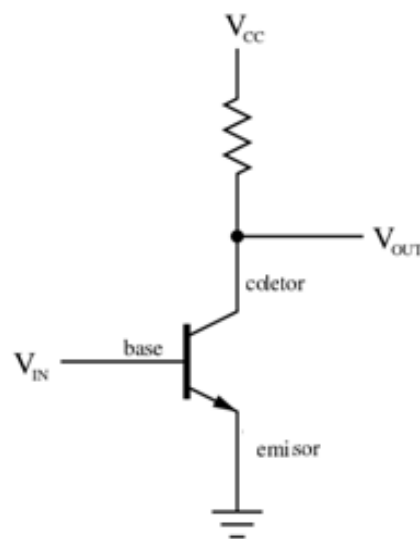
A fórmula para esse amplificador é:

$$Vs1 = \frac{R2}{R1} \cdot (Ve2 - Ve1)$$

4.12. Transistor

O transistor é um componente eletrônico à base de silício que é 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 17: Transistor



Fonte: Elaborado pelos autores

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

5. DESENVOLVIMENTO

Este trabalho tem o intuito de construir a estrutura do protótipo e partindo deste já construído, efetuar sua calibração para colher dados que permitam a programação e o controle do sistema.

Então, é primeiramente necessário escolher a bobina que será 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 levitar o objeto. Para isto foram feitas medições experimentais no laboratório de física da PUC Minas, que disponibilizou as bobinas e os materiais necessários para os testes, que consistiram em analisar a atração que a bobina gerava sobre um ímã quando esta estava ligada a uma diferença de potencial gerada por uma fonte linear, e a corrente que circulava por ela no momento em que esta começava a levitar o ímã, sendo assim possível determinar os valores de corrente e tensão necessários para levitar o ímã para uma determinada distância e a distância máxima que a bobina é capaz de fazê-lo.

A partir dos parâmetros da bobina é possível dimensionar o seu circuito, já que temos os valores máximos de corrente e tensão necessários. Como se deseja controlar a posição vertical do ímã se faz necessário um controlador, o Arduino foi escolhido para tal tarefa.

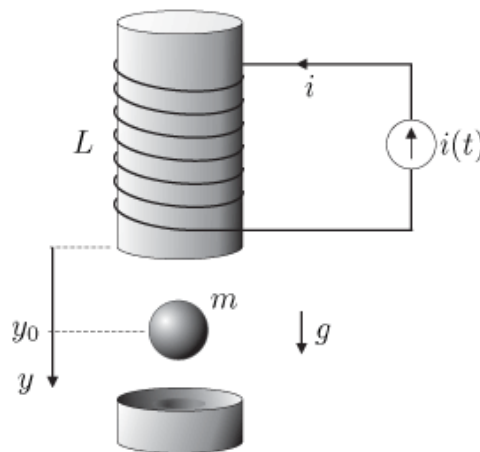
Portanto, é necessário um sinal de entrada para este controlador, este sinal deve retratar a posição vertical do ímã, é preciso então de um sensor que forneça este sinal. O sensor escolhido foi o sensor de efeito hall, que detecta o campo magnético gerado pelo ímã.

Juntamente com o controlador, e sensores, utiliza-se um circuito elétrico, para a amplificação do sinal do sensor, e para a amplificação da corrente na saída do controlador, pois este não consegue fornecer, por si próprio, a corrente necessária para acionar a bobina de modo que gere o campo magnético necessário para levitar o ímã.

5.1. 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 18: 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.

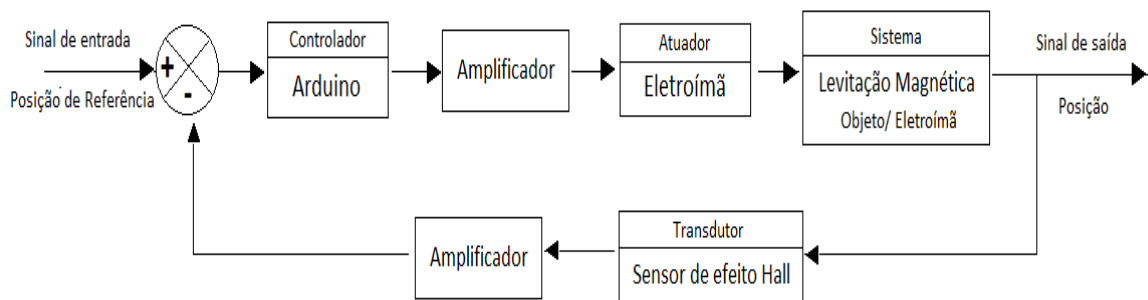
Para a construção do protótipo, são necessários os seguintes equipamentos:

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

5.2. 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 19: Diagrama em blocos



Fonte: Elaborado pelos autores

O projeto envolve diversas áreas do conhecimento, como a física, ciência dos materiais, cálculo, teoria de circuitos e dispositivos eletrônicos, automação e programação.

Para a realização do projeto deverão ser seguidos os seguintes passos:

- Montagem
- Dimensionamento do Eletroímã e determinação da corrente máxima
- Circuito amplificador de corrente
- Circuito e funcionamento do Sensor
- Desenvolvimento do software
- Testes

Os procedimentos serão subdivididos em tópicos, para facilitar a compreensão.

