

LEVITADOR MAGNÉTICO COM CONTROLE PID

Eduardo Alexandre de Marcelhas¹

RESUMO: Este projeto consiste em um sistema de levitação magnética com as espiras da bobina enroladas em um núcleo de ferro silício para concentração do campo magnético. Como a levitação magnética é um sistema de segunda ordem, ou seja, instável necessário um sistema capaz de controlar a corrente para que a força eletromagnética seja proporcional e contrária ao objeto a ser levitado, proporcionando a levitação. O sensor de efeito hall, através da variação de tensão nos terminais de saída pela exposição ao campo magnético, é responsável pela referência da distância do objeto em levitação em relação a base do eletroímã. O erro é tratado pelo controle PID (proporcional, integral e derivativo) através da rotina de programação inserida no microcontrolador Arduino. Dessa forma o sinal PWM é responsável por modular a corrente fazendo com que a força eletromagnética seja igual a força peso exercida pelo objeto em levitação. Esse trabalho experimental trouxe oportunidade de rever diferentes conteúdos ministrados, desde o modelo matemático das forças até aplicar o sistema clássico de controle.

Palavras – chave: Levitação Magnética. Controle PID. Estabilidade.

ABSTRACT: This Project of the magnetic levitation was building with the turns around a magnetic core to become magnetic field strong. The magnetic levitation is a second-order system, it is unsteady. A system of controlling the current is required to the electromagnet force is equal and contrary the object to be levitated, providing levitation. The hall-effect sensor change the output voltage when vary in proportion the magnetic field, thus, the output voltage was the setpoint for the control the object's distance. The PID (proportional, integral e derivative) controller through the routine programming in Arduino treats the error in the system. Therefore, PWM signal modula current, controlling doing the electromagnet force keeping the object levitating. This term paper provided opportunity to review different contents taught around the course, beginning in the mathematical model until apply the classical control system.

Keywords: Magnetic Levitation. Control PID. Stability.

1 INTRODUÇÃO

Um levitador magnético eficiente deve apresentar um sistema de controle estável. A levitação magnética vem sendo mencionada em artigo desde 1909 em veículos operando em túneis na cidade de Boston e Nova York, mas nenhum progresso foi feito até 1960. A partir dessa data foram estudados ímãs supercondutores, devido à economia de energia, levou o projeto para novos patamares (SERWAY, 2013). Hoje já é divulgado protótipo de coração artificial e

¹ MBE em Engenharia de Controle e Automação, Uninter. MBA Em Gestão de Projetos, UniCesumar. Graduação em Engenharia Elétrica - Conclusão Dezembro de 2019 - Instituição: Centro de Ensino superior de Conselheiro Lafaiete - CES CL.

micromotores utilizando a levitação magnética (KOMORI; YAMANE, 2001). Segundo Marques (2003), o sistema de Levitação Magnética é essencial onde é necessária a redução da força de atrito e contato mecânico, como em trens de alta velocidade, giroscópio e acelerômetros.

Oersted provou em experimento que um campo magnético é criado em torno de um condutor ao ser percorrido por corrente elétrica (SERWAY, 2013). O eletroímã, que é um imã controlado por corrente elétrica é o método mais comum para realizar a levitação magnética (BARBOSA *et al.*, 1986).

De acordo com Shiao (2001), a partir da Segunda Lei de Newton é possível obter modelo matemático das forças atuantes no objeto a ser levantado. A partir daí é possível obter a função de transferência e verificar estabilidade da planta. O controlador proporcional integral e derivativo (PID) atuará com objetivo de trazer o polo instável para região de estabilidade, fazendo levantar o objeto quando a força eletromagnética gerada for igual a força peso.

Desenvolver o levitador magnético didático, implicará na revisão de diferentes conteúdos já ministrados, como eletromagnetismo, conversão de energia, programação e eletrônica para aplicar o sistema clássico de controle através do PID discretizado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2

2.1 Controle Proporcional Integral Derivativo

O controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) combina as vantagens do controlador PI e PD. A ação integral está diretamente ligada à precisão do sistema, sendo responsável pelo erro nulo em regime permanente. O efeito desestabilizador do controlador I é contrabalançado pela ação derivativa, que tende a aumentar a estabilidade relativa do sistema ao mesmo tempo em que torna a resposta do sistema mais rápida devido ao seu efeito antecipatório (BAZANELLA E SILVA, 2005, p. 60).

É um controlador de circuito fechado que utiliza medições de valor de processo como retorno do sistema. O ajuste do controlador é necessário para cada tipo planta, de acordo com o tipo de resposta necessário (HEINÄNEN, 2018). O controle PID pode ser aplicado para controlar variáveis na indústria seja ela vazão, nível ou pressão. São ajustes feitos de acordo com a variável a ser medida e a tomada de decisão. Seja ela estabilidade, tempo de acomodação, tempo de subida ou sobressinal (ANG, 2005).

Bazanella e Silva (2005) e Ogata (2010), definem cada tipo das ações. Podendo levar a instabilidade com aumento excessivo do ganho, a ação proporcional tem o sinal de controle aplicado a cada instante, proporcional ao valor do erro. Definido pela EQUAÇÃO 01:

$$u(t) = kp * e(t) \quad (01)$$

Sendo :

$u(t)$ = Resultado da ação no estante de tempo;

kp = Valor do ganho proporcional;

$e(t)$ = Valor do erro no estante de tempo.

A ação integral tem função armazenadora de energia, pois armazena erro em função do tempo, dando uma importancia a ele por menor que seja. A proporção dessa ação também esta relacionada com o ganho integral ki como mostra na EQUAÇÃO 02.

$$u(t) = ki \int_0^t e(t)dt \quad (02)$$

A ação derivativa não é aplicada isolada, assim como a integral, por tornar o sistema sensível a ruído com o aumento da frequência. Como mostra a EQUAÇÃO 03, esta ação corresponde a aplicação de um sinal de controle proporcional a derivada do sinal do erro. Pois compara a variação do último valor do erro com a leitura mais recente a cada instante de tempo. Onde kd corresponde ao ganho dessa ação.

$$u(t) = kd \frac{d e(t)}{dt} \quad (03)$$

2.1.1 Controle Proporcional Integral e Derivativo com Implementação Discreta

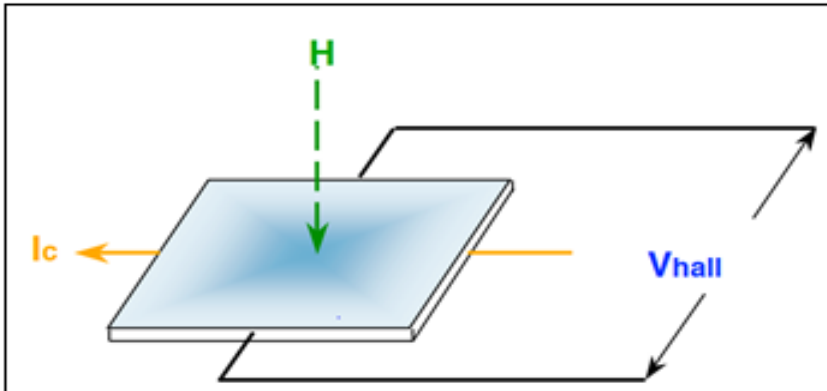
A implementação do controlador PID pode ser feita a partir de aproximações numéricas das derivadas e da integral que aparecem na lei de controle. Dessa forma, é possível descrever cada uma das ações por uma equação de recorrência. Que descrevem as operações matemáticas a serem programadas no micro controlador ou no microcomputador onde será implementado o PID digital (BAZANELLA E SILVA, 2005, p. 66).

