

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL – UCS**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CARLA GOULARTE**

**DESENVOLVIMENTO DE UM MANCAL MAGNÉTICO HÍBRIDO**

**CAXIAS DO SUL**

**2020**

**CARLA GOULARTE**

**DESENVOLVIMENTO DE UM MANCAL MAGNÉTICO HÍBRIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso II  
apresentado na Universidade de Caxias do  
Sul, como requisito parcial para obtenção  
do título de Engenheira Eletricista.

Orientador:  
Prof. Dr. Alexandre Mesquita

**CAXIAS DO SUL**

**2020**

**CARLA GOULARTE**

**DESENVOLVIMENTO DE UM MANCAL MAGNÉTICO HÍBRIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso II  
apresentado na Universidade de Caxias do  
Sul, como requisito parcial para obtenção  
do título de Engenheira Eletricista.

Orientador:  
Prof. Dr. Alexandre Mesquita

**Aprovado em** \_\_/\_\_/\_\_\_\_

**Banca Examinadora:**

-----  
Prof. Dr. Alexandre Mesquita  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

-----  
Prof. Me. Tiago Cassol Severo  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

-----  
Prof. Me. Bruno Fensterseifer Dias  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por minha vida, família e amigos e por iluminar meu caminho e minhas escolhas.

Aos meus pais, Antonio e Cleusa, que não mediram esforços para me ajudar nessa etapa tão importante da minha vida.

A minha irmã Júlia, pelos momentos de descontração e brigas, mas sempre acreditando no meu potencial e na nossa amizade.

A meu namorado Leandro, pelo carinho, inteligência compartilhada e por ter sido meu maior incentivador nesse período acadêmico.

Aos professores Guilherme Homrich e Alexandre Mesquita pelas orientações, pelo conhecimento compartilhado e atenção prestada neste trabalho e nas disciplinas cursadas.

Aos amigos e companheiros de curso pela amizade construída e desesperos da graduação compartilhados.

*“Devemos acreditar que somos talentosos em alguma coisa, e que essa coisa, a qualquer custo, deve ser alcançada. ”*

**Marie Skłodowska Curie**

## RESUMO

Mancais magnéticos ativos geram forças por meio de campos magnéticos com o uso de bobinas. Em sua estrutura não há contato entre móvel e estator, e essa característica permite ao sistema operar sem lubrificação e desgaste mecânico. Há dois grupos principais de rolamentos e eles podem ser distinguidos quanto a origem das forças magnéticas representadas. Uma delas é pela força de relutância e a outra é pela força de Lorentz. A rigidez e o amortecimento podem variar dentro dos limites físicos e podem ser ajustados conforme o projeto. O projeto utiliza bobinas e ímãs permanentes com o intuito de suspender um rotor em posição simétrica ao eixo principal. Para isso, se faz necessário utilização de sensores para medir o deslocamento do rotor a partir de uma posição tomada como referência, um microprocessador como controlador deriva um sinal de controle da medição. Esse sinal de controle é amplificado por um sistema de potência que transforma em uma corrente controlada que resulta em um campo magnético nas bobinas, derivando forças magnéticas e permitindo que o eixo rotacional permaneça em posição suspensa. O protótipo se mostrou viável e estável manipulando as variáveis de controle, através dos ganhos do controlador.

**Palavras-chave:** mancal magnético, rolamento, controle, bobinas, ímãs.

## ABSTRACT

Active magnetic bearings generate frames by means of magnetic fields using coils. In its structure there is no moving contact and stator, and this feature allows the system to operate without lubrication and mechanical wear. There are two main groups of bearings and they can be distinguished as to the origin of the represented magnetic options. One is by the force of reluctance and the other is by the force of Lorentz. Stiffness and damping can vary within physical limits and can be adjusted according to the design. The project uses coils and added permanents in order to suspend a rotor in a symmetrical position to the main axis. For this, it is necessary to use sensors to measure the rotor displacement from a socket as a reference, a microprocessor as a driver derives an evaluation control signal. This control signal is amplified by a power system that transforms into a controlled current that results in a magnetic field in the coils, deriving magnetic frames and allowing the rotational axis to remain in a suspended position. The prototype proved to be viable and stable, manipulating as control variables, through the driver's gains.

**Keywords:** magnetic bearing, bearing, control, coils, magnets.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1– Aplicação da lei de Ampère a um solenoide.....	17
Figura 2 – Linhas de força de um solenoide.....	18
Figura 3 – Campo magnético no eixo do solenoide em função da posição ao longo do eixo.....	19
Figura 4 – Ilustração teorema de Earnshaw.....	20
Figura 5 – Componentes básicos de um mancal magnético ativo.....	25
Figura 6 – Diagrama $BH$ .....	26
Figura 7 – Modelo esquemático da força de relutância.....	27
Figura 8 – Linearização da força em torno de $i_0$ e $x_0$ .....	28
Figura 9 – Modo de acionamento dos eletroímãs.....	29
Figura 10 – Esquemático do circuito de levitação com LCR.....	31
Figura 11 – Configuração do mancal magnético híbrido proposto.....	32
Figura 12 – Caminhos de fluxo do mancal.....	33
Figura 13 – Distribuição espacial de ímãs permanentes e supercondutores.....	34
Figura 14 – Princípio de levitação eletrodinâmica.....	35
Figura 15 – Funcionamento Efeito Hall.....	37
Figura 16 – Diagrama do circuito com transistor.....	40
Figura 17– Diagrama de blocos do sistema de controle.....	43
Figura 18 – Mapeamento do plano $s$ e do plano $z$ pelo método de Euler.....	45
Figura 19 – Mapeamento do plano $s$ e do plano $z$ pelo método diferencial.....	46
Figura 20 – Mapeamento entre o plano $s$ e o plano $z$ pelo método de Tustin.....	47
Figura 21 – Mancal magnético híbrido proposto.....	49
Figura 22 – Modelo axial com seis polos.....	50
Figura 23 – Estrutura do estator no mancal cônico.....	50
Figura 24 – Topologia do mancal magnético.....	52
Figura 25 - Vistas do protótipo desenvolvido.....	53
Figura 26 – Posição dos componentes.....	54
Figura 27 – Vista frontal com ângulos.....	55
Figura 28 – Distribuição de forças.....	56
Figura 29 – Vista superior e frontal do rotor de aço.....	56



Figura 30 – Eletroímãs utilizados no projeto.....	57
Figura 31 – Posicionamento do sensor e emissor de luz.....	58
Figura 32 – Funcionamento da medição da posição.....	59
Figura 33- Resistência em função do fluxo luminoso.....	59
Figura 34 – Circuito para leitura do LDR.....	60
Figura 35 – Placa Arduino Uno.....	61
Figura 36 – Posições para leitura do sensor.....	62
Figura 37 - Circuito de chaveamento.....	64
Figura 38 – Diagrama de blocos do controlador PD.....	66
Figura 39 – Implementação digital do controlador PD.....	67
Figura 40 – Massas e posições para perturbação axial.....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trabalhos abordados e topologias utilizadas.....	48
Tabela 2 – Especificações do eletroímã.....	57
Tabela 3 – Parâmetros físicos do protótipo.....	57
Tabela 4 – Relação de valores obtidos do LDR.....	63
Tabela 5 – Resultados medidos.....	70
Tabela 6 – Resultados medidos.....	71
Tabela 7 – Resultados medidos.....	71
Tabela 8 – Resultados medidos.....	72
Tabela 9 – Resultados medidos.....	73
Tabela 10 – Resultados medidos.....	73
Tabela 11 – Resultados medidos.....	74
Tabela 12 – Resultados medidos.....	75

## LISTA DE SIGLAS

CdS	<i>Sulfeto de Cádmio</i>
CdSe	<i>Seleneto de Cádmio</i>
PbS	<i>Sulfeto de Chumbo II</i>
InSb	<i>Antimoneto de Índio</i>
HgCdTe	<i>Mercúrio Cádmio Telureto</i>
LCR	<i>Indutor Capacitor Resistor</i>
PD	<i>Proporcional Derivativo</i>
PID	<i>Proporcional Integral Derivativo</i>
LC	<i>Indutor Capacitor</i>
HTS	<i>Supercondutor de Alta Temperatura</i>
YBCO	<i>Ítrio Bário Cobre Oxigênio</i>
PWM	<i>Modulação por Largura de Pulso</i>
IDE	<i>Ambiente de Desenvolvimento Integrado</i>
LED	<i>Diodo Emissor de Luz</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.3 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
2.1 PRINCÍPIOS FÍSICOS .....	16
<b>2.1.1 Campo magnético em um solenoide .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.2 Natureza instável do sistema – Teorema de Earnshaw .....</b>	<b>19</b>
2.2 TOPOLOGIAS DE MANCAIS MAGNÉTICOS .....	22
<b>2.2.1 Mancal magnético ativo .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.2 Rolamentos LCR sintonizados.....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.3 Mancal com ímãs permanentes.....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.4 Mancal com material supercondutor .....</b>	<b>33</b>
<b>2.2.5 Mancal com levitação eletrodinâmica .....</b>	<b>35</b>
2.3 SENSORES .....	36
<b>2.3.1 Sensor de Efeito Hall.....</b>	<b>36</b>
<b>2.3.2 Sensor ótico.....</b>	<b>37</b>
2.4 CIRCUITO DE ACIONAMENTO .....	39
2.5 SISTEMA DE CONTROLE .....	41
<b>2.5.1 Discretização de controladores .....</b>	<b>43</b>
<b>2.5.2 Métodos de discretização de controladores .....</b>	<b>44</b>
2.5.2.1 Método de Euler .....	44
2.5.2.2 Método diferencial .....	45
2.5.2.3 Método de Tustin.....	46
<b>3 TRABALHOS RELACIONADOS .....</b>	<b>48</b>
<b>4 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....</b>	<b>52</b>
4.1 MANCAL E ROTOR.....	52
4.2 SENSORES .....	58
4.3 CIRCUITO DE ACIONAMENTO .....	63

4.4 IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE .....	64
<b>4.4.1 Código de controle.....</b>	<b>67</b>
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	68
<b>4.5.1 Resposta à perturbação externa .....</b>	<b>68</b>
<b>4.5.2 Resposta com o eixo totalmente suspenso .....</b>	<b>72</b>
<b>4.5.3 Resposta à perturbação com o eixo totalmente suspenso .....</b>	<b>73</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>76</b>
5.1 TRABALHOS FUTUROS .....	77
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com Schweitzer (2002), há quatro décadas, os rolamentos magnéticos ativos foram projetados para superar as deficiências dos mancais convencionais ou rolamentos de esferas. Em laboratórios de pesquisa, mancais magnéticos ativos mostraram capacidade de trabalhar no vácuo sem lubrificação e sem contaminação, como também de alcançar alta velocidade.

Para Schweitzer (2002), os mancais magnéticos foram incorporados ao mundo industrial como um elemento de máquina inestimável e com uma vasta gama de aplicações. Ademais, eles também foram idealizados com o intuito de substituir os mancais mecânicos utilizando o princípio da levitação.

Empresas alemãs tais como a Evico e Siemens desenvolvem sistemas de mancais magnéticos para aplicações industriais. A Evico desenvolve rolamentos magnéticos supercondutores para aplicações com alta demanda de limpeza como, por exemplo, manipulação de amostras no vácuo e espaços contaminados pois esta topologia de mancal é isenta de atrito, poeira e desgaste mecânico.

A Siemens produz mancais magnéticos ativos para utilização em turbinas e motores, por ser uma aplicação mais complexa, os sensores capturam as posições do eixo 16.000 vezes por segundo e os dispositivos podem ser controlados remotamente podendo ser usados em áreas de difícil acesso, como desertos ou debaixo da água.

Siqueira (2013) desenvolveu um mancal magnético ativo com controle por modos deslizantes, esse método de controle é mais eficiente pois não se trata de um sistema de controle clássico. O projeto utiliza 8 bobinas e um rotor de aço-silício, a quantidade de bobinas ratifica que o principal objetivo do trabalho é observar o desempenho de um controle mais sofisticado e robusto, como o Sliding Mode Control (Controle dos Modos Deslizantes).

Similarmente, Coelho (2016) desenvolveu uma bancada com mancais magnéticos ativos para o estudo da dinâmica de rotores. O trabalho faz análise do comportamento dinâmico do rotor com o objetivo de estabelecer um modelo matemático, além disso, o trabalho também realiza o levantamento da capacidade de carga do mancal como, rigidez e amortecimento.

Diante do contexto apresentado, este trabalho propõe o desenvolvimento de um mancal magnético ativo capaz de suspender um rotor de forma simétrica ao longo do eixo utilizando conceitos de conversão eletromecânica, eletrônica de potência e sistemas de controle.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo desenvolver de um mancal magnético híbrido utilizando-se eletroímãs e materiais magnéticos de forma a suspender um rotor utilizando um sistema de controle PD.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) definir o número de bobinas necessárias e a posição no estator;
- b) dimensionar a estrutura mecânica do estator;
- c) desenvolver um circuito para controle da corrente aplicada a bobina;
- d) avaliar o protótipo do mancal magnético híbrido com ímãs permanentes e eletroímã.

## 1.3 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho se divide em 4 capítulos, sendo que no primeiro capítulo é apresentada uma breve introdução. O segundo capítulo consiste na revisão bibliográfica necessária para a compreensão da proposta deste trabalho, onde são apresentados os princípios físicos, tipos de mancais, métodos de controle, tipos de sensores que podem ser utilizados e circuito de acionamento. No terceiro capítulo é apresentada a análise de trabalhos relacionados, evidenciando as principais técnicas de controle e modelagens mecânicas. Por fim, o capítulo 4 apresenta uma abordagem quanto a metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho, detalhando sobre a topologia mecânica, escolha dos sensores e método de controle a ser utilizado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com a finalidade de fundamentar a metodologia a ser utilizada no decorrer do desenvolvimento deste estudo, a seguir serão apresentados assuntos considerados necessários para a sua compreensão e elaboração.

### 2.1 PRINCÍPIOS FÍSICOS

Nesta seção serão apresentados os princípios físico-matemáticos que fundamentam o dispositivo eletromagnético a ser desenvolvido neste trabalho.

#### 2.1.1 Campo magnético em um solenoide

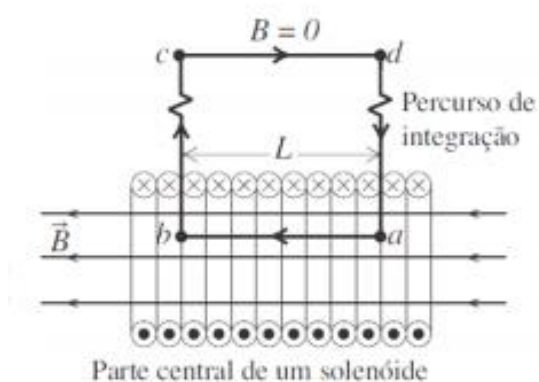
A lei de Ampère determina que a circulação do campo magnético ao longo de um percurso fechado é igual à permeabilidade magnética no vácuo vezes a corrente total que atravessa a área envolvida. Esta lei é utilizada quando envolve situações com simetria que permite o cálculo da integral.

Conforme Halliday, Resnick e Walker (2016) um solenoide é um enrolamento helicoidal sobre um núcleo cilíndrico, todas as espiras conduzem a mesma corrente e o campo magnético total em cada ponto é a soma vetorial dos campos produzidos pelas espiras individuais. No interior do solenoide, os campos se somam e o campo total é aproximadamente constante e uniforme. No exterior, os campos se cancelam, e o campo é aproximadamente nulo.

A Figura 1 evidencia a aplicação da Lei de Ampère a um solenoide em que  $\vec{B}$  é uniforme do lado de dentro do solenoide e zero do lado de fora, usando uma amperiana retangular *abcd*.



Figura 1- Aplicação da lei de Ampère a um solenoide.



Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2016).

Escreve-se  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l}$  como a soma de quatro integrais, uma para cada segmento da amperiana, conforme a Equação 1.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_a^b \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_b^c \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_c^d \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_d^a \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 n L i \quad (1)$$

Na região externa ao solenoide  $\vec{B} = 0$ , portanto a integral ao longo de  $cd$  é dada pela Equação 2.

$$\int_c^d \vec{B} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (2)$$

Na região interna, o campo magnético é perpendicular às linhas  $bc$  e  $da$ , de modo que resulte conforme a Equação 3.

$$\int_b^c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_d^a \vec{B} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (3)$$

Portanto a integral que resta resulta na Equação 4:

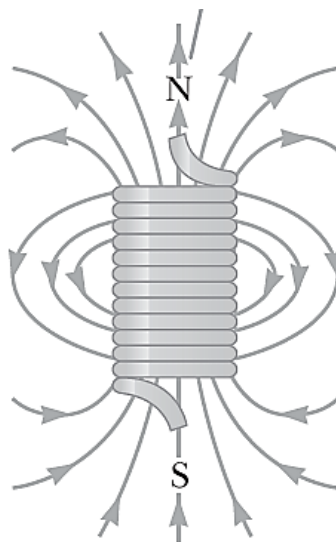
$$BL = \mu_0 nLi \quad (4)$$

Ou conforme a Equação 5 para solenoide ideal.

$$B = \mu_0 ni \quad (5)$$

As extremidades do solenoide constituem polos magnéticos, sendo que o polo norte é a face por onde saem as linhas de indução magnética, e a face por onde entram é chamada de polo sul. Conforme a Figura 2.

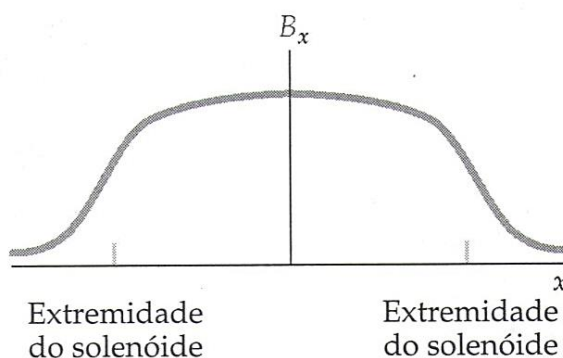
Figura 2 – Linhas de força de um solenoide.



Fonte: Jewett; Serway (2014).

A ideia de que o campo tem um valor constante, independentemente da posição, é razoável, a não ser a uma distância muito pequena das extremidades. A Figura 3 mostra que o campo não é constante próximo as extremidades de um solenoide.

Figura 3 – Campo magnético no eixo do solenoide em função da posição ao longo do eixo.



Fonte: Tipler (2000).

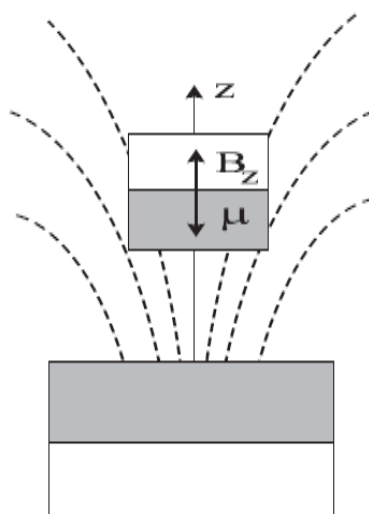
### 2.1.2 Natureza instável do sistema – Teorema de Earnshaw

A levitação de materiais magnéticos é associada aos princípios físicos do eletromagnetismo. Ao aproximar a face de dois ímãs com mesmos pólos, experimenta-se uma força de repulsão, então presupõe-se por que não há uma distância específica na qual essa força de repulsão se equilibra a energia potencial da gravidade e, assim, obtendo-se uma ímã levitando sem nenhum contato mecânico.

Em 1842, Earnshaw provou que a ideia não é sustentada matematicamente e fisicamente. Ele postula em seu teorema que não é possível levitar de forma estável um sistema utilizando-se apenas campos eletromagnéticos estáticos, pois as forças que atuam em um objeto combinando os campos gravitacional, eletrostático e magnético farão com que a posição do objeto levitado seja instável (JAYAWANT, 1981).

A Figura 4 mostra um ímã permanente com o polo norte de um ímã voltado para o polo norte de um ímã fixo grande,  $\mu$  é o momento dipolar do ímã levitando a uma distância  $z$  do ímã maior, cujo mesmo cria um campo magnético  $B_z$  no topo da posição do ímã levitando. As linhas indicam o campo magnético do ímã maior.

Figura 4- Ilustração teorema de Earnshaw.



Fonte: Abrahamsen (2001).

Assumindo que os ímãs são simétricos em relação ao eixo  $z$  e que o ímã superior está posicionado no centro de massa, pode-se descrever a energia do ímã superior como a soma da energia potencial gravitacional com o momento magnético conforme a Equação 6.

$$U = mgz - \mu B = mgz - \mu B_z \cos \theta \quad (6)$$

Em que  $m$  é a massa do ímã a levitar a uma distância  $z$ ,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\mu$  é o momento dipolar do ímã e  $B_z$  é o campo magnético criado pelo ímã inferior no eixo  $z$  e  $\theta$  é o ângulo entre o campo e a direção do dipolo magnético.

O equilíbrio do ímã superior é determinado pela derivada de  $U$  em relação às três coordenadas e ao ângulo de inclinação  $\theta$  do ímã como descrito na Equação 7.

$$\frac{\partial U}{\partial r_i} = 0 \quad (7)$$

para  $r_i = x, y, z, \theta$

Avaliando a Equação 7, para  $x = y = 0$ ,  $z = z_0$  e  $\theta = 180^\circ$  obtém-se as Equações 8, 9 e 10 para cada coordenada:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \mu \frac{\partial B_z}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial U}{\partial y} = \mu \frac{\partial B_z}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial U}{\partial z} = mg + \mu \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

A Equação 11 resulta em zero pois  $\text{sen}(180^\circ) = 0$  .

$$\frac{\partial U}{\partial \theta} = \mu B_z \sin \theta = 0 \quad (11)$$

Para atingir o equilíbrio, é necessário que o sistema esteja no mínimo de energia, que corresponde, matematicamente, pela segunda derivada da energia  $U$ , a qual deve ser positiva em relação a todas as direções no espaço e no ângulo de inclinação, como descrito na Equação 12 para posição no espaço e a Equação 13 para ângulo.

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r_i^2} = \mu \frac{\partial^2 B_z}{\partial r_i^2} > 0 \quad (12)$$

para  $r_i = x, y, z$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} = \mu B_z > 0 \quad (13)$$

Como não há correntes em funcionamento no sistema, conclui-se que a rotação da densidade do fluxo magnético  $B$  é zero e, portanto, é determinado pela equação de Laplace conforme as Equações 14,15 e 16.

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (14)$$

$$\nabla \times B = J = 0 \quad (15)$$

$$\nabla^2 B = 0 \quad (16)$$

A Equação 16 fornece as seguintes condições para as segundas derivadas da componente  $B_z$  como descrito na Equação 17.

$$\frac{d^2 B_z}{dx^2} + \frac{d^2 B_z}{dy^2} + \frac{d^2 B_z}{dz^2} = 0 \quad (17)$$

Portanto, é impossível obter segundas derivadas positivas nas direções  $x, y$  e  $z$  simultaneamente, evidenciando que a condição de equilíbrio estável descrita na Equação 12 não pode ser cumprida para as três coordenadas.

A segunda derivada da energia em relação ao ângulo de inclinação é negativa, mostrando que o sistema é instável em relação a inclinações. Dessa maneira, o ímã da Figura 4 girará e será atraído para o polo norte do ímã inferior.