5.3. Sensor de efeito Hall e circuito de 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

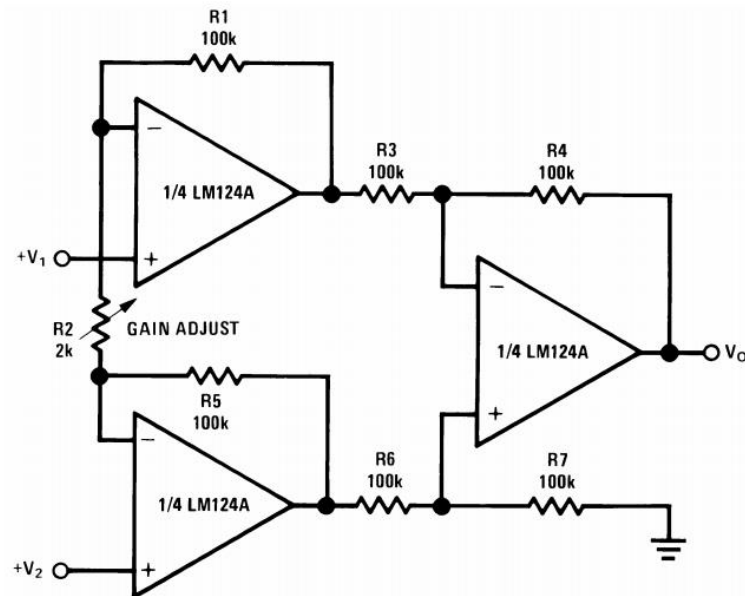
$$S2 = B \text{ bobina}$$

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 a 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 $B \text{ ímã} = S1 - S2$. 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 20: 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_0 = 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.

5.4. 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 2 transistores 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 $i_{ce\ max} = \frac{v_{cc}}{r_c} = \frac{33V}{19\ 0hm} = 1,74A$, 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

$$i_b \times \beta = i_c$$

$$i_b \times 1000 = 1,74A$$

Logo:

$$i_b = 1,74mA$$

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

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

Sabe-se que V_{be} do TIP112 é 1,4V.

Então:

$$5V = 100\Omega \times 2 \times 1,74mA + r_b \times 1,74mA + 1,4V$$

Logo:

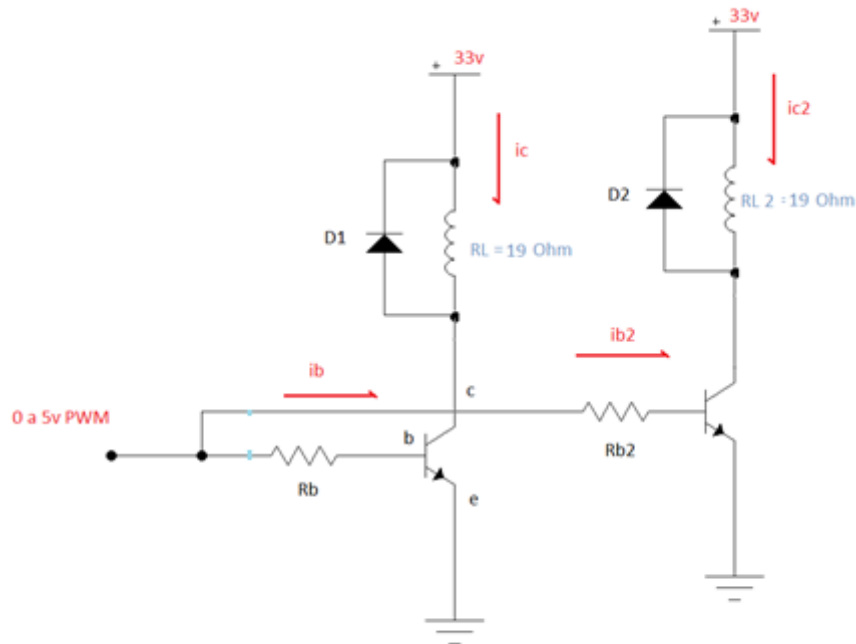
$$r_b = 1869\Omega$$

O mesmo vale para o calculo de r_{b2} .

$$r_{b2} = r_b = 1869\Omega$$

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 21: Circuito amplificador de corrente



Fonte: Elaborado pelos autores

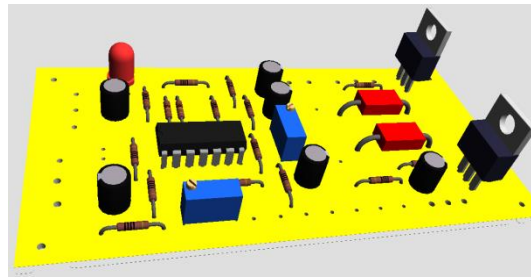
Os diodos em paralelo com as bobinas protegem o circuito, pois quando cessa a corrente no eletroímã, este torna-se uma fonte, cuja corrente possui o mesmo sentido de i_c . A corrente de fuga, então, passa pelos diodos, evitando danos nos transistores.

5.5. Montagem dos circuitos amplificadores

Os circuitos amplificadores, um para o sinal de entrada e o outro para o sinal de saída, utilizando amplificadores operacionais e transistores, além dos potenciômetros para controlar ganho e 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 22: Layout da placa



Fonte: Elaborado pelos autores

A montagem conta com um dissipador de calor, para evitar o sobreaquecimento dos transistores TIP120.

Figura 23: Placa de amplificação e sensor hall



Fonte: Elaborado pelos autores

5.6. Montagem da estrutura e experimentos

A Montagem foi realizada no laboratório de física dia 18 de outubro de 2013. A estrutura do protótipo de levitação magnética foi feita em acrílico, utilizando uma chapa de 1cm de espessura. Foram feitas uma base inferior e outra superior, para sustentar o eletroímã.