2.2 Sensor de Efeito Hall

Efeito Hall, mostrado na FIGURA 01 é o fenômeno no qual surge uma diferença de potencial após um condutor ou semiconductor ser exposto a um campo magnético H aplicado perpendicularmente à direção do movimento de uma partícula carregada (TIPLER, 2009). No

sensor de efeito hall a tensão de saída varia, devido a corrente de alimentação constante I_c desviar a sua trajetória pela deformação no semiconductor causado pelo campo magnético (HONEYWELL, 2008).

Figura 01 - Princípio da tensão Hall



Fonte: HONEYWELL, 2008.

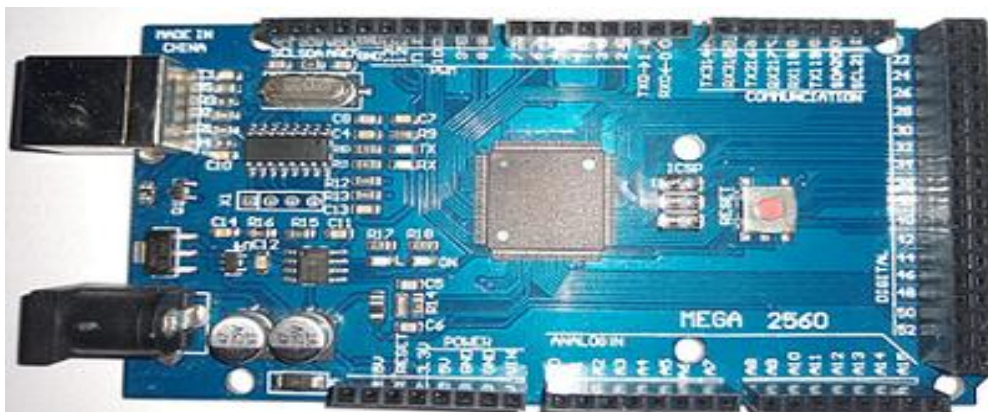
2.3 Arduino

Um Arduino é um pequeno computador que você pode programar para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele. O Arduino é o que chamamos de plataforma de computação física ou embarcada, ou seja, um sistema que pode interagir com seu ambiente por meio de hardware e software (MICHAEL MCROBERTS, 2011, p. 22).

4

Utilizando o Arduino mostrado na FIGURA 02, pode - se desenvolver desde um projeto de pisca por iniciante até a partida e controle de um motor, ou ainda, onde a imaginação levar. Esses variados projetos é denominado por Banzi (2015), de jeito arduino, por ser um microcontrolador didático de inúmeras possibilidades de utilização.

Figura 02 - Arduino MEGA 2560

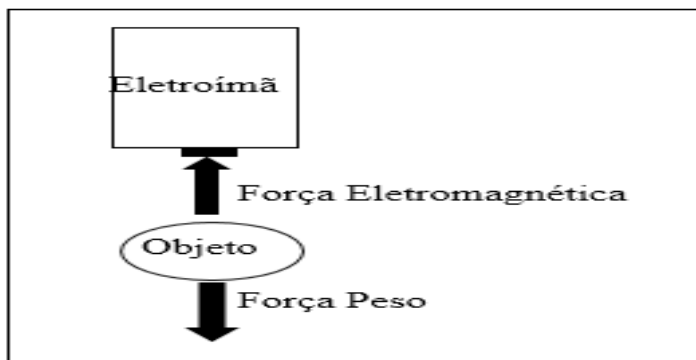


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

2.4 Levitação Magnética

O sistema de Levitação Magnética é essencial onde é necessária a redução da força de atrito e contato mecânico, como em trens de alta velocidade, giroscópio e acelerômetros (MARQUEZ, 2003). O fenômeno da levitação magnética acontece, mostrado na FIGURA 03, quando o somatório das forças atuante no objeto ferromagnético levantado for igual a zero. Dessa forma a força do campo magnético gerado contraria a força peso do corpo. Komori e Yamane (2001) realizam experimentos com diferentes tipos de rolamentos magnéticos, onde o rotor de um micromotor gira no centro dos eletroímãs.

Figura 03 - Forças Atuantes no Corpo Durante a Levitação

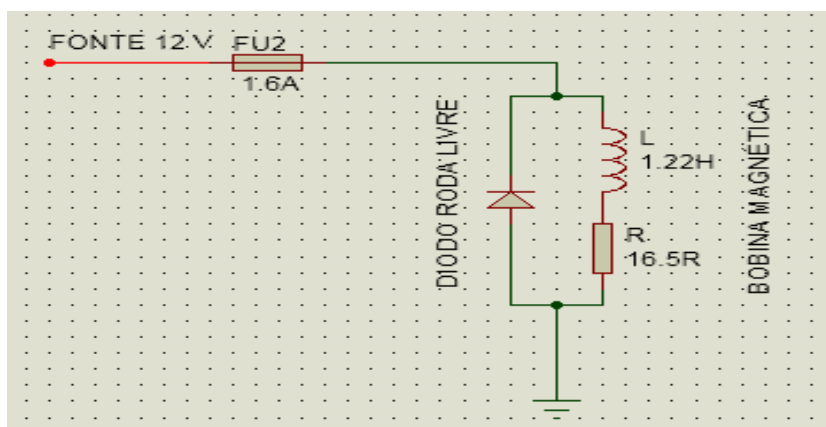


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

2.5 Diodo de Roda Livre

Segundo Rashid (1999) o diodo de roda livre permite que a energia circule e dissipe no indutor após o desligamento da fonte de tensão. Também impede que a corrente retorne para a fonte ou ainda seja dissipada sobre a chave desse circuito em forma de centelha. A FIGURA 04 mostra a instalação do diodo de roda livre em antiparalelo com a bobina do levitador.