Desta maneira, o teorema de Earnshaw ratifica que para obter um equilíbrio em partículas magnéticas não basta apenas encontrar uma configuração no qual os mesmos permaneçam estáveis, mas que algum outro componente que não seja ímãs permanentes deve ser adicionado ao sistema, por exemplo, eletroímãs para realizar controle ativo, de forma a atingir tal objetivo.

## 2.2 TOPOLOGIAS DE MANCAIS MAGNÉTICOS

Os rolamentos magnéticos podem ser classificados de acordo como que as respectivas forças magnéticas podem ser calculadas e representadas, e estas estão divididas entre força de relutância e força de Lorentz (SCHWEITZER, 2009).

No primeiro caso, a força é descrita através da constante de magnetização,  $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$  em que a permeabilidade relativa  $\mu_r$ , depende do material utilizado. Esta força deriva da energia armazenada no campo magnético que pode ou não ser convertida em energia mecânica.

Para materiais ferromagnéticos com  $\mu \gg 1$ , as forças podem se tornar muito grandes. A resistência magnética pode ser análoga a resistência de um circuito elétrico e é chamada relutância, como mostra a Equação 18.

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu \cdot A} \Leftrightarrow R = \rho \frac{l}{A} \quad (18)$$

Em que  $\mathfrak{R}$  é a relutância magnética dada por  $A_e/W_b$ ,  $l$  é o comprimento médio do caminho magnético das linhas de campo,  $\mu$  permeabilidade magnética do meio dada por  $W_b/A_m$ , e  $A$  a área da seção transversal,  $R$  resistência elétrica e  $\rho$  resistividade elétrica.

A relutância magnética é uma medida de oposição que um meio oferece ao estabelecimento e concentração das linhas de campo magnético enquanto que a resistência elétrica é uma oposição à passagem de corrente elétrica. A relutância é inversamente proporcional a permeabilidade relativa, e age de tal maneira que tende a diminuir a relutância do sistema mecânico. (UMANS, 2014).

Há tipos de mancais magnéticos em que as forças magnéticas que atuam no corpo mantêm o corpo em um estado estável de levitação, chamados mancais passivos, por exemplo, mancal com supercondutores. E também há os modelos em que é necessário ter meios ativos, como um circuito de controle, para adaptar continuamente o campo magnético ao movimento do corpo. Esta configuração leva à categoria de rolamentos magnéticos ativos.

No segundo caso, fundamentado na lei de Lorentz caracteriza o segundo grupo de classificação de mancais magnéticos. Uma força  $\vec{f}$  agindo em uma carga elétrica  $Q$  resulta na Equação 19.

$$\vec{f} = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (19)$$

De acordo com Schweitzer (2009), existem quatro tipos de levitação magnética fundamentados na força de Lorentz, eles são agrupados de acordo com a fonte de corrente, que pode ser induzida ou controlada. Para o sistema que utiliza corrente induzida, existem dois mecanismos de funcionamento possíveis: interação entre um campo magnético permanente e um condutor em movimento ou entre um condutor e um eletroímã alimentado por uma fonte de corrente alternada.

De outra forma, a corrente pode ser controlada e interagir com um campo magnético permitindo duas configurações: o campo magnético pode ser produzido por um ímã permanente ou ocorrer uma interação entre a corrente controlada e a corrente induzida.

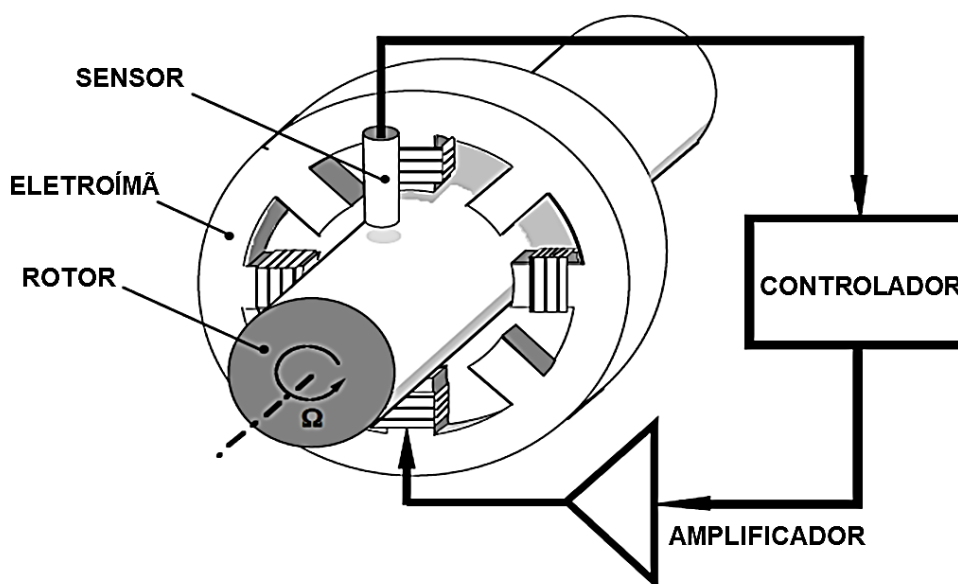
### 2.2.1 Mancal magnético ativo

Este tipo de mancal geralmente utiliza materiais ferromagnéticos, ou seja,  $\mu_r \gg 1$ . Para sua construção, se faz necessário o uso de um eletroímã, um sensor de posição e um sistema de controle. Com a variação da corrente no eletroímã pode-se então controlar o campo magnético de forma a obter-se uma estabilidade desejada. Este sistema é chamado de ativo.

A preferência pelo sistema ativo é evidenciada pela vantagem de controlar como o processo ocorre e a possibilidade de se alcançar um alto amortecimento. O controle ativo dispõe de três elementos básicos: o sensor, o controlador e o atuador. A Figura 5 mostra um esquema do modelo.



Figura 5 – Componentes básicos de um mancal magnético ativo.



Fonte: Adaptado de Schweitzer (2009).

O sensor tem a função de medir e transmitir ao controlador a posição do rotor, e portanto, aplica a lei de controle projetada e envia o sinal amplificado para as bobinas.

O princípio de funcionamento de um mancal magnético ativo é fundamentado em um eletroímã, alimentado por uma corrente elétrica, que gera um campo magnético em forma de circuito fechado pondo o objeto a levitar. Nesse caso, o rotor criando uma força de atração entre as partes constituídas de material ferromagnético. Tal força é conhecida como força de relutância.

A corrente que passa pelo indutor gera um campo magnético  $H$ , dado em  $A/m$ . Aumentando-se o campo magnético, o material ferromagnético alinha seus dipolos magnéticos, formando uma densidade de fluxo magnético  $B$ , dada em  $Wb/m^2$ . Portanto, o valor de  $B$  depende de  $H$  e do material pelo qual está percorrendo.

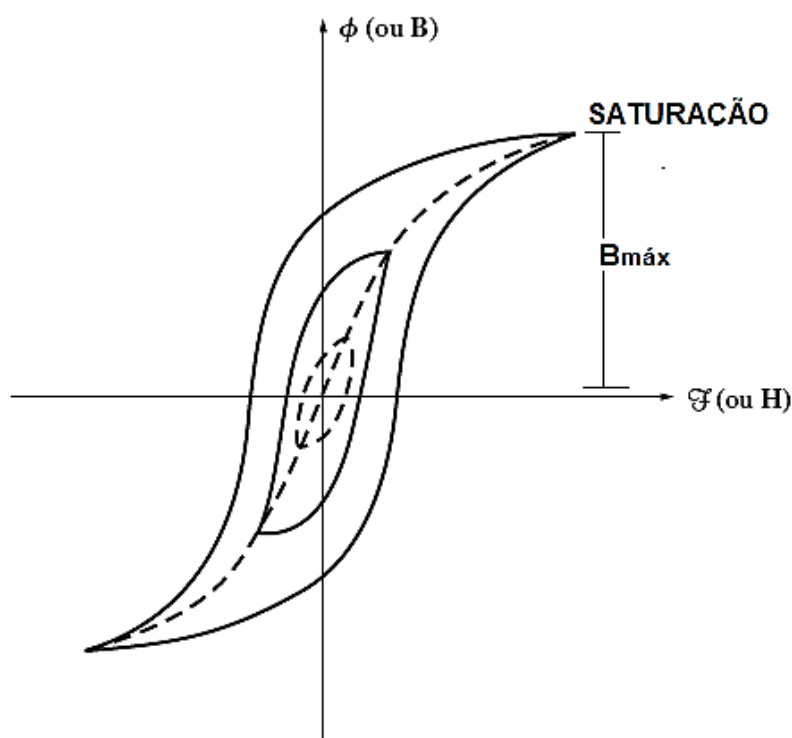
Existe uma relação entre  $B$  e  $H$  que pode ser analisada em diagramas de magnetização dos materiais e apresentam um efeito de histerese, que se deve aos dipolos magnéticos tenderem a manter um alinhamento mesmo que ocorra uma retirada de campo  $H$ .

A Equação 20 mostra que os valores de  $B$  e  $H$  estão relacionados através da constante magnética  $\mu_0$  e pela permeabilidade magnética relativa do material  $\mu_r$ .

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (20)$$

Quando  $B$  aumenta e atinge um ponto em que todos os dipolos do material estão alinhados, diz-se que atingiu o ponto de saturação do material que pode ser visto na Figura 6 que representa a curva de histerese.

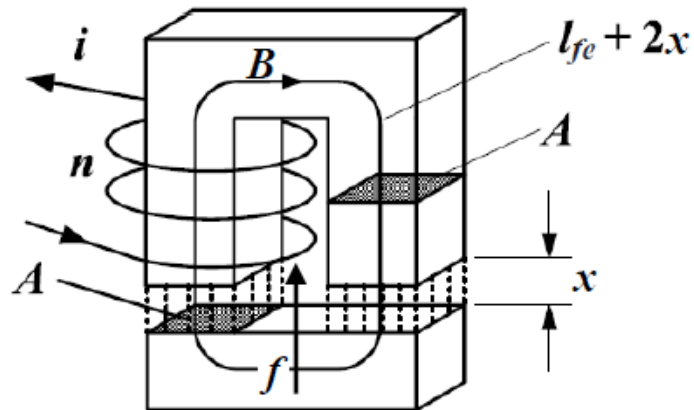
Figura 6 – Diagrama  $BH$ .



Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

Para o cálculo do campo magnético  $H$  em função da corrente  $i$  que passa pelas  $n$  espiras da bobina, utiliza-se a Lei de Ampère. Conforme análise da Figura 7, a intensidade de campo  $H$  induz linhas de fluxo magnético no interior dos materiais em um percurso fechado e de comprimento  $l + 2x$ .

Figura 7 – Modelo esquemático da força de relutância.



Fonte: Schweitzer (2009).

Dessa maneira, a integral da Lei de Ampère pode ser resolvida dividindo-se o campo que passa pelo material ferromagnético e pelo ar, conforme as Equações 21 e 22.

$$B = \mu_0 \frac{ni}{\left(\frac{l}{\mu_r}\right) + 2x} \quad (21)$$

$$\oint H \cdot ds = lH_f + 2xH_a = l \frac{B}{\mu_0 \mu_r} + 2x \frac{B}{\mu_0} \quad (22)$$

A Equação 21 relaciona a corrente com a folga entre o eletroímã e o objeto.

Pode-se mostrar que a energia armazenada no volume de ar pode ser expressa em termos de densidade de energia do campo magnético integrada em seu volume  $V_a = 2Ax$ , conforme a Equação 23.

$$W = \int_V \left(\frac{B^2}{2\mu}\right) dV = \frac{1}{2\mu_0} B^2 2xA \quad (23)$$

Sendo  $B$  o campo magnético que passa no volume de ar, pode-se calcular a força  $f$  presente no deslocamento, como descrito na Equação 24.

$$f = \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{B^2 A}{\mu_0} \quad (24)$$

Finalmente, substituindo a Equação 21 na Equação 24, obtém-se uma equação que relaciona a força  $f$  com a corrente  $i$  e o deslocamento  $x$ , conforme a Equação 25.

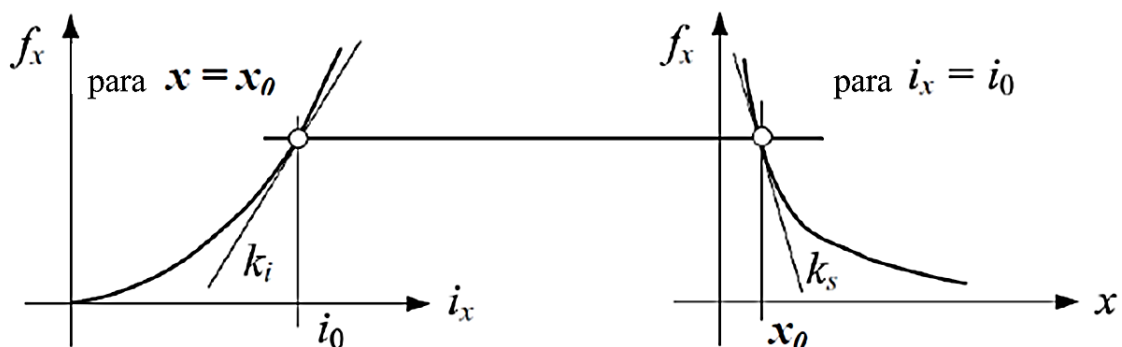
$$f(x, i) = \frac{\mu_0 n^2 i^2 A}{\left(\frac{l}{\mu_r} + 2x\right)^2} \quad (25)$$

A Equação 25 considera uma magnetização linear e ausência de histerese. Essas aproximações geram erros e incertezas no projeto, mas de qualquer forma já exibe uma previsão da força de relutância.

Existe um ponto de saturação para a força quando  $x$  é pequeno ou  $i$  é grande de acordo com o ponto de saturação magnética do material ferromagnético utilizado e este ponto deve ser conhecido ao projetar o mancal.

Admite-se que  $i_0$  e  $x_0$  são valores estacionários de corrente elétrica e posição, a Figura 8 mostra que as influências de corrente e da posição na força passam a ser independentes.

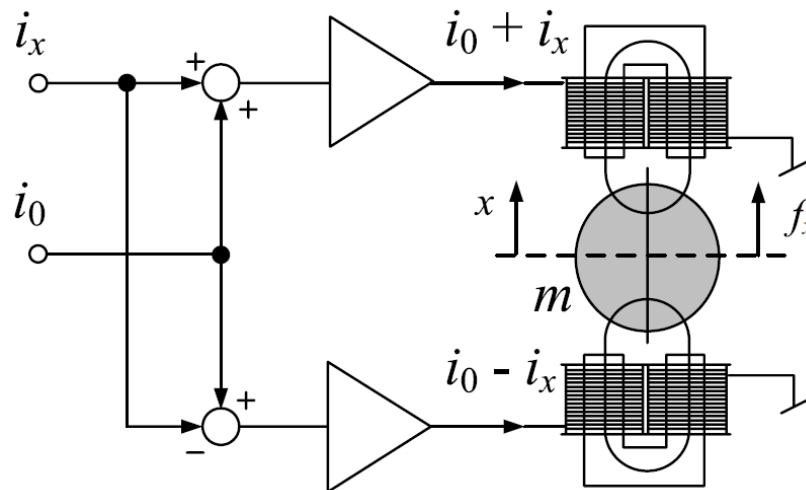
Figura 8 – Linearização da força em torno de  $i_0$  e  $x_0$ .



Fonte: Adaptado de Schweitzer (2009).

O mancal magnético apresenta eletroímãs agindo na parte superior e inferior ao rotor, exercendo forças em direções opostas. Desprezando a força peso, a corrente de referência  $i_0$  percorrerá os dois atuadores e ambas as forças irão se anular. Não estando mais nesta posição, a força de um dos eletroímãs será superior a outra, dessa forma o sinal de corrente  $i_x$  sempre será adicionado em um eletroímã e subtraído no outro, conforme a Figura 9.

Figura 9 – Modo de acionamento dos eletroímãs.



Fonte: Schweitzer (2009).

A corrente de referência serve para determinar o ponto de linearização, e esta corrente influencia nos parâmetros de controle. A corrente no eletroímã superior será maior para compensar a força peso.

Considerando-se o entreferro entre o eletroímã e o rotor como  $x'$ , a folga estacionária de  $x_0$  e o desvio da posição estacionária do rotor de  $x$ . E o mesmo para a corrente, sendo  $i'$  a corrente aplicada,  $i_0$  a corrente de base e  $i_x$  a variação da corrente, tem-se a Equações 26, 27 e 28.

$$f(x, i) = -k_s x + k_i i_x \quad (26)$$

$$k_s = \frac{\mu_0 n^2 A i_0^2}{x_0^3} \quad (27)$$

$$k_i = \frac{\mu_0 n^2 A i_0}{x_0^2} \quad (28)$$

Os valores das constantes  $k_s$  e  $k_i$  são dependentes do ponto de operação  $i_0$  e  $x_0$ . Portanto, ao projetar um mancal deve-se analisar qual bobina, qual a corrente de base, qual a folga de ar, qual material será utilizado levando em conta o ponto de saturação.

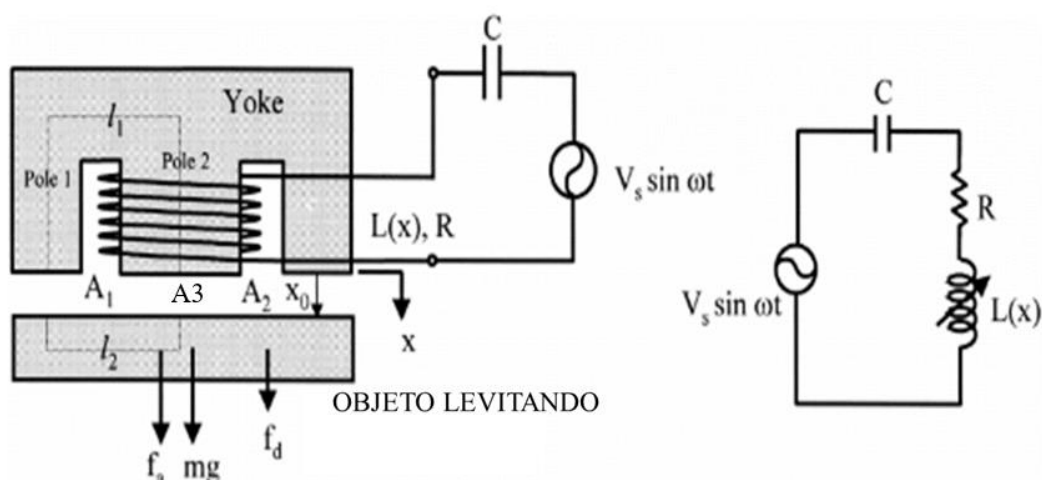
### 2.2.2 Rolamentos LCR sintonizados

Esse rolamento já foi utilizado em giroscópios e são capazes de atingir uma rigidez estável em um circuito LC. O circuito LC é composto pela indutância da bobina eletromagnética do rolamento e de um capacitor externo fixo. A indutância do eletroímã é alterada conforme o deslocamento mecânico do rotor. O circuito LC opera próximo à ressonância, resultando em um aumento da corrente da fonte de tensão CA que opera em uma frequência constante.

A força e a rigidez desse sistema eletromecânico são expressivas, comparado aos mancais convencionais. Esse rolamento não necessita de controle, portanto é chamado de passivo ou sistema auto estabilizado. A desvantagem é que não há amortecimento, sendo assim há uma tendência de o sistema ficar instável.

A Figura 10 mostra um sistema de levitação magnética usado para investigar a viabilidade de um sistema de levitação com detecção automática.

Figura 10 – Esquemático do circuito de levitação com LCR.



Fonte: Adaptado de Choi e Park (1999).

Os parâmetros  $l, l_1, A_1, A_2$  e  $A_3$  denotam o comprimento do núcleo magnético e o comprimento do objeto levitado através do qual passa o fluxo magnético e também a área do polo 1 e área do polo 2, respectivamente. Os parâmetros  $x, x_0, f_a, f_d$ , e  $mg$  indicam o deslocamento do objeto levitado, sua posição nominal, força magnética, força de perturbação e força de gravidade, respectivamente. Um capacitor  $C$  é incluído no circuito elétrico e uma entrada de tensão senoidal é fornecida com uma frequência  $\omega$  e amplitude  $V_s$ . O sistema de levitação magnética é modelado como um circuito LCR, com uma indutância variável  $L(x)$ .

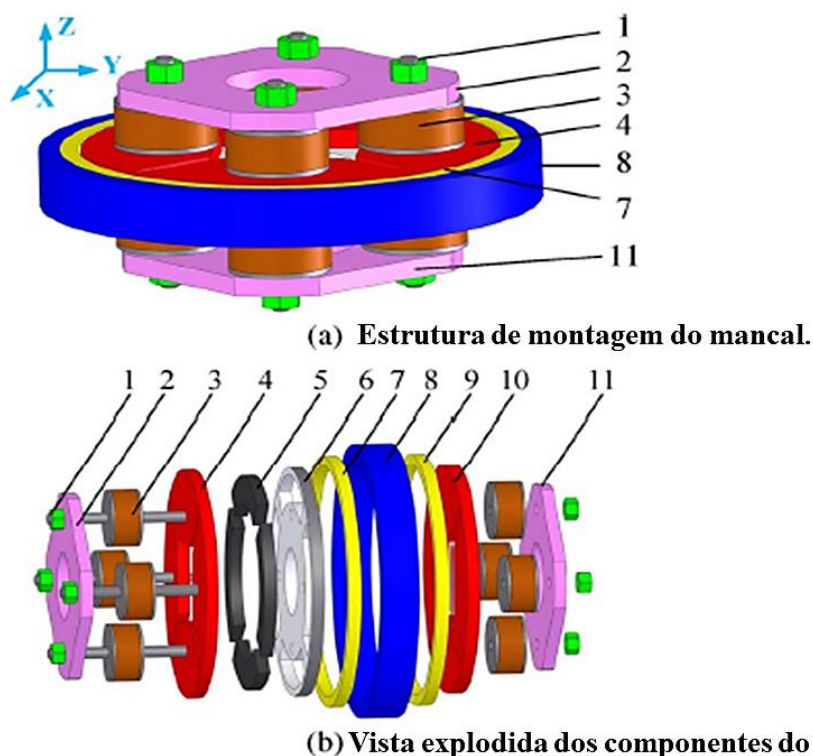
### 2.2.3 Mancal com ímãs permanentes

Este tipo de mancal também utiliza materiais ferromagnéticos, ou seja,  $\mu_r \gg 1$ , e são do tipo passivo. Conforme descrito no Teorema de Earnshaw, em uma configuração estacionário eles não capazes de fazer um corpo levitar em uma posição estável.

Embora essa topologia de mancal não atenda aos requisitos de estabilidade, ele pode ser utilizado em aplicações combinando rolamentos magnéticos ativos, levando aos chamados mancais híbridos.

Eryong e Kun (2011) desenvolveram um mancal magnético híbrido conforme a Figura 11. O rotor é composto de ferro e laminações, as laminações são feitas de aço silício e são montadas com o ferro do rotor com um ajuste para fornecer alta rigidez na direção radial e boa integridade mecânica.

Figura 11 – Configuração do mancal magnético híbrido proposto.



Fonte: (ERYONG; KUN, 2011).

