

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Eletrônica

**Estudo e simulação de um controlador PID
aplicado em um sistema de suspensão
magnética de uma viga**

Autor: Igor de Alcantara Rabelo
Orientador: Dr. Gerardo Antonio Idrobo Pizo

Brasília, DF
2022



Igor de Alcantara Rabelo

Estudo e simulação de um controlador PID aplicado em um sistema de suspensão magnética de uma viga

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Eletrônica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Eletrônica).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Dr. Gerardo Antonio Idrobo Pizo

Brasília, DF

2022

Igor de Alcantara Rabelo

Estudo e simulação de um controlador PID aplicado em um sistema de suspensão magnética de uma viga/ Igor de Alcantara Rabelo. – Brasília, DF, 2022-
107 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Gerardo Antonio Idrobo Pizo

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2022.

1. Estudo do maglev. 2. Controle de sistemas. I. Dr. Gerardo Antonio Idrobo Pizo. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Estudo e simulação de um controlador PID aplicado em um sistema de suspensão magnética de uma viga

CDU 02:141:005.6

Igor de Alcantara Rabelo

Estudo e simulação de um controlador PID aplicado em um sistema de suspensão magnética de uma viga

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Eletrônica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Eletrônica).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 10 de Março de 2022:

Dr. Gerardo Antonio Idrobo Pizo
Orientador

Dr(a). Gabriela Cunha Pôssa
Convidado 1

Dr. Jones Yudi Mori Alves da Silva
Convidado 2

Brasília, DF
2022

Agradecimentos

Quero agradecer primeiro a Deus, que ao longo de toda a minha jornada acadêmica, ou melhor de toda a minha vida, tem feito maravilhas para comigo. Só pelo fato de eu acordar todos os dias é graças as Suas grandes misericórdias que se renovam a cada dia. Sou eternamente grato por isso.

Quero agradecer também aos meus pais que me ajudaram dando apoio e proporcionaram todo sustento possível, tanto emocional quanto material ao longo da minha vida, inclusive a acadêmica. Agradeço a minha querida noiva Giuliana Paixão, por todo apoio, compreensão e palavras que me encorajaram de uma forma grandiosa e por todo cuidado e carinho que tem demonstrado nesses dias difíceis. Agradeço também a minha irmã, por sempre se preocupar pelo meu desempenho quanto as matérias e sempre tentar me animar pra continuar.

Agradeço a todos os meus amigos da faculdade que estiveram comigo ao longo desses 5 anos. Com eles eu pude compartilhar ansiedades e medos diante a cada obtáculo e dificuldades ao longo da faculdade. Quero agradecer aos meus amigos da igreja, em especial ao Gustavo Bessoni, amigo e irmão, sempre mostrou preocupação quanto a minha vida, principalmente acadêmica.

Enfim, agradeço ao meu professor e orientador, Dr. Gerardo, que me ajudou sempre com palavras de conforto quando o medo de não conseguir entregar falava mais alto. Agradeço pelo imenso apoio e também por diversas dicas técnicas que foram de grande utilidade na minha vida acadêmica. Agradeço pelo apoio que ele me concedeu para fazer parte desse projeto tão importante para o desenvolvimento de novas tecnologias.

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,
mas transformai-vos pela renovação da mente,
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*

Resumo

Com o desenvolvimento da tecnologia, o sistema de levitação magnética tem sido cada vez mais utilizado em diversos ramos da engenharia. Este trabalho consistiu em estudar e simular um sistema de levitação magnética (maglev) utilizando um controlador PID (Proporcional Integrativo Derivativo) para linearizar e estabilizar a planta do sistema físico. Foram desenvolvidos estudos acerca da modelagem do eletroímã que funciona como atuador no sistema, sensores de posição para simular a realimentação do sistema maglev e simular a medição da posição da viga e, a modelagem matemática de todo o sistema utilizando o software MATLAB/Simulink. Inicialmente foram realizados levantamentos bibliográficos para compreender o funcionamento e aplicações de um maglev. Logo em seguida, foi realizada a modelagem do eletroímã de acordo com as características essenciais para realizar a simulação do maglev da viga. Assim, encontrou-se o modelo do sensor Hall com as devidas configurações obtidas do datasheet, para simular a posição da viga, logo, foi realizado o cálculo do ganho e, com isso, a modelagem matemática do sistema como um todo, para simular o controlador PID em malha fechada em tempo contínuo e discreto. Assim, o sistema foi linearizado e estabilizado ao redor do ponto de equilíbrio de aproximadamente $\theta = 0.001$ rad, com isso, foi utilizado o método de sintonia de Ziegler-Nichols e o método por tentativa e erro para ajustar o controle do sistema por meio de simulações realizadas no MATLAB/Simulink. Deste modo, foram realizados três ajustes para estabilizar o sistema, sendo que o último, com os ganhos de $K_p = 37.15$, $K_i = 87.09$, $K_d = 3.82$, apresentou o melhor resultado, em relação as oscilações que foram diminuídas drasticamente, tornando os pólos reais, cujo valores foram de -1626.5, -23.47, -14.26, -5.78, fazendo o sistema se comportar com maior rapidez devido aos pólos estarem distantes do eixo imaginário no plano (s) e, conseqüentemente aos parâmetros de regime permanente nulo, sobresinal (overshoot) de aproximadamente $M_p = 10.6\%$, tempo de subida de $T_r = 0.036$ s e o tempo de acomodação $T_s = 0.86$ s. Diante disso, o sistema tornou-se estável em cima da posição angular máxima simulada, cujo, valor foi de $\theta = 0.028$ rad. Por fim, foi realizada a discretização da equação de malha fechada do terceiro ajuste com período de amostragem $T_{amostragem} = 0.02$ s e desenvolvida a equação de diferenças para que em trabalhos futuros seja implementado um algoritmo em um computador/microcontrolador.

Palavras-chaves: Simular. Maglev viga. Controlar sistemas. Suspensão magnética.

Abstract

With the development of technology, the magnetic levitation system has been increasingly used in various branches of engineering. This work consisted of studying and simulating a magnetic levitation (maglev) system using a PID (Proportional Integrative Derivative) controller to linearize and stabilize the physical system's plant. Studies were developed about the modeling of the electromagnet that works as an actuator in the system, position sensors to simulate the feedback of the maglev system and simulate the measurement of the position of the beam, and the mathematical modeling of the entire system using MATLAB/Simulink software. Initially, a literature survey was conducted to understand the operation and applications of a maglev. Next, the electromagnet was modeled according to the essential characteristics to perform the beam maglev simulation. Then, the Hall sensor model was found with the proper settings obtained from the datasheet, to simulate the position of the beam, then, the gain calculation was performed and, with this, the mathematical modeling of the system as a whole, to simulate the closed loop PID controller in continuous and discrete time. So, the system was linearized and stabilized around the equilibrium point of approximately $\theta = 0.001$ rad, and the Ziegler-Nichols tuning method and the trial-and-error method was used to adjust the system control through simulations performed in MATLAB/Simulink. Thus, three adjustments were made to stabilize the system, and the last one, with the gains of $K_p = 37.15$, $K_i = 87.09$, $K_d = 3.82$, presented the best result, regarding the oscillations that were drastically decreased, making the real poles, whose values were -1626.5, -23.47, -14.26, -5.78, making the system behave faster due to the poles being far from the imaginary axis in the (s) plane and, consequently, the permanent regime parameters of zero, overshoot of approximately $M_p = 10.6\%$, rise time of $T_r = 0.036$ s and the settling time $T_s = 0.86$ s. Given this, the system became stable over the simulated maximum angular position, whose value was $\theta = 0.028$ rad. Finally, the discretization of the closed loop equation of the third setting with sampling period $T_{sampling} = 0.02$ s was performed and the difference equation was developed for future works, to be implemented an algorithm on a computer/microcontroller.

Key-words: Simulate. MagLev Beam. Systems Controllers. Magnetic Suspension.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Sistema de levitação magnética da viga (Imagem modificada de PEGUEROS et al. 2017)	28
Figura 2 – Sistema de levitação magnética da viga com o imã de neodímio fixado na extremidade (Imagem modificada de PEGUEROS et al. 2017)	33
Figura 3 – Exemplo de três tipos de sistema de levitação magnética (Fonte: WINIK 2015)	34
Figura 4 – Levitação eletrodinâmica (Fonte: GOMES; STEPHAN 2004)	35
Figura 5 – Levitação supercondutora (Fonte: GOMES; STEPHAN 2004)	35
Figura 6 – Levitação eletromagnética (Fonte: GOMES; STEPHAN 2004)	36
Figura 7 – MagLev Cobra desenvolvido pela LASUP na universidade Federal do Rio de Janeiro (Fonte: MOURA 2006)	37
Figura 8 – Implante ventricular desenvolvido com tecnologia MAGLEV (Fonte: CARDOSO 2015)	38
Figura 9 – Dimensões do eletroimã (Figura modificada de SHU’AIBU; ADAMU)	42
Figura 10 – Sensor de efeito hall (Fonte: ALLEGRO 2017)	48
Figura 11 – Sistema físico completo de levitação magnética da viga (Imagem modificada de: PEGUEROS et al. 2017)	51
Figura 12 – Diagrama de bloco do controlador PID em malha aberta (Figura modificada de NISE 2020)	57
Figura 13 – Diagrama de bloco do controlador PID em malha fechada (Figura modificada de KATSUHIKO 2010)	58
Figura 14 – Diagrama de bloco do controlador PID do sistema (Fonte: SANTOS 2011)	59
Figura 15 – Gráfico do regime permanente e transitório (Figura modificada de BAYER; ARAÚJO 2016)	60
Figura 16 – Curva em S do primeiro método de Ziegler-Nichols (Fonte: KATSUHIKO 2010)	62
Figura 17 – Oscilação sustentada com período P_{cr} (em segundos) (Fonte: KATSUHIKO 2010)	63
Figura 18 – Pólos na resposta em malha fechada (Fonte: BOJORGE 2017)	64
Figura 19 – Simulação do ganho do sensor de posição da viga (Figura modificada de: GOMES 2016)	68
Figura 20 – Simulação da relação posição da viga e corrente do eletroimã.	69
Figura 21 – Simulação da relação posição da viga e constante de proporcionalidade da força eletromagnética.	70
Figura 22 – Gráfico LGR da planta sem o controlador PID.	71

Figura 23 – Curva do Ganho Crítico.	72
Figura 24 – LGR do sistema físico com o compensador PID no primeiro ajuste. . .	73
Figura 25 – Simulação do Sistema Físico com o compensador PID no primeiro ajuste.	73
Figura 26 – LGR do sistema físico com o compensador PID no segundo ajuste. . .	74
Figura 27 – Simulação do sistema físico com o compensador PID no segundo ajuste.	75
Figura 28 – LGR do sistema físico com o compensador PID no terceiro ajuste. . . .	76
Figura 29 – Simulação do sistema físico com o compensador PID no terceiro ajuste.	77
Figura 30 – Diagrama de Bode do sistema físico simulado com o compensador PID no terceiro ajuste.	78
Figura 31 – Curva discretizada do sistema físico simulado com o compensador PID no terceiro ajuste.	80
Figura 32 – Diagrama de blocos do Sistema Físico com o compensador PID no terceiro ajuste na forma direta II (Imagem modificada de HAYKIN 2001).	81
Figura 33 – Diagrama de blocos do Sistema Físico com o compensador PID no terceiro ajuste para implementar em um microcontrolador (Figura mo- dificada de LEMOS 2004).	81

Lista de tabelas

Tabela 1 – MUNIZ 2017 mostra o efeito dos parâmetros de um sistema em malha fechada.	57
Tabela 2 – Efeito dos ganhos devido as alterações dos parâmetros de um sistema em malha fechada (Fonte: MUNIZ 2017)	61
Tabela 3 – Tabela de Ziegler-Nichols em malha fechada (Fonte: KATSUHIKO 2010)	62
Tabela 4 – Arranjo de Routh (Fonte: SALVARANI 2015)	65
Tabela 5 – Medição da tensão do sensor de posição em função da distância.	68
Tabela 6 – Parâmetros de simulação do sistema físico.	70
Tabela 7 – Valores dos ganhos e parâmetros simulados.	77
Tabela 8 – Valores dos pólos e zeros encontrados pelas simulações.	78

Lista de abreviaturas e siglas

MAGLEV	Magnetic Levitation
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
PID	Proporcional Integral Derivativo
PI	Proporcional Integral
PD	Proporcional Derivativo
P	Proporcional
LGR	Lugar Geométrico das Raízes
LASUP	Laboratório de Aplicações de Supercondutores
MMF	Força Magneto Motora
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
PA	Progressão Aritmética
FE	Fator de Empilhamento

Lista de símbolos

μ_0	Permeabilidade do espaço livre
B	Magnitude do campo magnético
A_s	Área da superfície dos pólos
d_s	Diâmetro da superfície polar
r_s	Raio da superfície pólar
$e(t)$	Sinal de erro variando com o tempo
F_{max}	Magnitude da força máxima em materiais ferromagnético
i	Corrente
L_d	Comprimento no entreferro
N	Números de voltas
F_{mag}	Magnitude da força magnética
P_{grav}	Magnitude do peso da gravidade
Φ_B	Fluxo total
d_{fio}	Diâmetro do fio
T	Tesla
A	Ampere
A_c	Área do cilindro
r_c	raio do cilindro
l_c	Comprimento do cilindro
L_d	Distância no entreferro
W	Weber
H	Magnitude da força de magnetização
L	Indutor

R	Resistência
V	Tensão
g	Gravidade
r	Centro de massa da viga
l	Distância do centro da viga ao centro do imã de neodímio
θ	Ângulo da viga com a horizontal
C_e	Constante de proporcionalidade da força eletromagnética
u	Entrada de tensão aplicada ao sistema da viga
J	Momento de inércia da viga
x_1	Valor próximo para o ponto de equilíbrio
Ω	Ohm
∞	Infinito
$r(t)$	Ação de controle variando com o tempo
r_0	Valor base da ação de controle
T_r	Tempo de subida
M_p	Overshoot
$T_{amostragem}$	Período de amostragem
K_p	Ganho proporcional
K_d	Ganho derivativo
K_i	Ganho integrativo
T_i	Tempo integral
T_d	Tempo derivativo
K_{cr}	Ganho crítico
P_{cr}	Período crítico
m	Massa
h	Hora

km	kilômetros
\cdot	Multiplicação
\div	Divisão
\propto	Proporcional a
α	Ângulo que o fluxo magnético faz com a superfície

Sumário

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Definição do problema	28
1.2	Solução do problema	29
1.3	Objetivos	29
1.3.1	Objetivo geral	29
1.3.2	Objetivos específicos	30
1.4	Organização do trabalho	30
I	ASPECTOS GERAIS	31
2	SISTEMA DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA	33
2.1	Levitação Magnética (MAGLEV)	33
2.2	Tipos de Levitação Magnética	34
2.3	Levitação Eletrodinâmica - EDL	34
2.4	Levitação Supercondutora - LMS	35
2.5	Levitação Eletromagnética - EML	36
2.6	Aplicações da Levitação Magnética	36
2.6.1	MagLev Rio de Janeiro	36
2.6.2	Bomba Artificial de Sangue	37
2.7	Considerações finais	38
3	CONTRUÇÃO DO ELETROIMÃ	41
3.1	Intensidade magnética do Eletroimã	41
3.2	Intensidade atrativa do Eletroimã	41
3.3	Determinação do comprimento do fio necessário	44
3.4	Resistência e indutância do fio	45
3.5	Considerações finais	46
4	SENSOR DE POSIÇÃO	47
4.1	Funcionamento do Sensor Hall	47
4.2	Sensor hall A1308	48
4.3	Considerações finais	48
5	FUNDAMENTOS DO SISTEMA MAGLEV DA VIGA	51
5.1	Sistema de levitação magnética da viga	51
5.2	Equações do modelo não-linear	51

5.3	Linearização do sistema	53
5.4	Considerações finais	54
6	FUNDAMENTOS DE CONTROLE	55
6.1	Modos de controle	55
6.1.1	Modo proporcional	55
6.1.2	Modo integral	56
6.1.3	Modo derivativo	56
6.1.4	Malha aberta	57
6.1.5	Malha fechada	58
6.2	Estrutura do controlador PID	58
6.3	CrITÉRIOS de desempenho	59
6.3.1	T_r - Tempo de subida	60
6.3.2	M_p - Percentual de sobressinal (Overshoot)	60
6.3.3	T_s - Tempo de estabilização ou acomodação	60
6.3.4	L - Atraso ou tempo morto	60
6.3.5	Tabela do efeito dos parâmetros	61
6.4	Método de sintonia Ziegler-Nichols - Z&N	61
6.4.1	Primeiro método de Z&N	62
6.4.2	Segundo método de Z&N	62
6.5	Equações simplificada de controle magLev da viga	63
6.6	Estabilidade	64
6.7	CrITÉRIO de estabilidade de Routh-Hurwitz	65
6.8	Estabilidade do ponto de equilíbrio	66
6.9	Considerações finais	66
7	CÁLCULOS E SIMULAÇÕES	67
7.1	Ganho do sensor de posição - K_{SH}	67
7.2	Constante de força eletromagnética - C_e	68
7.3	Simulação do controlador PID	70
7.3.1	Simulação da planta do sistema	71
7.3.2	Encontrando K_{cr} e P_{cr}	71
7.3.3	O primeiro ajuste utilizando a sintonia de Z&N	72
7.3.4	O segundo ajuste do controlador PID	74
7.3.5	O terceiro ajuste do controlador PID	75
7.3.6	Resumo dos parâmetros	77
7.3.7	Diagrama de Bode	78
7.4	Análise da estrutura PID em tempo discreto	79
7.4.1	Transformando Função de Transferência em Equação de Diferenças	79
7.5	Considerações finais	82

II	ASPECTOS FINAIS	83
8	CONCLUSÃO	85
8.1	Trabalhos Futuros	86
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICES	95
	APÊNDICE A – MODELAGEM MATEMÁTICA DO ELETROÍMÃ	97
	APÊNDICE B – PLANTA LINEARIZADA UTILIZANDO O MÉ- TODO DE ESPAÇO DE ESTADOS E DOS GA- NHOS PID	99
	APÊNDICE C – GRÁFICO DA POSIÇÃO ANGULAR E CORRENTE DO ELETROÍMÃ	101
	APÊNDICE D – CONSTANTE DA FORÇA ELETROMAGNÉTICA - CE	103
	APÊNDICE E – PID CONTÍNUO E DISCRETO REALIMENTADO COM O GANHO DO SENSOR	105
	APÊNDICE F – GANHO DO SENSOR	107

1 Introdução

O magnetismo é a propriedade que alguns corpos metálicos têm de atrair e repelir outros metais através de um ímã (D. MICHAELIS, 2019). Desde os tempos antigos os fenômenos da natureza elétricos e magnéticos despertaram curiosidades no mundo e isso ajudou no desenvolvimento de estudos realizados a séculos atrás. Foram obtidas através de experimentos, leis matemáticas que ajudaram no avanço do eletromagnetismo, e isso ocorreu devido aos esforços realizados por grandes cientistas da época como Maxwell, Faraday, Coulomb, Amperè entre outros. Com isso, James Clerck Maxwell postulou quatro leis chamadas equações de Maxwell, que é um pequeno conjunto de leis experimentais encontradas pelos cientistas citados anteriormente (ASSIS, 1992) e que ajudaram bastante no desenvolvimento de novas pesquisas em eletromagnetismo.