Figura 04 - Diodo de roda livre instalado em antiparalelo com o levitador

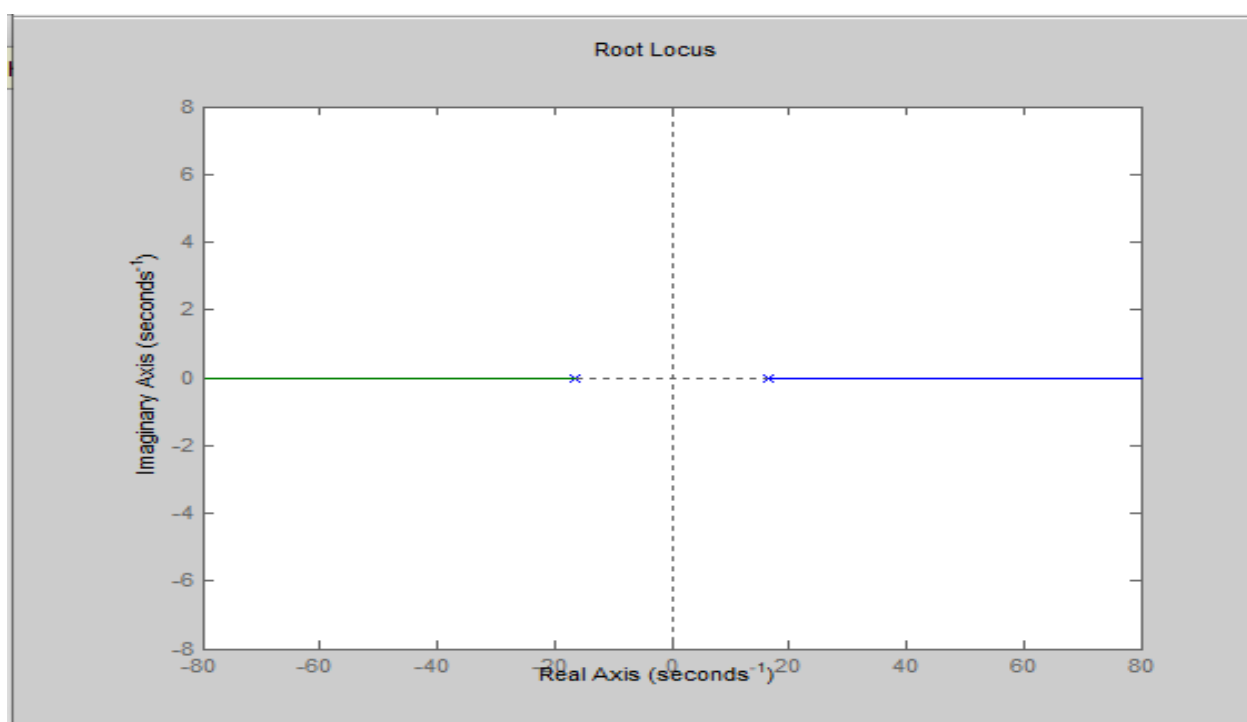


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

2.6 Lugar Geométrico das Raízes

Segundo Ogata (2003), o método lugar geométrico das raízes é uma técnica poderosa. Uma criação de Walter Evans que é possível verificar a estabilidade de um sistema. Um procedimento que através da equação característica da planta o projetista pode obter a localização dos zeros e polos utilizando gráfico com os parâmetros resultantes do sistema. A FIGURA 05 mostra o gráfico do lugar geométrico das raízes do levitador magnético

Figura 05 - Lugar Geométrico das Raízes do Levitador

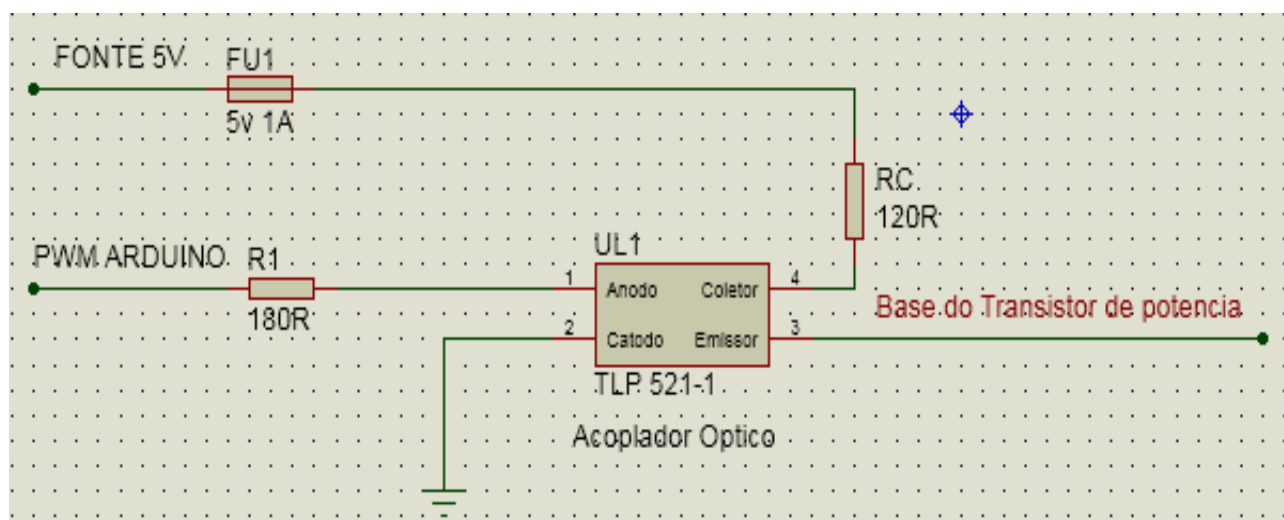


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

2.7 Acoplador Ótico

Segundo Malvino (1995), o acoplador ótico faz o isolamento elétrico entre o circuito de entrada e o de saída, por não existir um ponto de contato elétrico entre eles. O circuito de saída de um micro controlador, mostrado na FIGURA 06, é conectado na entrada do acoplador que é constituído por um fotodiodo, que transmite qualquer variação de corrente ao foto transistor na saída.

Figura 06 - Acoplador óptico instalado na saída do Arduino

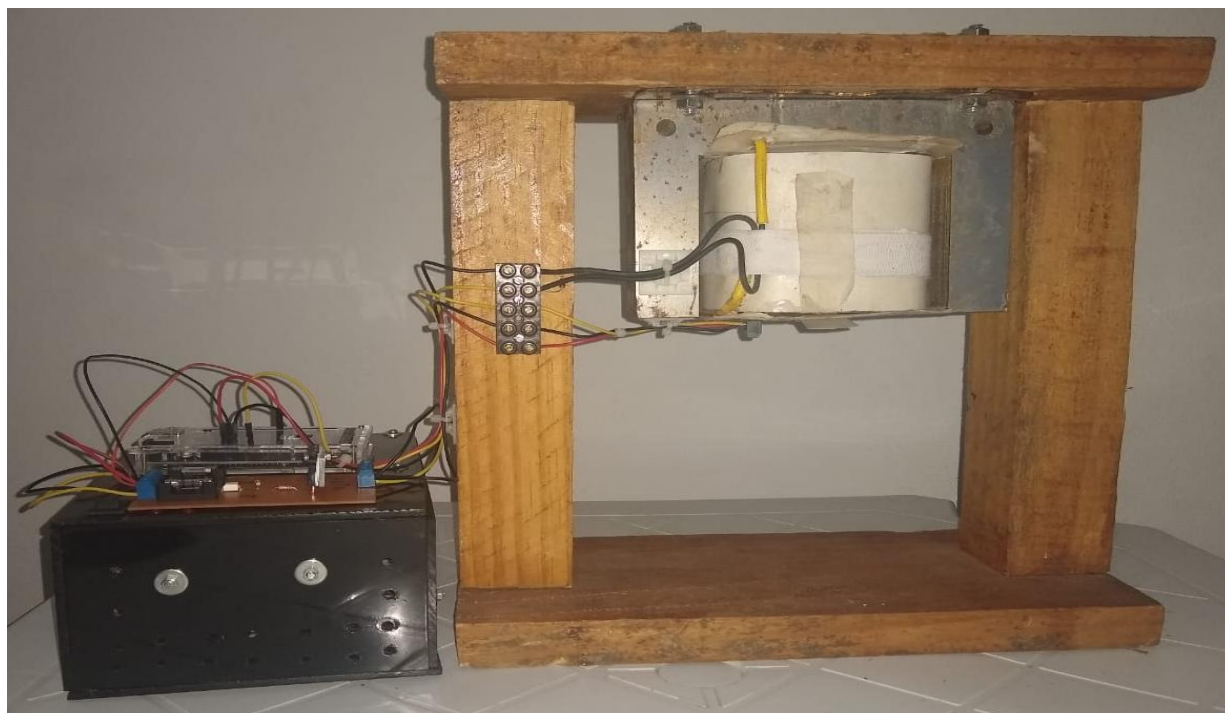


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

3 METODOLOGIA

Para este projeto didático, de caráter experimental, foi construído protótipo mostrado na Figura 07.