Na Figura 11, os componentes enumerados correspondem a: 1- porcas e parafusos, 2- placa de conexão superior, 3- bobina de controle, 4- polo magnético superior, 5- ímãs permanentes, 6- placa de instalação para ímãs permanentes, 7- rotor de laminação superior, 8- rotor de ferro, 9- rotor de laminação inferior, 10- polo magnético inferior, 11- placa de conexão inferior.

O estator consiste em oito bobinas de controle, quatro ímãs permanentes, duas placas de conexão, placas de polo magnético superior e inferior e uma placa de instalação de ímãs.

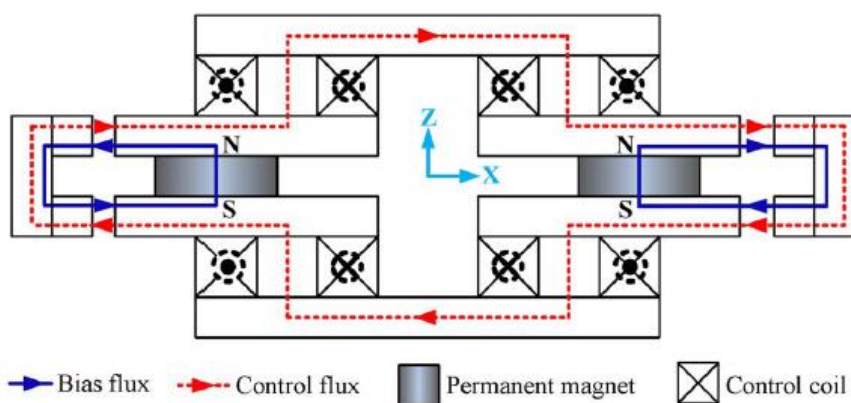
A Figura 12 mostra o princípio de funcionamento da topologia de mancal, as linhas sólidas com setas representam os caminhos de fluxo de polarização, e as



linhas pontilhadas o caminho do fluxo de controle na direção  $X$ . Os fluxos de polarização são gerados pelos ímãs permanentes e são independentes de um polo para outro.

Se o rotor estiver na posição central, não haverá corrente nas bobinas, e elas não produzirão fluxo. Os comprimentos do intervalo de ar e as densidades de fluxo de polarização dos polos opostos são iguais, o que faz com que as forças magnéticas nas direções se anulem e o rotor permaneça na posição central. Havendo uma perturbação em determinada direção, o comprimento do espaço de ar de uma direção se tornará menor, aumentando a densidade de fluxo de polarização e a força magnética.

Figura 12 – Caminhos de fluxo do mancal.



Fonte: (ERYONG; KUN, 2011).

#### 2.2.4 Mancal com material supercondutor

Os dispositivos desse tipo dependem exclusivamente da propriedade do material supercondutor que é  $\mu_r = 0$ , essa topologia pertence ao tipo passivo e a principal característica do material supercondutor é que em temperaturas baixas, a resistência elétrica torna-se nula, permitindo que uma corrente em uma bobina continue a fluir, mesmo que não haja mais tensão para acionamento.

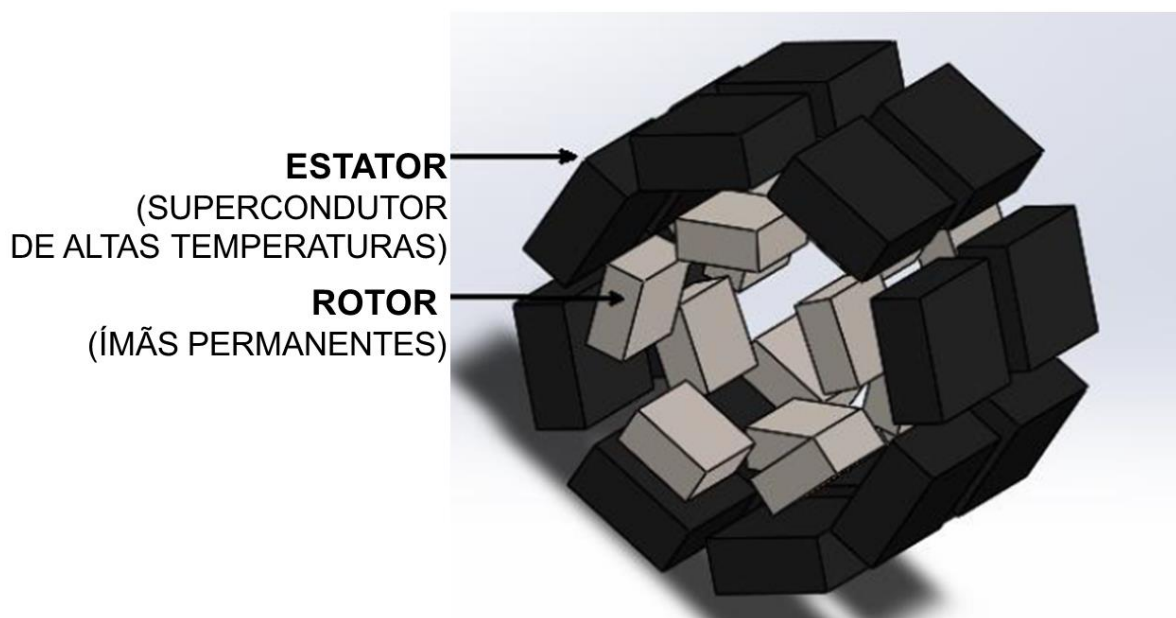
Em 1935, os pesquisadores Walther Meissner e Robert Ochsenfeld notaram que os supercondutores expulsavam campos magnéticos, e esse fenômeno ficou conhecido como o efeito Meissner.

Porém, os principais estudos ocorreram entre 1986 e 1987, quando começaram a ser descobertos supercondutores de alta temperatura (HTS) com temperaturas absolutas críticas acima de 30 K.

Em 1987, o grupo de Chu e o grupo de Kitazawa anunciaram e publicaram em conjunto a descoberta de ítrio-bário-cobre-óxido, ou seja,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (YBCO) com temperatura crítica de 92 K, como supercondutor do tipo II. A descoberta do YBCO foi uma conquista importante, pois o nitrogênio líquido poderia ser usado para resfriamento, em vez de hélio líquido, já que, por ser um gás nobre possui um valor superior ao do nitrogênio que é um gás mais fácil de se obter.

A Figura 13 mostra o protótipo de um mancal magnético desenvolvido por Da Costa Branco e Dente (2012) utilizando-se ímãs permanentes e supercondutores de alta temperatura, o primeiro constitui o rotor do mancal e o segundo o estator. O sistema é envolto por poliuretano pois este deve resistir à temperatura de 77K do nitrogênio líquido, ser impermeável e ter baixo coeficiente de condutividade térmica.

Figura 13 – Distribuição espacial de ímãs permanentes e supercondutores.



Fonte: Da Costa Branco; Dente (2012).

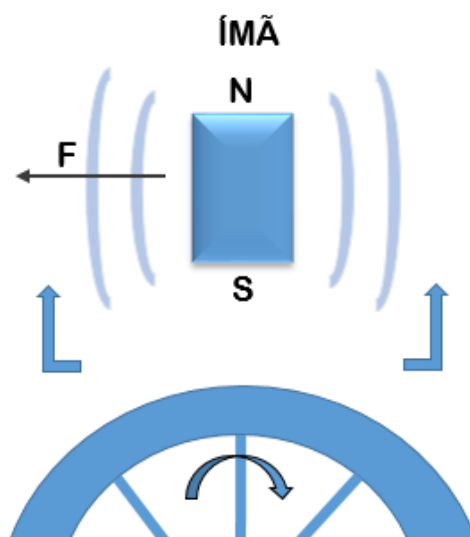
### 2.2.5 Mancal com levitação eletrodinâmica

Esta topologia envolve forças de Lorentz e não mais força de relutância como nas configurações citadas anteriormente. A interação entre rotor e estator ocorre com correntes induzidas e o campo magnético gerado por ímãs permanentes.

Essa levitação ocorre sem controle ativo quando altas correntes de Foucault são induzidas através de um movimento relativo suficientemente rápido entre o estator e o corpo em movimento.

A Figura 14 ilustra o princípio de funcionamento de um levitador eletrodinâmico, o material magnético realiza um movimento relativo a uma lâmina condutora e assim, correntes parasitas serão induzidas no condutor. Estas correntes, por sua vez, gerarão um outro campo magnético o qual, pela lei de Lenz, será oposto ao campo criado pelo material magnético. A interação entre ambos gerará uma pressão magnética e, por conseguinte, uma força repulsiva no material magnético. Esta força é a responsável pela levitação do corpo.

Figura 14 – Princípio de levitação eletrodinâmica.



Fonte: O Autor (2019).

## 2.3 SENSORES

De acordo com Webster (1999), a função de um sensor é realizar a conversão de uma grandeza física em padrões de sinais elétricos. Essas grandezas podem ser provenientes de várias origens, como por exemplo mecânica ou eletromagnética, então o sinal deverá ser transmitido a um sistema de processamento para que a extração da informação desejada ocorra.

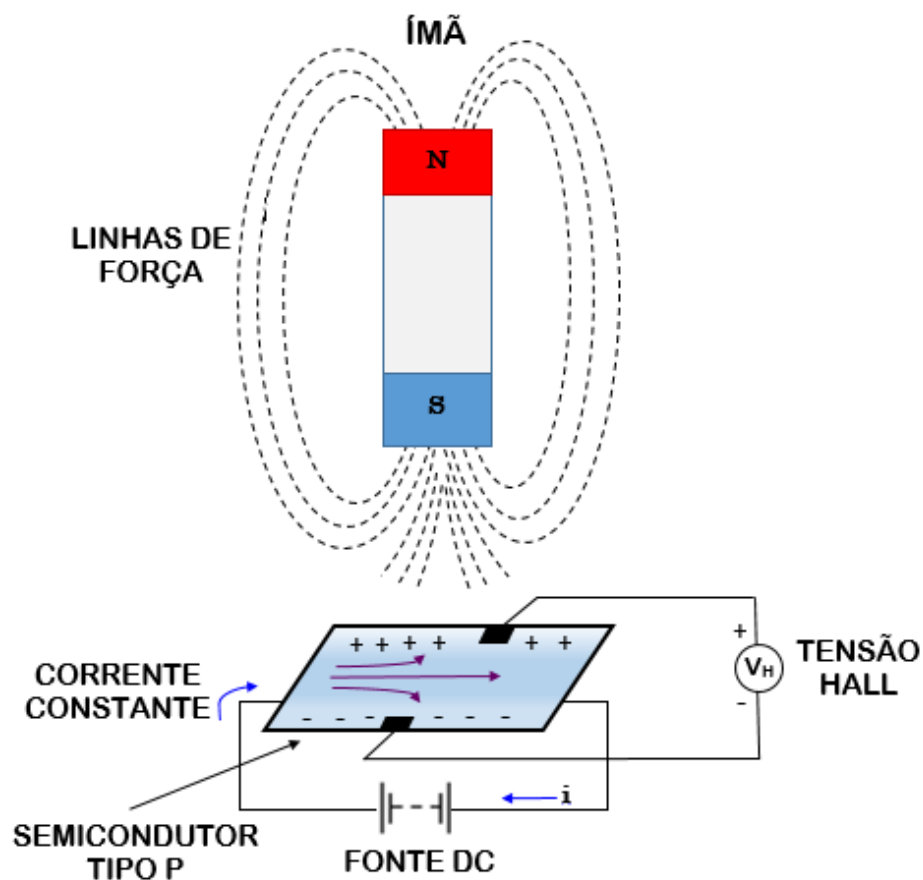
### 2.3.1 Sensor de Efeito Hall

Esse sensor tem o princípio de funcionamento baseado no efeito Hall, o efeito é uma propriedade manifestada em condutores quando um campo magnético perpendicular ao fluxo de corrente é aplicado, ocasionando em uma diferença de potencial, chamada de tensão de Hall. A tensão gerada é perpendicular à corrente e ao campo magnético, e também tem o aspecto de ser proporcional à densidade de fluxo e à corrente.

O sensor é constituído de uma placa de material semicondutor dopado no qual passa corrente elétrica em um sentido quando é aplicada uma tensão nos terminais dos mesmos. Quando o dispositivo entra em contato com um campo magnético, as linhas de fluxo desempenham uma força sobre material e faz com que os portadores de carga sejam desviados para as extremidades da placa conforme a Figura 15. O desvio é consequência da força de Lorentz de acordo com a Equação 19, em que a intensidade da força depende da velocidade de deslocamento da carga bem como da intensidade do campo magnético.

A diferença de potencial gerada pelo acúmulo de cargas pode ser aplicada a um circuito externo para efeitos de sensoriamento pois a tensão criada é proporcional à intensidade do campo magnético.

Figura 15 – Funcionamento Efeito Hall.



Fonte: O Autor (2019).

### 2.3.2 Sensor ótico

De acordo com Balbinot e Brusamarello (2011), um sistema de medição baseado em radiação eletromagnética normalmente utiliza a alteração de uma das seguintes propriedades:

- intensidade: a vantagem de utilização é devido à resposta direta que os detectores óticos como fotodiodos e fototransistores respondem às variações de intensidade;
- fase: ao movimentar um sensor, esta ação pode variar o comprimento do caminho ótico e conseqüentemente a fase do mesmo. Fotodetectores não respondem diretamente à variação de fase, portanto é necessário convertê-la em uma variação de intensidade;

- c) posição espacial: o princípio de medição é baseado na reflexão da luz que a incidir sobre uma superfície refletora forma um ângulo, e quando há deslocamento dessa superfície o ângulo passa a ser diferente. Possui a vantagem de ser imune às variações de intensidade das fontes e são ideais para monitoramento de distâncias pequenas e superfícies susceptíveis à deformação;
- d) frequência: um feixe óptico de frequência  $f_1$  que incide sobre um corpo se movimentando com uma velocidade  $v$  produz uma radiação refletida pelo corpo em movimento de frequência  $f_2$ .
- e) polarização: quando uma luz não polarizada incide na superfície de material transparente, os feixes refratados e refletidos não são integralmente polarizados de forma linear. A lei de Brewster mostra que no ângulo de polarização, o raio refletido gera um ângulo com o raio refratado.

Para Balbinot e Brusamarello (2011), os detectores de luz podem ser classificados em: fotocondutores, fotorresistores, fotodiodos e fototransistores.

- a) Fotocondutores aumentam a condutividade quando são expostos à luz, este efeito é evidenciado pela maioria dos semicondutores. Quando o dispositivo absorve um fóton, um elétron livre da banda de valência é direcionado para a banda de condução, ocasionando uma lacuna na banda de valência. Ao conectar uma fonte externa de tensão, ocorre o movimento de elétrons e lacunas, sucedendo uma corrente elétrica que pode ser detectável. Materiais compostos de CdS e CdSe são aplicados em sensores de radiação visível, já PbS, InSb e HgCdTe são usados para detecção de infravermelho;
- b) Fotorresistores são resistores variáveis controlados pela luz. Possuem resistência elevada no escuro (M $\Omega$ ) e quando aumenta a intensidade luminosa a resistência diminui significativamente ( $\Omega$ ). São feitos de cristal semiconductor CdS, pois o composto tem boa resposta à radiação eletromagnética de comprimento de onda de 400nm a 800nm. Quando este sensor é iluminado, a incidência de fótons ocasiona colisão com elétrons formando lacunas. A medida que esses elétrons são liberados ocorre um fluxo de corrente que reduz a resistência.

- c) Fotodiodos de junção  $pn$  , fótons absorvidos geram lacunas, a energia do fóton ( $E_f$ ) deve ser maior ou igual à energia da banda proibida ( $E_h$ ). Ele apresenta um limite na resposta, pois o comprimento de onda da luz incidente deve ser menor do que um certo valor que determinado pela  $E_h$  do semiconductor, esse comprimento de onda recebe o nome de comprimento de onda máximo ou de corte.
- d) Fototransistores realizam a mesma operação que fotodiodos, porém, adicionando ganho de corrente, e, por consequência esse tipo de sensor apresenta maior sensibilidade.

## 2.4 CIRCUITO DE ACIONAMENTO

O circuito de acionamento é a parte do sistema do mancal designada a gerar e controlar a corrente que passa pelo eletroímã, com o objetivo de manter o rotor em equilíbrio.

Conforme Rashid (1999), transistores são utilizados como componentes de chaveamento e podem ser classificados em quatro categorias:

- a) transistores bipolares de junção ( *bipolar junction transistors* – BJTs);
- b) transistores de efeito de campo de óxido metálico semiconductor ( *metal-oxide-semiconductor fiel-effect transistors* – MOSFETs);
- c) transistores de indução estática ( *static induction transistors* – SITs);
- d) transistores bipolares de porta isolada ( *insulated-gate bipolar transistor* – IGBTs).

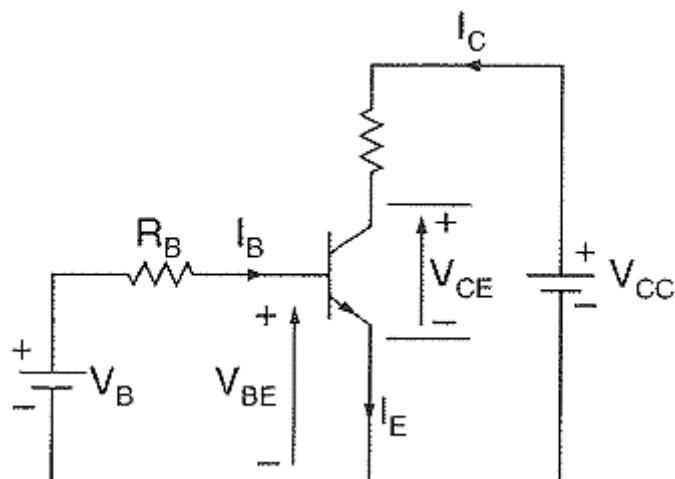
O transistor bipolar de junção (BJT) é controlado por corrente e demanda corrente e base para que passe corrente no coletor, como a corrente do coletor depende da corrente de base, o ganho de corrente depende da temperatura da junção.

Um MOSFET é controlado por tensão e necessita apenas de uma pequena corrente de entrada, a velocidade de chaveamento, compara ao BJT, é mais alta e os tempos de chaveamento são na ordem de nanossegundos.

Neste trabalho será utilizado o transistor BJT, pois será feito o controle por corrente.

Existem três configurações possíveis para o transistor bipolar tipo BJT: coletor comum, base comum e emissor comum. A configuração mais regular é a mostrada na Figura 16, que é, geralmente utilizada para chaveamento.

Figura 16 – Diagrama do circuito com transistor.



Fonte: Rashid (1999).

De acordo com Rashid (1999), há três regiões que um transistor pode operar, a de corte, ativa e de saturação. A Tabela 1 mostra o comportamento do componente em cada modo de operação.

Tabela 1 – Comportamento do transistor BJT.

Região de operação do transistor	Comportamento
De Corte	Transistor desligado ou a corrente de base não é suficiente para ligá-lo.
Ativa	Age como amplificador, a corrente do coletor é amplificada por um ganho, e a tensão coletor-emissor diminui com a corrente de base.
Saturação	A corrente de base é elevada para que tensão entre coletor e emissor seja baixa e o transistor se comporta com uma chave.

Fonte: Adaptado de Rashid (1999).



Para controlar a corrente no eletroímã (carga indutiva), utiliza-se o transistor operando na saturação, abrindo e fechando para a passagem de corrente como uma chave. Como a corrente aumenta e diminui, e leva um tempo para que ocorra essa transição, aplica-se um sinal por largura de pulso (PWM) para controlar o valor médio da tensão.

## 2.5 SISTEMA DE CONTROLE

Segundo Ogata (2010), sinal de controle ou variável manipulada é a grandeza ou condição modificada pelo controlador, de modo que afete o valor da variável controlada. Geralmente, a variável controlada é a saída do sistema. O significado de controlar é medir o valor da variável a ser controlada pelo sistema e aplicar o sinal de controle ao sistema para corrigir ou limitar os desvios do valor medido a partir de um valor desejado.

Um controlador automático compara o valor real de saída da planta (parte física que pode ser controlada) com a entrada de referência (valor desejado), determina o desvio e produz um sinal de controle que reduzirá o desvio a zero ou a um valor pequeno. A maneira pela qual o controlador automático produz o sinal de controle é chamada ação de controle (OGATA, 2010).

Um dos métodos de controle é o controle PID, o qual unifica três ações de controle: proporcional, integral e derivativa. Esse controle consiste em um algoritmo matemático, que tem por função controlar precisamente uma variável em um sistema, possibilitando o sistema operar de forma estável no ponto de ajuste desejado, mesmo que ocorram variações ou perturbações que afetariam a própria estabilidade.

A equação do controlador com as três ações combinadas é descrita pela função de transferência conforme a Equação 29:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (29)$$

E o domínio do tempo a equação passa a ser descrita de acordo com a Equação 30:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (30)$$

Sendo  $u(t)$  sinal de saída do controlador,  $K_p$  o ganho proporcional,  $T_i$  tempo integrativo,  $T_d$  tempo derivativo e  $e(t)$  sinal de erro atenuante.

De acordo com Dorf e Bishop (2013), para o sistema ser estável, os polos do sistema em malha fechada devem estar no semiplano esquerdo do plano  $s$ . Assim, uma condição necessária e suficiente para um sistema com realimentação ser estável é que todos os pólos da função de transferência do sistema tenham parte real negativa.

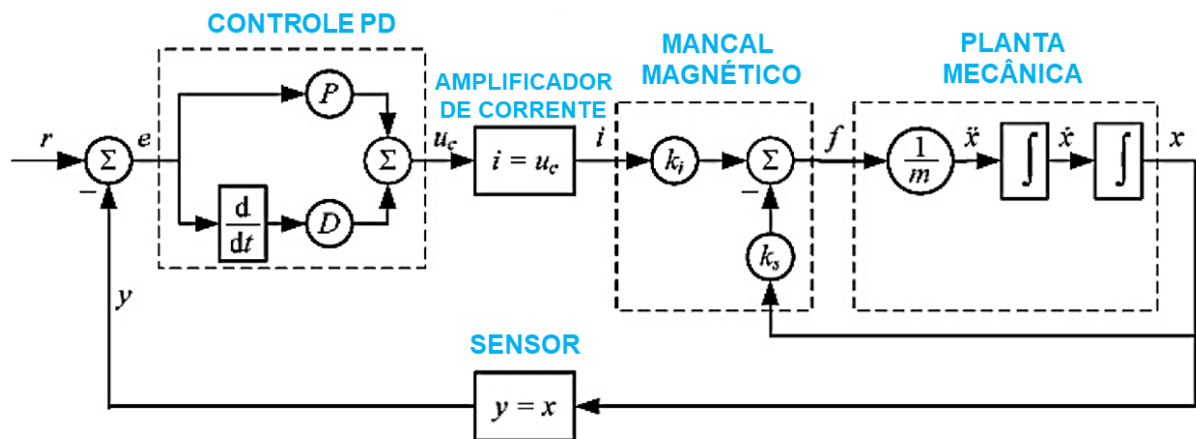
Segundo Gerhard e Schweitzer, os parâmetros P e D da lei de controle são determinados pela escolha de valores apropriados para rigidez  $k$  e amortecimento  $d$  do sistema em circuito fechado. Junto com a força máxima (capacidade de carga) de um rolamento magnético, a rigidez do rolamento é um dos parâmetros mais importantes do rolamento e já deve ser definido nos estágios iniciais de um projeto de rolamento magnético.