Ao longo de vários séculos o homem veio adquirindo grandes conhecimentos através de estudos e pesquisas, conseqüentemente houve um inquestionável avanço tecnológico em várias áreas utilizando o eletromagnetismo. Houve grandes avanços em importantes áreas como a da medicina, transportes(principalmente veículos ferroviários MAGLEV), telecomunicações, equipamentos industriais, etc, fazendo-se possível obter vários tipos de equipamentos utilizando o eletromagnetismo (IMAMAGNETS, 2019).

Com esses avanços tecnológicos, os estudiosos descobriram que dois campos magnéticos com a mesma polaridade podem sofrer o fenômeno de repulsão quando aproximados na mesma direção. Esse fenômeno também pode ser conhecido como levitação magnética - onde um corpo mantém uma certa distância em relação ao outro corpo sustentado apenas pela força magnética que compensa a força da gravidade - pode ocorrer quando os pólos de um ímã são iguais aos pólos de um eletroímã, esse último é possível controlar a intensidade do campo magnético aumentando ou diminuindo sua corrente de acordo com ARAÚJO; MÜLLER 2002 e PUDENZI, fazendo os dois corpos se manterem equidistantes um do outro.

Por meio do fenômeno da levitação magnética, foram definidas três técnicas que ficaram conhecidas, e são descritas logo a seguir. A técnica da levitação eletrodinâmica proposta para o trem de levitação japonesa JR-MagLev (FRANÇA, 2019), requer um eletroímã ou ímã permanente instalado no trem e bobinas supercondutoras fixadas nos trilhos, sendo que as bobinas necessita de uma refrigeração especial. A levitação supercondutora é a técnica utilizada no maglev Cobra e está em fase de experimento no Laboratório de Aplicações de Supercondutor (LASUP) na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e o funcionamento consiste em excluir o campo magnético de materiais supercondutores (diamagnéticos) fazendo com que seja diminuído o poder de levitação,

porém, cria uma melhor estabilidade evitando o uso de sistemas de controle (CABRAL, 2015). Por último é a técnica da levitação eletromagnética, que é encontrada no Transrapid desenvolvido na Alemanha, esta técnica consiste em um eletroímã que repele ou atrai um material ferromagnético e diferentemente da técnica por supercondutor, é necessário um sistema de controle pelo fato de tratar de um sistema não linear e instável (SUCENA; STEPHAN, 2012) (PEGUEROS et al., 2017) (CARDOSO, 2015), no qual, esta não linearidade e instabilidade é considerada uma desvantagem, porém a vantagem, é que o trem levita mesmo parado (COSTA, 2004).

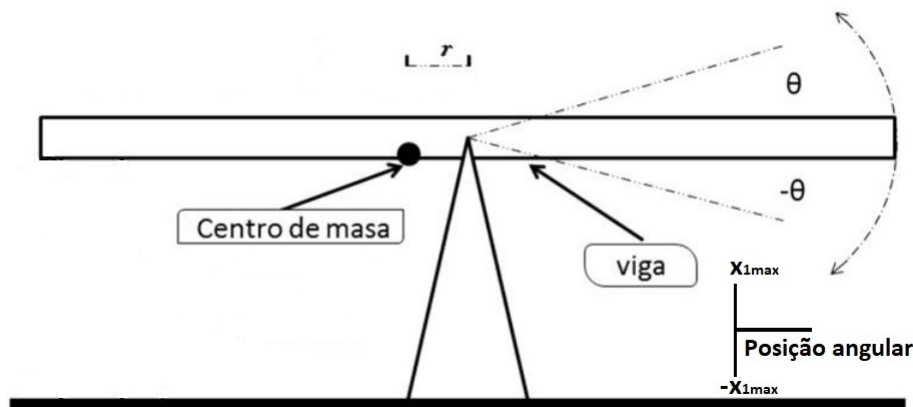


Figura 1 – Sistema de levitação magnética da viga (Imagem modificada de PEGUEROS et al. 2017)

Portanto, neste trabalho será abordada a técnica de levitação eletromagnética para realizar a levitação de uma viga apresentada na figura 1.

1.1 Definição do problema

A levitação magnética na maioria das vezes possui um sistema instável, pois, fazer um objeto levitar atuando contra a força da gravidade utilizando apenas a força magnética, possui diversas complicações. Sendo assim, esse é um dos principais objetivos que ao longo de vários anos, estudiosos buscam maneiras de como tornar o sistema o mais estável possível, fazendo testes com diversos sensores e sistemas de controle analógicos ou digitais (CARDOSO, 2015).

O sistema de levitação magnética é considerado não-linear. Assim, a grande dificuldade que se tem na análise de sistemas não-lineares é a limitação pela inexistência de soluções analíticas para a maioria dos casos (SANTOS, 2011). Sendo assim, a ênfase é dada ao estudo qualitativo das soluções. Para tratar esse problema é preciso realizar modelagens matemáticas do sistema e utilizar as equações adequadas em termos de linearização. No caso do sistema de levitação magnética, será preciso fazer a modelagem matemática do sistema considerando que ele é não-linear. Essa linearização, precisa ser

feita em relação a um ponto chamado, ponto de equilíbrio de acordo com [GOMES; SOTELO; STEPHAN 2004](#).

Assim sendo, é preciso utilizar um método de controle para melhorar a estabilidade do sistema viga-eletroimã. Este trabalho foi desenvolvido com base no artigo de [PEGUEROS et al. 2017](#) onde foi realizada uma análise do problema sobre a não-linearidade e instabilidade da levitação magnética da viga, e com isso, foi desenvolvida uma solução utilizando equações matemáticas e simulações do maglev da viga.

1.2 Solução do problema

As principais soluções para resolver os problemas encontrados, são realizar estudos bibliográficos sobre métodos eficazes para linearizar a planta do sistema e utilizar um controlador adequado para estabilizar o sistema instável.

É preciso, linearizar a planta em relação a um ponto de equilíbrio utilizando um método matemático e estabilizar o sistema através de técnicas de controle estabilizante, aproximando o sistema em relação ao ponto de equilíbrio ([PEGUEROS et al., 2017](#)) utilizando um controlador.

Em trabalhos desenvolvidos acerca da levitação magnética, são utilizadas diferentes técnicas de controle como o P (Proporcional), PI (Proporcional Integral), PD (Proporcional Derivativo), PID (Proporcional Integral Derivativo) e Lógica Fuzzy ([CARDOSO, 2015](#)) ([HORIZONTE, \)](#) ([JUNIOR, 2010](#)) ([LEMOS, 2004](#)).

Portanto, neste trabalho são realizados cálculos matemáticos e simulações utilizando a técnica do controlador PID que satisfaz a resposta necessária para um bom desempenho do projeto. Assim, de acordo com [HORIZONTE](#) o controlador PID faz o erro em regime permanente tender a zero, sendo que, os ganhos K_p (ganho proporcional), K_i (ganho integrador), K_d (ganho derivativo) podem ser ajustados usando o critério de Ziegler-Nichols e também utilizando o método por tentativa e erro tomando todos os cuidados necessários para que o sistema não torne lento ou instável ([SARAIVA, 2011](#)).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é utilizar um controlador PID para estabilizar o sistema de levitação magnética de uma viga. Também é preciso linearizar o sistema em torno de um ponto de equilíbrio utilizando um método matemático. Com isto são desenvolvidos levantamentos teóricos e simulações utilizando o controlador PID no sistema de levitação magnética da viga. Para isto, é preciso estudar o comportamento do sistema

físico da viga relacionando com o eletroímã e sensor de posição no processo de levitação magnética. Ao longo deste presente trabalho, são utilizados alguns trabalhos bibliográficos já existentes acerca deste tema para obter um melhor desenvolvimento e conclusões.

1.3.2 Objetivos específicos

- Obter a equação da planta do sistema através de uma modelagem matemática;
- Linearizar e estabilizar o sistema em torno de um ponto de equilíbrio;
- Extrair dados utilizando o MATLAB/Simulink dos tais parâmetros: overshoot, tempo de subida, tempo de acomodação, erro em regime permanente e pólos e zeros;
- Obter o melhor ajuste dos parâmetros e ganhos para boa estabilidade e rapidez do sistema;
- Transformar a função de transferência em tempo contínuo para o tempo discreto do melhor ajuste do sistema estabilizado em malha fechada.

1.4 Organização do trabalho

Capítulo 2 - Apresenta os modelos de levitação magnética e algumas aplicações.

Capítulo 3 - Apresenta os fundamentos do eletroímã no qual são realizados cálculos sobre a intensidade magnética e atrativa do eletroímã, comprimento do fio necessário para fabricar o eletroímã e a resistência e indutância do fio.

Capítulo 4 - Apresenta estudos acerca do funcionamento do sensor Hall e o modelo a ser utilizado.

Capítulo 5 - Apresenta o sistema maglev da viga, onde é realizado os cálculos do modelo não linear do sistema e em seguida a linearização.

Capítulo 6 - Apresenta os modos de controle PID, a estrutura do controle, os critérios de desempenho, o método utilizado de sintonia de Ziegler-Nichols, a equação simplificada de controle da viga, sua estabilidade com os pólos no plano (s) e a estabilidade de Routh-Hurwitz e a estabilidade ao redor do ponto de equilíbrio.

Capítulo 7 - Apresenta os cálculos e simulações do ganho de sensor de posição, da constante de força eletromagnética, dos três ajustes fino sendo que o primeiro utilizando a sintonia de Ziegler-Nichols, do controle em malha fechada do sistema com o PID e a análise em tempo discreto.

Capítulo 8 - Por fim, este capítulo apresenta as conclusões obtidas por meio deste trabalho e os trabalhos futuros.

Parte I

Aspectos Gerais

2 Sistema de Levitação Magnética

Neste capítulo, são explicados alguns conceitos relacionados a levitação magnética e aos tipos, como: levitação eletrodinâmica, levitação por supercondutor e levitação eletromagnética. Também são descritas algumas aplicações da engenharia do maglev no dia a dia das pessoas.

2.1 Levitação Magnética (MAGLEV)

A levitação magnética é um fenômeno no qual uma força magnética é gerada por ímãs permanentes ou eletroímãs. Esta força eletromagnética, atua contra a força da gravidade fazendo com que certos tipos de materiais flutuem devido ao campo magnético exercendo a força de atração ou repulsão (MILHOMEM et al., 2010).

Este método consiste em uma passagem de corrente pelo eletroímã que gera uma força magnética contrária ao do ímã permanente (neste trabalho o ímã é fixado na viga como é mostrado na figura 2), isto faz o objeto suspender devido as forças repulsivas que atuam sobre a força peso e a força magnética do ímã de neodímio que atua como material ferromagnético. Este tipo de levitação requer um sistema que controle a corrente que passa pela bobina, isso ocorre porque o sistema é considerado instável. Para que a viga permaneça suspensa no ar e se mantenha estável é preciso de algo que mantenha o equilíbrio entre a força magnética da bobina e a força da gravidade, ou seja, é preciso estabilizar o sistema com uma técnica de controle (STEPHAN et al., 2002). Assim sendo, para que o sistema alcance equilíbrio em um determinado ponto, é utilizado um controlador, fazendo com que a viga não se aproxime da bobina ou da superfície devido as instabilidades do sistema.

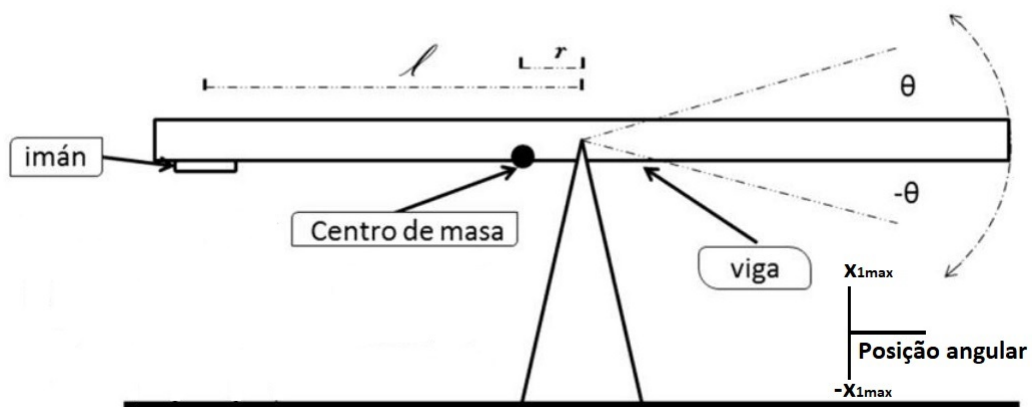


Figura 2 – Sistema de levitação magnética da viga com o ímã de neodímio fixado na extremidade (Imagem modificada de PEGUEROS et al. 2017)

A levitação magnética também é uma proposta dos trens da Alemanha, Transrapid que foi implementado na China. A Suíça também em seu projeto Swissmetro, emprega esta tecnologia (GOMES; SOTELO; STEPHAN, 2004). A figura 7 mostra o sistema de levitação eletromagnética que é utilizado no sistema de trens da Alemanha, que é chamado de Transrapid (MILHOMEM et al., 2010).

2.2 Tipos de Levitação Magnética

Os tipos de técnicas classificadas em levitação magnética são:

- Levitação Eletrodinâmica ou por repulsão Eletromagnética - EDL;
- Levitação Eletromagnética ou por Atração Eletromagnética - EML;
- levitação por Supercondução Magnética SQL;

Os tipos de levitação magnética são descritos a seguir para um melhor entendimento acerca do funcionamento de cada técnica e de alguns processos que ocorrem.

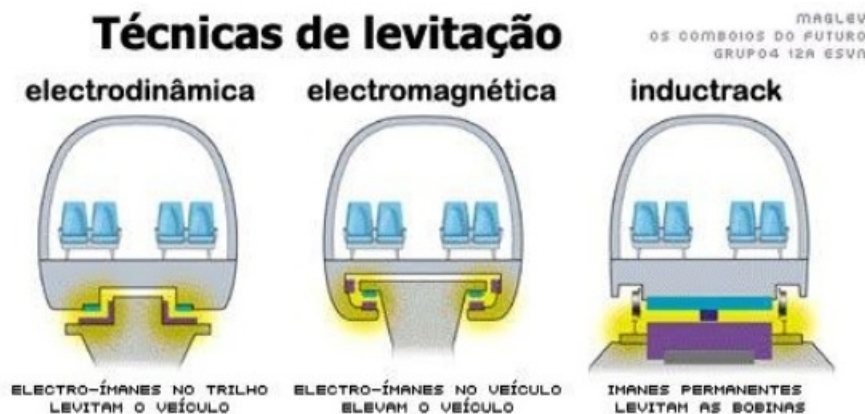


Figura 3 – Exemplo de três tipos de sistema de levitação magnética (Fonte: WINIK 2015)

Na figura 3 são mostrados os três tipos de levitação magnética (WINIK, 2015).

2.3 Levitação Eletrodinâmica - EDL

Esse tipo de levitação, mostrado na figura 4, requer o movimento de um campo magnético ao redor de um material condutor. Se um material magnético realizar um movimento sob uma lâmina condutora (alumínio por exemplo), são formadas correntes parasitas induzidas no condutor.

Estas correntes por sua vez, geram um outro campo magnético o qual, pela lei de Lenz, opor-se-á ao campo criado pelo material magnético (DIAS, 2010). A interação entre

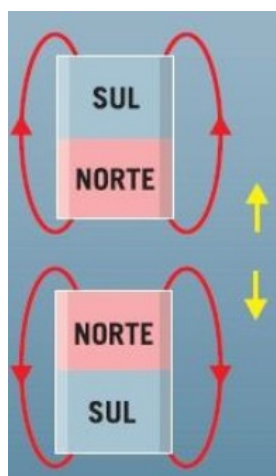


Figura 4 – Levitação eletrodinâmica (Fonte: GOMES; STEPHAN 2004)

estes dois gerará uma pressão magnética e logo uma força repulsiva no material magnético. Esta força é a responsável pela levitação do corpo. Uma outra força também existente neste modo de levitação, só que contrária ao movimento do material magnético, é a força de arrasto e origina-se devido a perdas ôhmicas na lâmina condutora (STEPHAN et al., 2002).

2.4 Levitação Supercondutora - LMS

A levitação magnética supercondutora se dá pela exclusão parcial do campo magnético no interior do supercondutor. A parte do campo que é aprisionada pelo material supercondutor é responsável pela alta estabilidade desse sistema de levitação (DIAS, 2010). Uma das vantagens da levitação supercondutora em relação à levitação eletrodinâmica e eletromagnética é a sua estabilidade gerada pelo efeito Pinning (FRANÇA, 2019).