A dimensões seguiram a proporção do número de ouro $\varphi = 1,618$, proporção muito utilizada em pinturas renascentistas. Os pilares foram feitos em alumínio, material paramagnético, evitando assim qualquer interferência com o ímã.

Além disso a montagem conta com um suporte para a fixação das bobinas. Os sensores foram posicionados na face inferior do suporte e o outro na face superior, ambos a uma distância de 2cm da bobina, alinhados, obtendo assim uma simetria. Essa distância evita a saturação do circuito amplificador.



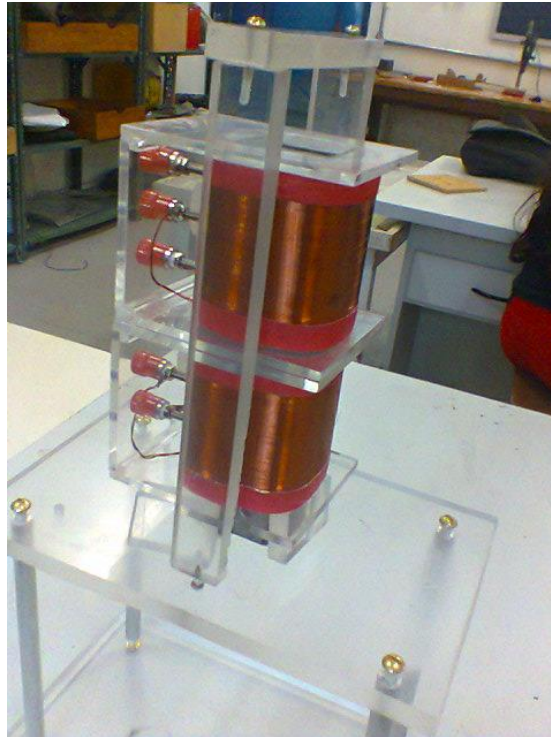
Figura 24: Estrutura para

Fonte: Elaborado pelos autores

Foram utilizadas 2 bobinas colocadas uma em cima da outra, conectadas em paralelo com a fonte de alimentação. Cada uma possui 1200 espiras com núcleo de ferro silício. Observou-se que o campo magnético dobrou, passando de 550 gauss para 1 bobina, para 1100 gauss para 2 bobinas, isso a uma distância nula.

A fonte do laboratório possui a tensão variando de 3 a 33V, e corrente máxima de 5A, sendo que foi usado a fonte com 33V e corrente variando de 0 a 3,16A.

Figura 25: Bobinas



Fonte: Elaborada pelos autores

A distância máxima obtida foi de 8cm, a partir da bobina. No entanto houve algumas perdas na distância na montagem, devido a espessura do material de suporte para as bobinas, que já ocupa 1cm.

Foram utilizados 10 ímãs de neodímio empilhados, aumentando assim a força de atração com a bobina.

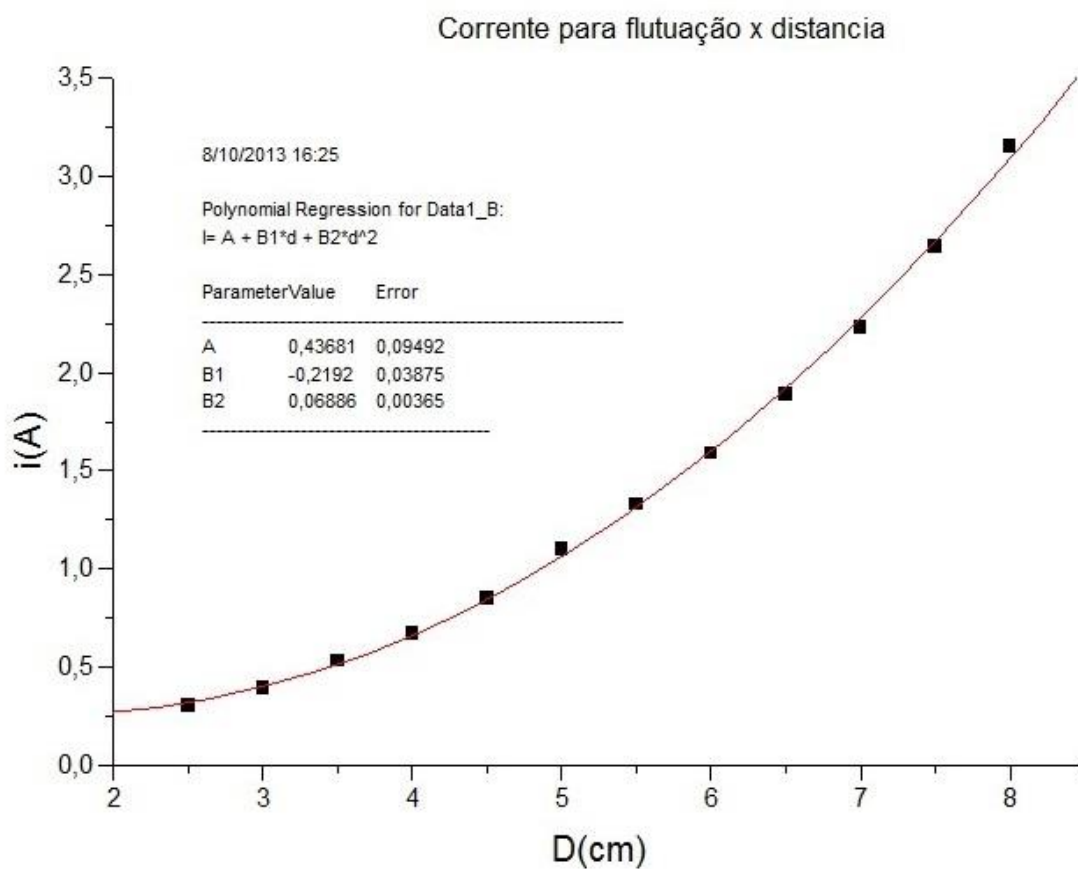
A distância em que foi possível levitar o ímã com maior estabilidade, quando implementado o controle, foi de +- 1,5 cm a 4cm.