No caso de valores de rigidez muito baixos  $k$ , o ganho proporcional  $K_p$ , apenas compensa a rigidez negativa do rolamento  $k_s$  e apenas estabiliza o sistema. Isso é refletido pela localização dos autovalores em malha fechada muito próximos de zero.

Quanto maior a rigidez, maior o coeficiente de amortecimento deve ser escolhido para obter resultados satisfatórios. No entanto, altos ganhos de feedback de amortecimento levarão a um alto nível de ruído, uma vez que o sinal de velocidade geralmente contém mais ruído do que o sinal de deslocamento correspondente.

O diagrama de blocos do sistema controlado pode visto conforme a Figura 17.

Figura 17- Diagrama de blocos do sistema de controle.



Fonte: Schweitzer (2009).

### 2.5.1 Discretização de controladores

Um sistema é considerado discreto quando as variáveis de estado variam apenas em instantes específicos de tempo. Quando se utiliza controle digital, empregando por exemplo um computador como controlador, deve-se então transformar o sistema contínuo em um discreto equivalente.

Sistemas de controle em tempo discreto envolvem a discretização do controlador. É necessário transformar o controlador PID de operação em tempo contínuo para operação em tempo discreto. Um sistema de controle em tempo discreto utiliza um microprocessador em conjunto com uma placa de aquisição de dados para a implementação do controlador.

Aplicando a transformada  $z$  a Equação 31 obtém-se:

$$G_c(z) = K_p + K_i \frac{T_s}{2} \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}} + K_d \frac{2}{T_s} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (31)$$

Onde  $T_s$  é o período de amostragem.

## 2.5.2 Métodos de discretização de controladores

A seguir serão listados alguns métodos de discretização de controladores. Estes métodos são utilizados para se obter os equivalentes discretos dos controladores contínuos. (MONZANI, 2010).

### 2.5.2.1 Método de Euler

O método de Euler é obtido aproximando-se o mapeamento entre os planos  $s$  e  $z$  por expansão de uma série truncada, portanto:

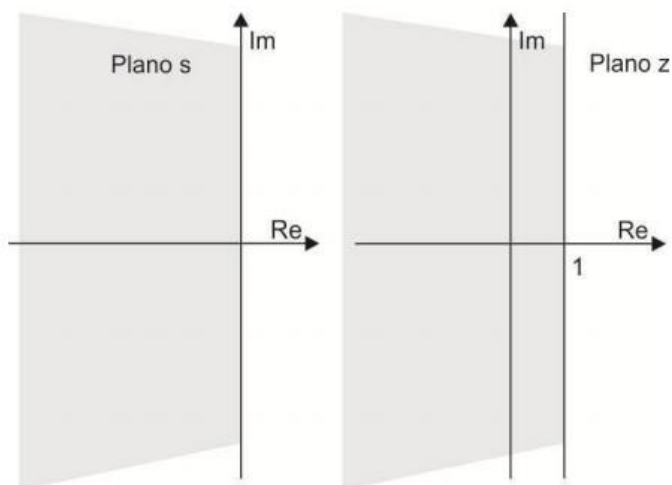
$$z = e^{sT} \approx 1 + sT \quad (32)$$

E obtém-se a Equação 33:

$$s = \frac{z - 1}{T} \quad (33)$$

É possível analisar que ao transformar o sistema analógico em digital a partir do método de Euler ocorre apenas o deslocamento do eixo imaginário conforme a Figura 18:

Figura 18 – Mapeamento do plano s e do plano z pelo método de Euler



Fonte: Adaptado Soares (1996).

Comparando com o método de discretização direta, é possível analisar que o método de Euler é pouco preciso, e que embora haja uma simplicidade de transformação, faz com que o mesmo seja pouco utilizado.

### 2.5.2.2 Método diferencial

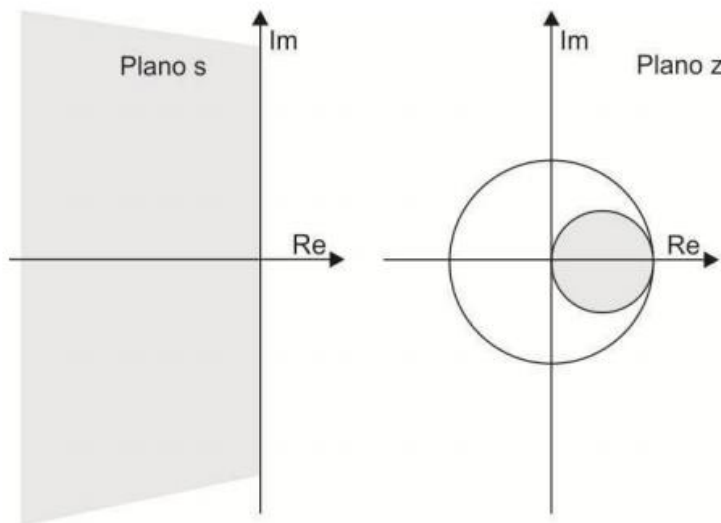
O método diferencial é similar ao método de Euler, o método é definido tomando como base a derivada da equação de diferença, como representada na Equação 34:

$$\frac{dx(t)}{dx} \approx \frac{x(t) - x(t-h)}{T} = \frac{1 - z^{-1}}{T} x(t) = \frac{z-1}{zT} x(t)^2 \quad (34)$$

Obtém-se a Equação 35:

$$s = \frac{z-1}{zT} \quad (35)$$

Figura 19 – Mapeamento do plano  $s$  e do plano  $z$  pelo método diferencial



Fonte: Adaptado Soares (1996).

Analisando o mapeamento dos pontos no plano  $s$  com os do plano  $z$ , tem-se que é formada uma circunferência no eixo dos reais positivos. Contudo, não é possível concluir se o sistema será estável, embora fique evidente que este método apresenta uma vantagem em relação ao método de Euler quando relacionado à estabilidade, pois o método diferencial limita a região de dominância dos polos, porém não se pode concluir sobre o desempenho de ambos.

### 2.5.2.3 Método de Tustin

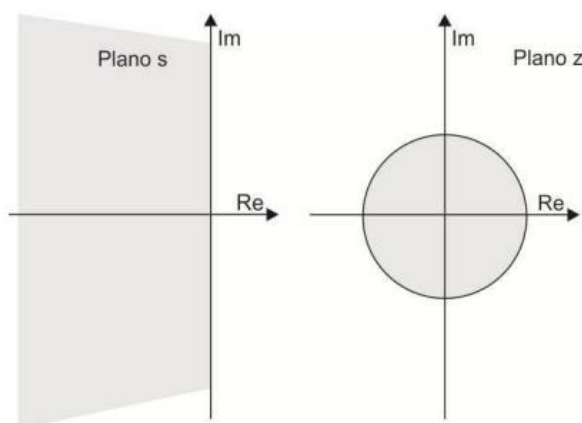
O método de Tustin ou dos trapézios é um dos mais utilizados no controle digital. Este método baseia-se na integral representada pelo fator  $\frac{1}{s}$ . O método mostra-se eficiente, pois tem a propriedade de transformar uma função de transferência contínua estável, em uma função de transferência discreta estável.

O método enuncia que o plano  $z$  pode obter valores do plano  $s$  fazendo a seguinte permuta obtém-se a Equação 36:

$$s = \frac{2z - 1}{Tz + 1} \quad (36)$$

A Figura 20 permite evidenciar tal estabilidade, analisando o mapeamento entre o plano  $s$ , em que a estabilidade é quando os polos estão localizados no semi-plano negativo e para o plano  $z$ , a mesma se dá quando os polos estão localizados no círculo de raio unitário.

Figura 20 – Mapeamento entre o plano  $s$  e o plano  $z$  pelo método de Tustin.



Fonte: Adaptado Soares (1996).

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

Tendo em vista o avanço das tecnologias em mancais magnéticos em equipamentos modernos, é possível observar diferentes técnicas e topologias de mancais. Neste capítulo serão apresentados diferentes trabalhos relacionados a mancais magnéticos sendo apresentados de forma resumida pela Tabela 1.

Tabela 1 – Trabalhos abordados e topologias utilizadas.

Autor	Trabalho	Topologia de mancal utilizada
(YAMAMOTO, 2017)	Mancal magnético híbrido do tipo repulsão com controle uniaxial com amortecimento fornecido por mancal eletrodinâmico	Híbrido
(SIKORA; PILAT, 2019)	Modelo numérico de um mancal magnético axial com seis polos cilíndricos	Ativo
		Fluxo axial
(XU; FANG, 2014)	Rolamento magnético ativo cônico com estrutura de garras	Ativo
		Garras entre rotor e estator

Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2020).

Yamamoto (2017), em seu trabalho propôs um mancal magnético híbrido que conjugue três diferentes estratégias de levitação: a levitação com ímãs permanentes, a levitação ativa eletromagnética e a levitação passiva eletrodinâmica.

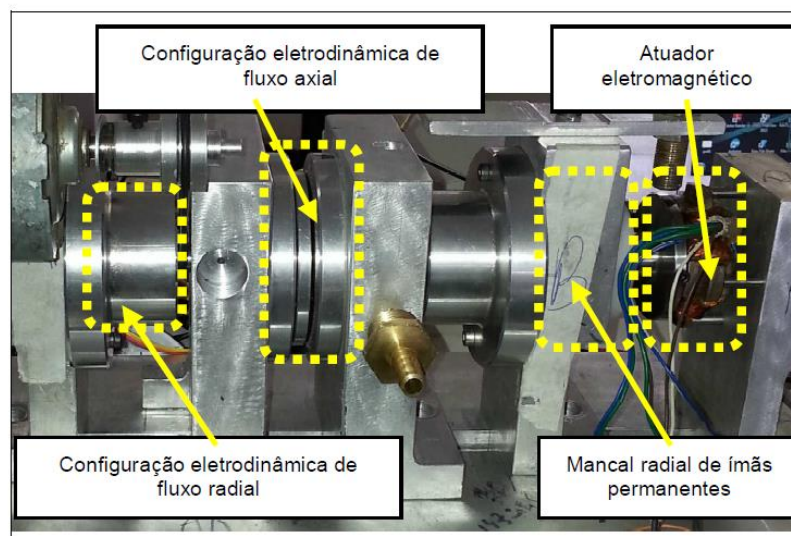
Cada uma das topologias de levitação utilizadas no mancal híbrido apresenta características próprias como distância entre os mancais radiais de ímãs permanentes para aumentar a rigidez à inclinação, ou o disco condutor utilizado na configuração eletrodinâmica de fluxo axial, que é necessário ser colocado no centro axial do rotor, para obter um carregamento igual sobre os rolamentos radiais dos ímãs permanentes.

Os atuadores estão dispostos nas extremidades, seguidos dos mancais radiais de ímãs permanentes e na região central do rotor estão localizadas as duas configurações eletrodinâmicas responsáveis por fornecer amortecimento em diferentes faixas de rotação.



Na Figura 21 é possível observar que ao lado do mancal radial de ímãs permanentes, se encontram os mancais eletrodinâmicos homopolares de fluxo radial e no centro do rotor, o mancal eletrodinâmico homopolar de fluxo axial. Foi necessário determinar as distâncias entre os mancais para evitar a influência de um mancal em outro.

Figura 21 – Mancal magnético híbrido proposto.

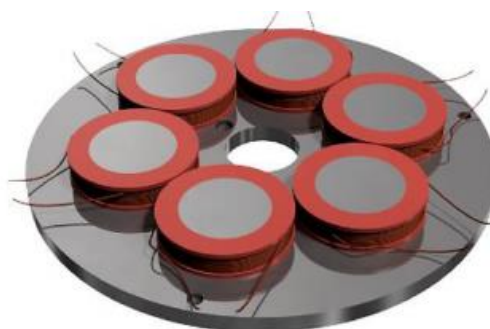


Fonte: (YAMAMOTO, 2017).

Sikora e Pilat (2019), desenvolveram um mancal magnético ativo axial projetado para impedir o movimento do eixo na direção axial. Em princípio, possui um recurso para controlar a inclinação do disco e estabilizar-se sobre a base.

O atuador, feito de aço de baixo carbono com a espessura de 4 mm, consiste em seis polos em forma de pinos, cada um com uma altura de 6 mm, colocados circunferencialmente a cada 60° com bobinas circulares, conforme a Figura 22.

Figura 22 – Modelo axial com seis polos.

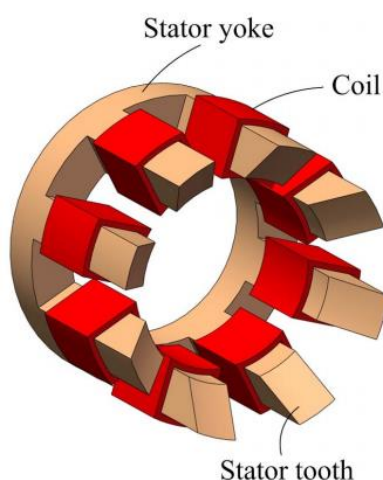


Fonte: (SIKORA; PILAT, 2019).

O eletroímã é criado por seis bobinas, cujos enrolamentos são colocados em torno de seis polos. As bobinas podem ser conectadas em paralelo ou em série. Além disso, eles podem ser divididos em grupos, para introduzir componentes adicionais da força axial em caso de movimento de inclinação do disco.

Xu e Fang (2014), propuseram um mancal com estrutura cônica. O rolamento magnético proposto é adequado para uso em casos em que o espaço radial é limitado. Como mostrado na Figura 23, o mancal magnético ativo cônico consiste em dois componentes do estator e um componente do rotor, e o rotor é suspenso no ar por dois estatores cônicos de garra.

Figura 23 – Estrutura do estator no mancal cônico.



Fonte: (XU; FANG, 2014)

Cada dente do estator é enrolado com uma bobina. Todos os oito dentes do estator têm superfície cônica nas extremidades. O núcleo do estator é fabricado com material ferromagnético. Os núcleos de ferro cônico são formados pela laminação da chapa de aço silício DW310-35 com 0,35 mm de espessura para reduzir sua perda por corrente de Foucault.

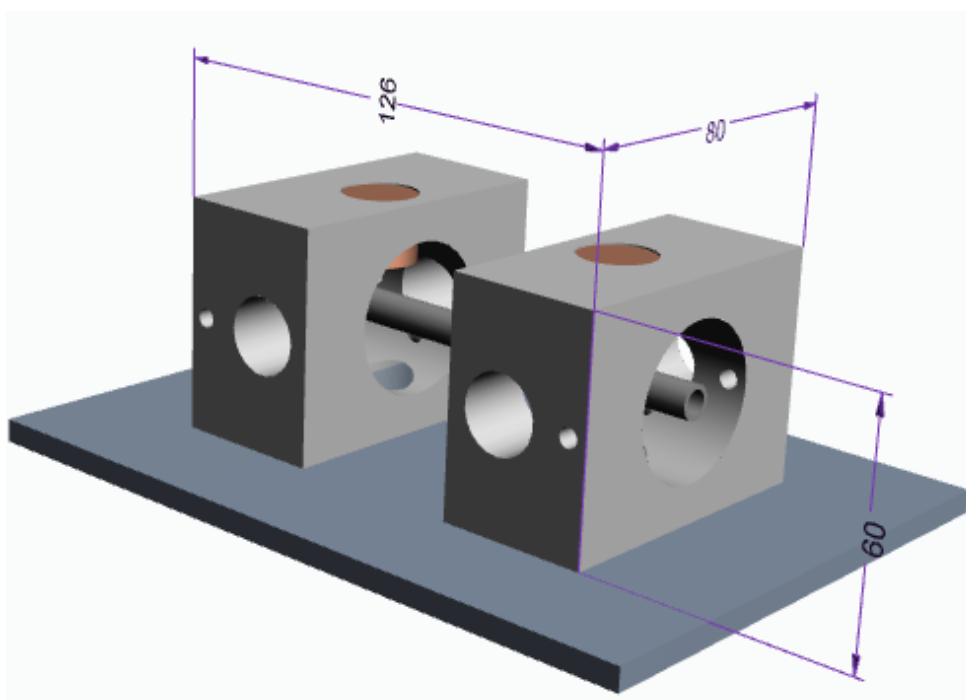
## 4 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A primeira fase de construção do protótipo foi a estrutura mecânica, pois é a partir dela que os componentes serão encaixados. Posteriormente, foram determinados os sensores utilizados e o circuito de acionamento, designado para fornecer energia ao mancal. Por fim, tem-se a parte de processamento de dados, o modo como foi feito a aquisição do sinal dos sensores e o projeto do controlador.

### 4.1 MANCAL E ROTOR

A topologia de mancal desenvolvida, conforme proposta do trabalho, está esquematizada conforme a Figura 24 dada em mm. A estrutura é formada pelo estator, peça que envolve o rotor e serve de corpo para os eletroímãs. Ela é composta por um eletroímã na parte superior da estrutura e dois ímãs permanentes dispostos  $120^\circ$  da posição da bobina. As cotas e vistas da montagem estão no Apêndice A.

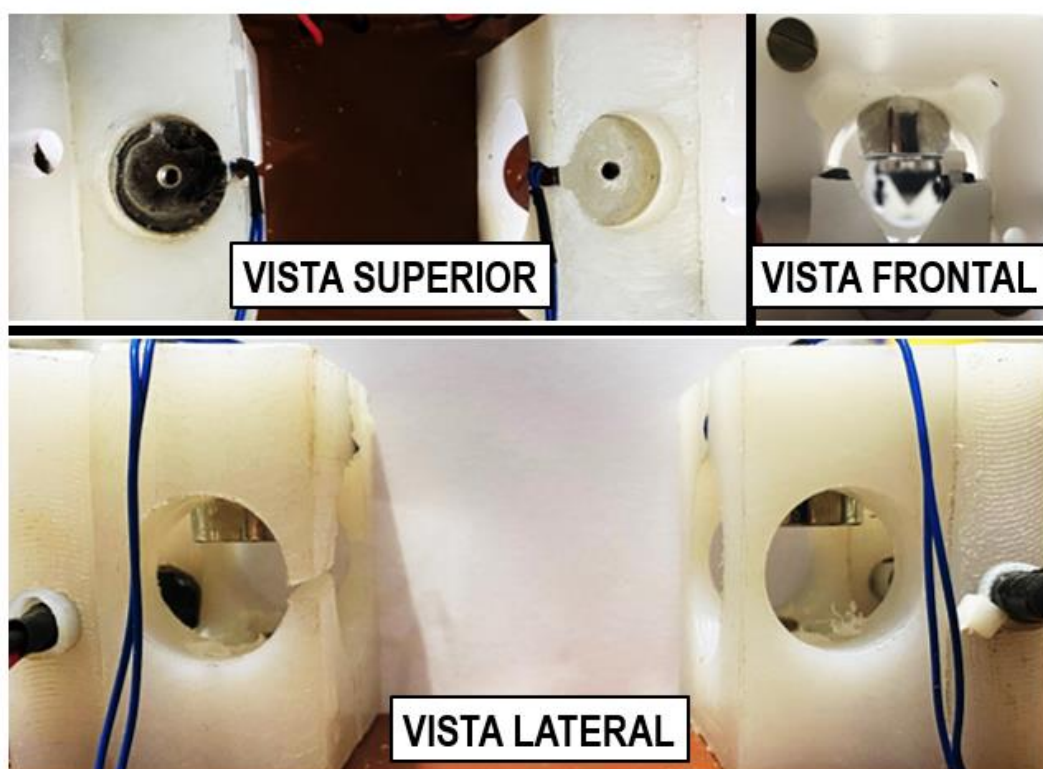
Figura 24 – Topologia do mancal magnético.



Fonte: O Autor (2020).

A Figura 25 mostra a estrutura do modelo desenvolvido, o suporte de apoio do eixo do rotor, também chamado mancal, foi usinado em uma peça, cuja composição é *nylon*. Na figura 25, é possível observar as vistas superior, frontal e lateral com duas peças usinadas, que servirão de sustentação para cada ponta extrema do eixo.

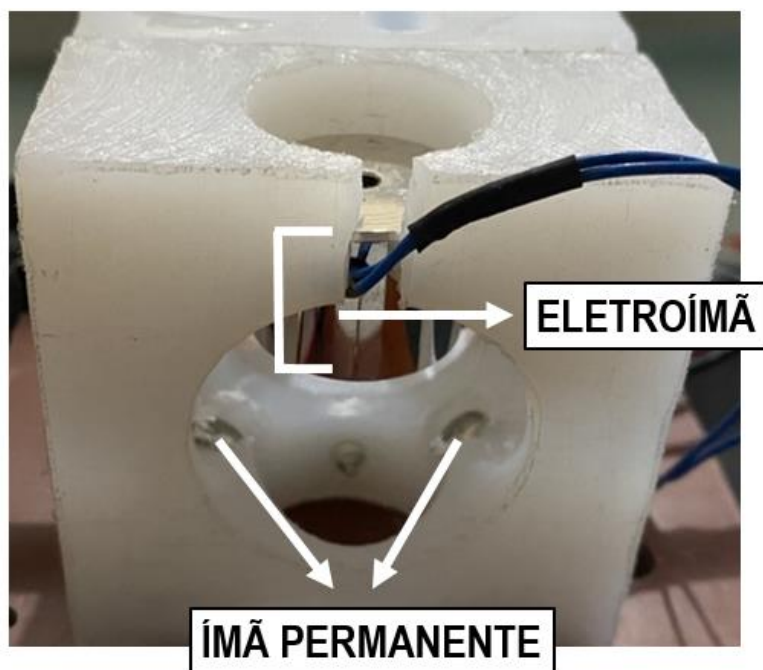
Figura 25 - Vistas do protótipo desenvolvido.



Fonte: O Autor (2020).

A Figura 26, mostra como foram posicionados os ímãs permanentes e o eletroímã no mancal usinado.

Figura 26 – Posição dos componentes.

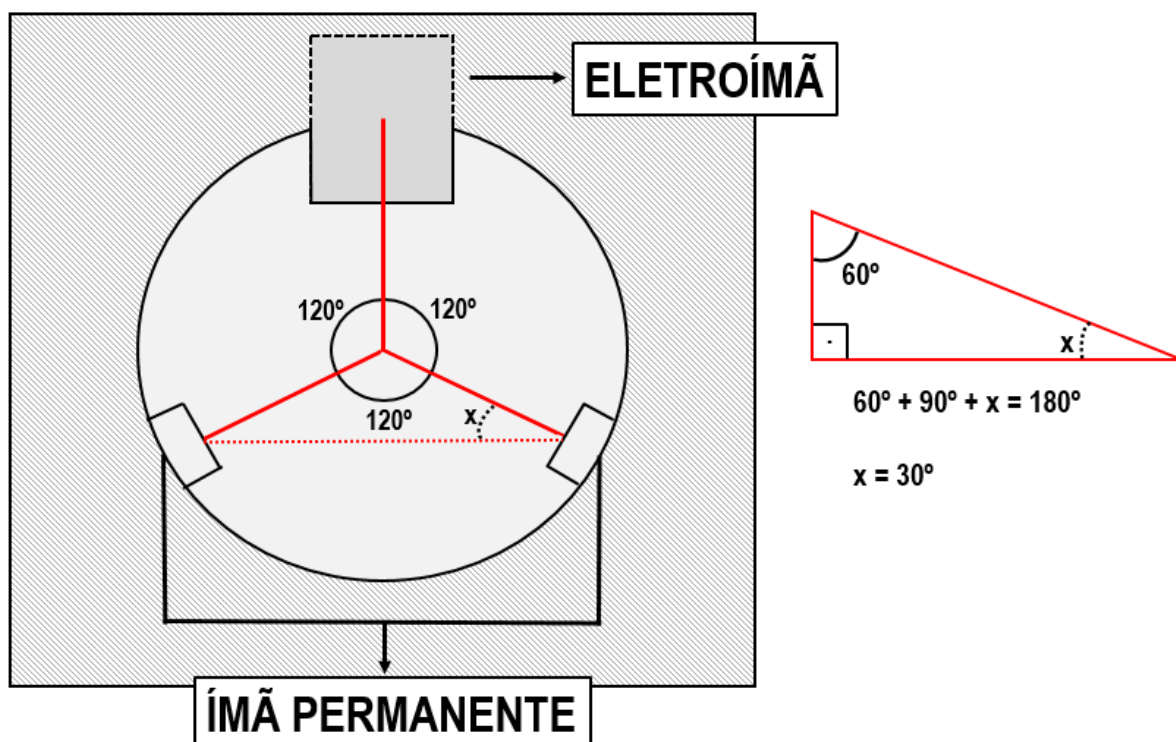


Fonte: O Autor (2020).