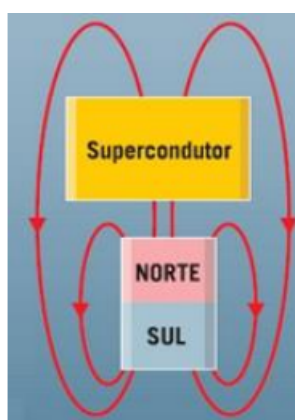


Figura 5 – Levitação supercondutora (Fonte: GOMES; STEPHAN 2004)

Devido a esta característica, a utilização de um mecanismo de controle, como o utilizado na levitação magnética, não se faz necessário (DIAS, 2010). Na figura 5 é

mostrado uma representação da levitação supercondutora.

2.5 Levitação Eletromagnética - EML

Nesta aplicação, o que é explorado é a força de atração que existe entre um ímã ou eletroímã e um material ferromagnético (GOMES; STEPHAN, 2004). O objeto é mantido em um ponto de equilíbrio instável, sendo atraído ora para cima (com o eletroímã ligado), ora para baixo (por ação da gravidade), oscilando em torno da altura de levitação. A estabilização, neste caso, só é possível com uma malha de realimentação e regulador devidamente sintonizado (SOUSA et al., 2016).



Figura 6 – Levitação eletromagnética (Fonte: GOMES; STEPHAN 2004)

Na figura 6 é mostrado uma representação da levitação eletromagnética.

2.6 Aplicações da Levitação Magnética

A seguir são descritas duas aplicações da levitação magnética no dia a dia. A primeira já é usada em alguns países para a locomoção mais rápida de pessoas e a segunda aplicação está em fase de estudos e dependendo dos avanços científicos será uma grande conquista para medicina.

2.6.1 MagLev Rio de Janeiro

O mundo moderno precisa de transportes eficientes, que não sejam muito poluidores e que sejam práticos e baratos. Esse é o tipo de transporte que as pessoas querem nos centros urbanos (DAVID et al., 2006).

Um exemplo de um transporte com essas características, é o MAGLEV Cobra desenvolvido pelo Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP) que fica na

Universidade Federal do Rio de Janeiro(UFRJ), esse trem figura 7 foi criado pelo método de levitação por supercondutores. As características que ele apresenta é a velocidade de 70 Km/h, curvas de raio de 30 metros e rampas de 15%. Além de ser um veículo com baixo ruído, podendo ser alimentado pela rede elétrica, com custo de construção e manutenção bem baratos (DAVID et al., 2006) e também com um bonito design, alta tecnologia e com alto fator de preservação ambiental. O nome MAGLEV Cobra foi dado devido a movimentação do trem que assemelha-se com uma serpente (SOUSA et al., 2016).

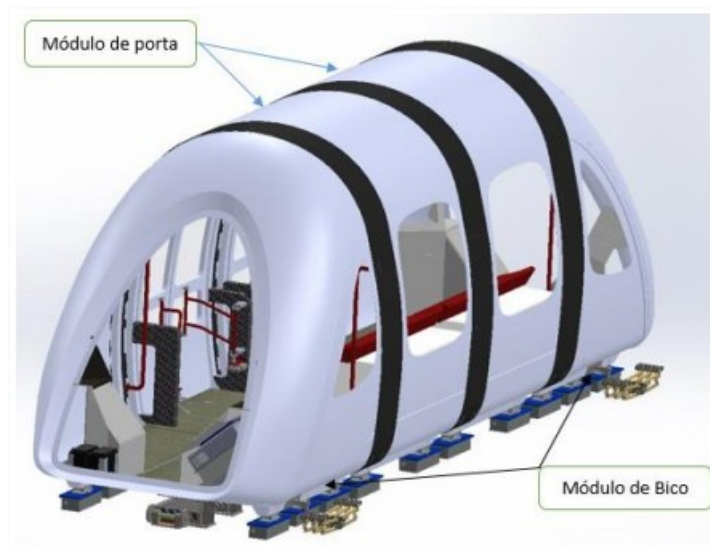


Figura 7 – MagLev Cobra desenvolvido pela LASUP na universidade Federal do Rio de Janeiro (Fonte: MOURA 2006)

O projeto MAGLEV Cobra teve quatro categorias acerca de sua implementação: A primeira parte foi a construção de um protótipo em escala reduzida. A segunda parte foi a construção de um protótipo funcional para demonstrar a viabilidade técnica do projeto real, essa parte ainda foi desenvolvida em laboratório. A terceira parte foi a construção de um protótipo operacional que permite realizar operações semanalmente em uma linha de 200 m de extensão para estudantes da UFRJ. A quarta e última parte, esta é a mais recente, que consiste na construção de uma linha de 5 Km de efetivo transporte urbano no campus (SOUSA et al., 2016).

2.6.2 Bomba Artificial de Sangue

A insuficiência cardíaca é considerada uma grave doença que atinge milhões de pessoas todos os anos. O transplante cardíaco é um excelente método para tratar essa doença, porém, há uma escassez enorme de pessoas que aceitam fazer doações deste órgão. Sendo assim, o desenvolvimento de bombas cardíacas artificiais, tornou-se de suma importância no tratamento dessa doença (WU; WANG; LV, 2011).

Estudos e pesquisas nessa área andam crescendo constantemente, e com isso já é possível identificar um grande avanço nessa área. Nos últimos anos pesquisadores realizaram testes em suspensores magnéticos e impulsores da bomba de fluxo de sangue e obtiveram poucos resultados. Essas bombas artificiais evitam problemas de fricção e a falta de lubrificação, isso é interessante, pois, ocorre o aumento de vida útil do equipamento e faz reduzir os danos nas células de sangue (CARDOSO, 2015).

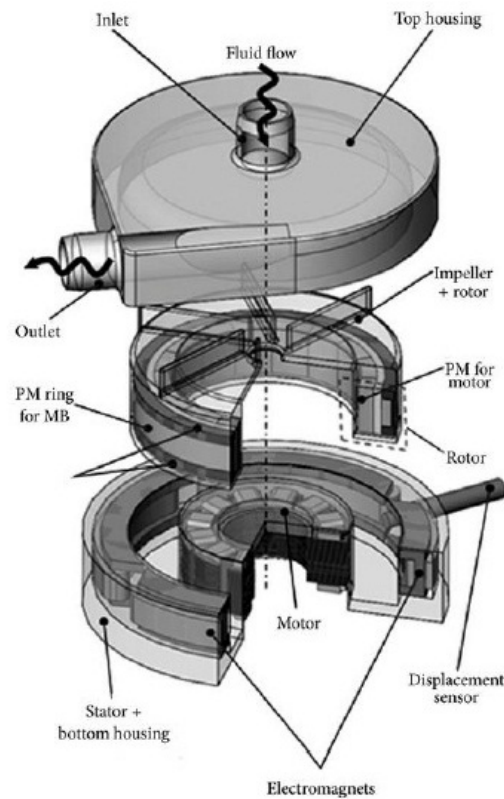


Figura 8 – Implante ventricular desenvolvido com tecnologia MAGLEV (Fonte: CARDOSO 2015)

Essas bombas artificiais são basicamente constituídas por um rotor suspenso por um mancal magnético permanente radial e mancal magnético ativo axial único. Porém a rigidez e o amortecimento não são capazes de resistir a perturbação (WU; WANG; LV, 2011). Na figura 8 é mostrado um implante ventricular MAGLEV (CARDOSO, 2015).

2.7 Considerações finais

Os três tipos de levitação magnética são utilizados para o mesmo propósito, que é o de fazer levitar um objeto. Portanto, no caso deste projeto, foram realizados levantamentos bibliográficos para realizar simulações acerca de um sistema de levitação eletromagnética, no qual, o seu principal atuador é um eletroímã que é utilizado para levitar um material ferromagnético, a saber, um ímã de neodímio fixado em uma viga. Com o avanço de

estudos relacionados ao eletromagnetismo e mais especificamente aos tipos de maglev, hoje é possível encontrar diversas aplicações no dia a dia e em grande quantidade de áreas envolvendo: a construção civil, a medicina, os meios de transportes etc.

3 Construção do Eletroímã

Este capítulo é escrito baseado no trabalho publicado pelo [RAJESHKANNA 2012](#), em que é explicado, de forma detalhada, os passos da construção do eletroímã, incluindo os cálculos e as explicações teóricas.

3.1 Intensidade magnética do Eletroímã

Um eletroímã produz um campo magnético gerado pelo fluxo de uma corrente elétrica. Quando essa corrente cessa o campo magnético desaparece. Uma das vantagens dos eletroímãs em relação aos imãs permanentes é que pode-se manipular o campo magnético variando a quantidade de corrente elétrica. O fornecimento contínuo de corrente elétrica é necessário para manter o funcionamento do campo magnético. Sendo assim, o poder de atração de um eletroímã é a capacidade de atravessar materiais ferromagnéticos a uma determinada distância ([THERAJA, 2008](#)), ([TIWARI; SARASVAT; PAL, 2014](#)). Na equação 3.1 é relacionado a magnitude da força máxima e a magnitude do campo magnético à área e a constante de permeabilidade.

$$F_{max} = \frac{B^2 \cdot A_s}{2 \cdot \mu_o} \quad (3.1)$$

Em que (F_{max}) é a magnitude da força máxima do eletroímã em Newton, (B) é a magnitude do campo magnético em Tesla, (A_s) é a área das faces do pólo em metros quadrados, (μ_o) é a permeabilidade do ar livre.

3.2 Intensidade atrativa do Eletroímã

Ao modelar um eletroímã é importante considerar a sua intensidade de atração conforme a necessidade do projeto. Para isso é necessário especificar o núcleo do eletroímã, a área do núcleo, o diâmetro e o comprimento necessário do enrolamento.

A principal característica dos materiais ferromagnéticos, é que a magnitude do campo B satura em 1.6T para a grande parte dos aços de núcleo de alta permeabilidade. Portanto, não é possível obter um campo magnético maior que 1.6T devido ao nivelamento do campo magnético tornando o campo não muito mais forte que esse valor.

A força máxima de retenção exercida por um eletroímã é dada pela equação 3.1. Com isso, a saturação estabelece um limite na força máxima por unidade de área central, ou pressão, que um eletroímã pode exercer. Dada a área do núcleo, a magnitude do campo

(B) necessário para uma determinada força pode ser calculado a partir da equação 3.1; se o campo for muito maior que $1.6T$ conseqüentemente um núcleo maior deve ser usado (WIKIPEDIA, 2004).

Uma vez que a magnitude do campo (B) necessário é conhecido, é possível calcular a magnitude da força motriz do magneto, a corrente e o número de voltas no enrolamento. Neste projeto, foi utilizado um eletroímã em formato (I) para levantar um objeto ferromagnético com comprimento de entreferro de $L_d = 60$ mm e de massa $m = 0.15$ kg, feito de haste de aço com as seguintes dimensões quando medido: diâmetro de $d_c = 15$ mm (diâmetro da haste), largura de $l_c = 60$ mm (comprimento da área de enrolamento), diâmetro da superfície das extremidades do enrolamento $d_s = 35$ mm. A figura 9 mostra o eletroímã e o objeto a ser levantado.

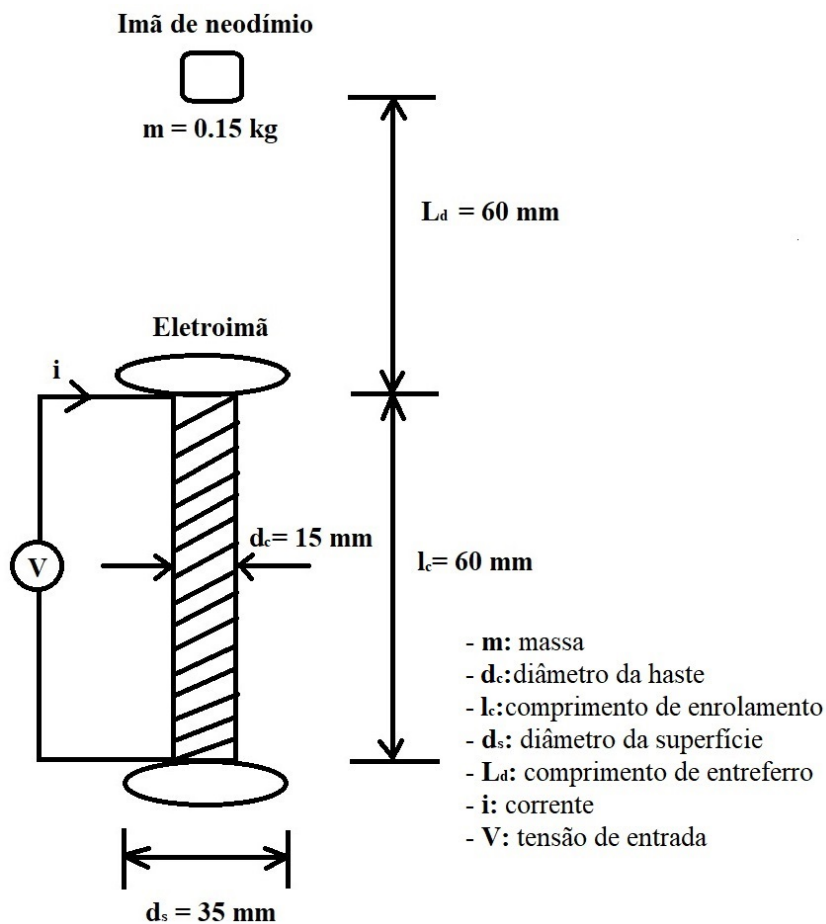


Figura 9 – Dimensões do eletroímã (Figura modificada de SHU'AIBU; ADAMU)

Quando o eletroímã é energizado, ele tende a atrair um material do tipo ferromagnético em torno da sua superfície. Ele só pode levantar a carga (objeto) quando a magnitude da força magnética é maior que a magnitude do peso gravitacional da carga. A magnitude do peso gravitacional é dada pela equação 3.2 (WIKIPEDIA, 2004).

$$P_{grav} = m \cdot g \quad (3.2)$$

Em que (m) é a massa da carga e (g) é a aceleração da gravidade cujo valor é $g = 9.81\text{m/s}^2$. Quando o peso da viga e a magnitude da força magnética estão em equilíbrio ambas são iguais, $P_{grav} = F_{mag}$. Portanto, a magnitude do peso gravitacional para o objeto de $m = 0.15\text{ kg}$ foi calculado usando a equação 3.2 e o resultado foi de $P_{grav} = 1.47\text{ N}$. Assim, para calcular a área da superfície do eletroimã foi utilizada a equação 3.3,

$$A_s = \frac{\pi \cdot d_s^2}{4} \quad (3.3)$$

Em que (d_s) é o diâmetro da superfície de valor igual a $d_s = 35\text{ mm}$. Realizando o cálculo com a equação 3.3 o valor da área da superfície obtido foi de $A_s = 9.62 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2$. Isolando o campo magnético da equação 3.1 e utilizando o valor encontrado da área A_s foi calculado a magnitude do campo magnético B obtendo o valor de $B = 62 \cdot 10^{-5}\text{ T}$ que também é denominado de densidade do fluxo no entreferro. A densidade do fluxo no entreferro é a mesma que a densidade do fluxo no núcleo para um entreferro muito pequeno sendo o fluxo total dado pela equação 3.4 (RAJESHKANNA, 2012), sendo que, o ângulo que o fluxo magnético faz com a superfície é $\alpha = 0^\circ$.

$$\Phi_B = B \cdot A_c \cdot \cos(\alpha) \quad (3.4)$$

Em que (A_c) é a área central do eletroimã. Como o eletroimã atua como um cilindro fechado; a área (A_c) é dada pela equação 3.5

$$A_c = 2\pi r_c l_c + 2\pi r_c^2 \quad (3.5)$$

Em que (r_c) é o raio do cilindro que é a metade do diâmetro do cilindro e o valor é de $r_c = 7.5\text{ mm}$ e (l_c) é o comprimento com valor de $l_c = 60\text{ mm}$. Com os valores do raio e do comprimento foi calculado a área do cilindro (A_c), no qual, o valor obtido foi de $A_c = 3.18 \cdot 10^{-3}\text{ m}^2$. O fluxo total Φ_B no cilindro é igual o fluxo no entreferro e realizando o cálculo, o valor obtido foi de $\Phi_B = 1.97 \cdot 10^{-6}\text{ W}$. A magnitude da força de magnetização (H) no entreferro é dada pela equação 3.6 (THERAJA, 2008).

$$H = \frac{B}{\mu_0} \quad (3.6)$$

O valor calculado da magnitude da força de magnetização foi de $H = 4.93 \cdot 10^4\text{ A} \cdot \text{T/m}$, assim, é possível calcular a magnitude da força magneto-motora (MMF) que é dada pela equação 3.7.

$$MMF = H \cdot L_d \quad (3.7)$$

Sendo que (L_d) é o comprimento do entreferro e o seu valor é $L_d = 0.06$ m. Logo, também foi realizado o cálculo da magnitude da força magneto motora e o valor obtido foi de $MMF = 2.96 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot T$.

Esta magnitude da força magneto-motora é o produto da corrente que vai ao redor do eletroímã e o número de voltas do fio que o compõe. Se uma das variáveis for escolhida, a outra variável pode ser calculada, portanto, se o número de voltas (N) escolhido for de 1200, então a corrente no eletroímã é dada pela equação 3.8.

$$i = \frac{MMF}{N} \quad (3.8)$$

Em que (N) é o número de voltas, com isso, através da equação 3.8 chegou-se no valor de corrente de $i = 2.47$ A. Finalmente, o poder de atração ou magnitude da força do eletroímã foi calculado utilizando a equação 3.1 como magnitude da força máxima do eletroímã $F_{max} = 4.87$ N. A tensão máxima de operação e a corrente são determinadas pelo fio usado para criar o campo magnético.

A escolha dos calibres dos fios para uma dada densidade de corrente é convenientemente feita em termos de cir mils por ampere. Um cir mils é a área de um círculo cujo diâmetro é de 1 mil (0.8032 mm) e geralmente é abreviado como cir. Para calcular os cir mils de qualquer fio, a corrente e a densidade da corrente precisam ser conhecidas antes de calcular e selecionar o fio.