Essas perdas na distância na montagem devem-se à espessura do material de suporte para as bobinas, que já ocupa 1cm, a menor precisão dos sensores para uma distância maior e à distância dos sensores à bobina.

Notou-se que as bobinas esquentaram bastante e para minimizar o aquecimento foi utilizado um cooler para resfriá-las.

Alguns testes foram feitos, e em seguida foi preenchida uma tabela da corrente mínima necessária para levantar os ímãs em função da posição. Seu gráfico segue abaixo.

Observa-se um perfil parabólico, cuja equação é $i(d)=0,068d^2 -0,22d +0,44$. De posse da equação, podemos saber a corrente que devemos fornecer para levantar o ímã a uma dada posição.



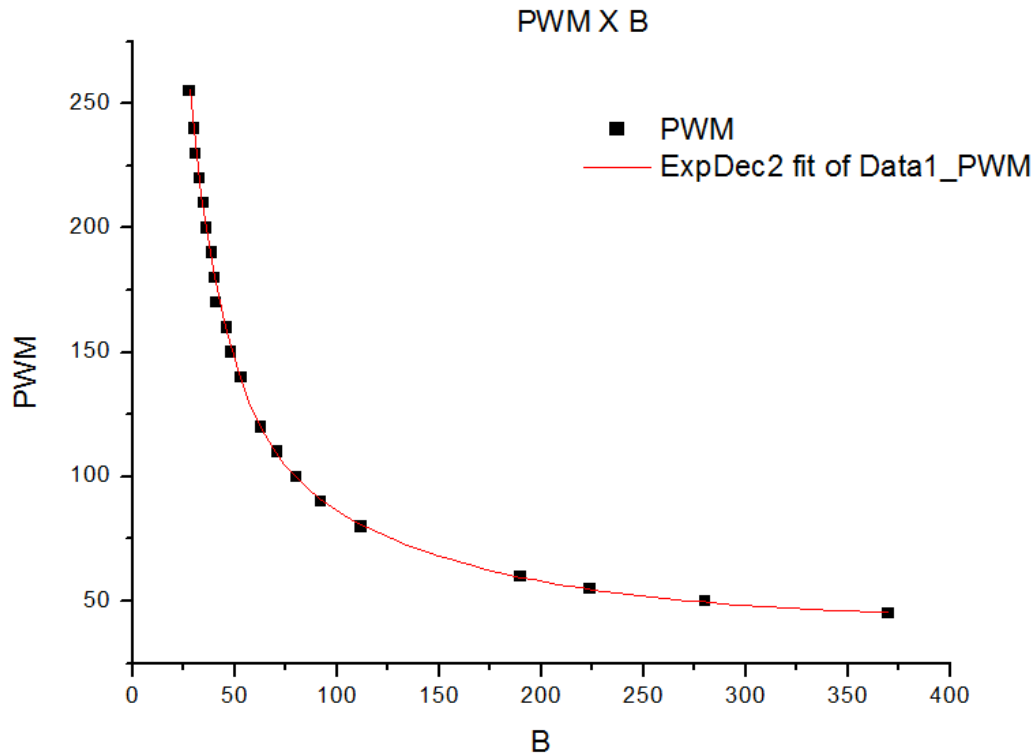
Esta curva revela o comportamento entre a distancia e a corrente, porém, a priori, não se tem acesso a esses dados no microcontrolador. Portanto foi utilizado uma outra curva para representar o sistema, uma curva mais precisa, envolvendo diretamente as variáveis de entrada e de saída do arduino.

5.7. Curva *PWM X B* e equação do sistema

Inicialmente 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. No entanto, não se tem o conhecimento a priori da posição nem do campo no eletroímã. O campo magnético do eletroímã é gerado pela corrente que circula nesse, e a corrente é gerada pelo PWM. A nossa referência de posição é a leitura dos sensores de campo magnético B. Portanto, a fim de se obter maior precisão, foi feita uma curva do PWM em função do campo B. Os dados obtidos empiricamente estão dispostos na tabela.

B	PWM
28	255
30	240
31	230
33	220
35	210
36	200
39	190
40	180
41	170
46	160
48	150
53	140
63	120
71	110
80	100
92	90
112	80
190	60
370	45
280	50
224	55

Através do software Origin foi feita uma interpolação dos dados obtidos, ou seja, a geração de uma curva que melhor se adapta aos pontos da tabela, sendo esta um modelo de decaimento exponencial de segunda ordem, de acordo com o gráfico abaixo.



A equação da curva é:

$$PWM = 42,78524 + 666,32789e^{-B/16,77321} + 115,5201e^{-B/98,77248}$$

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.

5.8. 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 ímã 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 ao campo B, quanto em relação ao próprio PWM. Caso fosse utilizado o erro como sendo $e(t) = B_{\text{referência}} - B(t)$, teríamos que 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 $e(t) = PWM(B_{\text{referência}}) - PWM(B(t))$, 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 temos proporcional e derivativo são responsáveis por garantir o equilíbrio do objeto, mas não garantem o erro nulo. Ao adicionar o integrativo, o erro de posição ficou praticamente zero, e o ímã oscilou sutilmente em torno do set point.