A Figura 27, mostra o desenho em vista frontal com a o eletroímã posicionado na parte superior da peça, e os ímãs permanentes posicionados  $120^\circ$  defasados da referência (eletroímã central na parte superior). Deseja-se que os ímãs permanentes estejam posicionados com a face para o eixo do rotor, portanto, utiliza-se a relação trigonométrica de que a soma dos ângulos internos de qualquer triângulo é igual a  $180^\circ$ .

A Figura 27 também mostra como se chegou ao ângulo de inclinação dos ímãs com o plano horizontal, dividiu-se o triângulo que possui dois pontos localizados nos ímãs permanentes e um na posição central do eixo, em dois triângulos retângulos. Dessa forma, para que os ímãs fiquem com a face para o eixo do rotor, eles devem estar posicionados 30 graus do plano horizontal.

Figura 27 – Vista frontal com ângulos.

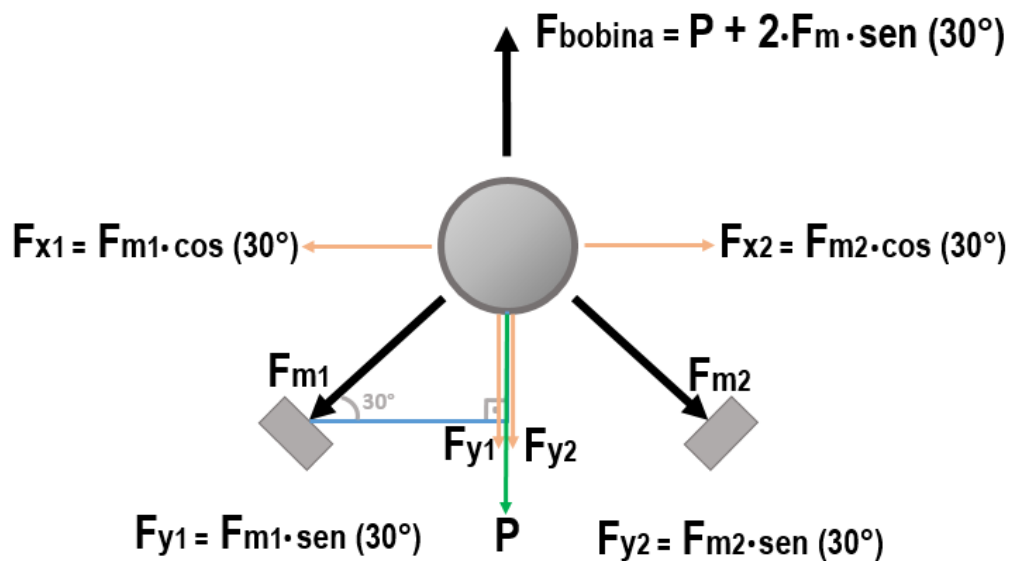


Fonte: O Autor (2020).

Para o adequado posicionamento do eletroímã e do ângulo de inclinação dos ímãs, utilizou-se instrumentos de medição como paquímetro e transferidor.

Para fundamentar o protótipo do tipo híbrido e a escolha do posicionamento dos ímãs permanentes, a Figura 28 mostra a distribuição de forças que são aplicadas ao eixo. O controle é unidirecional, ou seja, atua somente do eixo y, para que se tenha alguma força, mesmo que mínima, no eixo x, utilizou-se os ímãs na posição já descrita. Embora essa posição dos ímãs faz com que se tenha uma força adicional no eixo y ( $F_{y1}$  e  $F_{y2}$ ), que não haveria caso utilizasse somente a força do eletroímã, a bobina tem um esforço maior, porém conta com uma força passiva no eixo horizontal com o objetivo de centralizar o eixo.

Figura 28 – Distribuição de forças.



Fonte: O Autor (2020).

A Figura 29 mostra o eixo que será utilizado, ele é feito de aço, liga metálica composta por aproximadamente 98,5% de Ferro, possui 146 mm de comprimento, 9 mm de diâmetro externo, 6,5 mm de diâmetro interno e uma massa de 36g.

Figura 29 – Vista superior e frontal do rotor de aço.



Fonte: O Autor (2020).

Para o controle ativo, utilizou-se dois eletroímãs, iguais ao mostrada na Figura 30.



Figura 30 – Eletroímãs utilizados no projeto.



Fonte: O Autor (2020).

A Tabela 2 mostra as especificações dos eletroímãs, sendo que a tensão e a corrente são as particularidades mais importantes para o dimensionamento do projeto para a escolha dos componentes de acionamento.

Tabela 2 – Informações do eletroímã.

<b>Especificações</b>	
Tensão de entrada	12 V <sub>DC</sub>
Corrente	0,25 A
Capacidade	2,5 kg
Diâmetro	20 cm
Massa	25g

Fonte: O Autor (2020)

Um resumo dos parâmetros físicos do sistema é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros físicos do protótipo.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Massa do conjunto rotor/estator	1,250 kg
Distância entre mancais	126 mm
Distância entre centros bobinas	76 mm
Folga bobina/mancal	19 mm

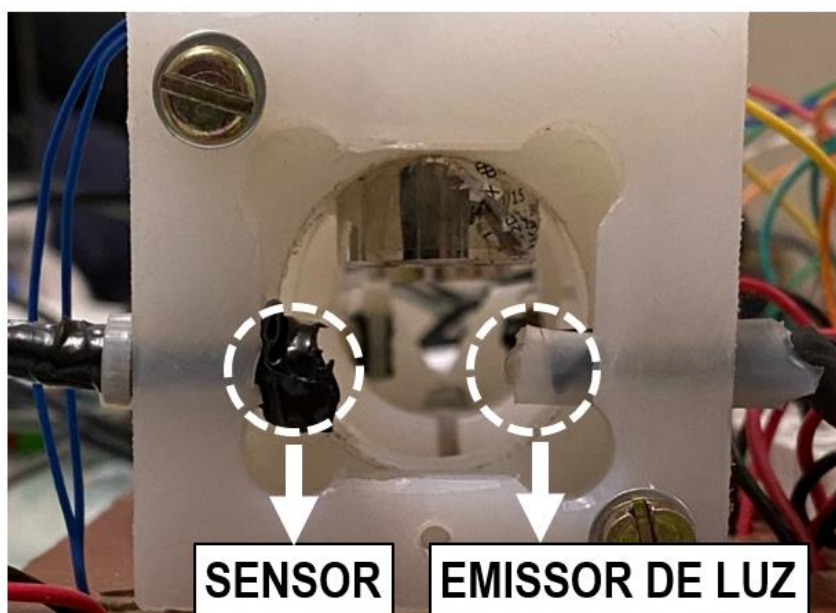
Fonte: O Autor (2020).

## 4.2 SENSORES

Nesta etapa do projeto, definiu-se os sensores a serem utilizados e a posição dos mesmos. Os sensores devem estar posicionados junto a estrutura do mancal para aferir os dados do deslocamento do rotor e enviar o sinal para o circuito de controle.

O sensor escolhido foi do tipo óptico LDR (Light Dependent Resistor) e o emissor de luz é um LED de alto brilho, a Figura 31 mostra a posição dos componentes no protótipo, o sensor e o emissor de luz estão posicionados paralelamente e no centro do estator, pois é no centro que se deseja obter o eixo levitando, portanto é nessa posição que o sensor fará a leitura.

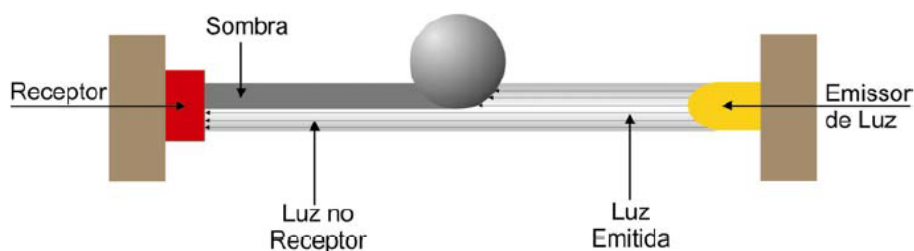
Figura 31 – Posicionamento do sensor e emissor de luz.



Fonte: O Autor (2020).

O princípio de funcionamento para aferir a posição do rotor está esquematizado conforme a Figura 32. Ao interromper o feixe de luz emitido pela fonte de luz, o eixo produzirá uma sombra no receptor, que é o sensor LDR.

Figura 32 – Funcionamento da medição da posição.

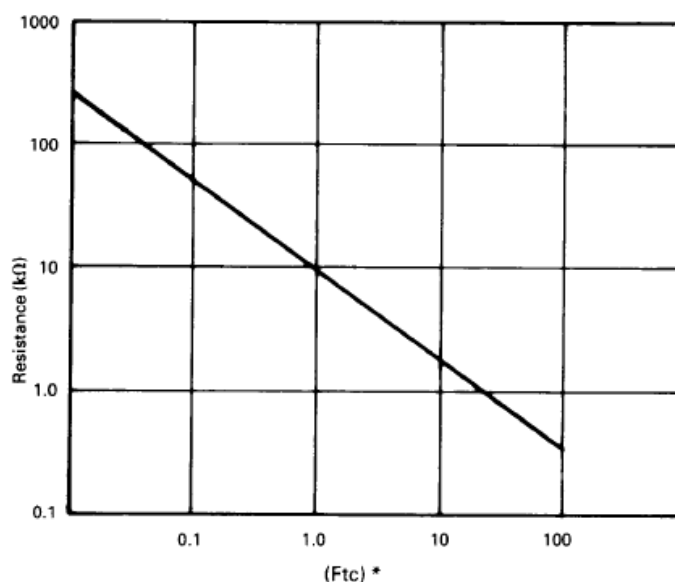


Fonte: De Lemos (2004).

Quando incide luz no sensor, a resistência fica baixa, quando fica escuro a resistência tende ao máximo, dessa forma quando eixo está na posição desejada, o sensor registra um valor de resistência e esse valor analógico é lido pelo microcontrolador.

A Figura 33 mostra a resistência em função do fluxo luminoso (lúmens) do sensor utilizado, em que 1 Ftc é igual a 10.764 lumens. É importante notar que a função é uma reta, indicando que não é necessário realizar linearização do sensor.

Figura 33- Resistência em função do fluxo luminoso.

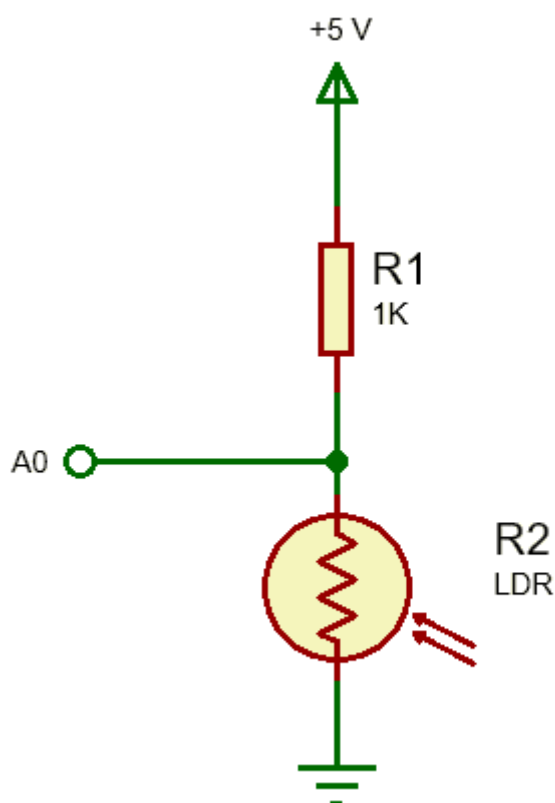


Fonte: LDR Datasheet.

Para extrair o valor lido do sensor pelo microcontrolador, foi utilizado um divisor de tensão para medir a variação da queda de tensão em cima do mesmo, já que a

tensão total e as resistências são fixas. Portanto, o divisor de tensão irá variar com a resistência entre A0 (pino analógico) e GND (pino *ground*), conforme a Figura 34.

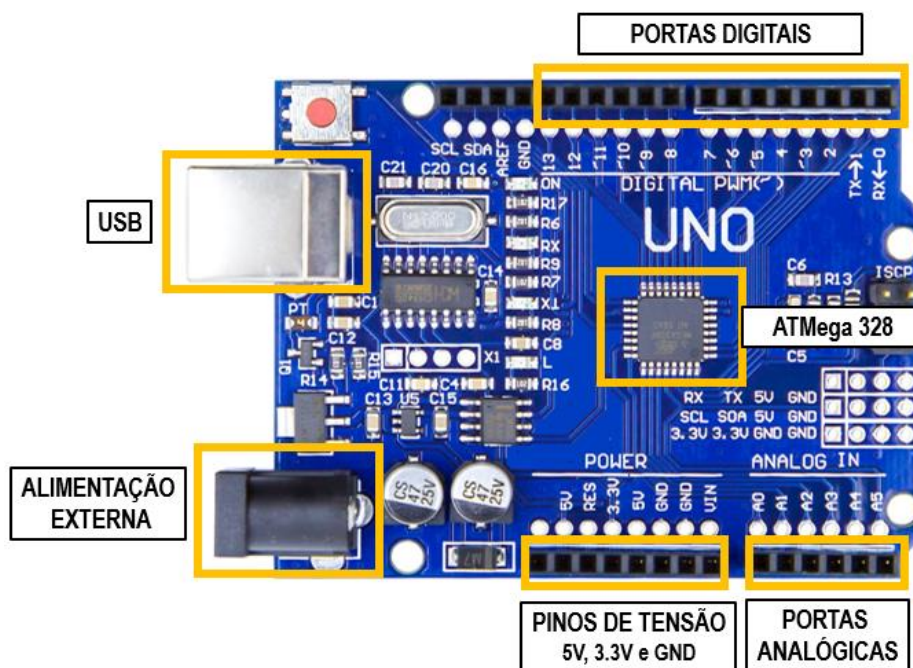
Figura 34 – Circuito para leitura do LDR.



Fonte: O Autor (2020).

A placa utilizada foi um Arduino Uno de microcontrolador ATmega 328, conforme a Figura 35, ele tem 14 pinos de entrada/saída digital, dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM, e 6 entradas analógicas.

Figura 35 – Placa Arduino Uno.



Fonte: O Autor (2020).

O microcontrolador recebe o valor analógico e retorna um valor digital que corresponde à tensão no pino. Como o conversor analógico-digital do Arduino Uno possui uma resolução de 10 bits, o intervalo de tensão de referência, que é 5V, será dividido em 1024 ( $2^{10}$ ) partes, valor lido no intervalo de 0 a 1023, assim, o valor retornado é o valor discreto mais próximo da tensão no pino.

Dessa forma, a partir da *IDE* (Ambiente de Desenvolvimento Integrado), da placa Arduino foi feita a leitura do valor em 3 pontos importantes: inferior, superior e intermediário, considerando o entreferro (distância de ar que há entre a bobina e o eixo do rotor).

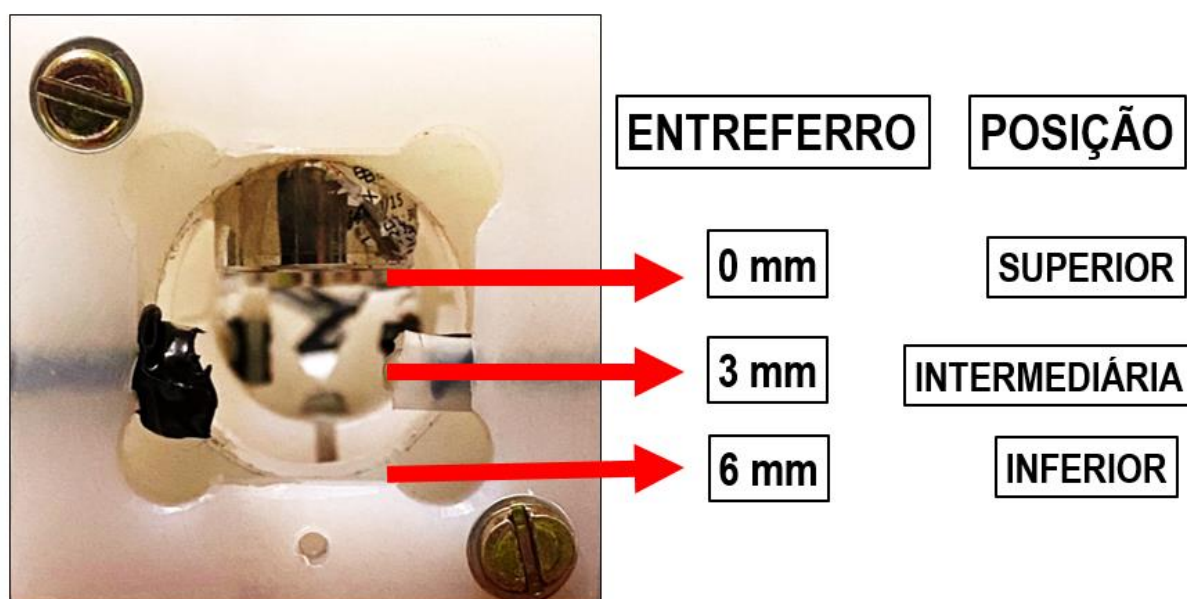
A *IDE* possui uma ferramenta chamada Monitor Serial, que é a ligação entre o computador e o microcontrolador, ele tem a função de enviar e receber informações na forma de texto, dessa forma, a *IDE* mostra os valores lidos pelo sensor instantaneamente, e a partir deles será escolhido *setpoint*.

A leitura fornecida pela IDE obedece à Equação 37, em que mostra a relação da tensão do divisor de tensão no sensor com o valor lido.

$$\frac{V_{pino} \cdot 1024}{5} = Valor_{lido} \quad (37)$$

A Figura 36 mostra as posições do eixo para as quais foram feitas as medidas de leitura do sensor óptico.

Figura 36 – Posições para leitura do sensor.



Fonte: O Autor (2020).

A Tabela 4, mostra a relação do valor de entreferro com o valor lido e tensão no pino analógico para as duas bobinas.

Tabela 4 - Relação de valores obtidos do LDR.

	<b>Entreferro</b>	<b>Valor lido</b>	<b>Tensão no pino</b>
<b>Lado A</b>	0 mm	802	3,916 V
	3 mm	812	3,964 V
	6 mm	250	1,220 V
<b>Lado B</b>	0 mm	806	3,934 V
	3 mm	821	4,008 V
	6 mm	259	1,264 V

Fonte: O Autor (2020).

É importante notar que, o entreferro de 3 mm corresponde à posição que o eixo deve ficar suspenso ou levitando, o valor lido nesta posição será o *setpoint* no código de controle, ou seja, a lógica do controle PD deve se ajustar de forma que a oscilação em torno do *setpoint* seja a menor possível.

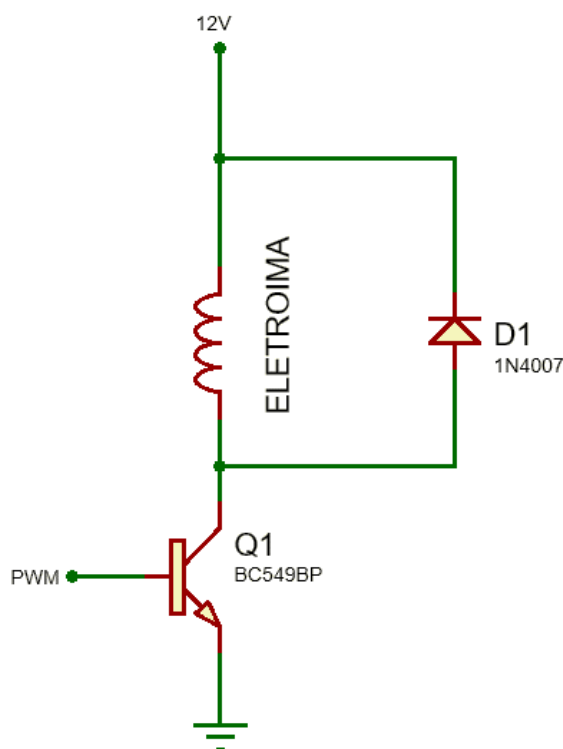
Os valores de entreferro são os obtidos pelas medições no mancal, no entreferro 6 mm (eixo na posição inferior) o valor lido pelo sensor é pequeno, pois a incidência de luz é maior, enquanto que o maior valor lido é na posição central, ou seja, quando o eixo está no centro, ele interrompe a incidência de luz, causando uma maior penumbra que nas posições superior e inferior.

#### 4.3 CIRCUITO DE ACIONAMENTO

Para se controlar corrente em cargas indutivas, que é o caso desse projeto, o eletroímã, utiliza-se circuitos chaveados. Eles consistem na aplicação de transistores operando na saturação, abrindo e fechando para que a passagem de corrente ocorra como uma chave com controle *on-off*.

A topologia para o circuito de acionamento escolhida é bem simples, com a presença somente de um transistor bipolar BC549B e um diodo modelo 1N4007, conforme a Figura 37.

Figura 37 - Circuito de chaveamento.



Fonte: O autor (2020).

O diodo em paralelo com o eletroímã tem a função de que, quando a chave estiver aberta, a corrente gerada pela indução do solenoide decresça, circulando pelo diodo, de forma, mais rápida.

#### 4.4 IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE

Foram usadas duas placas Arduino Uno, pois as bobinas funcionam com circuitos isolados. O controle também foi feito isoladamente.

O microcontrolador dispõe de uma interface de programação em linguagem C, com bibliotecas e configurações pré-instaladas, além de saídas digitais. Ademais, é um sistema de baixo custo, é fácil de ser implementado em razão da acessível interface com o usuário.

O controlador PID é um algoritmo de controle de fácil implementação e bom desempenho. Basicamente, ele compara o valor medido pelos sensores com um valor



de referência, a diferença é processada para calcular o sinal de controle. Esse sinal busca levar o valor medido para o valor de referência estipulado. Desse modo, o controlador minimiza o erro entre a medição e o valor de referência, com o objetivo de se obter um comportamento estável.