A densidade de corrente de trabalho é padronizada entre números de 700, 1000, 1500, 2000 etc. Foi escolhido o valor de 1000 para calcular o cir mils de acordo com a equação 3.9 e o valor obtido foi de 2470.

$$Cir \text{ mils} = (Densidade \text{ de Corrente de Trabalho}) \cdot Corrente \quad (3.9)$$

Portanto, para o fio de cobre recozido padrão, unidade americana de bitola sólida americana (BS), foram extraídos os seguintes dados: Cir mil para o medidor número 17 é 2048 e o diâmetro do fio 17 (AWG) é de 1.2 mm (TORRES; ORTIZ, 2013). Esses valores aproximados são a base dos cálculos do eletroímã utilizado no projeto

3.3 Determinação do comprimento do fio necessário

O fio deve ser enrolado na estrutura cilíndrica do eletroímã. Os seguintes parâmetros conhecidos: o diâmetro da estrutura com valor de $d_c = 15$ mm, o comprimento do passo ou do molde com valor de $l_c = 60$ mm e o diâmetro do fio a ser enrolado é de $d_{fio} =$

1.2 mm. O número máximo de enrolamento na primeira camada foi 60 mm dividido por 1.2 mm obtendo $N = 50$ Voltas. O fator de empilhamento escolhido foi de $FE = 0.9$ e o número máximo de Voltas na primeira camada será 50 multiplicado por 0.9 que é igual a 45 Voltas. Se cada camada deve ter este número máximo de Voltas, então o número total de camadas necessárias para dar o número total de Voltas é dada pela equação 3.10:

$$\text{Número de camadas} = \frac{\text{Número total de voltas}}{\text{Número total de voltas na primeira camada}} \quad (3.10)$$

De acordo com a equação 3.10 o número de Voltas calculada foram de aproximadamente 27 camadas. Ao rebobinar o fio, o perímetro de cada camada será aumentado em $2d_{fio}$, onde (d_{fio}) é o diâmetro do fio, isto é 1.2 mm. O perímetro da primeira camada (comprimento) será $\pi \cdot 15 \text{ mm} \cdot 45$. Portanto, o comprimento de uma volta na primeira camada é o primeiro termo da equação cujo valor obtido foi de 2020.6 mm. O comprimento de uma volta na segunda camada é $2020.6 \text{ mm} + 2d_{fio}$. O comprimento de uma volta na terceira camada = perímetro da segunda camada + $2d_{fio}$. O comprimento de uma volta na quarta camada = perímetro da terceira camada + $2d_{fio}$. O comprimento de uma volta na quinta camada = perímetro da quarta camada + $2d_{fio}$ etc., estes cálculos sequenciais tem a forma de uma progressão aritmética (PA) (TIWARI; SARASVAT; PAL, 2014).

A PA formada possui os seguintes parâmetros: Primeiro termo $a = 47$ mm, diferença comum $x = 2.4$ mm, número de termos $n = 27$. O comprimento do fio pode ser calculado usando a soma de PA dada pela equação 3.11

$$\text{Comprimento do fio} = \frac{n \cdot (2 \cdot a + (n - 1) \cdot x)}{2} \quad (3.11)$$

Após realizar os cálculos do comprimento do fio utilizando a equação 3.11, o valor obtido foi de 2111.4 mm. Portanto, o comprimento total necessário é a PA multiplicada pelo número total de voltas. Com isso, o comprimento total foi de $2111.4 \cdot 45 = 96$ m.

3.4 Resistência e indutância do fio

A resistência (R) do fio foi calculada a partir da tabela de resistência, para 17 (AWG), a bitola de 17 tem uma resistência de $16.6 \Omega/\text{Km}$. Como o comprimento do fio é de $96 \cdot 10^{-3} \text{ Km}$, portanto, a resistência obtida foi de $R = 1.6 \Omega$. E para o cálculo da indutância da bobina formada foi usada a equação 3.12 (RAJESHKANNA, 2012):

$$L = \frac{N \cdot \Phi_B}{i} = \frac{1200 \cdot 1.97 \cdot 10^{-6}}{2.47} = 0.96 \cdot 10^{-3} \text{ H} \quad (3.12)$$

Onde (L) é a indutância máxima da bobina.

3.5 Considerações finais

O eletroímã é o principal atuador do sistema, capaz de levantar a viga com o fenômeno da levitação magnética, na posição desejada. Assim sendo, neste capítulo, foi apresentada a modelagem matemática para o eletroímã simulado neste projeto. Sabendo a força magnética suficiente para levantar a viga de massa (m), foram encontrados parâmetros como a intensidade, a área da superfície da face e do cilindro do eletroímã, densidade do fluxo no entreferro, força de magnetização no entreferro, força magneto motora, número de voltas, corrente, resistência, indutância e dados relacionados ao comprimento do fio. Estes parâmetros são necessários para que seja realizada a simulação do modelo do eletroímã.

4 Sensor de posição

O sensor de efeito hall, é um sensor que se baseia na intensidade do campo magnético aplicado para determinar a posição do material ferromagnético (ANTUNES, 2012). Neste capítulo é descrito o funcionamento do sensor hall e o modelo que é usado como base para realizar as simulações neste presente trabalho, pelo qual, apresenta características de saída linear de acordo com os trabalhos realizados por PEGUEROS et al. 2017, LEMOS 2004, GOMES 2016 e II 2002.

4.1 Funcionamento do Sensor Hall

O sensor Hall funciona quando um objeto com campo magnético é aproximado, como por exemplo, um ímã de neodímio, o mesmo faz com que aconteça uma distribuição de corrente ao longo do material. Com isso, os elétrons se acumulam em um lado do condutor, criando uma tensão ou diferença de potencial entre suas laterais. Caso o sentido seja alterado, a tensão também é alterada (PATSKO, 2006). Com isso, a equação 4.1 converte o fluxo magnético em relação a magnitude do campo magnético e a tensão, de acordo com ANTUNES 2012.

$$V_H \propto I \cdot \Phi_B \quad (4.1)$$

Em que (V_H) é a tensão Hall, (I) é a corrente que passa pelo material e (Φ_B) é o fluxo magnético.

Este sensor pode ser colocado acima do eletroímã, como mostra a figura 11 apresentada no capítulo 5, para realizar as simulações das medições da posição da viga. Um ímã de neodímio é fixado na extremidade da viga e é gerado o efeito do campo magnético que é lido pelo sensor Hall e convertido em dados de posição e tensão.

Através das posições lidas pelo sensor é enviado um feedback para o controlador, ou seja, são enviadas informações para que ocorra a realimentação do sistema em malha fechada, isso acontece junto com o controlador que recebe o feedback e compensa as instabilidades tornando o sistema mais estável possível. No entanto, o sensor posicionado acima do eletroímã, pode ser um problema, pois, o mesmo pode detectar tanto o campo magnético do ímã quanto o campo criado pelo eletroímã, por isso, é necessário criar um algoritmo para corrigir os valores de leitura do sensor (GOMES, 2016).

Assim sendo, neste trabalho, o sensor é simulado realimentando o sistema de malha fechada. Para isso, é necessário uma variação da posição angular e tensão para realizar

a técnica matemática de método dos mínimos quadrados (MMQ) para calcular o ganho usado na realimentação do sistema.

4.2 Sensor hall A1308

O modelo do sensor de efeito hall escolhido para realizar as simulações é o A1308 (ALLEGRO, 2017) e o objeto de identificação deste sensor é um imã de neodímio permanente preso a extremidade de uma viga, no qual, é o objeto que recebe o fenômeno da levitação magnética. O sensor é representado na figura 10.



Autoria: Allegro MicroSystem LCC (2017)

Figura 10 – Sensor de efeito hall (Fonte: ALLEGRO 2017)

Este sensor Hall, atende os requisitos de simulação do sistema maglev, pois, a sua tensão de alimentação é adequada sendo de 5V e tensão de saída de até 7V, a saída analógica de alta largura de banda e baixo ruído, a temperatura de saída se mantém estável, é imune aos estresses mecânicos e o desempenho é aprimorado para aplicações mecânicas. Portanto, este sensor funciona de forma linear, sendo que, para realizar as simulações é preciso os valores de saída de forma mais linear possível para que as medidas da posição angular sejam obtidas com maior precisão (ALLEGRO, 2017). No capítulo 7, é realizado o cálculo do ganho com valores lineares simulados, acerca da posição angular e da tensão, sendo que, estes valores são valores próximos dos encontrados nos trabalhos de PEGUEROS et al. 2017, LEMOS 2004, GOMES 2016 e II 2002.

4.3 Considerações finais

Portanto, como foi dito, o sensor Hall foi utilizado neste trabalho, para fins de simulações, com o intuito de realizar medições da posição angular da viga, para que ocorresse o processo de realimentação do sistema a ser controlado. Assim, este modelo de sensor foi escolhido como base devido aos parâmetros adequados para a realização das simulações e por apresentar características de saída linear. Nas simulações, o sensor é posicionado acima do eletroímã, conforme é mostrado no capítulo 5. Assim, ao identificar

a aproximação do campo magnético do ímã de neodímio fixado na viga, o sensor realiza leituras digitais que podem ser transformadas em leituras analógicas (posição e tensão). Com isso, o cálculo do ganho para realimentar o sistema em malha fechada, é realizado no capítulo 7, no qual, é utilizado o Método dos Mínimo Quadrados (MMQ) para encontrar a equação da reta.

5 Fundamentos do sistema maglev da viga

Este capítulo é baseado no trabalho de [PEGUEROS et al.,2017](#) que desenvolveu um sistema de levitação eletromagnética de uma viga usando um eletroímã que funciona como atuador do sistema junto com o imã de neodímio.

5.1 Sistema de levitação magnética da viga

Na figura 11 é representada o sistema completo, sendo que a viga, que é o objeto que sofre o fenômeno da levitação magnética. Este é um sistema eletromecânico que consiste em uma viga desequilibrada ou instável, cujo centro de gravidade se encontra a uma distância r do centro da viga. O dispositivo possui um ímã permanente de neodímio a uma distância l centro da viga, além de um eletroímã que possui a função de repelir a viga.

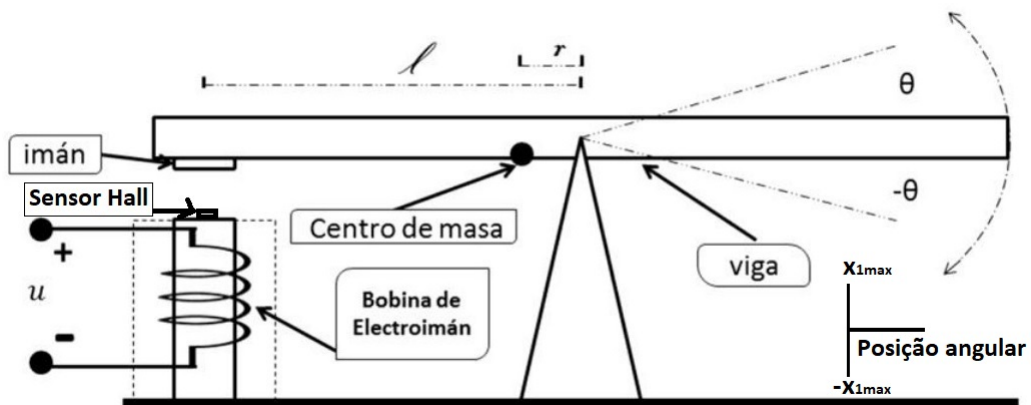


Figura 11 – Sistema físico completo de levitação magnética da viga (Imagem modificada de: [PEGUEROS et al. 2017](#))

5.2 Equações do modelo não-linear

O modelo não linear calculado, pode ser encontrado pelas equações diferenciais obtidas através das equações de Euler-Lagrange e as leis de Kirchoff, definidas da seguinte maneira na equação 5.1:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\theta}{dt^2} &= \frac{1}{J} C_e \frac{i^2}{(l \sin \theta)^2} \frac{mgr \cos \theta}{J} \\ \frac{di}{dt} &= -\frac{R}{L} i + \frac{1}{L} u \end{aligned} \quad (5.1)$$

Em que θ é o ângulo da viga com a horizontal; i é a corrente que circula pela bobina do eletroímã; m e J são os parâmetros correspondentes a massa e o momento de inércia da viga respectivamente; l é a distância entre o centro da viga e o centro de massa do imã permanente; r é a distância radial do centro de massa da viga do centro de rotação; g é a constante de gravidade e C_e é a constante de proporcionalidade da força eletromagnética; R e L é a resistência e a indutância do eletroímã; u é a entrada de tensão aplicada no sistema eletromagnético.

As variáveis de estado definidas para o sistema são: $x_1 = \theta$, $x_2 = \dot{\theta}$ e $x_3 = i$ em que $X = (x_1, x_2, x_3)^T$ é o vetor de estado correspondente. O sistema não linear em variáveis de estado é expresso da seguinte forma na equação 5.2:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2 \quad (5.2)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{C_e}{J} \left(\frac{x_3}{l \sin x_1} \right)^2 - \frac{mgr \cos x_1}{J} \quad (5.3)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = -\frac{Rx_3}{L} + \frac{u}{L} \quad (5.4)$$

Para obter o ponto de equilíbrio é preciso considerar a equação 5.5:

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{dx_2}{dt} = \frac{dx_3}{dt} = 0 \quad (5.5)$$

logo se tem:

$$\frac{dx_1}{dt} = 0, \text{ implica que } x_2 = 0 \text{ e } x_1 = \bar{x} \text{ com } \bar{x} \text{ sendo um valor real} \quad (5.6)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = 0, \frac{dx_2}{dt} = \frac{C_e}{J} \left(\frac{x_3}{l \sin x_1} \right)^2 - \frac{mgr \cos x_1}{J} = 0 \Rightarrow \left(\frac{x_3}{l \sin x_1} \right)^2 = \frac{mgr \cos x_1}{C_e} \quad (5.7)$$

$$x_3 = \sqrt{\frac{(mgr \cos x_1)}{C_e}} l \sin x_1 \Rightarrow x_3 = \sqrt{\frac{(mgr \cos x_1)(l \sin x_1)^2}{C_e}}$$

Considerando a natureza de x_1 a equação de x_3 é reescrita da seguinte forma:

$$x_3 = \sqrt{\frac{(mgr \cos \bar{x})(l \sin \bar{x})^2}{C_e}} \quad (5.8)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = 0,$$

(5.9)

$$\frac{dx_3}{dt} = -\frac{Rx_3}{L} + \frac{u}{L} = 0 \Rightarrow \frac{u}{L} = \frac{Rx_3}{L} \Rightarrow u = Rx_3$$

Considerando x_3 :

$$u = R\sqrt{\frac{(mgr \cos \bar{x})(l \sin \bar{x})^2}{C_e}}$$

Finalmente o ponto de equilíbrio é dado por \bar{X} :

$$\bar{X} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3) = \left(\bar{x}, 0, \sqrt{(gmr \cos \bar{x})(l \sin \bar{x})^2 / C_e} \right)$$

A entrada de controle u pode ser calculada em estado permanente para manter a viga na posição de x_1^* pela seguinte equação 5.10:

$$\bar{u} = R\sqrt{\frac{(gmr \cos \bar{x})(l \sin \bar{x})^2}{C_e}} \quad (5.10)$$

Onde é possível deduzir que em estado permanente é puramente resistivo e que os valores da variável de corrente e de entrada de controle aumentam quando a viga se afasta da horizontal. É importante notar que se $x_1 = 0$ possui uma singularidade em \dot{x}_2 e, portanto, para que isso seja evitado, é considerado um valor próximo para o ponto de equilíbrio, a saber de, $x_1 = 0.001 \text{ rad}$.

5.3 Linearização do sistema

O objetivo principal é estabilizar o sistema ao redor do ponto de equilíbrio, através de uma estratégia de controle clássica, supondo que a viga se encontra inicialmente na região $x_1 = (-x_{1max}, x_{1max})$ com x_{1max} fixo em valores de operação, como mostra a figura 11. Em outras palavras, a intenção é levar a viga à posição desejada x_1^* .

Para o cálculo da lei de controle estabilizante se utiliza a linearização aproximada do sistema não linear em relação ao ponto de equilíbrio \bar{X} , no qual tem a seguinte equação 5.11:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= AX + Bu \\ Y &= CX \end{aligned} \quad (5.11)$$

Onde:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{J}(gmr - 2gmr \cot^2 \bar{x}_1) \sin \bar{x}_1 & 0 & \frac{2C_e \csc^2 \bar{x}_1 \sqrt{\frac{gl^2 mr \cos \bar{x}_1 \sin^2 \bar{x}_1}{C_e}}}{Jl^2} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0]$$

Da equação 5.11 pode ser obtida a função de transferência do sistema, através do MATLAB/Simulink, e expressada pela equação 5.12:

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{u(s)} = C(sl - A)^{-1}B = \frac{4C_e \csc \bar{x}_1 \sqrt{\frac{gl^2 mr \cos \bar{x}_1 \sin^2 \bar{x}_1}{C_e}}}{l^2(R + Ls)(gmr(1 + 3 \cos 2\bar{x}_1) + 2Js^2 \sin \bar{x}_1)} \quad (5.12)$$

A equação 5.12 é a função de transferência do sistema da equação 5.11, onde a entrada u é a tensão aplicada na bobina representada e a saída Y é a posição angular da viga.

5.4 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentado o modelo do sistema da viga desequilibrada (instável), logo em seguida, foi exibido o equacionamento do modelo não linear representado por variáveis de estados, utilizando equações diferenciais. Com isto, sabe-se que o objetivo principal é fazer com que, através de uma pequena força aplicada, o sistema se torne estável, para isto, o sistema foi linearizado com o método de espaço de estado ao redor de um ponto de equilíbrio e, logo, foi encontrada a função de transferência da planta, para que seja utilizada uma técnica de controle para estabilizar o sistema, no qual, é explicado no capítulo 6.

6 Fundamentos de controle

O controlador Proporcional, integral e derivativo conhecido como PID, é um dos controladores mais eficientes já desenvolvido. Este controlador é utilizado em diversos casos industriais, sendo que pode ser implementado de forma analógica, utilizando circuitos analógicos, ou digital, por meio de computadores ou microcontroladores (FACCIN, 2004). Pode-se dizer que alguns dos motivos que levam este tipo de controlador serem bastante utilizados na indústria, é que são baratos, não há muitas dificuldades para implementá-los e os resultados são bastante satisfatórios para os variados processos do dia-a-dia (CAMPESTRINI, 2006). Neste capítulo, são descritos os modos de controle, os critérios de desempenho e a forma de obter os valores dos ganhos PID.