Figura 07 - Protótipo para levitação magnética

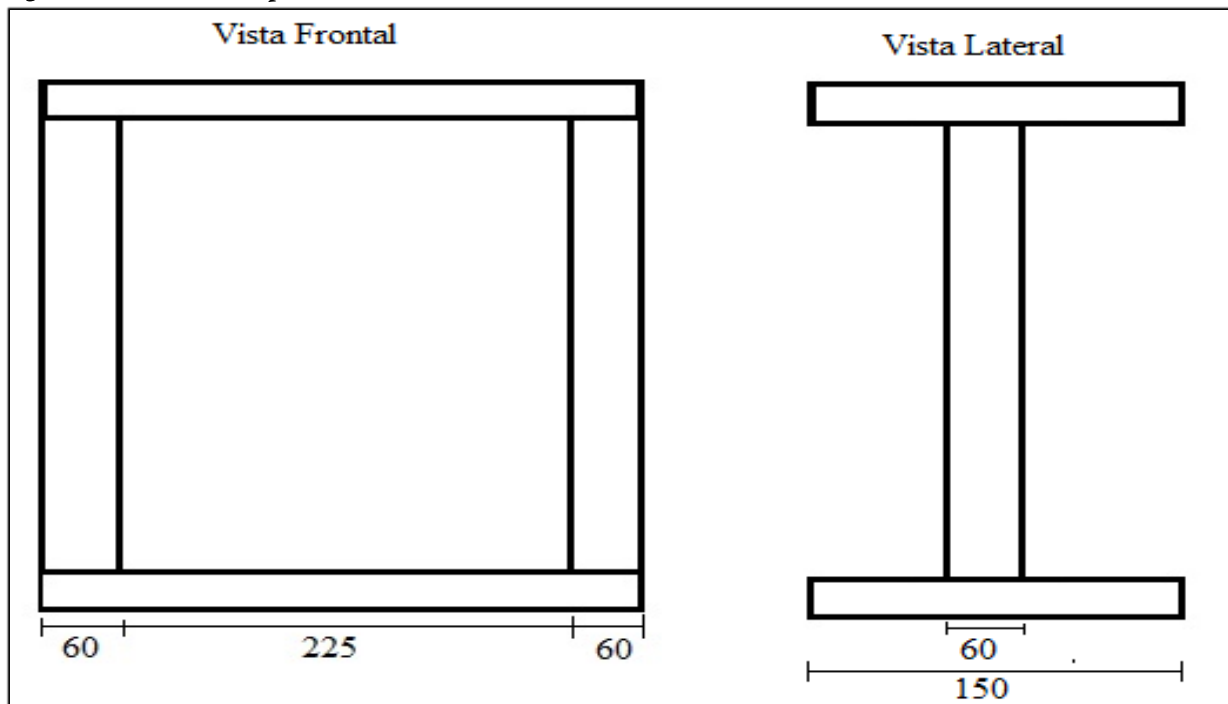


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

3.1 Aspectos Construtivos do levitador Magnético

Para fixação do eletroímã e do sensor de posição, foi reutilizada estrutura de madeira de projeto anterior. Com dimensões em *mm*, mostrado na FIGURA 08.

Figura 08 - Estrutura para fixação do eletroímã



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

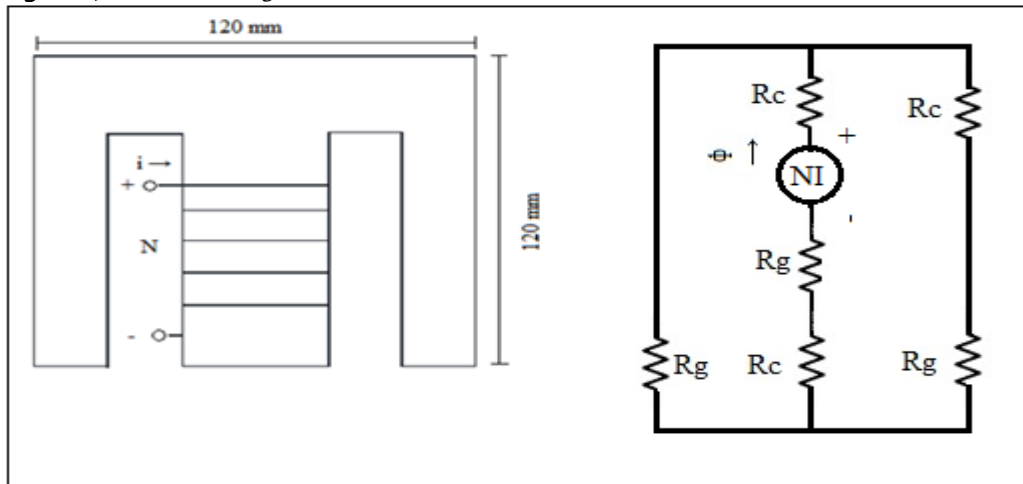
3.2 Bobina Magnética

Como sendo responsável pela levitação do corpo, o eletroímã possui um campo magnético forte. Para concentrar as linhas de força o eletroímã, possui núcleo de material ferro silício *FeSi*. Suas 1800 espiras com resistência de 16.5 Ω e indutância 1.66 H mostrado na FIGURA 07, foram enroladas com condutor de seção transversal de 20 AWG que possui capacidade de condução que limitará a corrente máxima em 1,6 A.

3.2.1 Circuito Magnético do Levitador

O circuito magnético, FIGURA 09, é semelhante ao circuito elétrico, onde a relutância no entreferro R_g e no cobre R_c opõem a passagem do fluxo magnético ϕ . A força eletromagnetomotriz é o produto da corrente i pelo número de espiras N (FITZGERALD, 2014).