A Equação 38 mostra a equação do PID no domínio da transformada de Laplace, sendo  $U(s)$  o sinal de saída e  $Y(s)$  o sinal de entrada.

$$U(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) Y(s) \quad (38)$$

As ações de controle do mancal têm influência direta no comportamento dinâmico do rotor. O controle proporcional gera um sinal de saída proporcional ao erro, o ganho  $K_p$  é ajustado de forma que a mudança de desvio entre o sinal medido pelo sensor, e o sinal e referência seja o menor possível. O aumento desse ganho aumenta a rigidez do rotor, porém, um aumento muito grande leva o sistema à instabilidade.

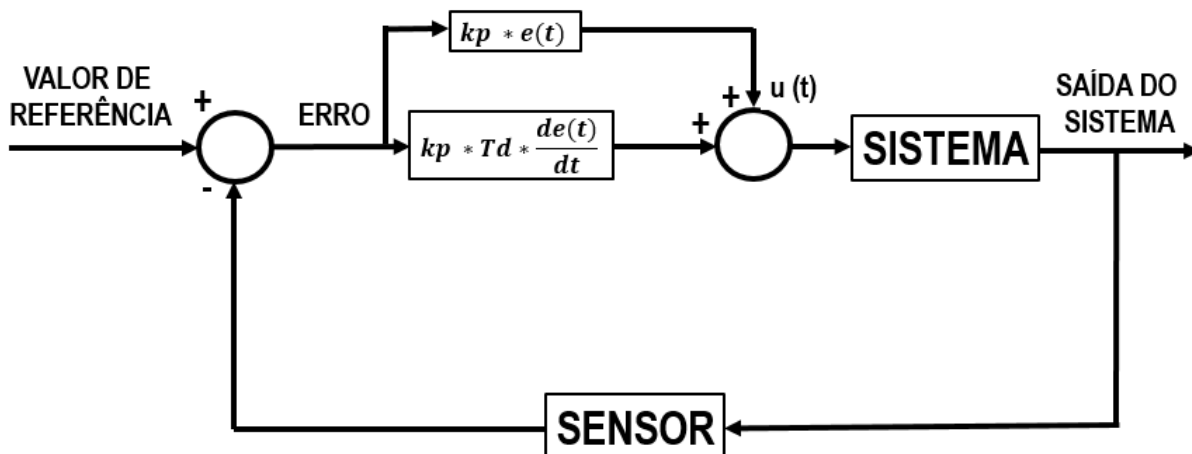
A ação integrativa, ganho  $K_i$ , é proporcional à integral no tempo do erro, esse ganho tem a função de trazer o sistema de volta ao ponto de referência, ou centro geométrico do mancal.

A ação derivativa, atua quando ocorre perturbação externa ou na partida do sistema de forma a reduzir essas variações. O ganho  $K_d$  atua durante os transitórios, pois ele prevê o comportamento futuro do sistema e atua antes, essa ação é proporcional à taxa de variação do erro. Aumentando o valor do ganho  $K_d$ , o amortecimento do mancal aumenta e as oscilações são reduzidas.

Usando os três termos em conjunto, têm-se um desempenho conveniente, porém, nesse projeto será utilizado um controlador PD, pois o objetivo do trabalho não se restringe ao desempenho específico do sistema de controle.

Na Figura 38, têm-se o diagrama de blocos do controlador proporcional-derivativo (PD), o sinal de entrada é o valor de referência, ou seja, o valor lido pelo sensor óptico em que o eixo está no centro. Nesse sistema em malha fechada, a variável medida e realimentada é a corrente, o sinal de saída é comparado com o valor de referência, e o desvio (sinal de erro) entre os dois sinais é utilizado no controlador para determinar o sinal de controle que deve ser aplicado ao processo.

Figura 38 – Diagrama de blocos do controlador PD.



Fonte: O Autor (2020).

Em que  $u(t)$  é o esforço de controle,  $K_p$  o ganho proporcional,  $T_d$  tempo derivativo e  $e(t)$  sinal de erro, ou seja, o valor medido subtraído do valor de referência.

Analisando-se a estabilidade do controlador PD (Proporcional e Derivativo), o ganho  $K_p$  está relacionado à frequência de oscilação e o ganho  $K_d$  com o amortecimento do eixo. O termo  $K_i$  será considerado igual a zero no código do controlador, e tem apenas a função de garantir um erro nulo em regime permanente caso ocorre uma força de perturbação externa.

Pelas características do sistema e pelo efeito de cada ação, para um aumento do ganho do termo derivativo, o sistema terá mais amortecimento, e conforme o ganho proporcional aumenta, o sistema terá uma velocidade de resposta mais rápida. Dessa forma, deve-se encontrar a combinação precisa dos parâmetros para o sistema atingir o desempenho pretendido.

O ajuste dos ganhos foi feito de forma manual, através de potenciômetros ajustáveis  $10k\Omega$ , portanto, foram utilizados 4 potenciômetros, um para o ganho  $K_p$ , um para o ganho  $K_d$  da bobina controlada do lado A, e mais dois potenciômetros igualmente para o lado B.

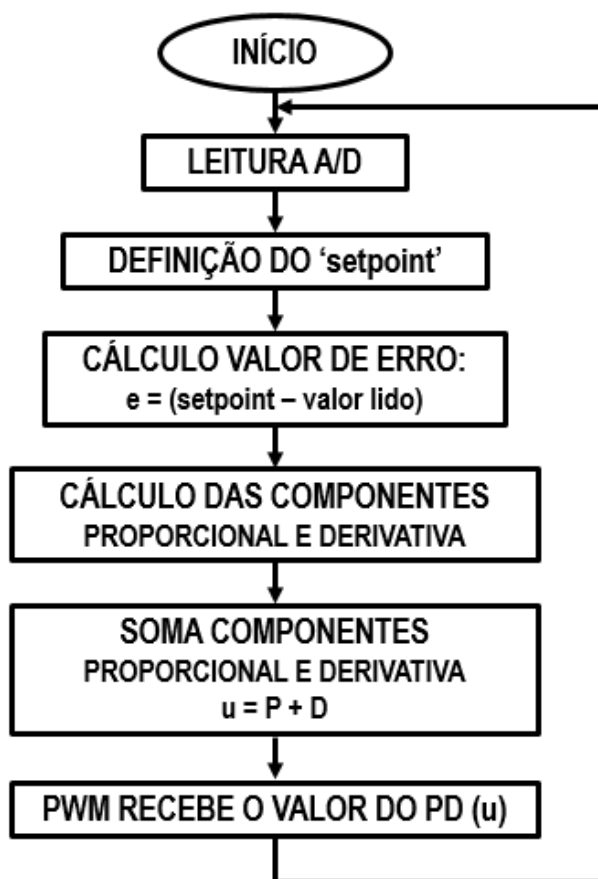
O circuito elétrico esquemático com os componentes utilizados no protótipo está no Apêndice B.

#### 4.4.1 Código de controle

Um controlador PD na forma discreta irá ler a posição, ou valor do sensor, calcular o erro, e por fim, calcular o sinal de controle em um dado período de amostragem. Esse período deve ser menor que o tempo de resposta do sistema.

O código da IDE de controle está conforme o Apêndice C com os comentários de cada linha de código, porém a Figura 39 mostra o fluxograma da lógica de controle implementada.

Figura 39 – Implementação digital do controlador PD.



Fonte: O Autor (2020).

A variável  $C1$  é o valor de *setpoint*, ou seja, ela foi definida através da leitura do sensor das posições desejadas, para se obter o valor da variável, posicionou-se o eixo na posição central e o valor foi colocado no código como,  $C1 = \text{valor do setpoint}$ , a variável  $C0$  é o valor que será lido pelo sensor durante o funcionamento do mancal.

O período de amostragem considerado foi  $10\mu\text{s}$ , que está definido no timer de inicialização, as variáveis  $K_p$  e  $K_d$  recebem o valor do potenciômetro ajustável das entradas analógicas, e o  $K_i$ , como já explicado, foi considerado igual a zero, pois é um controlador PD.

A diferença entre  $C1$  e  $C0$  resulta no erro para a amostra atual, após é feito o código matemático que realiza o cálculo das componentes proporcional e derivativa.

Essas componentes são somadas na variável  $u$ , que será o esforço do controle para corrigir o erro, esse sinal é enviado para o PWM do microcontrolador que irá fazer o chaveamento do transistor.

O PWM manda pulsos de tensões variando a largura desses pulsos numa frequência de 980 Hz, que é a frequência do PWM do Arduino Uno no pino 5. A regulagem do pulso, *duty cycle* define a tensão aplicada em cima da bobina. Se o eixo está afastado, ele manda mais tensão, o PWM é alterado e alarga o pulso para que envie um pacote maior de energia.

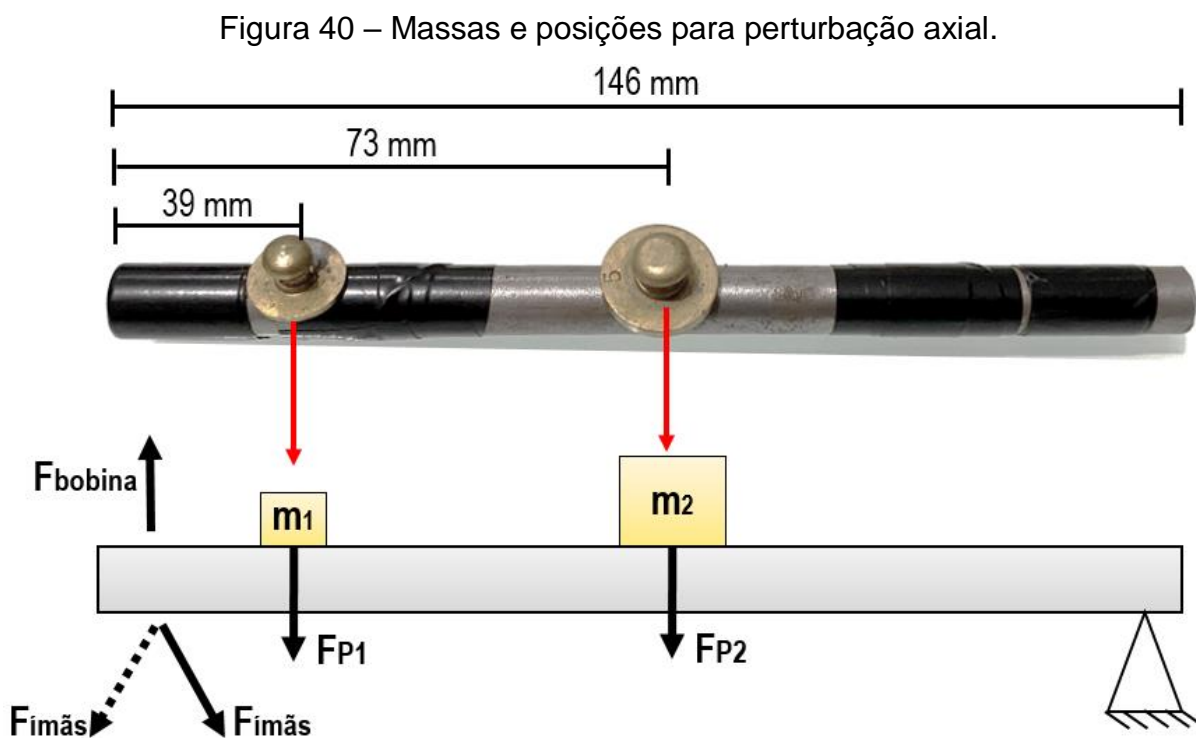
## 4.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção serão apresentados os resultados e discussões do trabalho. A metodologia consiste em analisar a estabilidade do sistema quando submetidos a perturbações externas.

### 4.5.1 Resposta à perturbação externa

Para analisar o desempenho do mancal magnético híbrido desenvolvido, realizou-se testes aplicando força radial no rotor em diferentes posições, e com diferentes desempenhos, ou seja, diferentes ajustes nos ganhos proporcional e derivativo do controlador de forma manual regulando os potenciômetros.

A Figura 40 mostra as massas utilizadas, e as posições no eixo, em quais elas foram medidas, uma no centro e outra próxima à ponta.



Fonte: O Autor (2020).

As massas utilizadas foram de 1g, representada na figura por  $m_1$ , e 5g por  $m_2$ . Para análise, testou-se a massa de 1g nas posições inicial (39 mm) e central (73 mm), e para a massa de 5g, o mesmo procedimento, para verificar a influência das massas em diferentes posições.

Só um lado do mancal estará suspenso através de forças magnéticas, enquanto que, o outro lado está apoiado em um calço que está na altura em que se deseja ter o eixo levitando. A força de perturbação radial para 1g é igual a  $9,81 \times 10^{-3}$  N, considerando  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ , e para 5g,  $4,9 \times 10^{-2}$  N.

A Tabela 5 mostra os valores de tensão medidos no sensor ótico, como o sensor varia a resistência conforme varia a intensidade de luz sobre o mesmo, por consequência, a tensão também irá variar, portanto as tensões máximas e mínimas foram aferidas.

Os valores dos ganhos indicados, são para a configuração mais estável que foi possível chegar, dessa forma, foram feitas cinco medições para cada situação, para

se ter uma média de variação. Posição central indica que a massa para a força axial foi posicionada no centro do eixo, em 73mm, e posição inicial, indica que a massa foi colocada em 39 mm.

Os valores de tensão foram medidos com um osciloscópio Agilent Technologies DSO1052b 50MHz, e os *print screen* de cada medição para construção da Tabela 5 estão no apêndice D.

Tabela 5: Resultados medidos.

<b><math>K_p = 1</math> e <math>K_d = 475</math> e <math>m = 1g</math></b>					
		<b><math>V_{máx.}</math></b>	<b><math>V_{mín.}</math></b>	<b>Diferença</b>	<b>Média</b>
<b>Posição Central</b> (73 mm)	Medição 1	264 mV	136 mV	128 mV	131,2 mV
	Medição 2	288 mV	164 mV	124 mV	
	Medição 3	276 mV	144 mV	132 mV	
	Medição 4	272 mV	136mV	136 mV	
	Medição 5	308 mV	172 mV	136 mV	
<b>Posição Inicial</b> (39 mm)	Medição 1	300 mV	208 mV	92 mV	90,4 mV
	Medição 2	308 mV	220 mV	88 mV	
	Medição 3	300 mV	216 mV	84 mV	
	Medição 4	300 mV	208 mV	92 mV	
	Medição 5	308 mV	212 mV	96 mV	

Fonte: O Autor (2020).

Quanto maior a diferença entre tensão máxima e tensão mínima, menos estável está o rotor, ou seja, o deslocamento no eixo  $y$  é maior, pois a tensão no sensor varia conforme a posição do rotor.

A Tabela 5 mostra que posicionando a massa de 1g na posição inicial do eixo, há uma menor variação de tensão, e por consequência uma maior estabilidade, pois a diferença entre tensões máximas e mínimas é menor, comparada quando a massa está na posição central.

A Tabela 6 mostra os resultados de medições para as mesmas condições de operação da Tabela 5, porém para uma massa de 5g aplicada como carga radial no eixo.

Tabela 6: Resultados medidos.

<b><math>K_p = 1</math> e <math>K_d = 475</math> e <math>m = 5g</math></b>					
<b>Posição Central</b> (73 mm)		<b><math>V_{m\acute{a}x.}</math></b>	<b><math>V_{m\acute{i}n.}</math></b>	<b>Diferença</b>	<b>Média</b>
	Medição 1	264 mV	156 mV	108 mV	104 mV
	Medição 2	272 mV	176 mV	96 mV	
	Medição 3	272 mV	172 mV	104 mV	
	Medição 4	260 mV	156mV	104 mV	
	Medição 5	256 mV	148 mV	108 mV	
<b>Posição Inicial</b> (39 mm)	Medição 1	368 mV	32 mV	336 mV	312,8 mV
	Medição 2	260 mV	28 mV	232 mV	
	Medição 3	364 mV	36 mV	328 mV	
	Medição 4	364 mV	32 mV	332 mV	
	Medição 5	368 mV	32 mV	336 mV	

Fonte: O Autor (2020).

Através da análise da Tabela 6, aplicando uma massa de 5g na posição central resultou em uma estabilidade, ou deslocamento vertical, menor que quando aplicada 1g nessa posição. Na posição inicial, obteve-se uma diferença de tensão na ordem de 3 vezes mais, essa diferença é grande para o sistema dimensionado, e portanto, quando aplicado 5g nessa posição, o eixo instantaneamente se desestabiliza e sai da zona de levitação caindo na estrutura. Os valores e medições podem ser consultados no Apêndice E.

As Tabelas 7 e 8 mostram os valores aferidos para as mesmas condições anteriores, porém com a diferença de uma unidade no ganho diferencial, essa alteração no ganho, resulta em um visível deslocamento do eixo y.

Tabela 7 - Resultados medidos.

<b><math>K_p = 1</math> e <math>K_d = 476</math> e <math>m = 5g</math></b>					
<b>Posição Central</b> (73 mm)		<b><math>V_{m\acute{a}x.}</math></b>	<b><math>V_{m\acute{i}n.}</math></b>	<b>Diferença</b>	<b>Média</b>
	Medição 1	320 mV	196 mV	124 mV	125,6 mV
	Medição 2	332 mV	196 mV	136 mV	
	Medição 3	324 mV	204 mV	120 mV	
	Medição 4	332 mV	208 mV	124 mV	
	Medição 5	328 mV	204 mV	124 mV	

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 8 - Resultados medidos.

<b><math>K_p = 1</math> e <math>K_d = 476</math> para 1g</b>					
		<b><math>V_{m\acute{a}x.}</math></b>	<b><math>V_{m\acute{i}n.}</math></b>	<b>Diferença</b>	<b>Média</b>
<b>Posição Central</b> (73 mm)	Medição 1	336 mV	223 mV	96 mV	110 mV
	Medição 2	332 mV	228 mV	104 mV	
	Medição 3	338 mV	222 mV	107 mV	
	Medição 4	342 mV	219 mV	120 mV	
	Medição 5	351 mV	228 mV	123 mV	

Fonte: O Autor (2020).

Para os casos das Tabelas 7 e 8 foram testados apenas nas posições central, pois na posição inicial, para as duas situações e eixo sai fora da estabilidade instantaneamente. Pelo fato dessas combinações de ganhos gerar um eixo menos estável que comparado às tabelas anteriores, a massa de 5g se mostrou como uma perturbação a mais e piorou a estabilidade devido à diferença de tensões, devido à força exercida para baixo, ou seja, exigiu mais eficiência da bobina, porém a dinâmica de controle não conseguiu responder adequadamente à perturbação.

Já para a massa de 1g, o sistema se mostrou mais estável, e resultou em um deslocamento em y menor que para a massa de 5g.

#### 4.5.2 Resposta com o eixo totalmente suspenso

A meta do trabalho foi suspender o eixo pelas duas bobinas, pois em ambos os lados o deslocamento em y deve ser o menor possível, para que não ocorra desequilíbrio de forças entre um lado e outro.

As Tabelas 9 e 10 mostram os resultados para cada bobina, em funcionamento sem perturbação. Os valores e medições podem ser consultados no Apêndice E.



Tabela 9 - Resultados medidos.

<b><math>K_p = 1</math> e <math>K_d = 476</math></b>					
<b>Lado A</b>		<b><math>V_{m\acute{a}x.}</math></b>	<b><math>V_{m\acute{i}n.}</math></b>	<b>Diferença</b>	<b>Média</b>
	Medição 1	368 mV	216 mV	152 mV	148,8 mV
	Medição 2	360 mV	216 mV	144 mV	
	Medição 3	360 mV	216 mV	144 mV	
	Medição 4	368 mV	208 mV	160 mV	
	Medição 5	356 mV	212 mV	144 mV	

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 10 - Resultados medidos.

<b><math>K_p = 1</math> e <math>K_d = 463</math></b>					
<b>Lado B</b>		<b><math>V_{m\acute{a}x.}</math></b>	<b><math>V_{m\acute{i}n.}</math></b>	<b>Diferença</b>	<b>Média</b>
	Medição 1	364 mV	220 mV	144 mV	127,2 mV
	Medição 2	328 mV	216 mV	112 mV	
	Medição 3	332 mV	208 mV	124 mV	
	Medição 4	352 mV	220 mV	132 mV	
	Medição 5	328 mV	204 mV	124 mV	

Fonte: O Autor (2020).

A diferença da média de tensão do lado A com o lado B é de 21,6 mV, a estabilidade ideal é que esse valor seja o menor possível, porém o sistema se mostrou satisfatório nessas condições, e o eixo ficou suspenso no protótipo desenvolvido.

#### 4.5.3 Resposta à perturbação com o eixo totalmente suspenso

Com ambas bobinas funcionando, realizou-se os testes com perturbação radial na posição central para avaliar o desempenho.

A Tabela 11 mostra os resultados para uma massa de 5g posicionada no centro do eixo, o eixo sai da zona de estabilidade e acaba caindo, por isso, a diferença de tensão para ambos lados da ordem de 300 mV. Dessa forma, o rotor não é capaz de suportar tal força peso.

Tabela 11 - Resultados medidos.

<b>m = 5g</b>					
		<b>V<sub>máx.</sub></b>	<b>V<sub>mín.</sub></b>	<b>Diferença</b>	<b>Média</b>
<b>Lado A</b>	Medição 1	408 mV	80 mV	328 mV	320,8 mV
	Medição 2	360 mV	64 mV	296 mV	
	Medição 3	384 mV	72 mV	312 mV	
	Medição 4	412 mV	76 mV	336 mV	
	Medição 5	400 mV	69 mV	332 mV	
<b>Lado B</b>	Medição 1	396 mV	76 mV	320 mV	312,8 mV
	Medição 2	408 mV	80 mV	328 mV	
	Medição 3	416 mV	64 mV	352 mV	
	Medição 4	360 mV	68 mV	292 mV	
	Medição 5	348 mV	76 mV	272 mV	

Fonte: O Autor (2020).

A Tabela 11 mostra os resultados para uma massa de 1 g posicionada no centro do eixo, essa massa não desestabilizou o eixo a ponto do mesmo cair, porém, ao comparar com as Tabelas 9 e 10 que mostram o funcionamento sem carga, é possível notar que a massa deixou o sistema menos estável, resultando em um maior deslocamento em y.

Tabela 12 - Resultados medidos.

<b>m = 1g</b>					
		<b>V<sub>máx.</sub></b>	<b>V<sub>mín.</sub></b>	<b>Diferença</b>	<b>Média</b>
<b>Lado A</b>	Medição 1	380 mV	196 mV	184 mV	192,8 mV
	Medição 2	324 mV	124 mV	200 mV	
	Medição 3	408 mV	212 mV	196 mV	
	Medição 4	332 mV	124 mV	208 mV	
	Medição 5	348 mV	172 mV	176 mV	
<b>Lado B</b>	Medição 1	380 mV	196 mV	184 mV	180 mV
	Medição 2	384 mV	200 mV	184 mV	
	Medição 3	344 mV	172 mV	172 mV	
	Medição 4	352 mV	168 mV	184 mV	
	Medição 5	440 mV	264 mV	176 mV	

Fonte: O Autor (2020).

Os valores e medições podem ser consultados no Apêndice E.