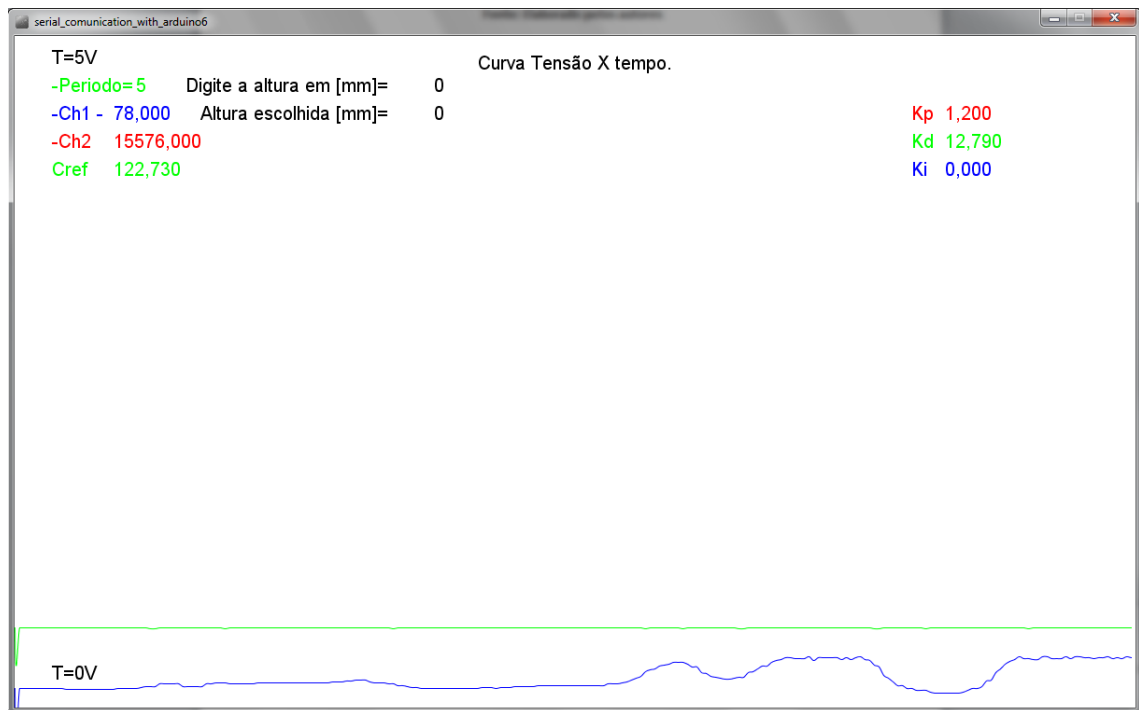
As constantes definem o comportamento da saída, podendo ser instável, amortecido, subamortecido, e outros. Foram encontradas as constantes K_p, K_i e K_d através de um potenciômetro, que tonaram o sistema sabamortecido. Não foi necessário obter valores das constantes para cada posição, uma vez que o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

O PWM está trabalhando numa frequência de 3921,5 Hz, e a saída é atualizada a cada período de oscilação, ou seja, 3921,5 amostras de saída por segundo., pois a função que envia o valor à saída do Arduino está na rotina do timer.

5.9. Interface gráfica utilizando o Processing

Existe um aplicativo gráfico para o Arduino utilizando o software Processing que facilita a interação do usuário com o controlador. Através de um potenciômetro foi enviado um valor de altura desejada, que é recebido pelo Arduino, e também os valores de tensão fornecidos pelo sensor. Esses dados são enviados ao Processing, que juntamente com o valor PWM de saída, gera as curvas do sistema em tempo real, permitindo analisar a função de transferência, como a saída se comporta em relação à entrada, e verificar a precisão do sistema.

Figura 26: Curvas no processing



Fonte: Elaborado pelos autores

A curva verde representa o set point, a curva azul é o valor lido pelo sensor, e a em vermelho é a saída do PWM.