6.1 Modos de controle

Em processos de controle de levitação magnética, é necessário um controle rigoroso que requer a utilização de modos contínuos, onde a saída se altera suavemente em resposta a variações no sinal de erro. Esses modos podem ser chamados de proporcional, integral e derivativo e estão descritos a seguir (FACCIN, 2004).

6.1.1 Modo proporcional

O controlador com ação puramente proporcional, é aquele cujo a saída $y(t)$, é diretamente proporcional ao sinal de entrada, set point(SP), multiplicado por uma constante. De forma mais fácil, pode-se entender o controlador proporcional como um amplificador com ganho ajustável (FRANÇA, 2018). A equação 6.1 mostra a relação do sinal de erro (e) e a ação de controle (r) gerada pelo modo de controle proporcional.

$$r(t) = K_p e(t) + r_0 \quad (6.1)$$

Onde K_p é o ganho proporcional, $e(t)$ é o sinal de erro variando com o tempo, $r(t)$ é a ação de controle variando com o tempo e (r_0) é o valor de base da ação de controle (FACCIN, 2004). Uma característica dessa ação de controle, é a existência de um erro residual permanente sempre que ocorre uma alteração de carga, e o sistema que se pretende controlar seja do tipo 0. Esse erro residual pode ser eliminado se uma ação de controle integral for incluída no controlador (KATSUHIKO, 2010).

Com o aumento de K_p o erro estacionário pode ser diminuído. No entanto deve-se notar que o aumento deste parâmetro conduz a um aumento do tempo de estabelecimento e eventualmente até a instabilidade (LOURENÇO, 1997).

Com ganho proporcional, o tempo de resposta pode ser reduzido, quando é comparado a um controle on-off, mas não consegue eliminar por completo o erro de estado estacionário (MUNIZ, 2017).

6.1.2 Modo integral

No controle integral de uma planta, o sinal de saída do controlador em qualquer instante é a área sob a curva do sinal de erro atuante, até aquele momento. O sinal de controle $r(t)$ pode ter um valor não nulo quando o sinal do erro atuante $e(t)$ for zero. Na ação de controle integral, embora remova o erro residual ou o erro estacionário, pode conduzir a uma resposta oscilatória com uma amplitude que decresce lentamente ou mesmo uma amplitude (overshoot) sempre crescente, ambas, em geral, indesejáveis (KATSUHIKO, 2010).

A equação 6.2 mostra que a ação de controle depende do histórico do erro, desde que o processo de integração foi iniciado ($t=0$) até o instante atual.

$$r(t) = K_i \int_0^t e(t)dt + r_0 \quad (6.2)$$

A ação integral pode atualizar automaticamente o valor base do controlador com ação proporcional. Devido a isto, ela foi originalmente denominada de reset action (FACCIN, 2004).

6.1.3 Modo derivativo

A equação 6.3 mostra que a ação de controle gerada pelo modo derivativo é proporcional á taxa de variação do sinal de erro, ou seja, a sua derivada no tempo (FACCIN, 2004).

$$r(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} + r_0 \quad (6.3)$$

Uma vantagem em utilizar a ação de controle derivativo é que esta responde a uma taxa de variação do erro atuante e pode produzir uma correção significativa antes que o valor do erro atuante se torne muito elevado. Portanto, o controle derivativo prevê o erro atuante, inicia uma ação corretiva antecipada e tende a aumentar a estabilidade do sistema (KATSUHIKO, 2010). No entanto, uma desvantagem, é que em sistemas com sensores presente algum tipo de ruído, pode ocasionar problemas devido a sensibilidade da derivada (MUNIZ, 2017).

Embora o controle derivativo não afete diretamente o erro estacionário, ele aumenta o amortecimento do sistema, permitindo, assim, o uso de um valor mais elevado do ganho K , o que resultará em maior precisão no regime permanente. Pelo fato de o

Tabela 1 – MUNIZ 2017 mostra o efeito dos parâmetros de um sistema em malha fechada.

P	Correção proporcional ao erro	A correção a ser aplicada ao processo deve crescer na proporção que cresce o erro entre o valor real e o desejado.
I	Correção proporcional ao produto erro x tempo	Erros pequenos mas que existem há muito tempo requerem correção mais intensa
D	Correção proporcional à de variação do erro	Se o erro está variando muito rápido, esta taxa de variação deve ser reduzida para evitar oscilações

controle derivativo operar sobre a taxa de variação do erro atuante e não sobre o próprio erro atuante, esse modo nunca é utilizado sozinho (KATSUHIKO, 2010).

O controlador PID é uma junção de três ações conforme mostra a tabela 1.

6.1.4 Malha aberta

No sistema em malha aberta, a variável controlada não exerce qualquer influência no sinal do controlador que é a variável manipulada, ou seja, a ação de controle em um sistema de malha aberta não depende da saída. A figura 12 representa um sistema de controle em malha aberta.

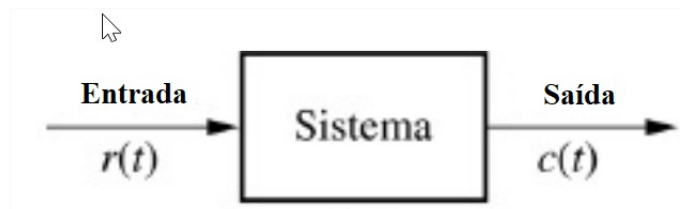


Figura 12 – Diagrama de bloco do controlador PID em malha aberta (Figura modificada de NISE 2020)

As características deste tipo de sistema é que normalmente não conseguem realizar compensações para quaisquer perturbações que sejam adicionadas ao sinal de acionamento do controlador. A saída é corrompida não apenas por sinais que são adicionados aos comandos do controlador, mas também por perturbações na saída (NISE, 2020). Sendo assim, a equação 6.4 apresenta a relação entrada/saída de um sistema $G(s)$ em malha aberta.

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} \quad (6.4)$$

Em sistemas reais, a malha aberta é utilizada somente quando existem perturbações internas ou externas e o sistema apresenta uma relação entre entrada e saída conhecidas (TAVARES, 2017).

6.1.5 Malha fechada

O sistema de controle em malha fechada compensa os efeitos de perturbações realizando medições da saída e realimentando através da malha de realimentação negativa uma comparação com a entrada na junção de soma. Caso ocorra alguma diferença entre as duas respostas, o sistema aciona a planta, através do sinal de atuação, para fazer a devida correção. Caso, não haja diferença, o sistema permanece sem acionar a planta, sendo que a resposta da própria planta já é a desejada (NISE, 2020).

O sinal de erro, que é a diferença entre o valor de referência (set point) e a variável de processo é introduzida na entrada do controlador para estabilizar a saída do sistema (variável de processo) em um valor adequado para evitar resultados indesejáveis.

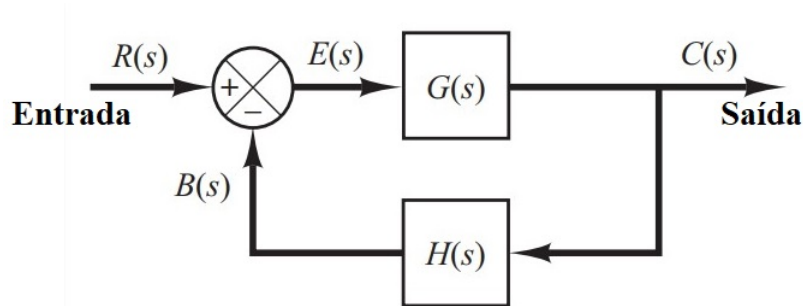


Figura 13 – Diagrama de bloco do controlador PID em malha fechada (Figura modificada de KATSUHIKO 2010)

Em um sistema em malha fechada, as perturbações externas tendem a provocar influências de curta duração, visto que o controlador percebe rapidamente a variação no sinal de erro e atua de forma a diminuí-lo (TAVARES, 2017). Sendo assim, a equação 6.5 apresenta a relação entrada/saída do sistema em malha fechada da figura 13.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (6.5)$$

Assim, este sistema possui a vantagem de apresentar resultados com mais exatidão que o sistema em malha aberta, sendo que, são menos sensíveis a ruídos, perturbações e alterações do ambiente (NISE, 2020).

6.2 Estrutura do controlador PID

Este tipo de controlador é muito aplicado em sistemas que requerem o uso de um controle, seja sistemas lineares ou não lineares. Com o PID é possível obter um controle satisfatório de vários sistemas, embora por vezes não seja possível obter um controle ótimo. Um diagrama de blocos ilustrando este tipo de controle está representado na figura 14. Este sistema de controle possui funções importantes, tais como: proporciona

realimentação negativa, a ação integral permite eliminar o erro em regime permanente (para entradas de referência) e a ação derivativa permite diminuir o overshoot (sobresinal) do sistema (SANTOS, 2011).

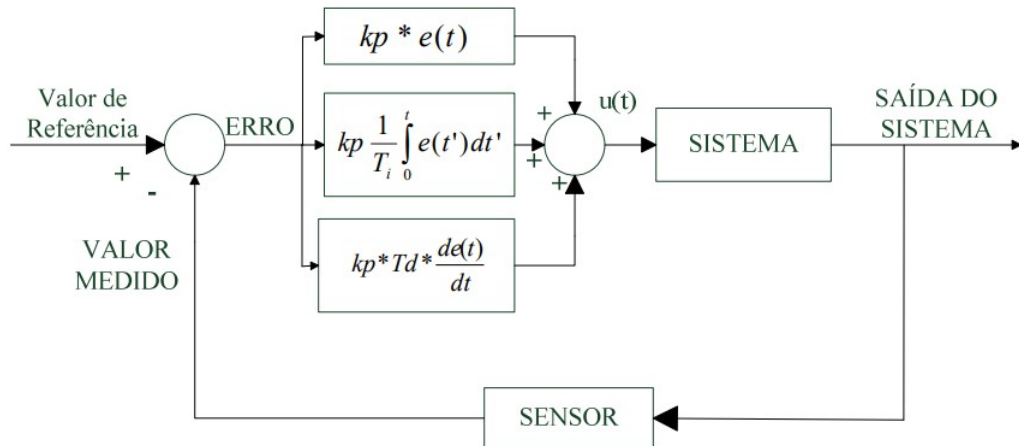


Figura 14 – Diagrama de bloco do controlador PID do sistema (Fonte: SANTOS 2011)

Assim, com o ganho proporcional K_p , o tempo integral T_i e o tempo derivativo T_d pode-se chegar na função de transferência do PID que é dada pela equação 6.6.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s, \quad (6.6)$$

Este controlador é chamado de controlador não-interativo, pelo fato de que o tempo integral T_i não interfere na parte derivativa, e o tempo derivativo não interfere na parte integral (CAMPESTRINI, 2006).

6.3 Critérios de desempenho

Caso o sistema seja alterado é possível dividir em duas partes: regime transitório e permanente. O regime transitório, é dito que, a variável controlada pode apresentar variações a partir de uma variação inicial. Ao projetar o controlador é preciso obter alguns parâmetros como o tempo de subida, a amplitude máxima da oscilação e tempo de acomodação. O regime permanente tem a característica da variável controlada convergir para um valor aproximadamente constante e nesse período é importante reduzir o erro (BAYER; ARAÚJO, 2016). O gráfico da figura 15 representa o regime transitório e permanente.

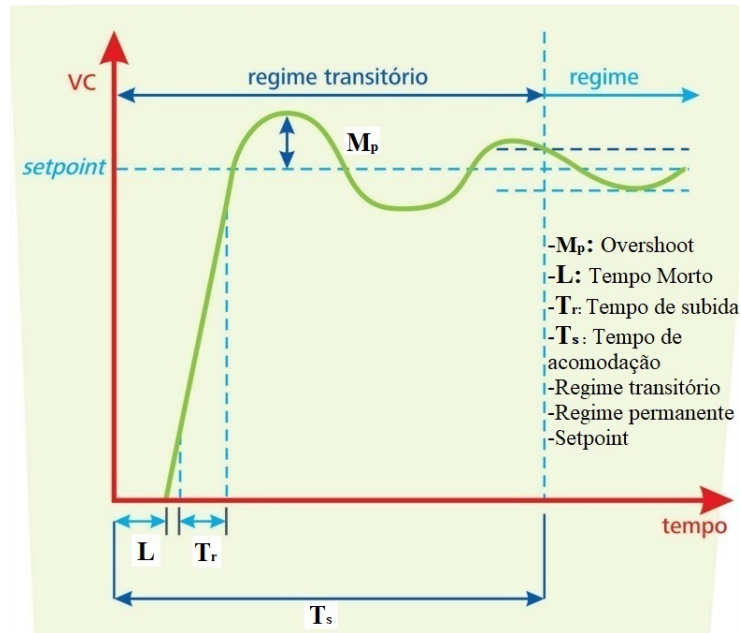


Figura 15 – Gráfico do regime permanente e transitório (Figura modificada de BAYER; ARAÚJO 2016)

Abaixo nas subseções, são descritos as variáveis do gráfico da figura 15.

6.3.1 T_r - Tempo de subida

O tempo de subida é o intervalo de tempo necessário para a resposta ir de 10% a 90% do valor estacionário ou valor final (EM, 2014).

6.3.2 M_p - Percentual de sobressinal (Overshoot)

É o valor que a variável de processo ultrapassa o valor do degrau e chega ao seu valor máximo, e geralmente é expresso como uma porcentagem final. Ele é bom ou satisfatório quando o valor dos sinais são menores ou iguais a 10% (EM, 2014). Quanto maior for o valor, menor é a estabilidade relativa e o sistema apresentará um comportamento instável (BAYER; ARAÚJO, 2016).

6.3.3 T_s - Tempo de estabilização ou acomodação

É o tempo necessário para que o processo chegue a uma porcentagem (próxima de 5%) do valor final (EM, 2014).

6.3.4 L - Atraso ou tempo morto

É o tempo que o processo leva para começar a responder a uma variação na variável manipulada. Quanto maior for o tempo morto, maior é a dificuldade de controlar o sistema (BAYER; ARAÚJO, 2016).

A tabela 2 resume o efeito do tempo de subida, overshoot, tempo de acomodação e erro estacionário de um sistema em malha-fechada.

6.3.5 Tabela do efeito dos parâmetros

As correlações da tabela 2 não são totalmente exatas, pois os parâmetros K_p , K_i e K_d estão relacionados e podem ser dependentes entre si, sendo que mudar um desses parâmetros podem alterar os demais especialmente onde os controles não são separados em blocos de controle independente. Por isso, a tabela deve ser apenas uma referência geral e não algo absoluto (MUNIZ, 2017).

Tabela 2 – Efeito dos ganhos devido as alterações dos parâmetros de um sistema em malha fechada (Fonte: MUNIZ 2017)

Resposta	T_r	M_p	T_s	Erro de estado estacionário
K_p	Reduz	Aumenta	Pouco efeito	Reduz
K_i	Reduz	Aumenta	Aumenta	Elimina
K_d	Pouco efeito	Reduz	Reduz	Não muda

Assim, a tabela 2 mostra os efeitos dos parâmetros PID em um sistema de controle em malha fechada.

6.4 Método de sintonia Ziegler-Nichols - Z&N

Foram propostos dois métodos por Ziegler e Nichols, no qual, consistem em sintonizar o controlador PID (ajustando os valores K_p , T_i e T_d) determinando características de sistemas em malha aberta ou em malha fechada, baseado na resposta experimental a uma excitação ou no valor de K_p que resulta em estabilidade marginal quando se utiliza unicamente a ação de controle proporcional (AZEVEDO, 2009).

A aplicação do controlador PID exige que o sistema possua um modelo matemático não muito complexo, no entanto, a melhor forma de estabilizá-lo é realizando experimentos para sintonizar o controlador. Estes métodos podem ser aplicados quando os modelos matemáticos não são conhecidos. O objetivo pretendido ao utilizar qualquer um dos métodos é obter um sobresinal máximo de 25% na resposta a uma excitação em degrau (KATSUHIKO, 2010).

O uso dessas regras para o trabalho de otimização objetiva a obtenção de parâmetros iniciais do controlador. Os três parâmetros trabalhados são: K_p , K_i e K_d ; onde $K_p = K_p$, $K_i = K_p/T_i$, $K_d = K_p T_d$. Tais parâmetros podem constituir num controlador PID que, juntamente com a planta, fornecerá uma resposta que, comparada a um modelo de referência desejado, proporcionará um erro relativo pequeno (MAITELLI; CARVALHO, 2003).

6.4.1 Primeiro método de Z&N

O primeiro método, Ziegler e Nichols aplicou um degrau unitário na entrada do sistema em malha aberta. No caso da planta não existir integradores, nem pólos complexos conjugados dominantes, esse sinal de resposta ao degrau unitário tem a forma de S (OLIVEIRA et al., 2016). A curva da resposta ao degrau pode ser encontrada de forma experimental ou realizando simulações da planta. A curva em S possui duas constantes como características, o atraso L e o tempo T e são determinados conforme a figura 16 (KATSUHIKO, 2010).

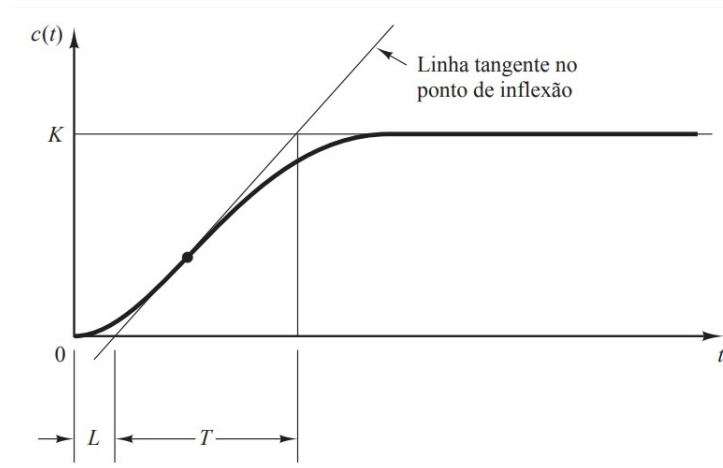


Figura 16 – Curva em S do primeiro método de Ziegler-Nichols (Fonte: KATSUHIKO 2010)

6.4.2 Segundo método de Z&N

O segundo método, pelo qual é utilizado para realizar as simulações neste trabalho, é usado em sistemas de malha fechada que apresentam oscilações ou instabilidades (OLIVEIRA et al., 2016). São definidos $T_i = \infty$ e $T_d = 0$ e é preciso que varie o valor de K_p de 0 ao valor crítico K_{cr} . Esse método não se aplica se o sistema não exibir uma oscilação de saída para qualquer valor de K_p . Com isso, os valores do ganho crítico K_{cr} e o período P_{cr} são obtidos de forma experimental conforme a figura 17. Assim os valores de K_p , T_i e T_d são determinados e substituídos na equação 6.6 (KATSUHIKO, 2010).