Figura 09 - Circuito magnético do levitador

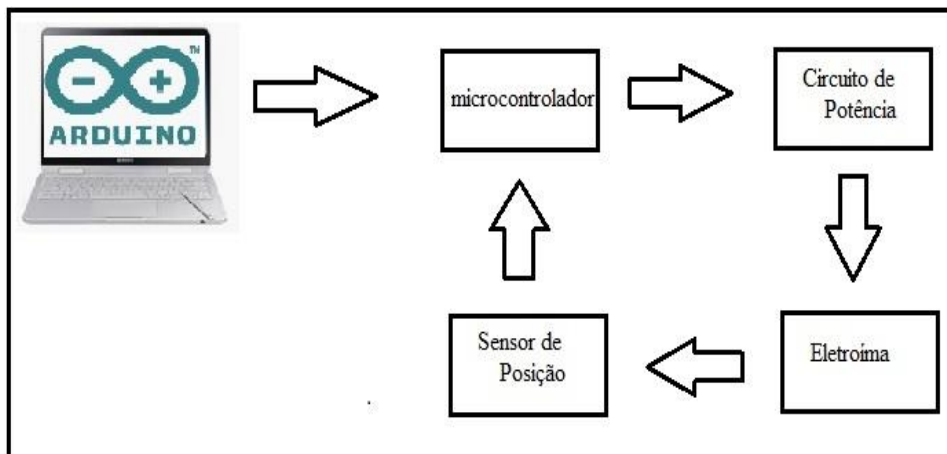


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

3.3 Montagem do Circuito

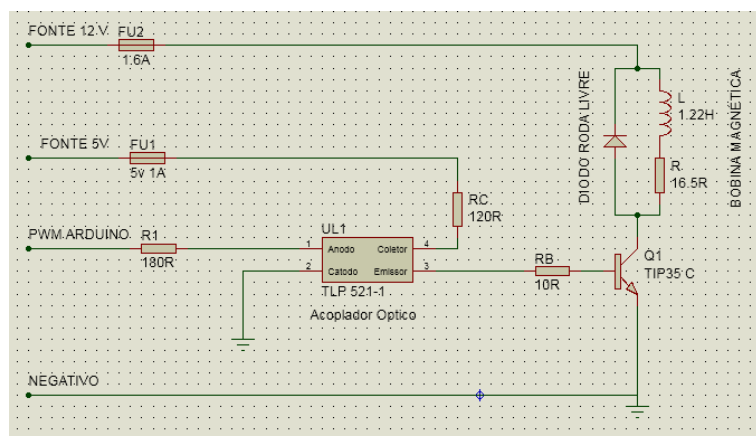
A FIGURA 10 mostra o sistema de controle, onde o sensor de efeito Hall 49E envia para o Arduino através da tensão de saída, a distância do objeto em relação a bobina eletromagnética. De acordo com a lógica PID inserida, o Arduino através da porta PWM modula a corrente controlando o campo para estabilizar o objeto. A FIGURA 11 mostra o circuito de controle e potencia do levitador. Onde o acoplador ótico TLP 521-1 foi instalado na saída do microcontrolador, um resistor de 180Ω limita a corrente em 21 mA . O fototransistor alimentado por uma fonte de 5 V , teve a corrente limitada em $33,08 \text{ mA}$ por uma associação de resistores de 130Ω . Sendo a corrente de base responsável por polarizar o transistor de potencia TIP 35C para fluir no coletor a corrente de 720 mA na bobina do levitador alimentado por 12 V .

Figura 10 - Sistema de controle do levitador



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 11 - Circuito de controle e potência do levitador



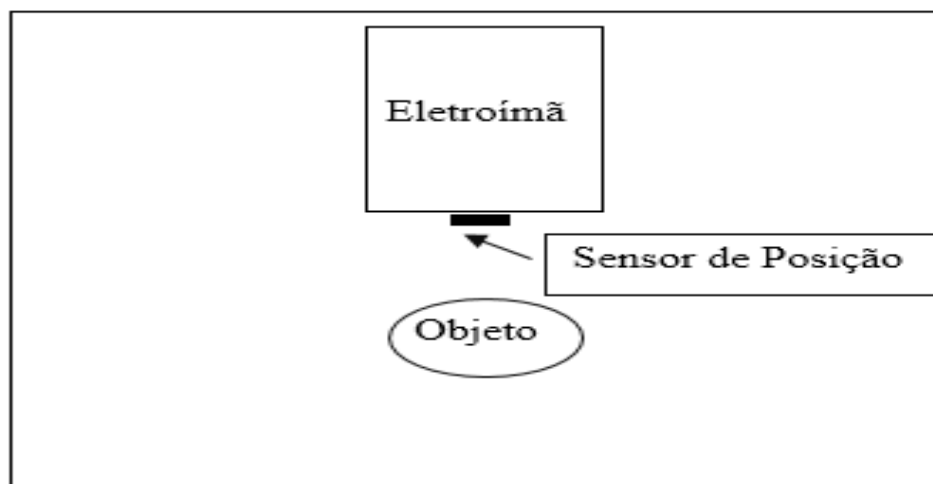
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

3.3.1 Sensor de Efeito Hall

O sensor de Efeito Hall 49E alimentado em 5 VCC foi posicionado na extremidade do eletroímã, como mostra FIGURA 12. Este envia posição do objeto ferromagnético durante a levitação através do valor de tensão nos terminais de saída, que é o parâmetro de referência para o controle da corrente do sistema. Ao ser alimentado sem nenhuma exposição ao campo magnético, o sensor hall a ser utilizado tem valor de tensão de 2,5 V no terminal de saída. Ao ser exposto ao campo magnético sentido positivo, mostrado no GRÁFICO 01 apresenta valores de tensão hall que aumentam em relação à proximidade do campo. Enquanto na proximidade do campo magnético no sentido negativo, mostrado no GRÁFICO 02, a tensão hall é decrescente.

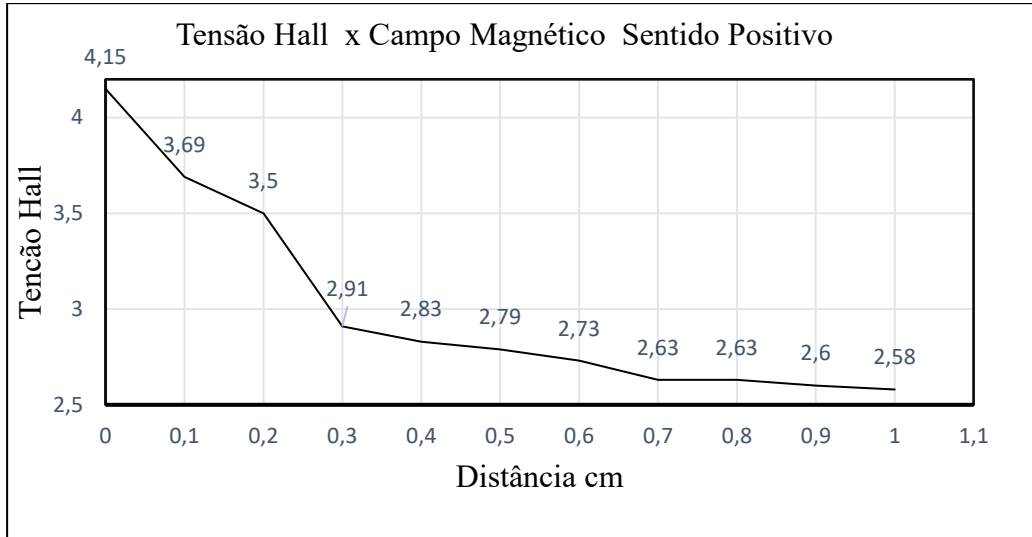
10

Figura 12 - Localização do sensor de posição no eletroímã



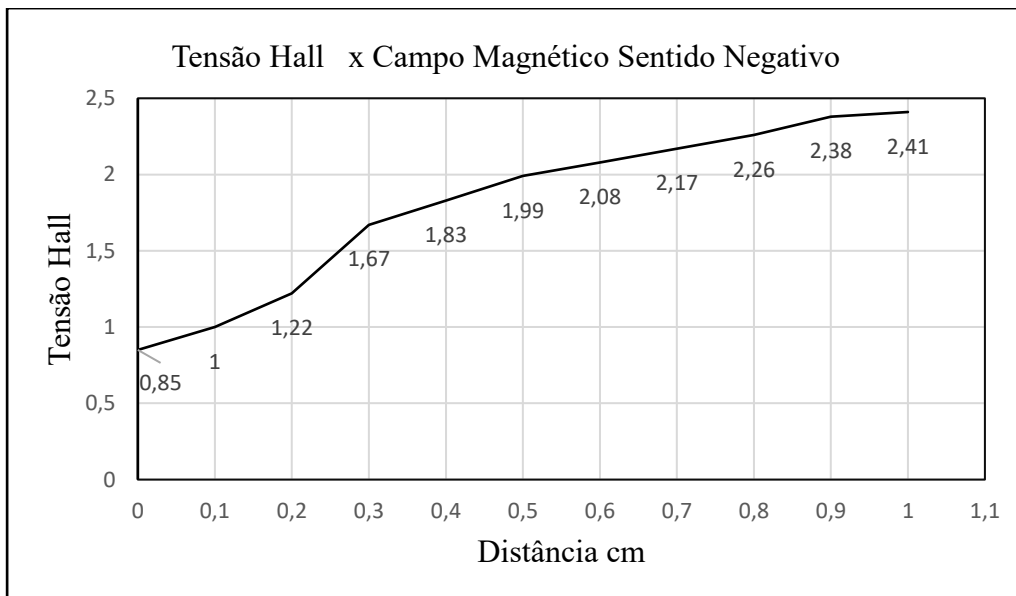
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Gráfico 01 - Sensor exposto ao Campo Magnético Sentido Positivo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Gráfico 02 - Sensor Exposto ao Campo Magnético Sentido Negativo