## 5 CONCLUSÃO

A proposta do trabalho visou a implementação e análise de desempenho de parâmetros eletrônicos, como eletrônica de potência e controle, não foi investido no desenvolvimento de uma plataforma mecânica estável que a aproximasse de um sistema de mancal real, pois o enfoque foi na parte elétrica do sistema. Pois essa intenção acrescentaria uma complexidade maior, a ponto de tomar mais tempo para sua implementação do que a parte elétrica. Portanto, buscou-se uma estrutura robusta e com constituição de nylon, ou seja, não magnética, e nem condutora, para não afetar os parâmetros de interesse.

A execução da proposta de produzir o protótipo para controlar a estabilidade estática do eixo de um mancal magnético por meio de controle eletrônico apresentou como principais resultados conclusivos:

- O conjunto de parâmetros que melhor se adequou os objetivos foi  $K_p = 1$ ,  $K_d = 463$  para uma bobina e  $K_d = 473$  para a outra, para uma massa de 36 g.
- A lógica de controle pautada apenas nos ganhos proporcional e derivativo se mostrou adequada para obter a estabilidade do eixo.
- A viabilidade de se aplicar uma topologia híbrida, baseada em dois conjuntos, cada conjunto constituído de apenas uma bobina e dois ímãs permanentes em um arranjo de  $120^\circ$  entre eles, para obter uma estabilidade estática em um mancal magnético.

O principal problema ao longo do desenvolvimento do trabalho foi no dimensionamento do circuito de potência com controle. Uma das bobinas queimou, a outra, aparentemente sob o mesmo regime de operação, não. As causas não puderam ser melhor avaliadas por questões circunstanciais a época do desenvolvimento desse trabalho. Uma possível causa diz respeito ao chaveamento do transistor bipolar utilizado. A corrente pode ter oscilado e atingido picos acima de seu regime de trabalho, não obedecendo aos níveis de tensão do PWM. Se for um fato, pode ser atribuído a um problema construtivo do transistor ou então a uma montagem incorreta do circuito, que pode ter feito esse componente trabalhar sem uma tensão de referência adequada para ajustar-se às tensões do sinal PWM.

Como mencionado no referencial teórico, a utilização dos mancais magnético vem crescendo em aplicações diversas, em especial na indústria, mas apesar do seu ganho quando as perdas por dissipação mecânica de rolamentos, quando comparada aos sistemas tradicionais, ainda carece de melhorias quanto a aspectos quanto a eficiência de torque e estabilidade, nessa mesma comparação. Para tal, abordar aspectos inerentes à tecnologia, seja para trazer melhoramentos, ou para gerar conhecimento prático ao tema, tem importância inquestionável. E o presente trabalho apresenta ganhos em ambos, a implementação do controle de um sistema híbrido, ainda pouco utilizado em contextos industriais, e a apropriação dos conhecimentos específicos para a implementação e condução de novos projetos baseados nessa tecnologia.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros indica-se a próxima etapa natural desse trabalho que é incluir atuadores para impor rotação ao eixo, e avaliar os ganhos de PID necessários para garantir a estabilidade. E, posteriormente inserir cargas mecânicas no extremo do eixo para além de avaliar a estabilidade, também analisar aspectos de torque e velocidade, aproximando o estudo de um motor ou atuador real.

Além disso propõe-se a implementação de um sistema de controle baseado em lógica de FUZZY, para buscar uma melhor eficiência no controle de polos instáveis, e por consequência deslocamento nos eixos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. v. 2. ISBN 978-85-216-1879-9.

COELHO, Jefferson. **Construção de uma Bancada com Mancais Magnéticos para Estudo da Dinâmica de Rotores**. [s. l.], 2016.

CHOI, Changhwan; PARK, Kyihwan. **Self-sensing magnetic levitation using a LC resonant circuit**. Sensors and Actuators A: Physical, [s. l.], v. 72, n. 2, p. 169–177, 1999.

DA COSTA BRANCO, P. J.; DENTE, J. A. **Design and experiment of a new maglev design using zero-field-cooled YBCO superconductors**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, [s. l.], v. 59, n. 11, p. 4120–4127, 2012.

ERYONG, Hou; KUN, Liu. **A novel structure for low-loss radial hybrid magnetic bearing**. IEEE Transactions on Magnetics, [s. l.], v. 47, n. 12, p. 4725–4733, 2011. G.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física: Eletromagnetismo**. Tradução: Ronaldo Sérgio De Biasi. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 3. ISBN 978-85-216-3208-5.

JAYAWANT, B. V. **Electromagnetic suspension**. [s. l.], v. 44, n. April 1980, 1981.

SERWAY, Raymond A. e Jewett Jr, John W., **Princípios de Física Volume 3 Eletromagnetismo**, Ed. Thomson São Paulo, 2006

Ogata, K., 2010, Engenharia de Controle Moderno, 5° ed., São Paulo – SP, Ed. Pearson.

RASHID, M.H. **Eletrônica de potência, circuitos, dispositivos e aplicações**.

Makron Books, 1999.

SIKORA, Bartłomiej Marian; PILAT, Adam Krzysztof. **Numerical model of the axial magnetic bearing with six cylindrical poles**. Archives of Electrical Engineering, [s. l.], v. 68, n. 1, p. 195–208, 2019.

S. Earnshaw. **On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the lumiferous ether**. Trans. Camb. Phil. Soc., 7, Part I:97–112, 1842.

Schweitzer, E. Maslen, **Magnetic Bearings - Theory, Design and Application to Rotating Machinery**, Springer –Verlag, Berlin. 2009

Schweitzer, Gerhard. "**Active magnetic bearings-chances and limitations.**" IFToMM Sixth International Conference on Rotor Dynamics, Sydney, Australia. Vol. 1. 2002.

SOARES, P.M.O. **Discretização de Controladores Contínuos**. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1996.

TIPLER, Paul A. **Física: Eletricidade e Magnetismo, Ótica**. Tradução: Horacio Macedo, Ronaldo De Biasi. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000. v. 2.

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

XU, Shilei; FANG, Jiancheng. **A Novel Conical Active Magnetic Bearing with Claw Structure**. IEEE Transactions on Magnetics, [s. l.], v. 50, n. 5, 2014.

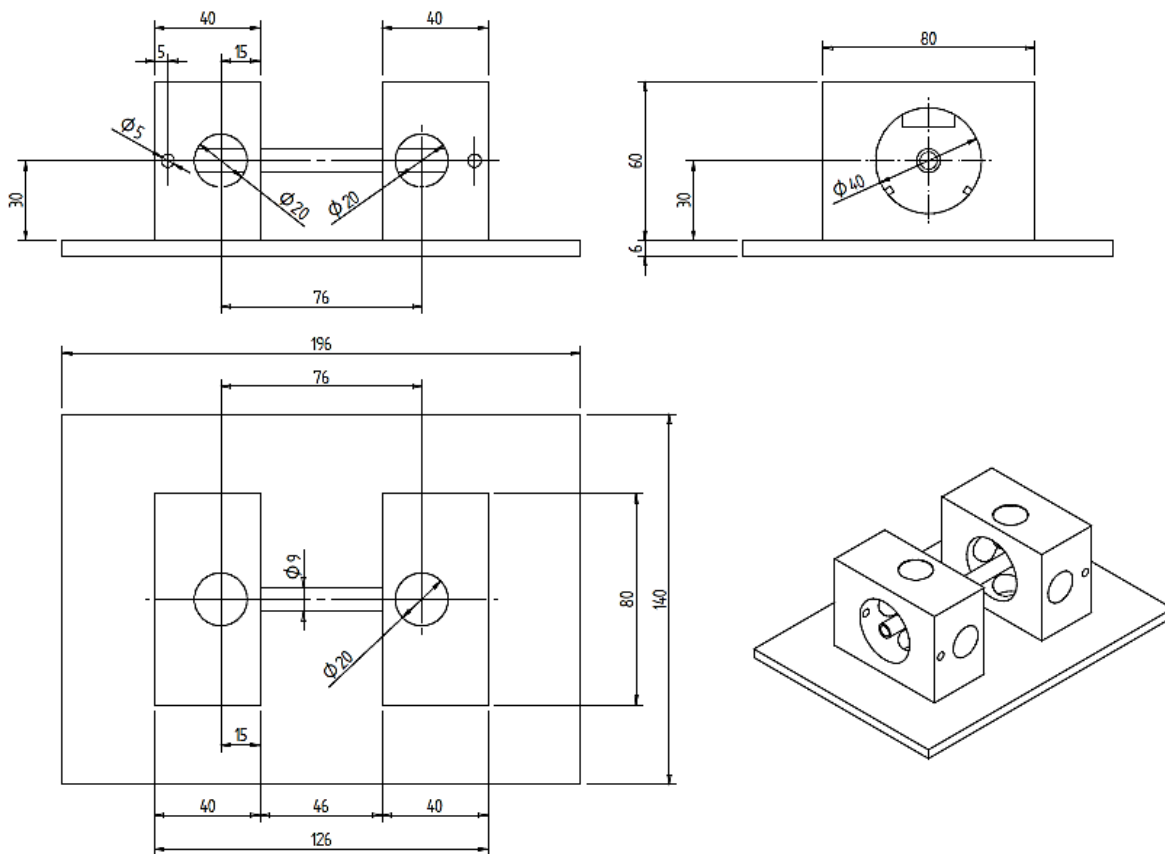
WEBSTER, John G., [ed.]. **The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook**. [s.l]: CRC-Press, 1999. ISBN 0-8493-8347-1.

YAMAMOTO, Rogério Issamu. **Mancal magnético híbrido do tipo repulsão com controle uniaxial com amortecimento fornecido por mancal eletrodinâmico**. Orientador: Oswaldo Horikawa. 2017. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

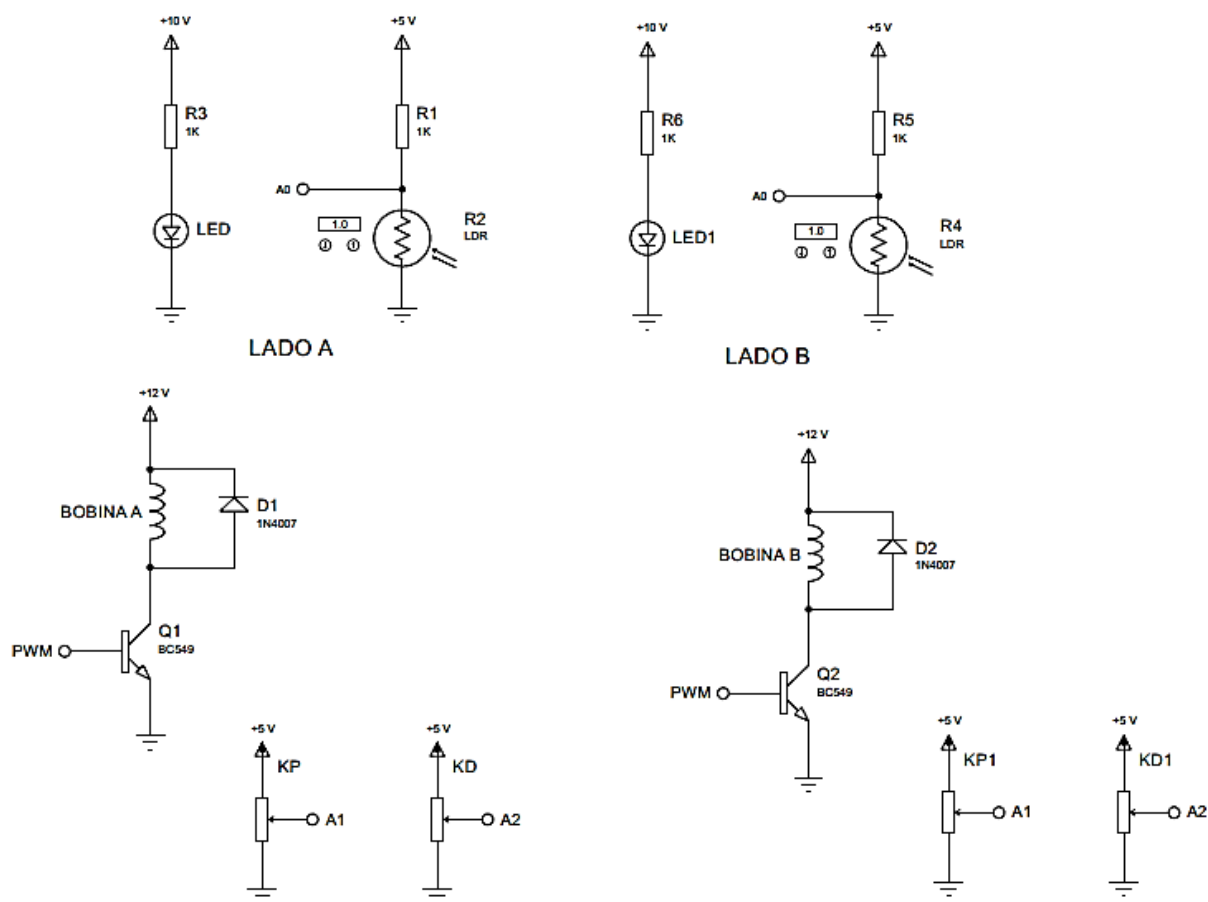


## APÊNDICE

## APÊNDICE A – MONTAGEM ROTOR E MANCAL



## APÊNDICE B – DIAGRAMA DO CIRCUITO ESQUEMÁTICO



## APÊNDICE C – ALGORITMO DE CONTROLE

```

#include "TimerOne.h"
int ilr, i0r, iaux,u;
float C1, C0, e1, e0=0, i0=0, i1, d, di, elabs, deadBand=1; // Delcara variáveis int
float kp,ki,kd; // Declara variáveis double

void setup()
{
  Timer1.initialize(10); // Inicializa o Timer1 para um período de
10us (frequência de amostragem)
  Timer1.attachInterrupt(controle); // Configura a função controle para ser
chamada a cada interrupção do Timer1
  pinMode(5, OUTPUT); // Configura pino 3 como PWM
  pinMode(0, INPUT); // Configura pino 0 como leitura ldr
  pinMode(1, INPUT); // Configura pino 1 como ganho kp
  pinMode(2, INPUT); // Configura pino 2 como ganho ki
  pinMode(3, INPUT); // Configura pino 3 como ganho kd
  //Serial.begin(9600);
}

void controle()
{
  C1= 820;//812 // Declara valor de setpoint
  C0 = (analogRead(0)); // Lê valor de referência do sensor
  kp= map(analogRead(1),0,1023,0,50); // Mapeia valores lidos da entrada
analógica referente ao ganho Kp (ajuste fino do ganho)
  //ki=map(analogRead(2),0,1023,0,25); // Mapeia valores lidos da entrada
analógica referente ao ganho Ki (ajuste fino do ganho)
  kd=map(analogRead(3),0,1023,0,600); // Mapeia valores lidos da entrada
analógica referente ao ganho Kd (ajuste fino do ganho)
  ki=0;
  kp=kp/1.0;
  kd=kd/1.0;
  // kp=1.60; valor de referência
  //kd=500; valor de referência
  // Serial.println (kd);
  // kd=0;

  e1=C1-C0; // Calcula o valor de erro para a amostra atual

  if(e1>=0) // Condição para cálculo do módulo do erro atual
  {
    elabs=e1; // Se o erro atual for positivo, variável elabs recebe o
erro atual
  }
}

```

```

else
{
    elabs=-e1;           // Se o erro atual for negativo variável elabs recebe o
módulo do erro atual
}

if(elabs>deadBand)     // Dentro da tolerância, erro é considerado nulo
{
    e1=e1;             // Se o erro atual for maior que a zona morta, mantem o
valor do erro
}
else
{
    e1=0;              // Se o erro atual for menor que o valor da zona morta,
erro atual é nulo
}

d=(e1-e0)*kd/40;      // Cálculo da componente derivativa kd*(e(t)-e(t-
1))/T --> método para trás (euler)
ilr= (e1+e0);         // Cálculo da componente intergal ki*T*(e(t-1)+e(t))/2
--> trapezoidal
i1=ilr/1000;          // Cálculo para deixar a componente integral menos
sensível
ilr=ilr-(i1*1000);    // Resto da divisão de i1 é alocado em ilr (milésimos)
ilr=(ilr*ki)+i0r;     // Milésimos acumulados da amostra anterior (já
multiplicada pelo ganho) somados ao resto da amostra atual multiplicado pelo ganho
iaux=ilr/10000;       // Verifica se os milésimos multiplicados pelo ganho
geraram uma ou mais unidades inteiras
i0r=ilr-(iaux*1000);  // Se sim, são eliminados dos milésimos acumulados e
somados ao valor da saída atual
i1=(i1*ki)+ iaux;    // Soma da parte inteira mais (milésimos acumulados/1000);
i0=i0+i1;            // Somatório da parcela integral acumulada + o período
atual
di= i0 + d;          // Soma da componente integral + derivativa
u= (kp*e1)/2;        // Cálculo da componente proporcional
u=u+di;              // Soma da componente proporcional + (integral +
derivativa)
e0=e1;

// Variável erro atual é salva na variável erro anterior
if(u>=0)              // Se PID for maior que zero
{
    if(elabs<=deadBand) // Se estiver na zona morta
    {
        u=0;           // Saída PID recebe zero
    }
    else
    {
        if(u>255)      // Se a saída do PID for maior que 255
        {

```

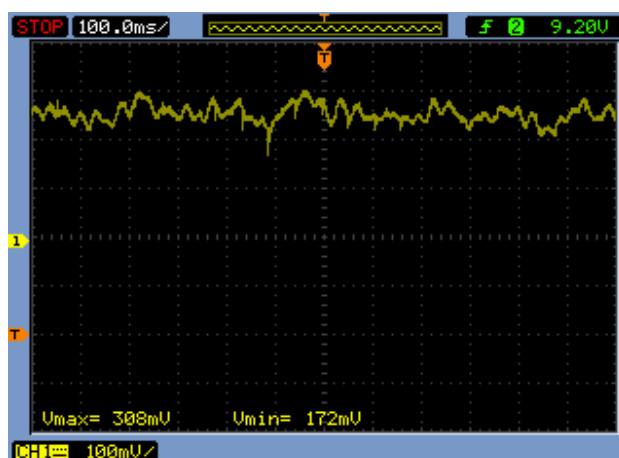
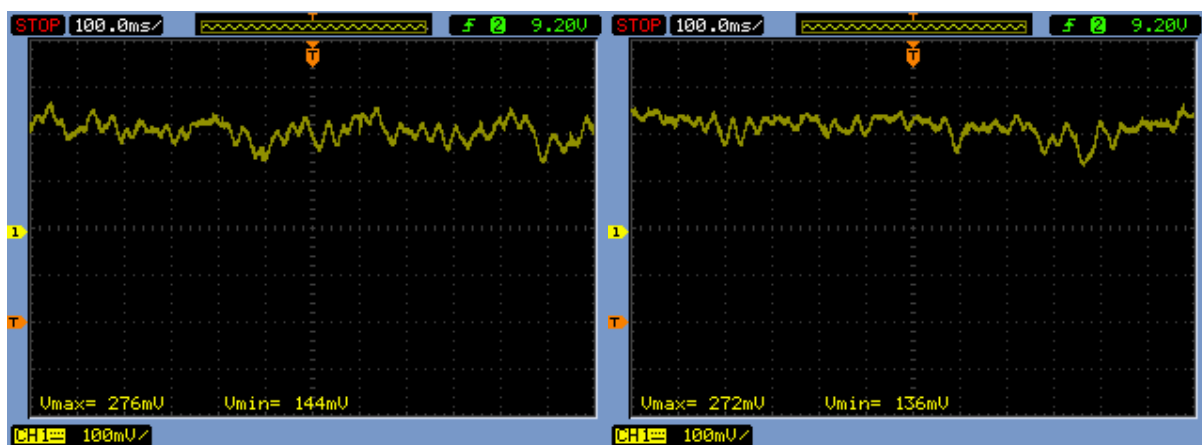
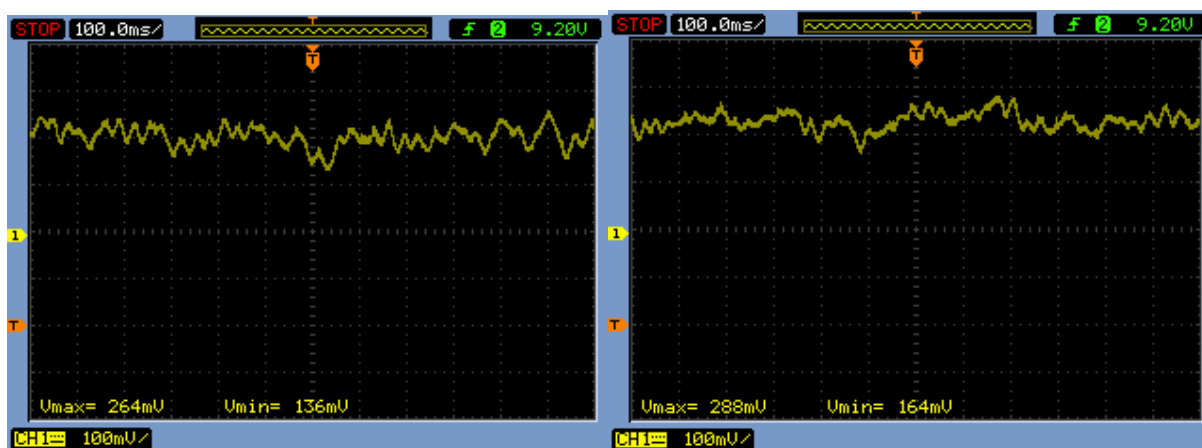
```
        u=255;           // Variável u recebe 255
    }

    analogWrite(5, u); // Saída PWM recebe como duty o valor do PID
}
}

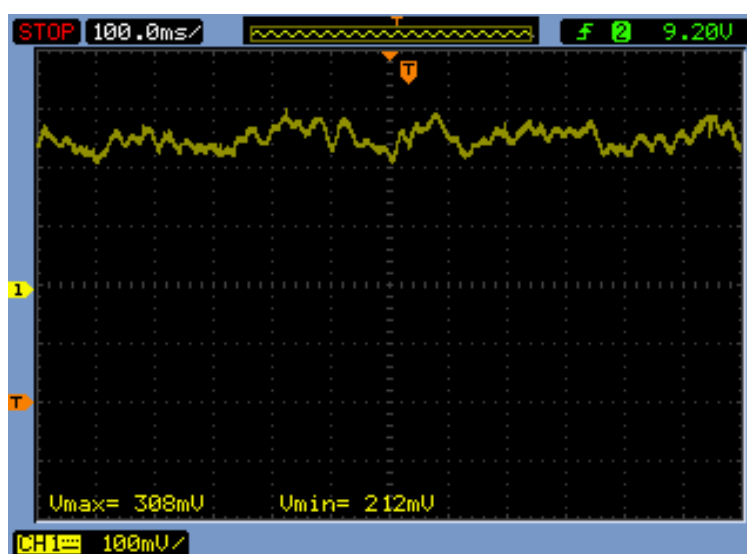
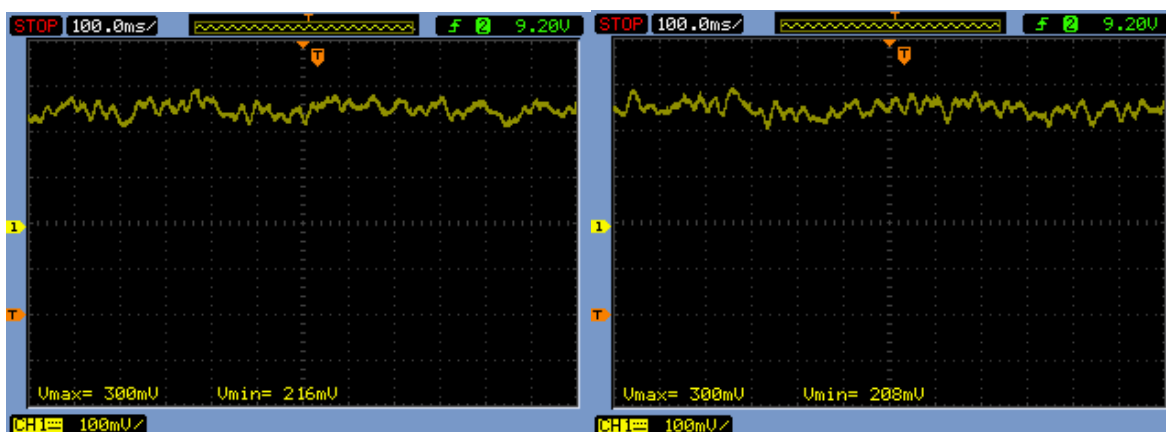
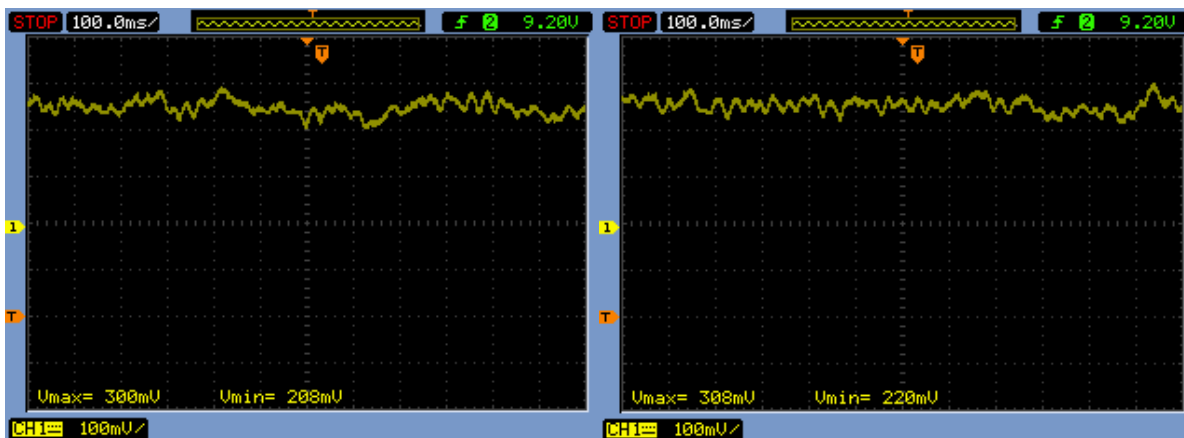
void loop()
{
    while(1) // Laço infinito
    {
        // Programa rodando neste laço
    }
}
```