A tabela 3 mostra como obter o ganho proporcional K_p , o tempo integrativo T_i e derivativo T_d através do ganho crítico K_{cr} e período crítico P_{cr} .

Tabela 3 – Tabela de Ziegler-Nichols em malha fechada (Fonte: KATSUHIKO 2010)

Tipo de Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

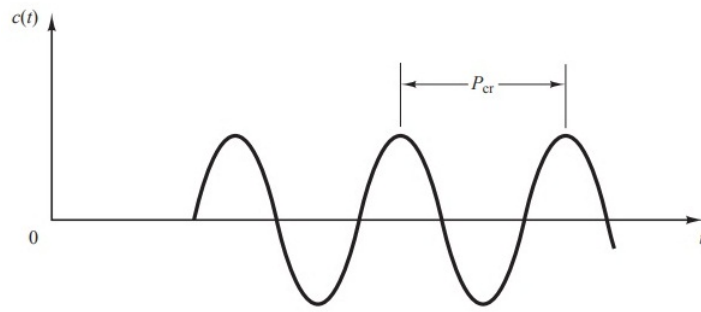


Figura 17 – Oscilação sustentada com período P_{cr} (em segundos) (Fonte: [KATSUHIKO 2010](#))

Portanto, na próxima seção é mostrado a relação matemática que representa a planta do sistema físico convoluído com o sistema de controle PID e o uso dos ganhos K_p , K_i e K_d .

6.5 Equações simplificada de controle magLev da viga

A equação 5.12 é a relação do sistema físico ou a planta de levitação magnética e abaixo é a representação de forma simplificada e definida com as seguintes constantes:

$$\begin{aligned} a_3 &= 2JLl^2 \text{sen } \bar{x}_1 \\ a_2 &= 2Jl^2 R \text{sen } \bar{x}_1 \\ a_1 &= l^2 Lgmr(1 + 3 \cos 2\bar{x}_1) \\ a_0 &= l^2 Rgmr(1 + 3 \cos 2\bar{x}_1) \\ b &= 4C_e \text{cossec } \bar{x}_1 \sqrt{\frac{gl^2mr \cos \bar{x}_1 \sin^2 \bar{x}_1}{C_e}} \end{aligned}$$

Com isso, a equação 6.7 é a representação da planta simplificada.

$$G_p(s) = \frac{b}{a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad (6.7)$$

Realizando a convolução entre a equação 6.6 e a equação 6.7 do controle PID chegou-se na equação 6.9:

$$G_T(s) = G_c(s)G_p(s) = \left(\frac{b}{a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \right) \cdot \left(\frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \right) \quad (6.8)$$

E o sistema com realimentação negativa é representado pela equação 6.9:

$$G_T(s) = G_c(s)G_p(s) = \frac{b(K_d s^2 + K_p s + K_i)}{a_3 s^4 + a_2 s^3 + (a_1 + K_d)s^2 + (a_0 + K_p)s + K_i} \quad (6.9)$$

Onde K_p , K_i e K_d são os ganhos do controlador PID e b , a_3 , a_2 , a_1 e a_0 são as constantes da planta do sistema.

6.6 Estabilidade

A estabilidade pode ser dada pela localização dos pólos do sistema no gráfico de pólos e zeros. Se todos os pólos estiverem mais a direita do eixo imaginário, o sistema é dito instável e a saída tende ao infinito conforme o tempo. Se todos os pólos estiverem mais a esquerda do eixo imaginário, o sistema é dito estável e a saída tende a zero conforme o tempo. Caso algum pólo se estabelecer em cima do eixo imaginário o sistema é dito criticamente estável e muito oscilatório, ou seja, não converge nem diverge, porém, é necessário estabilizar (OPPENHEIM et al., 1997).

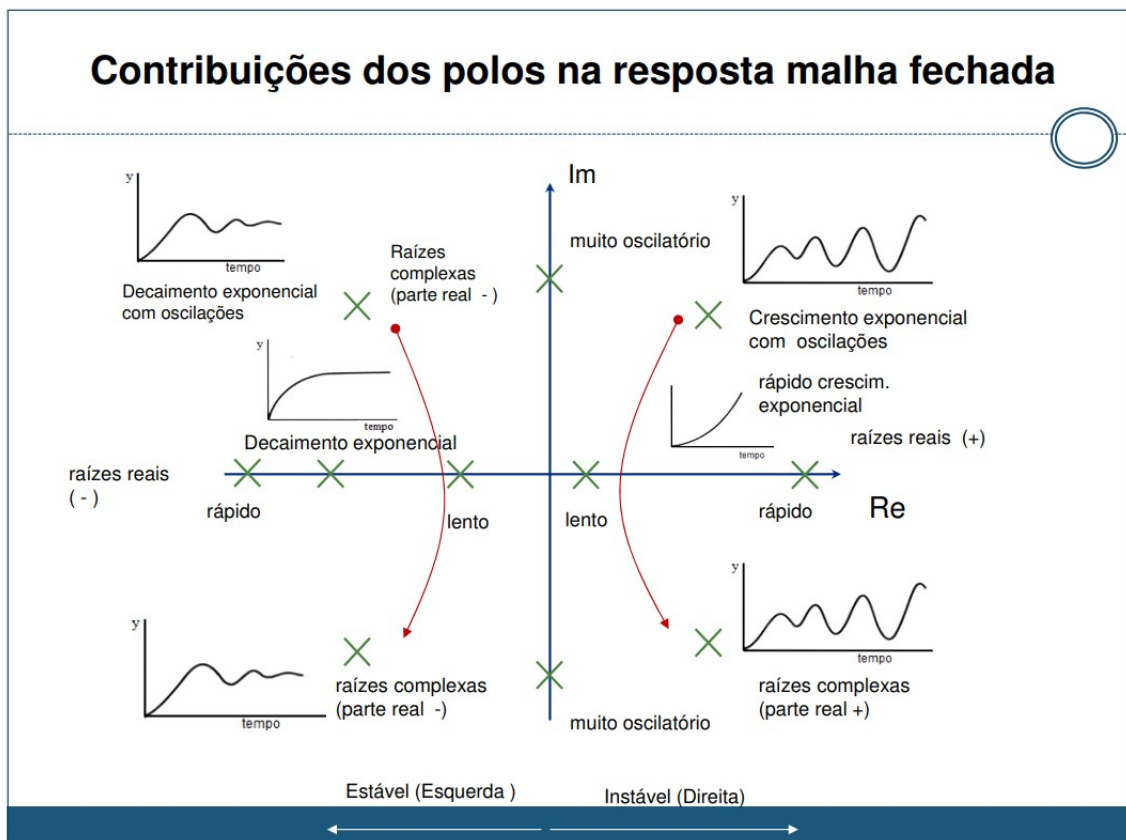


Figura 18 – Pólos na resposta em malha fechada (Fonte: BOJORGE 2017)

A figura 18 demonstra uma representação dos pólos em um sistema. Quando há pólos distante do eixo imaginário o sistema torna-se mais rápido, tanto para convergir,

no caso dos pólos a esquerda, quanto para divergir, no caso dos pólos a direita. Assim sendo, quando os pólos se aproxima do eixo imaginário, ocorre o inverso, ou seja, o sistema torna-se mais lento (BOJORGE, 2017).

6.7 Critério de estabilidade de Routh-Hurwitz

O critério de Routh-Hurwitz é utilizado para determinar se um sistema é estável ou instável de acordo com cálculos realizado sobre o denominador encontrando as raízes da equação característica. No entanto, é preciso organizar a equação característica na forma canônica como a equação 6.10.

$$a_0s^n + a_1s^{n-1} + a_2s^{n-2} + \dots + a_n = 0 \quad (6.10)$$

Da equação 6.10 é analisado somente as constantes e se o termo de maior grau for negativo é necessário dividir ou multiplicar a equação antes e depois da igualdade por (-1). Se qualquer um dos termos reais forem negativos, o sistema é considerado instável, caso contrário, se todos os termos reais forem positivos, o sistema é considerado estável ou instável, deste modo, é necessário aplicar o método de Routh para identificar o estado do sistema (SALVARANI, 2015).

A tabela 4 mostra o arranjo das linhas que forma os elementos da equação característica para realizar os cálculos. A quantidade do número de elementos é (n+1) e os cálculos são realizados pelas equações 6.11, 6.12, 6.13 e 6.14 sendo que d_1 e e_1 são calculados da mesma forma.

Tabela 4 – Arranjo de Routh (Fonte: SALVARANI 2015)

Linha	
1	$a_0 \quad a_2 \quad a_4$
2	$a_1 \quad a_3 \quad a_5$
3	$b_1 \quad b_2 \quad b_3$
4	$c_1 \quad c_2$
5	d_1
n + 1	e_1

$$b_1 = \frac{a_1a_2 - a_0a_3}{a_1} \quad (6.11)$$

$$b_2 = \frac{a_1a_4 - a_0a_5}{a_1} \quad (6.12)$$

$$c_1 = \frac{b_1a_3 - a_1b_2}{b_1} \quad (6.13)$$

$$c_2 = \frac{b_1 b_5 - a_1 b_3}{b_1} \quad (6.14)$$

Sendo assim, de acordo com [SALVARANI 2015](#), se todos os elementos da primeira coluna não mudarem o sinal, sendo que todos sejam positivos, o sistema é dito estável, no entanto, se apenas um elemento for negativo o sistema é instável, e a quantidade de trocas de sinais na primeira coluna é a quantidade de raízes da equação característica no semiplano direito do plano s .

6.8 Estabilidade do ponto de equilíbrio

Utilizando o teorema de estabilidade de Routh-Hurwitz ([COVACIC et al., 2010](#)) é possível estabelecer localmente a estabilidade do ponto de equilíbrio a partir dos pólos da função de transferência da equação [6.9](#) como é mostrado a seguir:

$$\begin{aligned} a_3, a_2, K_i &> 0 \\ K_p &> -a_0 \\ K_d &> \frac{K_i}{(a_0 + K_p)} + \frac{a_3}{a_2}(a_0 + K_p) - a_1 \end{aligned}$$

As condições a_2 , a_3 são atendidas pela natureza do modelo, e as demais equações definem os parâmetros de controle que garantem a estabilidade em torno do ponto de equilíbrio.

6.9 Considerações finais

O controlador é uma das principais ferramentas para estabilizar um sistema instável. Assim sendo, neste capítulo foram descritos os modos de controle proporcional, integral e derivativo que são aplicados neste trabalho para realizar as simulações no sistema de malha fechada. Estes modos de controle, são utilizados para proporcionar realimentação negativa eliminando o erro em regime permanente e diminuindo o sobressinal, fazendo com que melhore os critérios de desempenho como o tempo de subida, overshoot, tempo de estabilização e erro de regime permanente, minimizando os erros causados pelas instabilidades e melhorando consideravelmente a estabilidade do sistema. Do mesmo modo, também foi dito sobre o critério de Routh Hurwitz para determinar se o sistema é estável ou instável e o método de sintonia de Z&N que é utilizado para encontrar os possíveis valores consideráveis dos ganhos PID e, com isto, obter bons resultados de parâmetros para linearizar e estabilizar o sistema ao redor do ponto de equilíbrio.

7 Cálculos e simulações

Neste capítulo são descritos os métodos adotados para os cálculos e simulações realizadas para executar o projeto. São feitos cálculos de ganho do sensor e ganhos PID utilizando simulações para obter o ganho e período crítico, além disso, são plotados os gráficos para melhorar o entendimento do comportamento do sistema com o controlador em malha fechada.

Deste modo, para realizar os cálculos do ganho do sensor, da constante de proporcionalidade eletromagnética e da planta do sistema, são necessários determinar alguns dados em relação aos parâmetros do sistema, incluindo a variação da posição angular da viga, a variação da tensão do sensor, a variação da corrente do eletroímã, a massa da viga, o tamanho da viga e o centro de gravidade. Sabendo disto, foram atribuídos valores próximos dos encontrados em trabalhos já realizados, em virtude deste presente trabalho ser uma simulação e não uma implementação de forma real. Portanto, os valores simulados foram próximos dos valores obtidos e apresentados nos trabalhos realizados por [PEGUEROS et al. 2017](#), [LEMOS 2004](#), [GOMES 2016](#) e [II 2002](#).

7.1 Ganho do sensor de posição - K_{SH}

De acordo com os valores da tabela 5 foi determinado o ganho do sensor de posição K_{SH} utilizando o método dos mínimos quadrados (MMQ) com o auxílio do MATLAB/Simulink ([CHAPRA, 2013](#)). A tabela mostra as variações da posição e tensão entre o eletroímã e o imã fixado na viga, e como foi dito, os valores são uma aproximação dos valores lidos pelo sensor apresentado nos trabalhos de [LEMOS 2004](#), [GOMES 2016](#) e [II 2002](#).

Assim, de acordo com os dados da tabela 5, foi encontrada a equação 7.1 que representa a linearização da função para $x(t)$. Foram utilizados todos os valores da tabela 5 para realizar a simulação do sensor Hall na leitura da posição e tensão.

$$V_{SH} = 23.58x(t) + 1.65 \quad (7.1)$$

Através da equação 7.1 foi plotado o gráfico representado na figura 19. Com isso, o valor do ganho do sensor de posição é de $K_{SH} = 23.58V/m$.

Portanto, o gráfico da figura 19 mostra a reta encontrada ao linearizar a função $x(t)$.

Tabela 5 – Medição da tensão do sensor de posição em função da distância.

Posição (rad)	Leitura do Sensor (V)
-0.029	1.003
-0.022	1.129
-0.019	1.238
-0.014	1.315
-0.009	1.413
-0.004	1.545
0.004	1.711
0.009	1.833
0.013	1.961
0.015	2.020
0.019	2.094
0.022	2.165
0.024	2.251
0.026	2.298
0.028	2.313

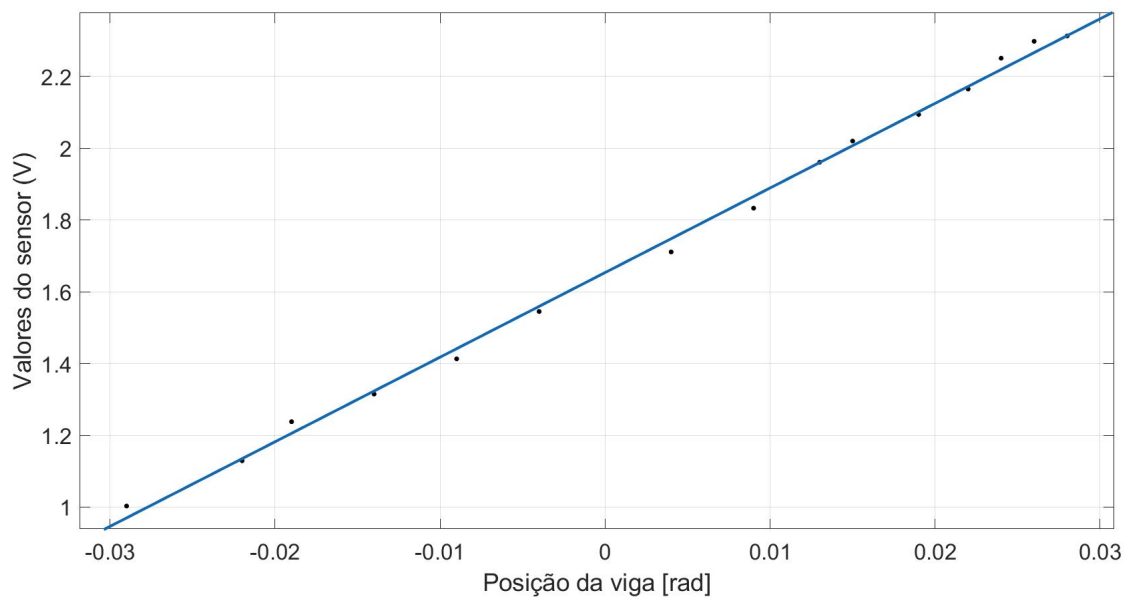


Figura 19 – Simulação do ganho do sensor de posição da viga (Figura modificada de: GOMES 2016)

7.2 Constante de força eletromagnética - C_e

A caracterização da força eletromagnética foi baseada no trabalho de PEGUEROS et al. 2017 para o qual foi obtido o valor de C_e . Para isso, é tomada a seguinte condição: A posição inicial de levitação da viga é $\theta = -0.029$ rad e a corrente é $I = 0.31$ A, que corresponde aos limites mecânicos do sistema, abaixo deste valor de corrente o ímã de neodímio fixado na viga atingirá a superfície. Foram simuladas 15 medições da posição

angular da viga e a corrente na bobina. Para realizar as simulações, é preciso dos valores de um sinal de voltagem aplicado no atuador magnético.

Os valores simulados foram valores aproximados dos encontrados no trabalho de [PEGUEROS et al. 2017](#) e foram ajustados a uma função polinomial usando o MMQ (Método dos Mínimos Quadrados) do MATLAB/Simulink que relaciona a corrente I em função da posição θ , como é representado na equação 7.2 e mostrado na figura 20. Usando o MMQ é obtido a equação 7.2 :

$$I = 3222.60\theta^3 + 123.03\theta^2 + 4.18\theta + 0.40 \quad (7.2)$$

A figura 20 mostra a relação dos dados obtidos da posição θ [rad] com a corrente I [A].