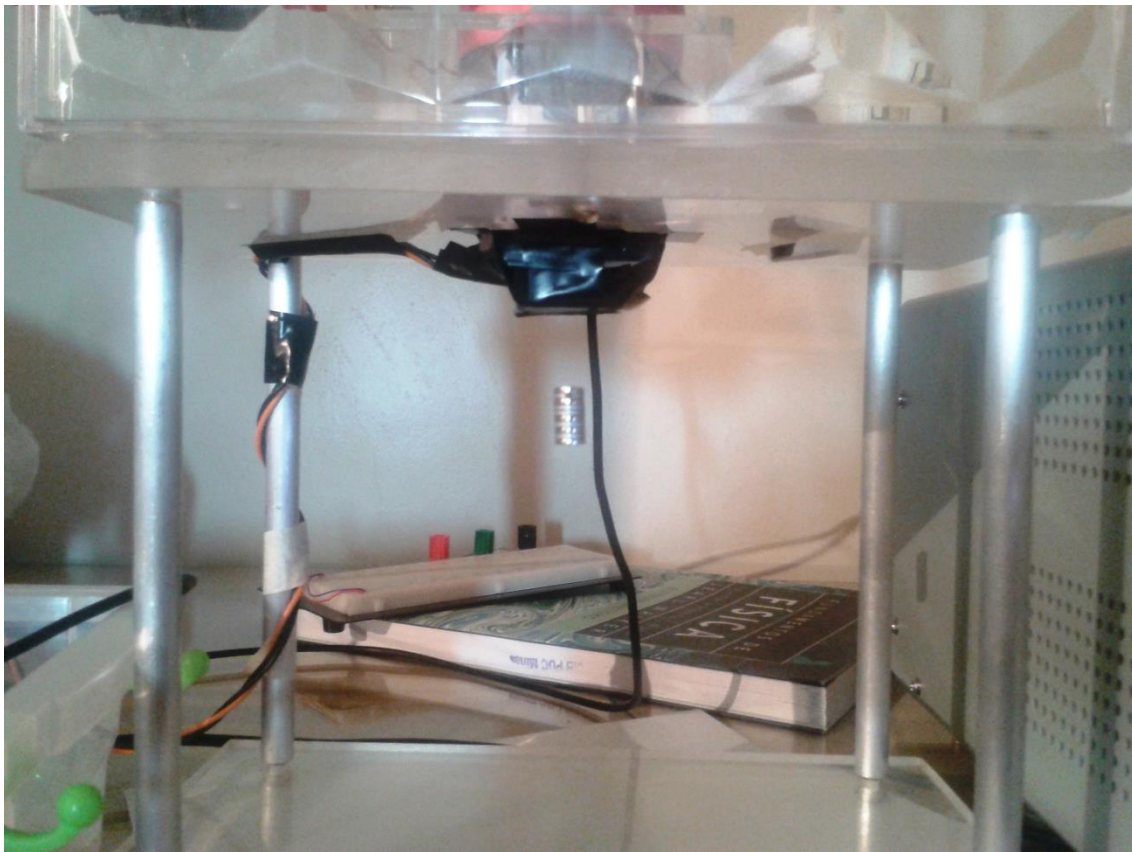
5.10. Colocação do sistema em operação

Primeiramente liga-se o arduino a um computador e o circuito amplificador a uma fonte de 33V. Abre-se o programa Processing para geração das curvas.

Através dos potenciômetros, é escolhida uma posição de referência e é encontrado os valores de Kd e Kp que melhor estabilizem o ímã, enquanto $k_i = 0$. Depois que o ímã estiver estável no ar, aumenta-se o ganho de Ki . Observa-se que o objeto converge para a posição de referência.

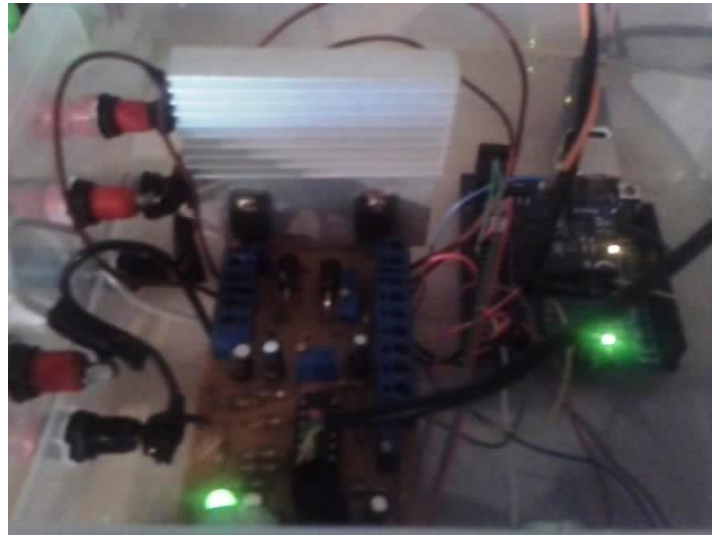
A partir daí, pode-se variar a posição de referência. Caso o ímã caia, Ki deverá ser posto nulo, até que o ímã flutue novamente.

Figura 27: Ímã em levitação



Fonte: Elaborado pelos Autores

Figura 28: Arduino e placa amplificadora em funcionamento



Fonte: Elaborado pelos autores

6. CONCLUSÃO

Explorando a teoria do eletromagnetismo 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 através de medições foi definida a corrente que gera o campo magnético suficiente para atrair o ímã, em relação à distância do ímã a bobina. E com base nestes dados, foi gerado o controle de posição, através da placa programável Arduino, utilizando um controle proporcional derivativo (PID). 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.

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 an 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.

ANEXO A

//Projeto de Levitacao Magnetica implementado no arduino

//controle PID

#define cbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) &= ~_BV(bit))

#define sbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) |= _BV(bit))

#define ajusteTimer1 256

#define prescaler 64

const int analogInPin = A0;

const int analogInPin1 = A1;

const int analogInPin2 = A2;

const int analogOutPin = 9; // Analog output pin that the transistor is attached to

int sensorValue = 0; // value read from the pot

int sensorValue1 = 0;

int sensorValue2 = 0;

int outputValue = 0; // value output to the PWM (analog out)

float posicaoRef = 0; //em mm

float campoRef = 0;

int erroPosicao = 0;

int erroCampo = 0;

float erroCurrent = 0;

float derivada;

int derivadaCampo, derivadaErro;

float derivadaCurrent;