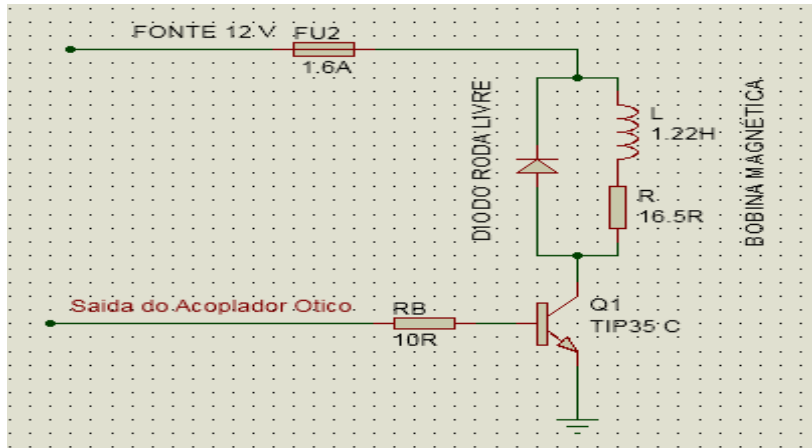


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

3.3.2 Circuito de Potência

A corrente de saída do acoplador ótico, mostrado na FIGURA 13, foi a corrente de base do transistor de potência TIP 35C. Responsável pelo chaveamento da corrente para o controle do campo magnético no eletroímã.

Figura 13 - Circuito de potência do levitador magnético



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

3.4 Modelo Matemático das Forças Atuantes no Objeto Levitado

Para obter o modelo matemático, é necessário conhecer as forças atuantes no objeto ferromagnético a ser levitado. Quando a corrente i_0 percorrer no eletroímã cria uma força eletromagnética, $f_m(x, i)$, que atua no corpo na mesma direção da força gravitacional, porém, em sentidos opostos. A EQUAÇÃO 4 mostra que as forças que regem no corpo é dada pela Segunda Lei de Newton (SHIAO, 2001).

12

Onde:

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} = mg - f_m(x, t) \quad (04)$$

$x(t)$ = Distancia do corpo a ser levitado em relação ao eletroímã;

m = massa do objeto;

g = Constante gravitacional ($9.81m/s^2$);

f_m = força magnetica.

A força magnetica f_m exercida num objeto pode ser vista como a variação do trabalho $W(x)$, apresentado pela EQUAÇÃO 05.

$$W(x) = \frac{1}{2} L(x) i_0^2 \quad (05)$$

Onde $L(x)$ representa somatório de L_a e L_b . Onde L_a representa a indutancia do solenoide sem o corpo a ser levitado. Enquanto que L_b representará indutancia incrementada pelo objeto durante a levitação a uma distancia de referencia x_0 . A indutancia total $L(x)$ é mostrada na EQUAÇÃO 06:

$$l(X) = La + \frac{Lbx_0}{x} \quad (06)$$

Então a força magnética pode ser reescrita pela EQUAÇÃO 07, onde o sinal negativo representa a força de atração:

$$Fm = \frac{i_0^2}{2} \frac{dl(x)}{dx} = \frac{i_0^2}{2} \frac{d}{dx} \left(La + \frac{Lbx_0}{x} \right) = -\frac{Lbx_0 i_0^2}{2 x^2} \quad (07)$$

A EQUAÇÃO 08 atribui valor a K:

$$K = -\frac{Lbx_0}{x} \quad (08)$$

A EQUAÇÃO 09 mostra a força eletromagnética reescrita com a constante k adicionada.

$$Fm = K \frac{i_0^2}{x^2} \quad (09)$$

A EQUAÇÃO 10 é o resultado da força eletromagnética linearizada em torno do ponto de equilíbrio (x_0, i_0) utilizando a expansão de Taylor (GUIDORIZZI, 2001).

$$Fm(x, t) = k \left(\frac{i_0}{x_0} \right)^2 - 2k \left(\frac{i_0^2}{x_0^3} \right) + (x(t) - x_0) - 2k \left(\frac{i_0}{x_0^2} \right) (i(t) - i_0) \quad (10)$$

Como mostra a EQUAÇÃO 11, Para que ocorra a levitação, a força peso será igual à força magnética de atração:

$$mg = k \left(\frac{i_0}{x_0} \right)^2 \quad (11)$$

Após da linearização da EQUAÇÃO 10, valores Atribuídos as constantes k_1 e k_2 , que são mostrados na EQUAÇÃO 12:

$$k_1 = 2k \frac{i_0}{x_0^2}; k_2 = 2k \frac{i_0^2}{x_0^3} \quad (12)$$

Substituindo as constantes na EQUAÇÃO 04 pode – se reescrever a Segunda Lei de Newton, mostrado na EQUAÇÃO 13:

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} = k_2(xt) - k_1 i(t) \quad (13)$$

Aplicando Transformada de Laplace na EQUAÇÃO 13 temos a função de transferência da planta, mostrado na EQUAÇÃO 14:

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = -\frac{k_1}{ms^2 - k_2} \quad (14)$$

Com base no objeto de massa $m = 0,022 \text{ Kg}$, a uma distancia de $x_0 = 10 \text{ mm}$. A corrente $i_0 = 720 \text{ mA}$ percorre no eletromã com indutancia de $L = 1.22 \text{ H}$. É possível obter o valor das constantes $K, K1$ e $K2$, mostrado nas EQUAÇÕES 15, 16, 17.

$$K = mg \left(\frac{x_0}{i_0}\right)^2 = 4,2438\mu \left[N \frac{m^2}{A^2}\right]; \quad (15)$$

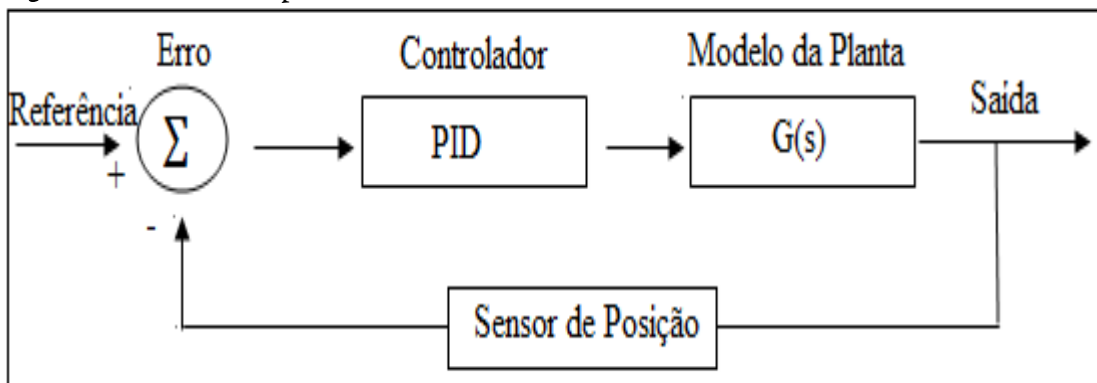
$$K1 = 2K \left(\frac{i_0}{x_0^2}\right) = 0,0305 [N/A]; \quad (16)$$

$$K2 = 2K \left(\frac{i_0^2}{x_0^3}\right) = 6,1110 [N/m]; \quad (17)$$

3.5 Controle Proporcional Integral derivativo (PID)

A FIGURA 14 mostra o diagrama de blocos do controle PID, com a rotina implementada de forma discreta mostrado na FIGURA 15, que foi desenvolvida no IDE do Arduino, como mostra o APÊNDICE A. O valor de tensão proporcional a distância do objeto foi a referência para atuação do controle. Onde o valor de leitura do sensor hall 49E enviado ao microcontrolador, será comparado com a referencia e o erro tratado pelo controle. Os ganhos k_p, k_i e k_d para referencia e ajustes do controle, foram obtidos utilizando *software* computacional.