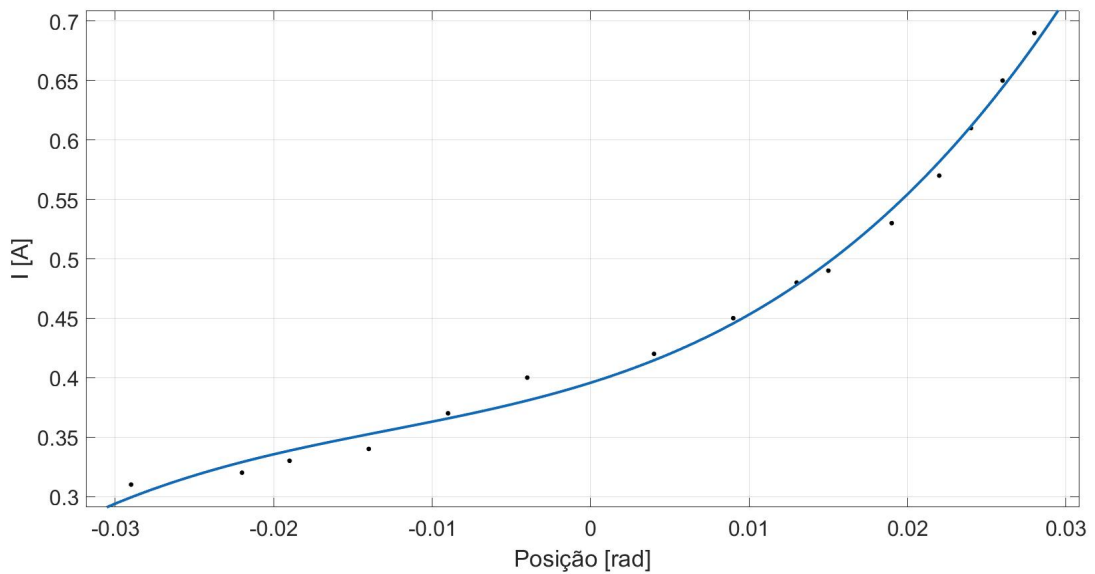


Figura 20 – Simulação da relação posição da viga e corrente do eletroímã.

Da equação 5.1, a constante C_e é expressa da seguinte forma:

$$C_e = F_{mag} \frac{(l \sin \theta)^2}{I^2} \quad (7.3)$$

Substituindo a equação 7.2 na 7.3 e substituindo o valor do ponto de equilíbrio 0.001 rad, foi obtido o valor da equação 7.4:

$$C_e = -11.2\theta^3 + 0.48\theta^2 - 1.71 \cdot 10^{-4}\theta = 3.0 \cdot 10^{-7} [Nrad^2/A^2] \quad (7.4)$$

Na figura 21 é apresentado o comportamento de C_e [$Nrad^2/A^2$] em relação a posição θ [rad].

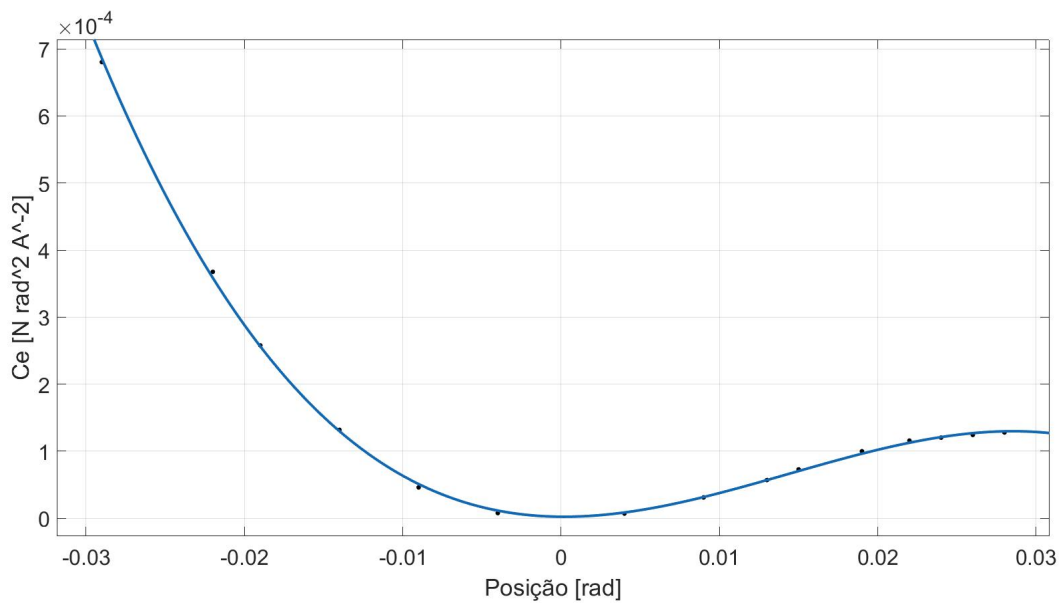


Figura 21 – Simulação da relação posição da viga e constante de proporcionalidade da força eletromagnética.

Observando a figura 21, é possível notar que a curva da constante de proporcionalidade beira a região negativa, isso pode ocorrer devido a ruídos apresentados nos sensores que são utilizados para obter os dados, de acordo com [PEGUEROS et al. 2017](#).

7.3 Simulação do controlador PID

Os dados representados na tabela 6 foram utilizados para fins de simulações realizadas no MATLAB/Simulink. As medições podem ser realizadas através dos seguintes instrumentos utilizados em laboratório: balança de precisão, paquímetro, medidor de ângulo, multímetro e indutímetro.

Tabela 6 – Parâmetros de simulação do sistema físico.

Parâmetro Físicos	Valores	Unidade de Medida
m, massa da viga	0.15	kg
l, distância da viga ao centro do ímã	0.23	m
g, gravidade	9.81	m/s ²
r, distância CM e centro de rotação	1.4 · 10 ⁻²	m
R, resistência	1.6	Ω
L, indutância	0.96 · 10 ⁻³	H
J, momento de inércia da viga	9.67 · 10 ⁻¹	kgm ²
C _e , Constante de Proporcionalidade	3.00 · 10 ⁻⁷	Nrad ² /A ²
\bar{x}_1 , ponto de equilíbrio	0.001	rad

Da mesma forma, foram realizadas simulações pelo MATLAB/Simulink utilizando a função de transferência do sistema físico e o controlador PID.

7.3.1 Simulação da planta do sistema

Os valores dos parâmetros físicos da tabela 6 foram substituídos na equação 5.12, obtendo-se a função de transferência representada pela equação 7.5.

$$G_p(s) = \frac{736}{s^3 + 1667s^2 + 42.56s + 70940} \quad (7.5)$$

Através da equação 7.5 foram encontrados os valores dos pólos para descobrir se o sistema é instável. Com isso, os valores encontrados foram de -1667 , $j6.52$ e $-j6.52$.

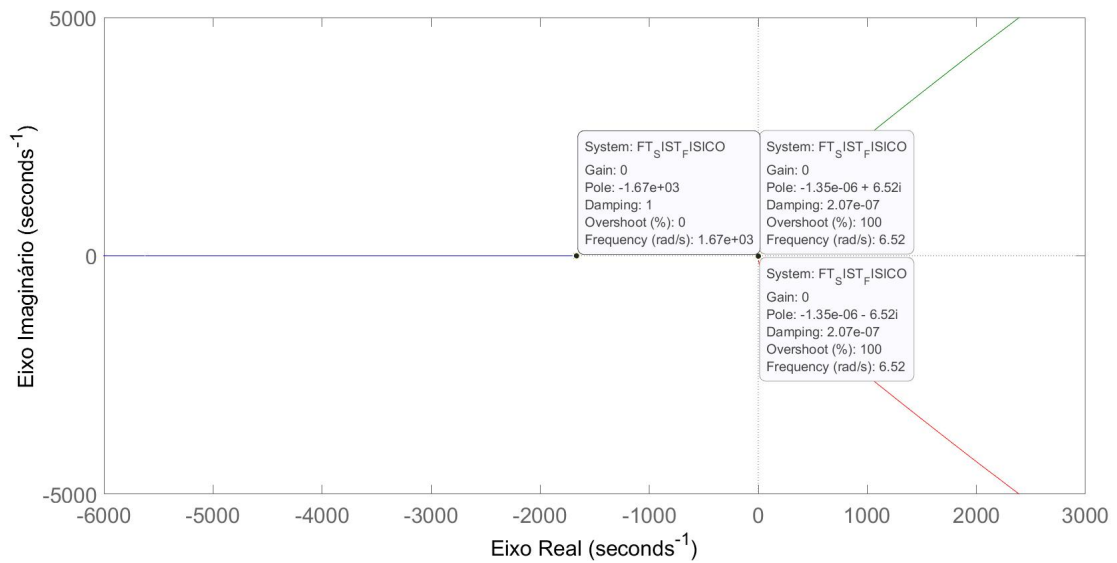


Figura 22 – Gráfico LGR da planta sem o controlador PID.

Fazendo uma análise dos valores, concluiu-se que os pólos estão a esquerda e em cima do eixo imaginário, portanto, o sistema é criticamente estável, no qual, é preciso estabilizá-lo. O LGR é representado na figura 22.

7.3.2 Encontrando K_{cr} e P_{cr}

Com a equação 7.5 foi utilizado o método da oscilação por tentativa e erro, no qual, de acordo com TANNURI, é uma variação da regra de sintonia de Ziegler-Nichols, e em seguida são realizadas simulações até encontrar o ganho e período crítico. A figura 23 mostra as oscilações permanentes simuladas no MATLAB/Simulink. O valor do ganho crítico que tornou o sistema criticamente estável foi de $K_{cr} = 0.73$ e o período crítico de $P_{cr} = 0.96$ s, este último, foi encontrado medindo a distância de dois picos consecutivos (AGUIAR; VENDRAMINI, 2018) como mostra na figura 17. Os valores obtidos da resposta ao sinal de degrau, na entrada dos sistemas, apresentaram resultados a serem ajustados. Portanto, o tempo de subida, o sobresinal, o tempo de acomodação e o erro em regime permanente são parâmetros a serem ajustados. (OLIVEIRA et al., 2016).

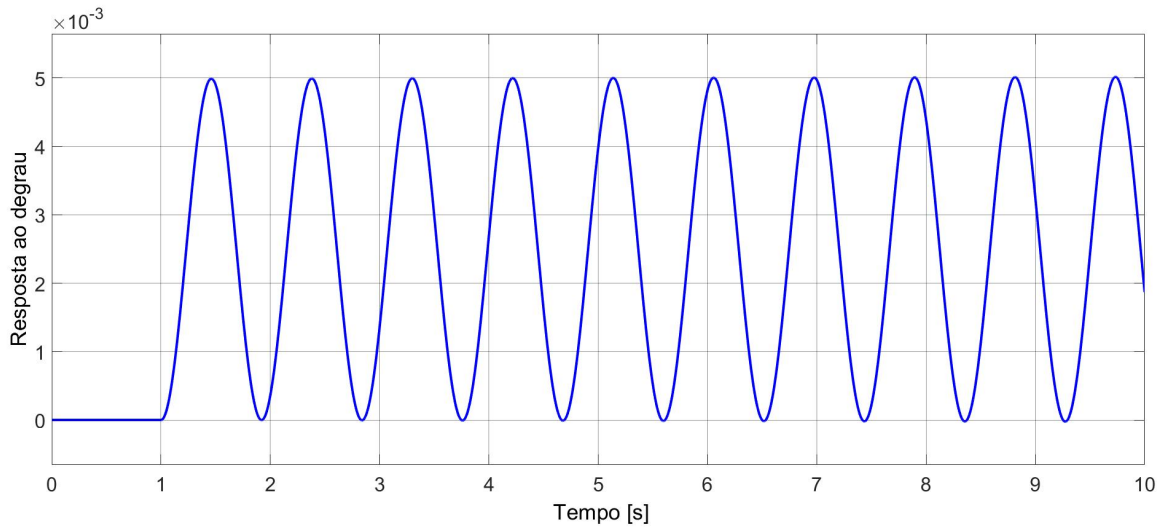


Figura 23 – Curva do Ganho Crítico.

A planta simulada sem o controlador PID resultou em um overshoot M_p e tempo de subida T_r tendendo ao infinito devido a instabilidade do controlador. Este resultado é prejudicial para o sistema, com isto, foi utilizado o controlador PID, no qual, foram realizados ajustes finos para melhorar o controle em relação ao overshoot e tempo de subida do sistema e o tempo de acomodação. Estes ajustes consistiram em alterar os ganhos K_p , K_i e K_d usando a sintonia de Ziegler-Nichols como ponto de partida (OLIVEIRA et al., 2016).

7.3.3 O primeiro ajuste utilizando a sintonia de Z&N

Sabendo os valores de K_{cr} e P_{cr} , foi calculado os valores de $K_p = 0.44$, $K_i = 0.91$ e $K_d = 0.052$ utilizando as equações da tabela 3. Logo após, foram substituídos na equação 6.6 obtendo a equação 7.6.

$$G_{cl}(s) = \frac{0.052s^2 + 0.44s + 0.91}{s} \quad (7.6)$$

Através da equação 7.6 do controlador PID, foi realizada a convolução com a equação 7.5 do sistema, e obteve-se a equação 7.7.

$$G_{T1}(s) = \frac{38.27s^2 + 323.84s + 669.76}{s^4 + 1667s^3 + 42.56s^2 + 70940s} \quad (7.7)$$

Pela equação 7.7 chegou-se na equação 7.8 com um ganho de realimentação de 23.57 do sistema em malha fechada.

$$G_{T1}(s) = \frac{38.27s^2 + 323.8s + 669.8}{s^4 + 1667s^3 + 944.6s^2 + 78570s + 15790} \quad (7.8)$$

Primeiro foi verificado a estabilidade do sistema com a equação 7.7. Os valores dos pólos encontrados são -1666.5 , $-0.17+j6.86$, $-0.17+j6.86$, -0.20 e os zeros -3.6 e -4.86 . Fazendo uma análise dos pólos, todos estão a esquerda do eixo imaginário, portanto, o sistema estabilizou. Assim, o LGR é representado pela figura 24.

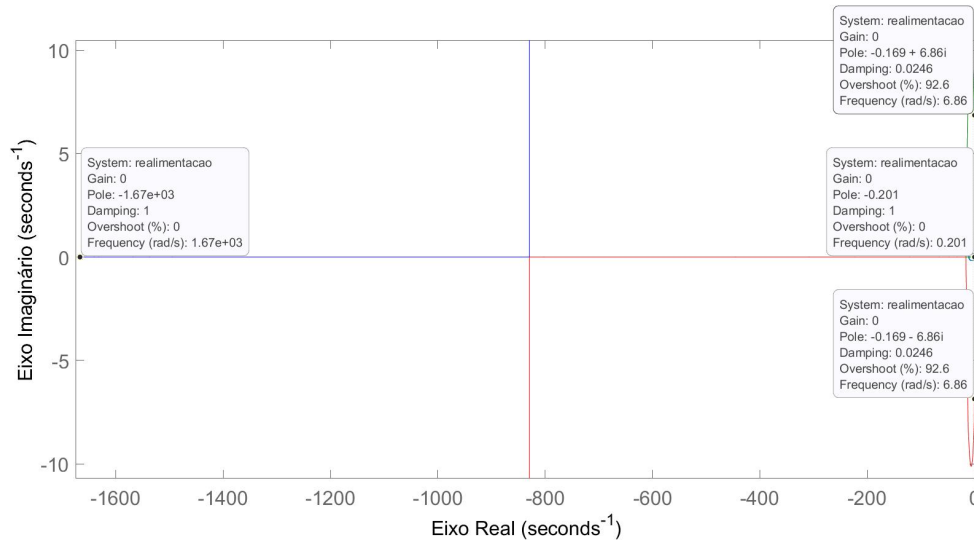


Figura 24 – LGR do sistema físico com o compensador PID no primeiro ajuste.

Assim sendo, com o primeiro ajuste realizado, o valor do overshoot foi nulo o $T_r = 10.2$ s com tempo de acomodação $T_s = 19.3$ s com erro em regime transitório e 1.44% de erro em regime permanente, ou seja, não alcançando a posição da viga de 0.028 rad. A simulação feita no MATLAB/Simulink é representada na figura 25.

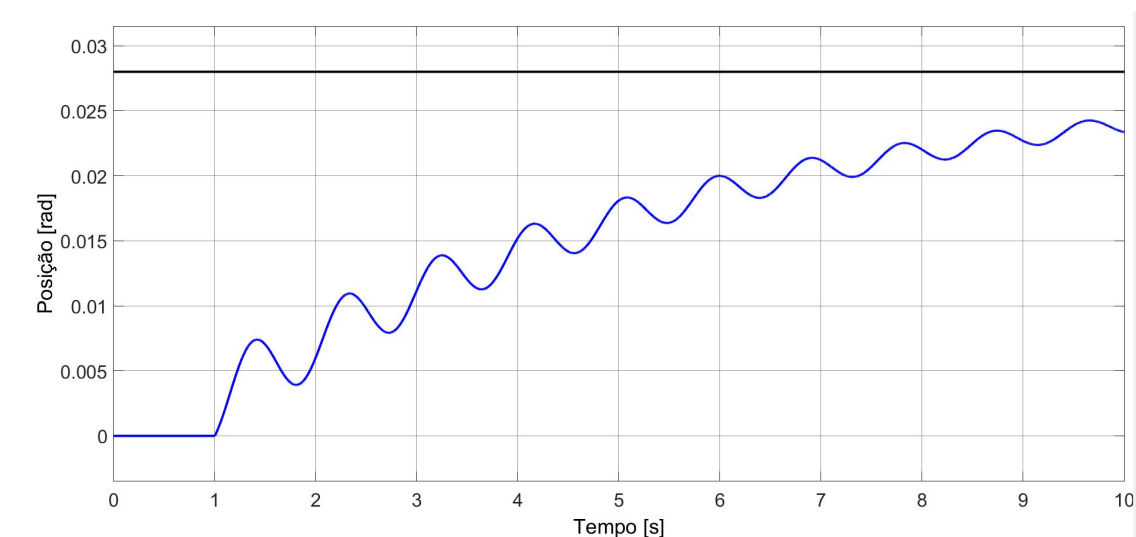


Figura 25 – Simulação do Sistema Físico com o compensador PID no primeiro ajuste.