int sensorValueA;

```
float integral;
```

```
float kp, kd, ki;
```

```
// constantes para convercao AD rapida
```

```
#define FASTADC 1
```

```
// defines for setting and clearing register bits
```

```
#ifndef cbi
```

```
#define cbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) &= ~_BV(bit))
```

```
#endif
```

```
#ifndef sbi
```

```
#define sbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) |= _BV(bit))
```

```
#endif
```

```
void setup() {
```

```
    // initialize serial communications at 115200 bps:
```

```
    Serial.begin(115200);
```

```
    pinMode(analogOutPin, OUTPUT);
```

```
    Setup_timer2();
```

```
    sbi(TIMSK2,TOIE2);          // enable Timer2 Interrupt
```

```
    //convercao AD rapida
```

```
    // set prescale to 16
```

```
    sbi(ADCSRA,ADPS2) ;
```

```
    cbi(ADCSRA,ADPS1) ;
```

```
    cbi(ADCSRA,ADPS0) ;
```

```
    delay(20000); // tempo para sincronizar arduino e processing sem erro
```

```
}
```

```
float funcaoPWMxB(float b) {
```

```
    float pwm;
```

```
    pwm= 45.16289+927.1107*pow(2.6429,-b/22.25711)+86.97756*pow(2.6429,-  
b/184.46454);
```

```
    return pwm;
```



```
}

```

```
float funcaoBxZ(float z) {
    float b;
    b = 8.14+700*pow(2.6429,-z/1.481);
    // b = z;
    return b;
}
```

```
float funcaoZxB(float b) {
    float z;
    z = b;
    return z;
}
```

```
void loop() {

    posicaoRef =analogRead(analogInPin2);
    posicaoRef = float(posicaoRef)*8/1024;

    sensorValue1=analogRead(analogInPin1);

    kp=analogRead(A3);
    kp=kp*6/1024;
    kd=analogRead(A4);
    kd=kd*25/1024;
    ki=analogRead(5);
    ki=ki*0.1/1024;

    sensorValueA= sensorValue;

    //Obtendo um valor medio
    sensorValue=0;
    for(int i=0; i<16; i++)

```

```

    sensorValue = sensorValue + analogRead(analogInPin);
    sensorValue = sensorValue/16;

```

//da posição de set point para campo de set point, pois a minha entrada do sensor é campo magnetico, e nao posicao

```

    campoRef = funcaoBxZ(posicaoRef);

```

```

//erro

```

```

    erroPosicao = posicaoRef - funcaoZxB(sensorValue);

```

```

    erroCampo = campoRef - sensorValue;

```

//posicaoRef - sensorValue negativo indica que o objeto esta acima da posição de referencia e a corrente de saida deve ser menor

//posicaoRef - sensorValue positivo indica que o objeto esta abaixo da posição de referencia e a corrente de saida deve ser maior

```

    erroCurrent = funcaoPWMxB(sensorValue)- funcaoPWMxB(campoRef) ;

```

```

    derivada= - funcaoZxB(sensorValue)+ funcaoZxB(sensorValueA);

```

```

//obs: derivada = derivadaCampo

```

```

    derivadaCampo= sensorValueA- sensorValue;

```

```

    derivadaErro=derivadaCampo;

```

```

    derivadaCurrent= + funcaoPWMxB(sensorValue) -
    funcaoPWMxB(sensorValueA);

```

```

    if(ki == 0)

```

```

        integral= 0;

```

```

    else

```

```

        integral= integral+ erroCurrent;

```

// quanto mais proximo da bobina, maior potencial para a instabilidade pois qualquer pequena mudança na corrente da bobina acarreta numa maior variação da posição

// e quando mais proximo da bobina(sensor), maior é também a variação do valor de campo lido pelo sensor

//sendo assim, a minima oscilação na altura acarreta numa grande variação no valor do sensor, causando uma maior variação do campo magnetico e maior a instabilidade

//isto no caso de um controle cujos termos p i d sejam proporcionais ao erro do sensor

// para esse sistema é melhor um controle no qual os ganhos sejam menores quanto mais perto o objeto estiver da bobina. Maior será a estabilidade

//a partir de uma calibragem rapida, testes, verificou-se isso

// outputValue = float(funcaoPWMxB(campoRef)) + float(derivadaCampo)*kd+ float(erroCampo)*kp +integral*ki; // neste controle quanto mais proximo da bobina maiores serao os pesos

outputValue = funcaoPWMxB(campoRef) + derivadaCurrent*kd+ erroCurrent*kp +integral*ki; // neste controle quanto mais proximo da bobina menores serao os pesos

//kp 1.21

//kd 9.67

//ki 1.66

// print the results on processing:

processingCommunicate();

}

ISR(TIMER2_OVF_vect) {

if (outputValue>255)

analogWrite(analogOutPin, 255);

else if (outputValue<0)

analogWrite(analogOutPin,0);

else

```

    analogWrite(analogOutPin, outputValue);
}

```

```

// timer2 setup

```

```

// set prescaler to 1, PWM mode to phase correct PWM,  $16000000/510 =$ 
31372.55 Hz clock

```

```

// set prescaler to 3, PWM mode to phase correct PWM,  $(16000000/510)/2^3 =$ 
3921.57 Hz clock

```

```

void Setup_timer2() {

```

```

    // Timer2 Clock Prescaler to : 4

```

```

    sbi (TCCR2B, CS20);

```

```

    sbi (TCCR2B, CS21);

```

```

    cbi (TCCR2B, CS22);

```

```

// Timer2 PWM Mode set to Phase Correct PWM

```

```

    cbi (TCCR2A, COM2A0); // clear Compare Match

```

```

    sbi (TCCR2A, COM2A1);

```

```

    sbi (TCCR2A, WGM20); // Mode 1 / Phase Correct PWM

```

```

    cbi (TCCR2A, WGM21);

```

```

    cbi (TCCR2B, WGM22);