## APÊNDICE D – MEDIÇÕES

Posição central:

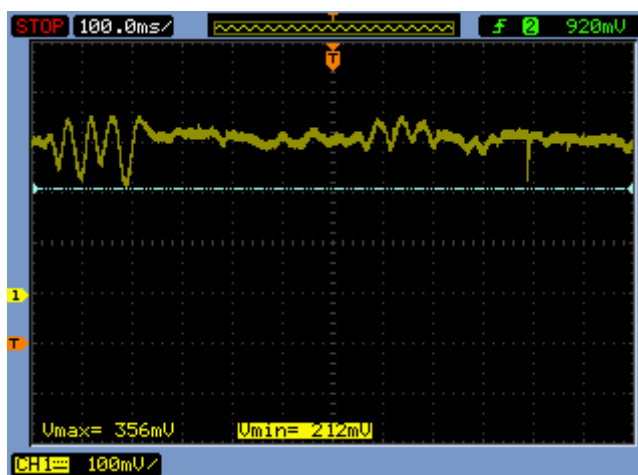
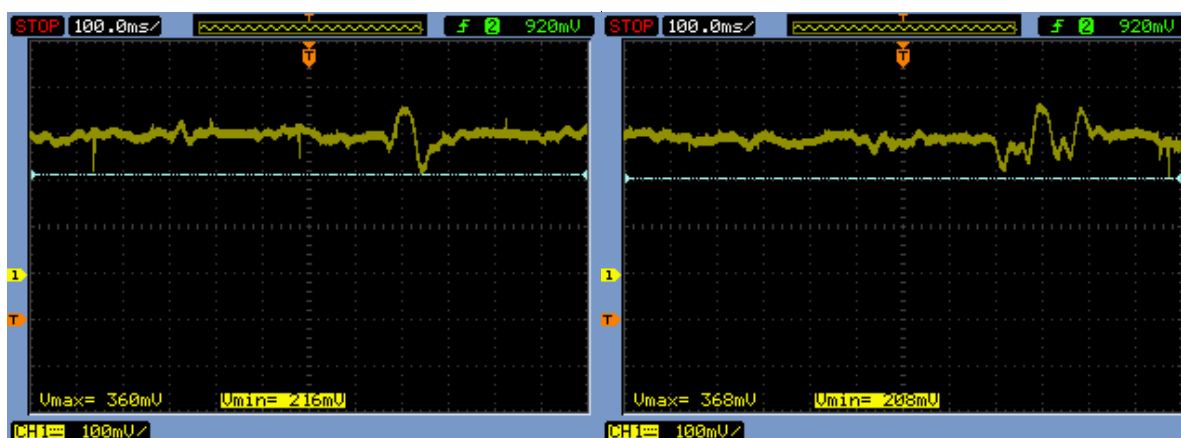
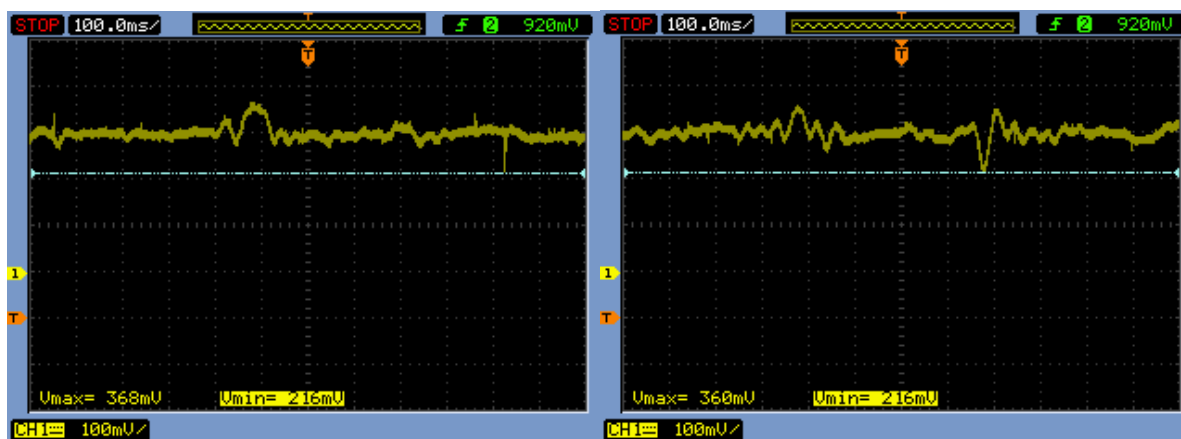


Posição inicial:



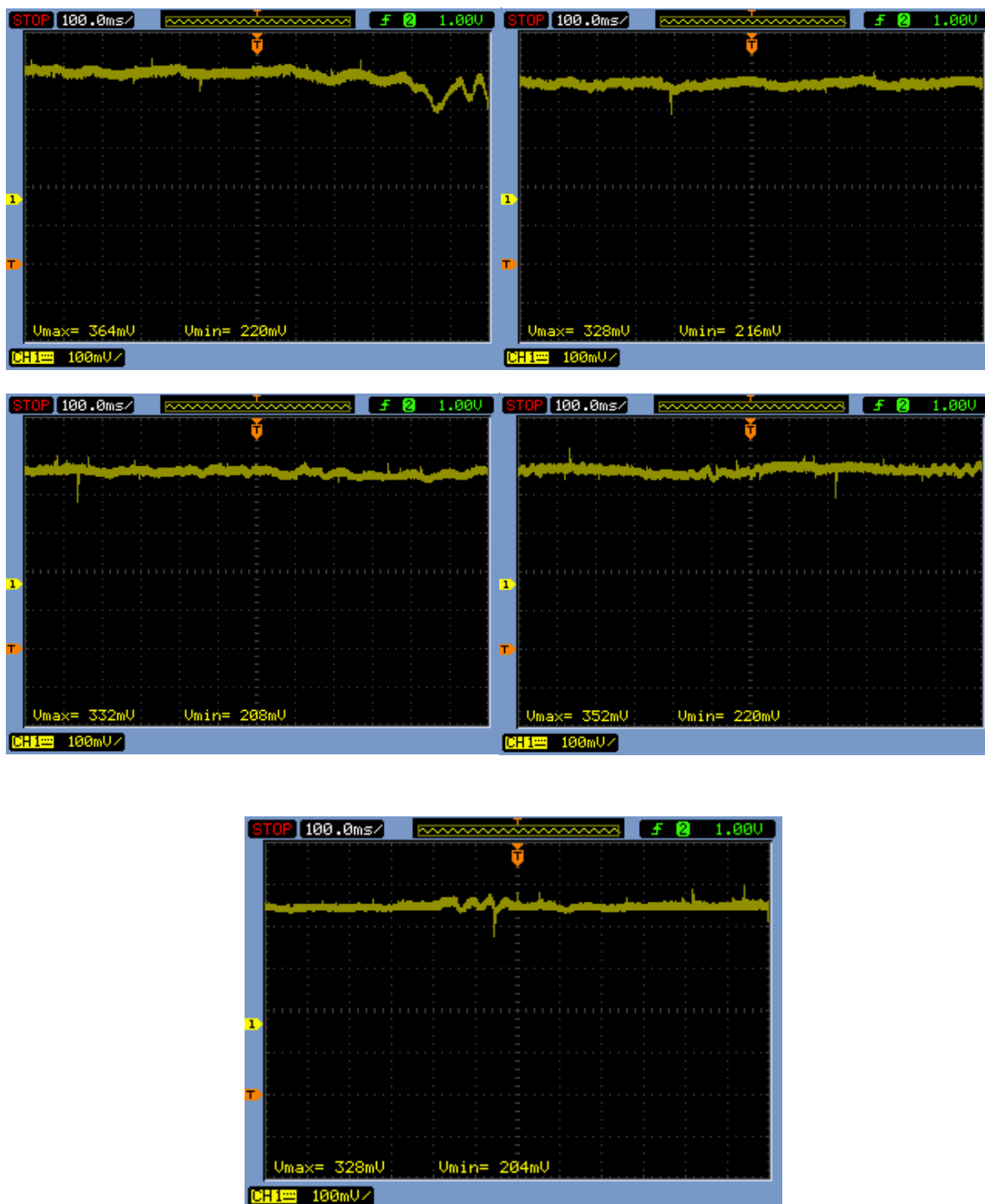
## APÊNDICE E - MEDIÇÕES

Lado A:



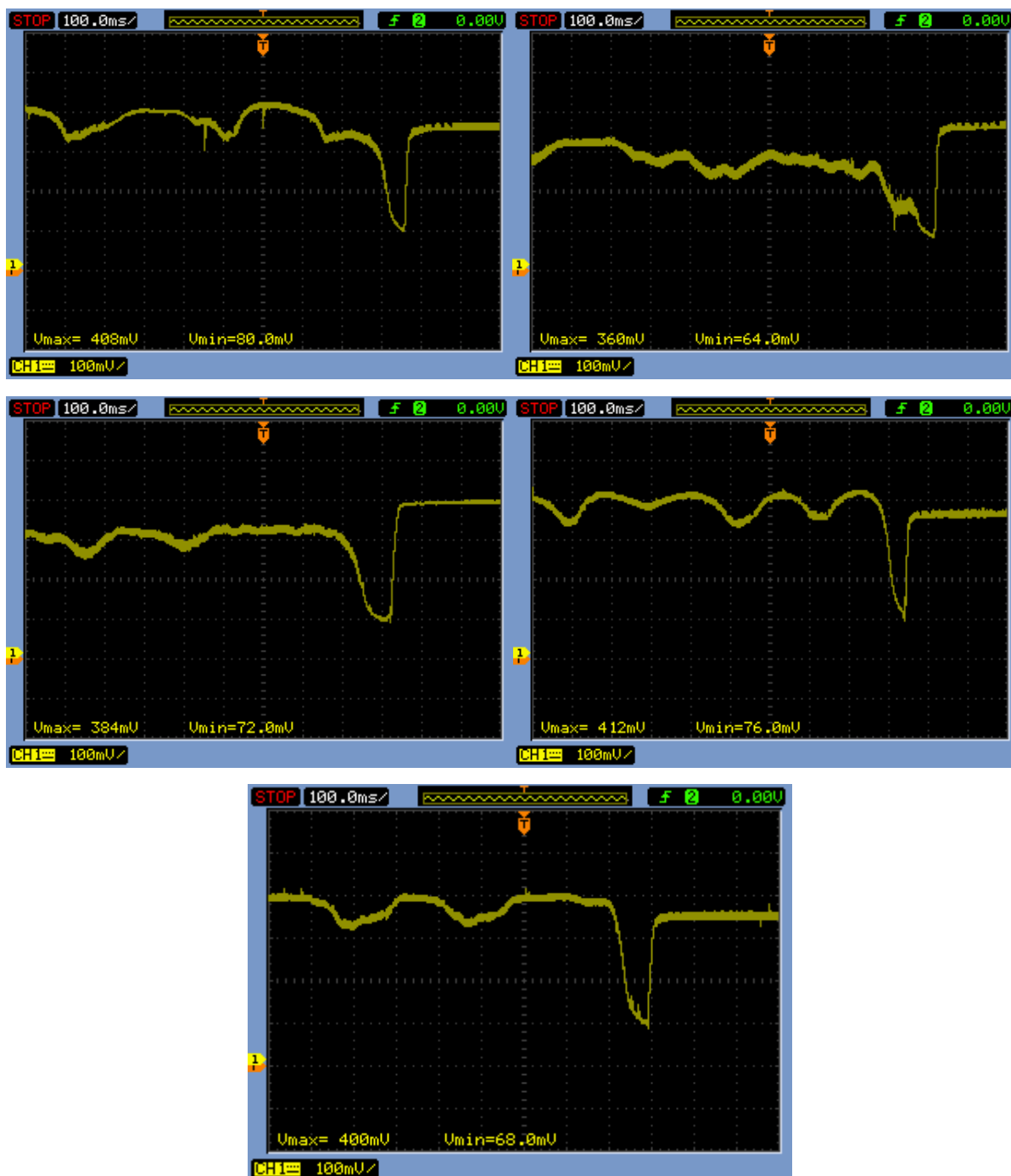


Lado B:

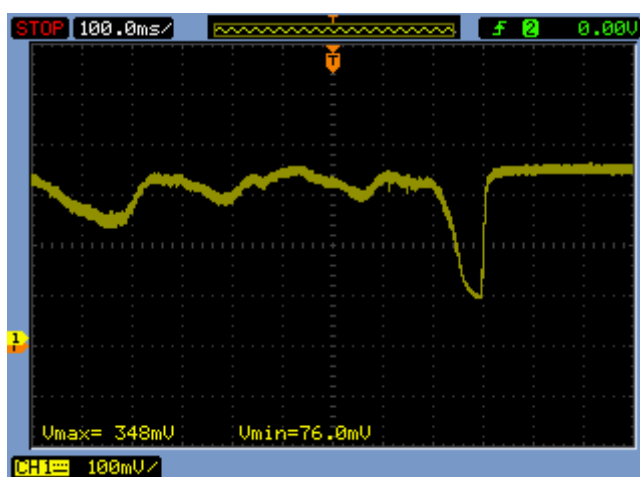
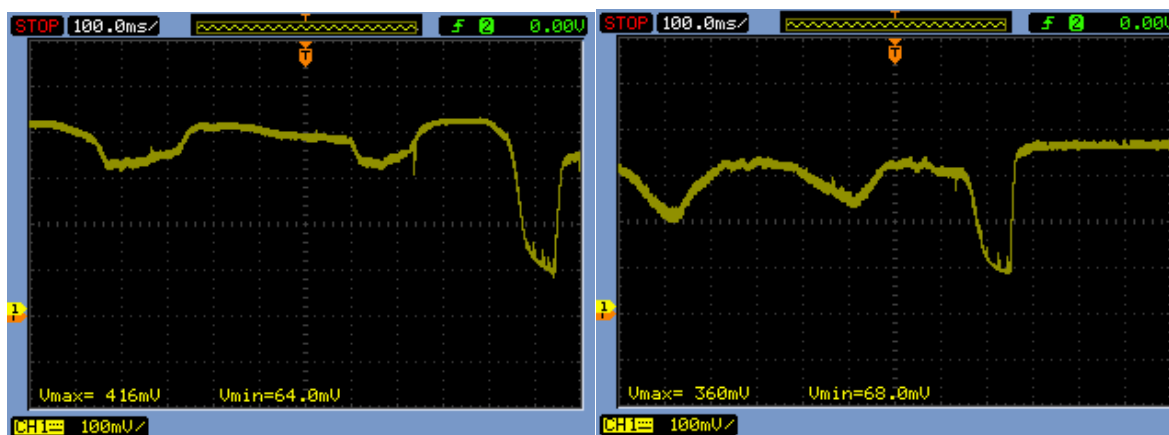
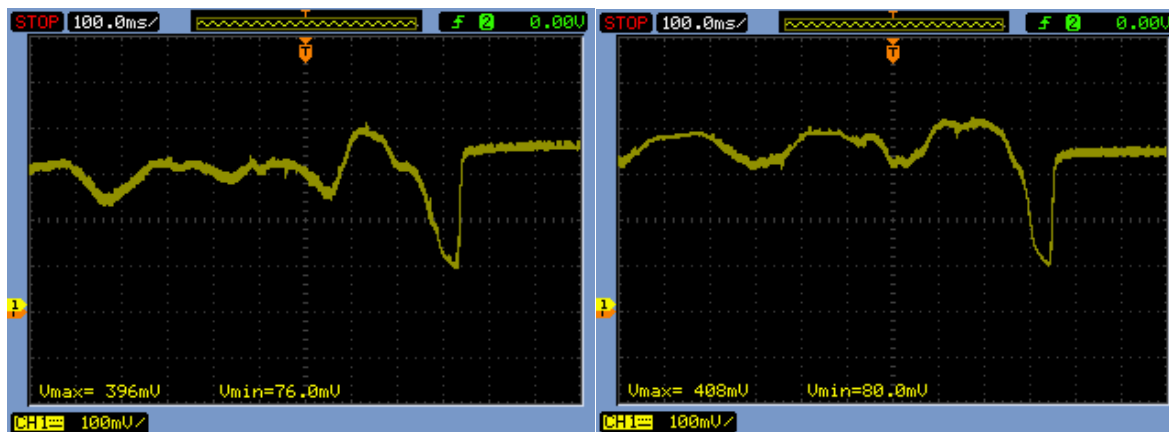


## APÊNDICE F - MEDIÇÕES

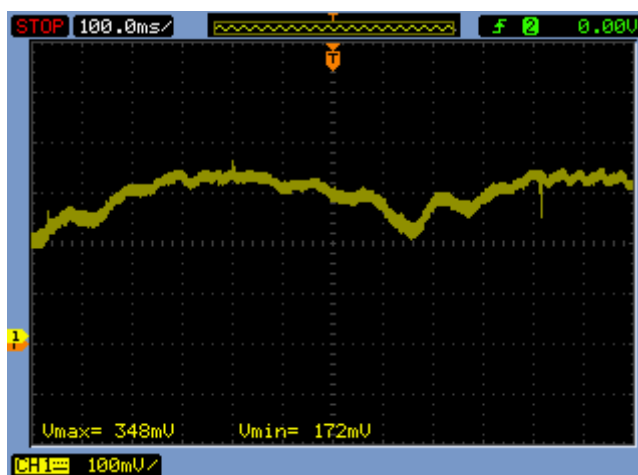
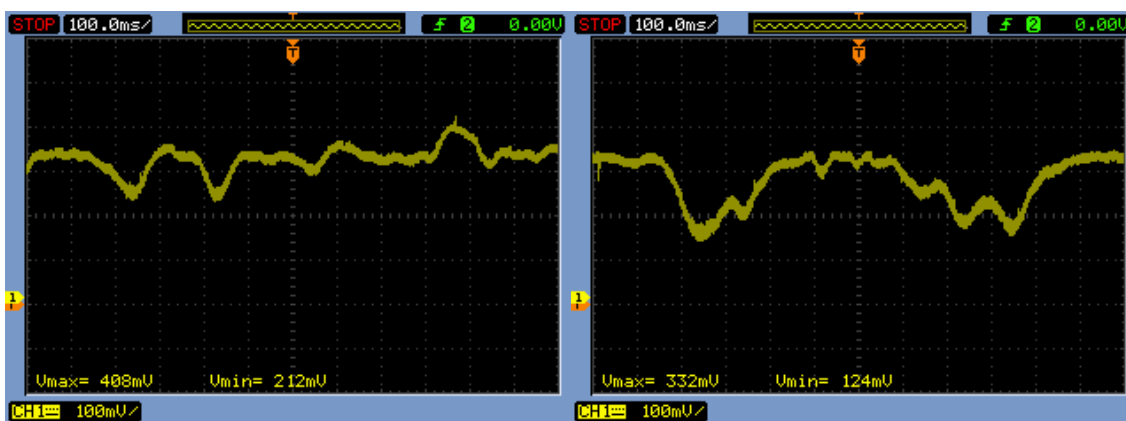
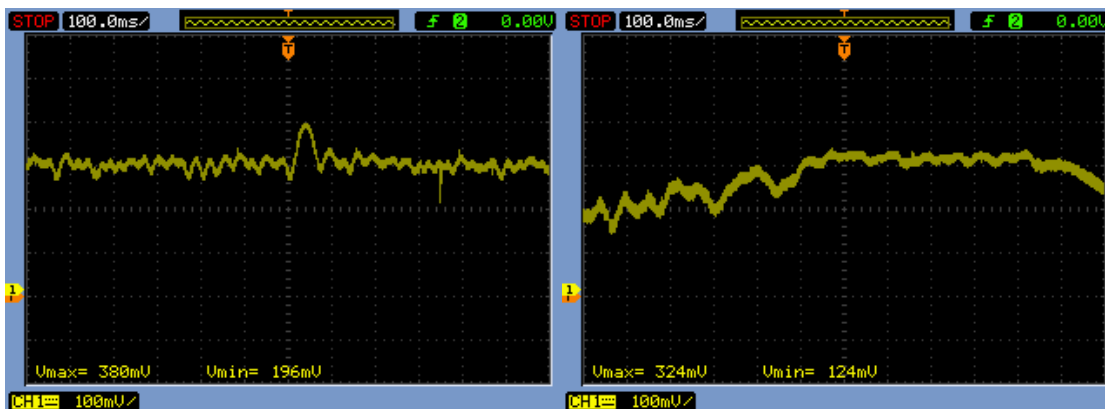
5g – Lado A



## 5g – Lado B



## 1g – Lado A



## 1g – Lado B