Figura 14 - Modelo da planta com controle PID



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Figura 15 - Rotina do controle PID discretizado

```
//Início da Rotina PID

erro = referência - valor lido;
proporcional = kp * erro;
integral = integral + erro * dt;
derivativo = (erro - erro_anterior) / dt;
pid = (proporcional + integral * ki + derivativo * kd);
erro_anterior = erro;

//Fim da Rotina PID
```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

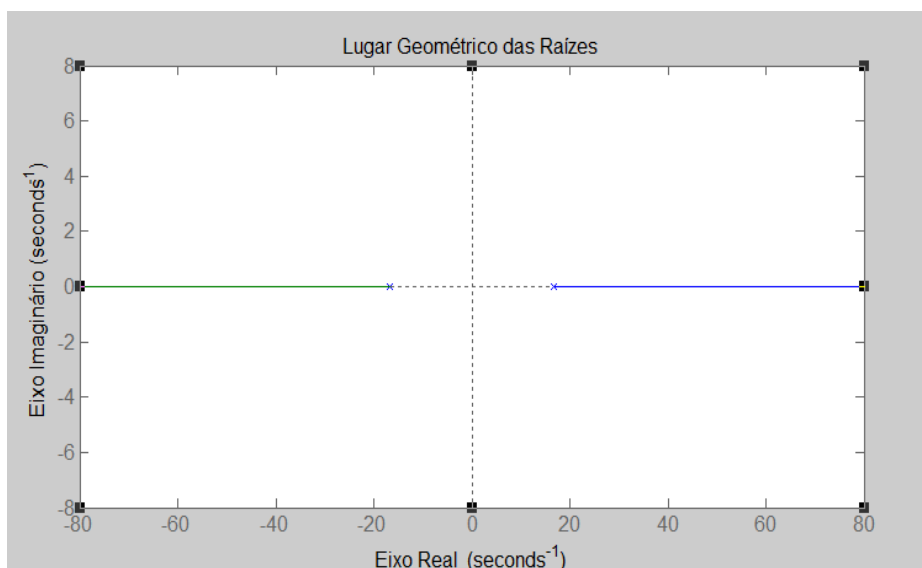
A função de transferência da planta apresentado na EQUAÇÃO 18, foi obtida substituindo os valores na EQUAÇÃO 14.

$$G(s) = -\frac{0.0305}{0.022s^2 - 6.1110} \quad (18)$$

Com a função de transferencia da EQUAÇÃO 18, foi obtido o lugar geométrico das raízes com *software* computacional. A FIGURA 16 mostra a planta com um polo no eixo real positivo causando instabilidade no sistema. Aplicação do controle PID faz com que este polo saia da região de instabilidade para região estável.

15

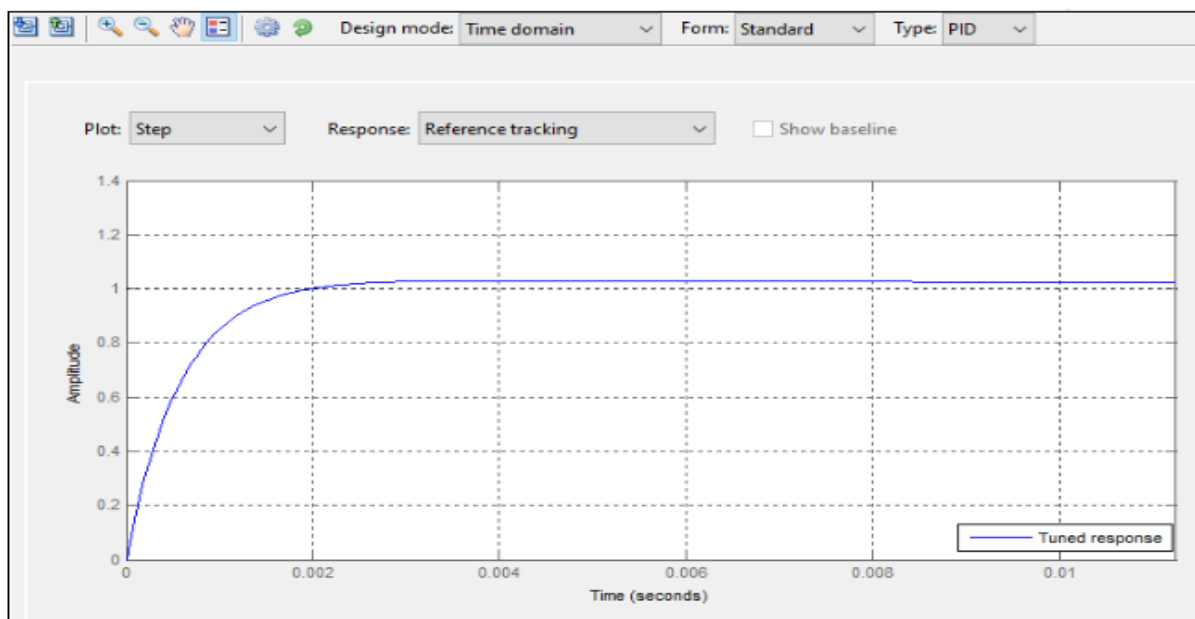
Figura 16 - Lugar geométrico das raízes do levitador



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Com a função de transferência, utilizada para obter o lugar geométrico das raízes, foi obtido a resposta do sistema mostrados na FIGURA 17. Com os ganhos k_p , k_i , k_d que foram inseridos na da rotina de programação do controle, mostrados no QUADRO 01.