```

```

}

```

```

void processingCommunicate() {

```

```

    Serial.println(sensorValue);

```

```

    Serial.println(outputValue);

```

```

    Serial.println(kp);

```

```

    Serial.println(kd);

```

```
Serial.println(ki*1000);
```

```
Serial.println(campoRef);
```

```
if (Serial.available() > 0){  
  int valorLido = Serial.read();  
  posicaoRef = valorLido;  
}
```

```
}
```


ANEXO B

//Codigo do Processing para receber dados do Arduino e e mostrá-los na forma de gráficos

```

import processing.serial.*;

Serial port;

float brightness = 0;
float val2 = 0;
float bright= 0;
int e=0;


int sizeWidth =1200, sizeHeight =720;


int periodo = 5;
float amplitude = (float(sizeHeight)/1023);
int dimVectory = sizeWidth/periodo;


int[] coords = new int[dimVectory ];
int[] coords2 = new int[dimVectory ];


PFont f;


int variable=0;
int variableChosen=0;


float val3= 0, val4= 0, val5= 0, val6= 0, val7= 0, campoRef= 0;
int[] coords3 = new int[dimVectory ];
int[] coords4 = new int[dimVectory ];
void setup()
{
    size (sizeWidth, sizeHeight);

```

```
port = new Serial(this, "COM5", 115200);
port.bufferUntil('\n');
```

```
f = createFont("Arial",20,true);
}
```

```
void draw()
{
```

```
background(255);
smooth();
```

```
noFill();
stroke(0,0,255);
drawingCurves( coords, dimVectory, sizeHeight, periodo);
vectorUpdate( coords, dimVectory, amplitude, brightness);
```

```
//pwm saida
noFill();
stroke(255,0,0);
drawingCurves( coords2, dimVectory, sizeHeight, periodo);
vectorUpdate( coords2, dimVectory, amplitude, val2*2);
```

```
//campoRef
noFill();
stroke(100,255,100);
drawingCurves( coords3, dimVectory, sizeHeight, periodo);
vectorUpdate( coords3, dimVectory, amplitude, campoRef);
```

```
writeText ( );
```



```
port.write(variableChosen);
}
```

```
void serialEvent (Serial port)
{
  bright = float(port.readStringUntil('\n'));

```

```
  if(e==0){
    brightness=bright;
    e=1;
  }

```

```
  else if(e==1){
    val2=bright;
    e=2;}

```

```
  else if(e==2){
    val3=bright;
    e=3;}

```

```
  else if(e==3){
    val4=bright;
    e=4;}

```

```
  else if(e==4){
    val5=bright;
    e=5;}

```

```
  else if(e==5){
    val6=bright;
    campoRef=bright;
    e=0;}

```

```
}
```

```
void vectorUpdate (int[] coords, int dimVectory, float amplitude, float brightness)
{
  for(int i = 0; i < (dimVectory-1); i++)
  {

```

```

coords[i] = coords[i+1];
}
coords[dimVectory-1] = int((brightness)* amplitude);
}

```

```

void drawingCurves (int[] coords, int dimVectory, int sizeHeight, int periodo )
{

```

```

    beginShape();
    curveVertex(0, coords[0]); // the first control point
    for(int i = 0; i < dimVectory; i++)
    {
        curveVertex(periodo*i, sizeHeight-(coords[i])); // is also the start point of curve
    }
    curveVertex(periodo*dimVectory-1, sizeHeight- (coords[dimVectory-1])); // is

```

also the last control point

```

    endShape();
}

```

```

void writeText ( )

```

```

{
    textFont(f);
    fill(0);

    textAlign(CENTER);
    text("Curva sinal X tempo.",int(width/2),int(sizeHeight/20));

```

```

    fill(0, 255, 0);
    textAlign(LEFT);
    text("-Periodo= ",int(width/30), 60);
    fill(0, 255, 0);
    textAlign(LEFT);
    text(periodo,int(width/30)+90, 60);

```

```

fill(0, 0, 255);
textAlign(LEFT);
text("B de entrada - ",int(width/30), 90);

```

```

textAlign(LEFT);
text(brightness,int(width/30)+120, 90);

```

```

fill(255, 0, 0);
textAlign(LEFT);
text("Saída PWM",int(width/30), 120);

```

```

textAlign(LEFT);
text(val2,int(width/30)+120, 120);

```

```

//campoRef
fill(0, 255, 100);
textAlign(LEFT);
text("B referência ",int(width/30), 150);

```

```

textAlign(LEFT);
text(val6,int(width/30)+120, 150);

```

```

// print nos ganhos
fill(255, 0, 0);
textAlign(LEFT);
text("Kp",int(width-width/5), 90);

```

```

textAlign(LEFT);
text(val3,int(width-width/5)+30, 90);

```

```

    fill(0, 255, 0);
    textAlign(LEFT);
    text("Kd",int(width-width/5), 120);

    textAlign(LEFT);
    text(val4,int(width-width/5)+30, 120);


    fill(0, 0, 255);
    textAlign(LEFT);
    text("Ki",int(width-width/5), 150);

    textAlign(LEFT);
    text(val5,int(width-width/5)+30, 150);

}

// = " '
void keyPressed() {
    if(key >='0' &&key <='9')
    {
        variable *= 10;
        variable += key-48;
    }
    if(key == BACKSPACE || key == DELETE)
    {
        variable /= 10;
    }
    if(key == ENTER||key == RETURN)
    {
        variableChosen= variable;
    }
    // periodo= variable;

```

```
    variable = 0;  
}  
println (variable);  
}
```