Figura 17 - Resposta do sistema



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Quadro 01 - Dados para o ajuste do controle

Parâmetros do Controle	
Ganho Para Ação Proporcional – k_p	- 79713,8805
Ganho Para Ação Integral – k_i	0,064306
Ganho Para Ação Derivativa – k_d	0,016076
Sobressinal	3,1%
Pico	1,03
Tempo de subida	0,00113 segundos
Tempo de Acomodação	0,0145 segundos

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

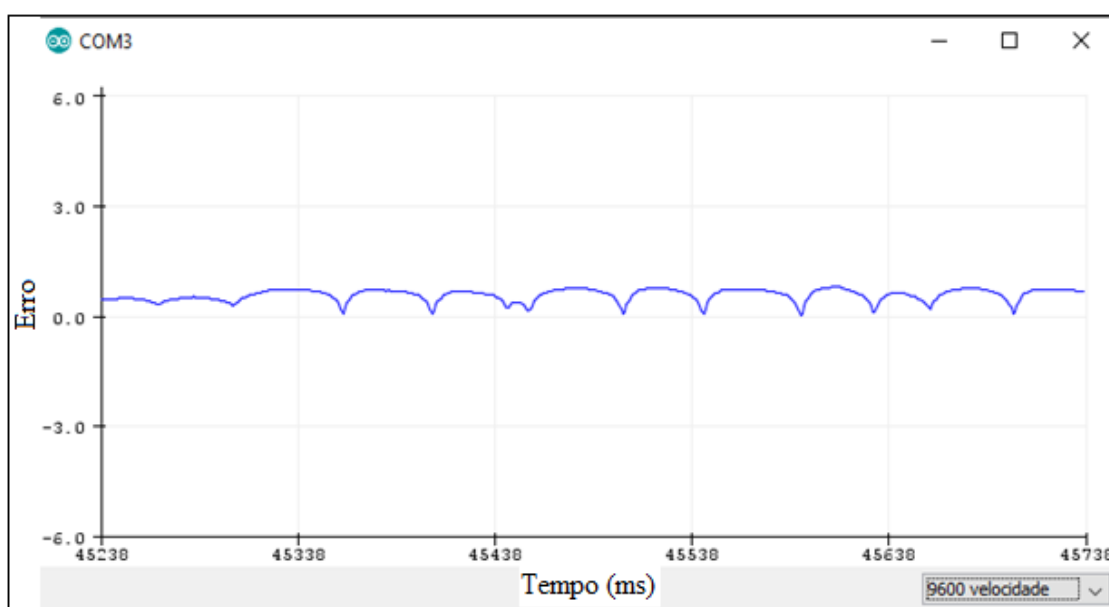
Ao alimentar o eletroímã de 1800 espiras enroladas com fio esmaltado de 20 AWG, com 1,22 H de indutância e 16,5 Ω de resistência foi medido 720 mA fluindo no circuito. A tensão

de saída nos terminais do sensor de efeito hall proporcional ao campo gerado foi de $3,3 V_{CC}$. Com objeto posicionado na distância de referência a tensão hall foi $4,20 V_{CC}$, sendo a tensão de referência para o ajuste do controle. Foi obtido o valor de 926 (adimensional) como resultado do PID com objeto na posição de referência e -11356 (adimensional) com objeto não detectado. Como a saída do microcontrolador trabalha com valores entre 0 e 255 que corresponde valor de 0 a 5 V. A EQUAÇÃO 19 recebe esta variação e define a saída da PWM. Sendo y o resultado da equação que define a saída do microcontrolador para $PID < 0$ e 255 para $PID > 0$.

$$Y = (-0,0207 * PID) - 19,16 \quad (19)$$

O sinal de erro mostrado na FIGURA 18 mostra que o erro do sistema não foi totalmente tratado pelo controlador. Os ganhos obtidos pelo *software* computacional não foram suficientes para o controle e estabilizar o objeto em levitação. Sendo necessário alterar os valores dos ganhos de acordo com a resposta do objeto em levitação. A cada mudança feita nos ganhos no IDE era necessário compilá-lo, causando atrasos nos testes. Foi inserido rotina para utilização de potenciômetros para que a leitura fosse realizada de forma instantânea para que alteração dos ganhos fossem instantâneas, evitando compilar a rotina a cada mudança realizada. Mas os potenciômetros causaram oscilações nas leituras, sendo necessário utilizar a primeira forma de alteração dos ganhos.

Figura 18 - Sinal de erro do Controle



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o desenvolvimento do projeto foi possível perceber o ganho para os discentes terem um projeto prático para conhecimento na área de controle, com a possibilidade de melhoria e modificações. Além da disciplina de controle, pode-se revisar outras disciplinas como eletrônica, programação, máquinas e conversão de energia torna-se necessário. Ressaltar um projeto que possui opções de diferentes linguagens de programação para o desenvolvimento do controle: como Python, Fuzzy, Matlab, Scilab ou ainda utilizar circuito analógico.

Através do modelo matemático extraído das forças atuantes foi possível comprovar a instabilidade do projeto. O ajuste fino dos ganhos que dão importância às ações do controle para eliminar o polo da região instável foi ineficaz, não sendo possível eliminar as oscilações para tornar o sistema estável e cumprir a proposta do trabalho.

Contudo, fica oportuna oportunidade para futuros alunos encontrarem os ganhos necessários para realizar a levitação. Encontrar através de simulações o mínimo e o máximo valor de massa para esta planta. Levantar quais possíveis sensores pode ser usado para referencia da distancia do objeto. E ainda, a massa de construção ferromagnética que melhor interage com as linhas de força gerada pela bobina eletromagnética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A SERWAY, Jonh w. Jewett, Jr. **Princípios de Física: Eletromagnetismo**. 3. ed. Cengage Learning, 2013.

ANG, Kiam Heong, CHONG Gregory. **PID Control System Analysis, Design, and Technology**. Disponível em: <http://eprints.gla.ac.uk/3817/1/IEEE3.pdf>. Acesso em: 24 de maio. 2019.

BANZI, Massino; SHILOH, Michael. **Primeiros Passos Com Arduíno**. 2. ed. São Paulo: Novatec, 2015.

BARBOSA, Luís. **Controle Analógico de um Levitador Magnético (MAGLEV) de Simples Construção e Operação**. Disponível em: https://www.academia.edu/3035050/Controle_anal%C3%B3gico_de_um_levitador_magn%C3%A9tico_MagLev_de_simples_constru%C3%A7%C3%A3o_e_operac%C3%A7%C3%A3o. Acesso em: 24 de mai. 2019.

BAZANELLA, Alexandre Sanfelice; DA SILVA JR, João Manoel Gomes. **Sistemas de Controle: Princípios e Métodos de Projeto**. 1. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

GUIDORIZZI, Hamilton Luiz. **Um curso de Cálculo**. 5. ed. São Paulo: Ltc, 2001.

HEINÄNEN, Eero. **A Method For Automatic Tuning PID Controller Following Luus-Jaakola Optimization**. Disponível em: A Method for automatic tuning of PID controller following Luus-Jaakola optimization. Acesso em: 24 de mai. 2019.

HONEYWELL. **Magnetic Sensors**. Disponível em: <http://www.mouser.com/pdfdocs/Honeywell%20Magnetic%20Sensors.pdf>. Acesso em: 23 de maio. 2019.

KOMORI, M; YAMANE, T. **Magnetically Levitated Micro PM Motors by Two Types of Active Magnetic Bearings**. IEEE/AsmeTransactionsonMechatronics. 2001.

MARQUEZ, Horacio. J. **Nonlinear Control Systems: Analysis and Design**. University of Alberta, Canada, 2003.

MCROBERTS, Michael. **Arduíno Básico**. 3. ed. São Paulo: Novatec, 2013.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 4. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

RASHID, Muhammed H. **Eletrônica de Potência: Circuitos, dispositivos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 1999.

SANTANA, Ferreira, SALAZAR, Andrés Ortiz. **Modulo Educativo de um Levitador Magnético: Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia (COBENGE)**, p. MTE 273, 2001.

SHIAO, Ying Shing. **Design and implementation of a Controller for a Magnetic Levitation System**. p. 88 – 94, 2001.

TIPLE, Paul Allen; MOSCA Gene. **Física Para Cientistas e Engenheiros**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

UMANS, STEPHEN D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

WONG, T.H. **Design of a magnetic levitation control systems: an undergraduate project**. IEEE Transactions of Education, volume E-29, 196-200, 1986