7.3.4 O segundo ajuste do controlador PID

Foi realizado novamente outro ajuste fino do controlador PID para obter uma resposta mais satisfatória do controle do sistema. Para isto, foram alterados os ganhos dos valores para $K_p = 26.48$, $K_i = 148.8$, $K_d = 0.93$. Com estas alterações, foi projetado novamente o compensador PID para a planta, e assim, chegou-se na seguinte função de transferência descrito pela equação 7.9 (DESOUZA et al., 2020).

$$G_{c2}(s) = \frac{0.93s^2 + 26.48s + 148.8}{s} \quad (7.9)$$

Fazendo novamente a convolução, agora da equação 7.9 com a equação 6.6 do sistema foi encontrada a seguinte equação 7.10.

$$G_{T2}(s) = \frac{684.5s^2 + 19490s + 109500}{s^4 + 1667s^3 + 42.56s^2 + 70940s} \quad (7.10)$$

E através da equação 7.10 com ganho de realimentação de 23.57 chegou-se na equação 7.11 que é a equação do sistema em malha fechada.

$$G_{T2}(s) = \frac{684.48s^2 + 1.95 \cdot 10^4 s + 1.10 \cdot 10^5}{s^4 + 1.67 \cdot 10^3 s^3 + 1.62 \cdot 10^4 s^2 + 5.30 \cdot 10^5 s + 2.58 \cdot 10^6} \quad (7.11)$$

Foi novamente realizado uma verificação da estabilidade do sistema encontrando os valores dos pólos, e de acordo com a equação 7.11, foram encontrados os valores dos pólos -1657.43, $-2.16 + j17.08$, $-2.16 - j17.08$ e -5.26 . e os zeros -20.8 e -7.7 . Assim, concluiu-se que de acordo com os valores dos pólos o sistema se encontra em estabilidade devido a todos estarem do lado esquerdo do eixo imaginário conforme é demonstrado na figura 26.

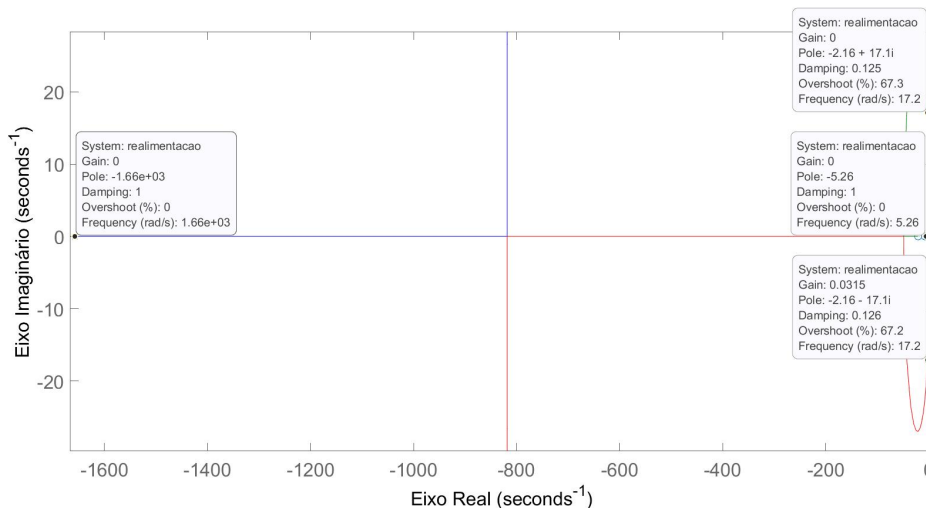


Figura 26 – LGR do sistema físico com o compensador PID no segundo ajuste.

Sabendo que o sistema estabilizou, foi utilizada a equação 7.14 para encontrar por meio do MATLAB/Simulink as curvas da figura 27.

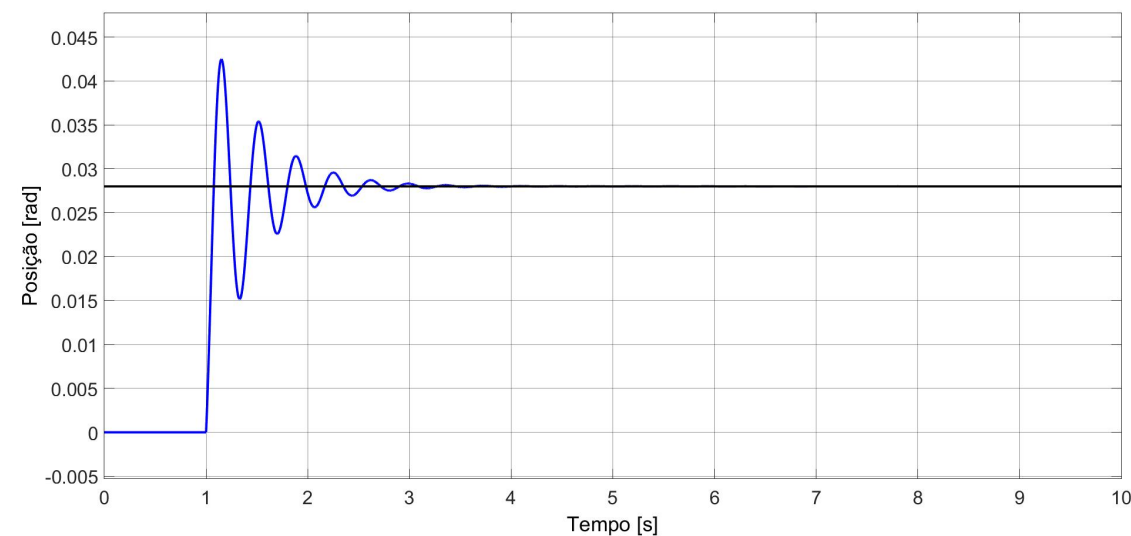


Figura 27 – Simulação do sistema físico com o compensador PID no segundo ajuste.

Novamente com o MATLAB/Simulink foram encontrados os novos valores do sobressinal (overshoot) que aumentou consideravelmente para o valor de $M_p = 51.5\%$ com tempo de subida de $T_r = 0.060$ s e tempo de acomodação de $T_s = 1.66$ s e o regime permanente nulo, mesmo com a oscilação no transitório a posição desejada de 0.028 rad foi alcançada.

Assim, de acordo com a figura 27 foi observado que após a diminuição dos ganhos K_p , K_i e K_d o sistema ficou mais lento e mais oscilatório. Houve uma piora em seu transitório, sem prejudicar o permanente, melhorando consideravelmente o seu desempenho em relação ao primeiro ajuste. Portanto, de acordo com os parâmetros adquiridos pelo segundo ajuste, notou-se que o sistema apresentou uma resposta satisfatória quanto ao primeiro ajuste (AGUIAR; VENDRAMINI, 2018), porém, é realizada outra simulação com novos valores dos ganhos para um melhor refinamento do controle do sistema.

7.3.5 O terceiro ajuste do controlador PID

Por fim, foi realizado o terceiro e último ajuste fino do controlador PID para obter uma resposta mais refinada do controle do sistema. Para isto, foram alterados novamente os ganhos pid, para os valores de $K_p = 37.15$, $K_i = 87.09$, $K_d = 3.819$. Com estas alterações, foi projetado novamente o compensador PID para a planta, com isto, chegou-se na seguinte função de transferência descrito pela equação 7.9 (DESOUZA et al., 2020).

$$G_{c3}(s) = \frac{3.82s^2 + 37.15s + 87.09}{s} \quad (7.12)$$

Novamente foi realizada a convolução, agora da equação 7.12 com a equação 6.6 do sistema, e foi encontrada a seguinte equação 7.10.

$$G_{T3}(s) = \frac{2811.52s^2 + 27342.4s + 64098.24}{s^4 + 1667s^3 + 42.56s^2 + 70940s} \quad (7.13)$$

E através da equação 7.13 com ganho de realimentação de 23.57 chegou-se na equação 7.14 do sistema em malha fechada.

$$G_{T3}(s) = \frac{2.81 \cdot 10^3 s^2 + 2.73 \cdot 10^4 s + 6.41 \cdot 10^4}{s^4 + 1.67 \cdot 10^3 s^3 + 6.63 \cdot 10^4 s^2 + 7.15 \cdot 10^5 s + 1.51 \cdot 10^6} \quad (7.14)$$

De acordo com a equação 7.14 foram encontrados os valores dos pólos -1626.5, -23.47, -14.26 e -2.78 e zeros -5.78 e -3.94. Portanto, com os novos valores dos pólos, o sistema se encontra em estabilidade, devido a todos eles estarem do lado esquerdo do eixo imaginário conforme é representado na figura 28.

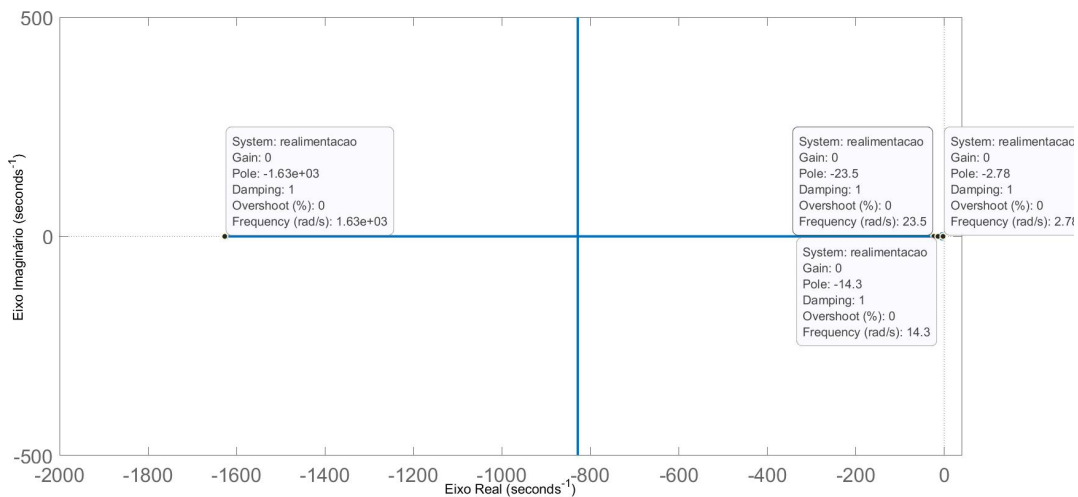


Figura 28 – LGR do sistema físico com o compensador PID no terceiro ajuste.

Assim, com a equação 7.14 foi encontrado por meio do MATLAB/Simulink as curvas da figura 29.

Com os novos valores dos ganhos K_p , K_i e K_d , houve uma melhora significativa do sistema, quanto ao overshoot que diminuiu para $M_p = 10.6\%$ com tempo de subida de $T_r = 0.036$ s e tempo de acomodação de $T_s = 0.858$ s e o regime permanente nulo, sem muitas oscilações no transitório e a posição de 0.028 rad foi alcançada.

Portanto, de acordo com a figura 29 foi observado que após a terceira alteração dos ganhos o sistema ficou mais rápido e mais oscilatório. Houve uma piora em seu transitório, sem prejudicar o permanente, melhorando bruscamente o seu desempenho. Com isto, de acordo com o terceiro ajuste, notou-se que o sistema apresentou uma resposta satisfatória,

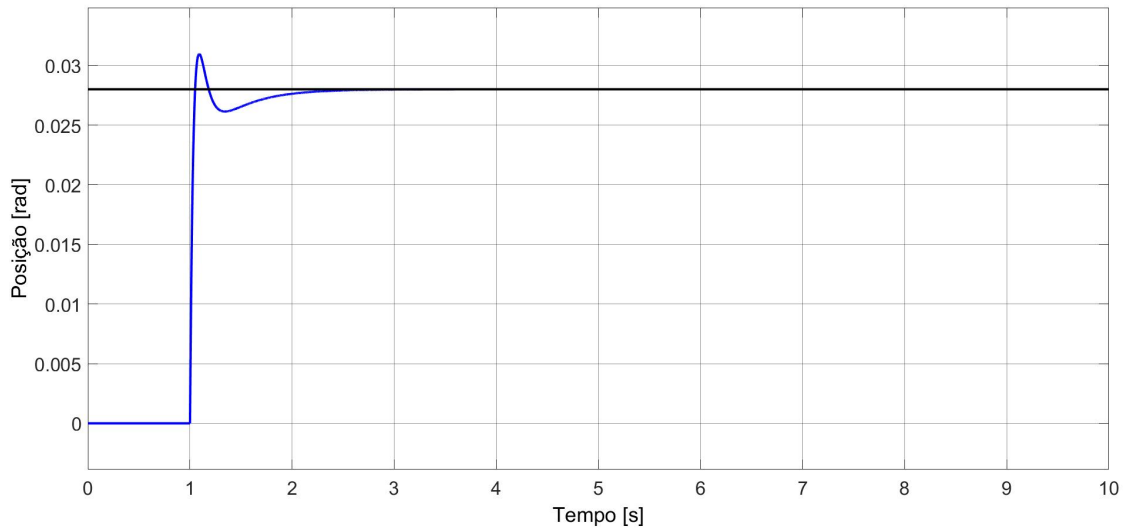


Figura 29 – Simulação do sistema físico com o compensador PID no terceiro ajuste.

com os parâmetros adequados, sendo que, o sistema tornou-se mais rápido com tempo de subida e acomodação menor e com sobresinal mínimo, próximo de 10% que é o valor adequado para um bom desempenho, de acordo com [EM 2014](#).

7.3.6 Resumo dos parâmetros

A tabela 7 informa os parâmetros encontrados ao realizar a simulação de oscilação por tentativa e erro do sistema para encontrar o K_{cr} e P_{cr} e os três ajustes, utilizando o método de Z&N e novamente o método por tentativa erro, para encontrar os melhores valores de K_p , K_i e K_d para a estabilidade adequada.

Tabela 7 – Valores dos ganhos e parâmetros simulados.

	K_{cr}	P_{cr} [s]	K_p	K_i	K_d	T_r [s]	T_s [s]	M_p [%]	Erro em regime permanente
Oscilação por tentativa e erro	0.73	0.96	x	x	x	x	x	x	x
Primeiro ajuste	x	x	0.44	0.91	0.052	10.2	19.3	nulo	1.44%
Segundo ajuste	x	x	26.48	148.8	0.93	0.06	1.66	51.5	nulo
Terceiro ajuste	x	x	37.15	87.09	3.82	0.036	0.86	10.6	nulo

A tabela 8 reúne as informações acerca dos pólos e zeros encontrados do sistema desde a planta sem o controlador até o sistema realimentado em malha fechada.

Tabela 8 – Valores dos pólos e zeros encontrados pelas simulações.

	Pólo 1	Pólo 2	Pólo 3	Pólo 4	Zero 1	Zero 2
Sem o controle PID	-1667	j6.52	-j6.52	x	x	x
Primeiro ajuste	-1666.5	-0.17+j6.86	-0.17-j6.86	-0.20	-3.6	-4.86
Segundo ajuste	-1657.43	-2.16+j17.08	-2.16-j17.08	-5.26	-20.8	-7.7
Terceiro ajuste	-1626.5	-23.47	-14.26	-2.78	-5.78	-3.94

Com isso, as duas tabelas informam os valores dos parâmetros resultantes obtidos ao realizar as simulações. Logo em seguida são apresentados o diagrama de bode do sistema e a estrutura do sistema de levitação magnética em tempo discreto.

7.3.7 Diagrama de Bode

Os Diagramas de Bode são uma representação gráfica da resposta em frequência baseada em dois gráficos distintos. No gráfico superior é representado o módulo da resposta em frequência, em decibéis, em relação à frequência, representada em escala logarítmica. Já no gráfico inferior, a representação é dada pela fase da função de transferência em relação à frequência ω (PONTAROLO, 2019). A resposta em frequência do controlador PID utilizado é visto no diagrama de Bode do terceiro ajuste representado na figura 30.

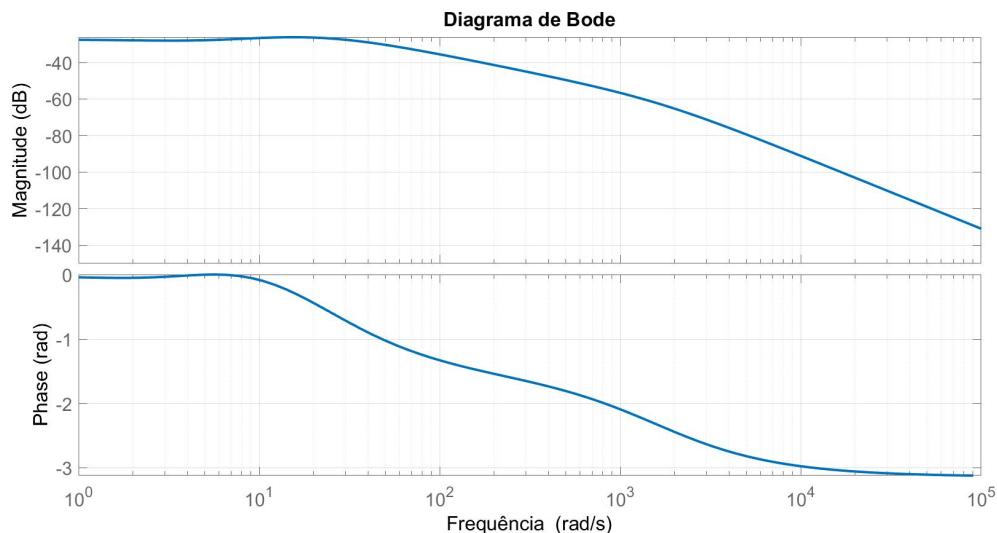


Figura 30 – Diagrama de Bode do sistema físico simulado com o compensador PID no terceiro ajuste.

À medida que a frequência de entrada aumenta, a saída não pode seguir mais a entrada, por que é necessário um certo intervalo de tempo para o sistema atingir uma amplitude elevada (SANTOS, 2009).

7.4 Análise da estrutura PID em tempo discreto

De acordo com LEMOS 2004 o sistema em tempo contínuo estabilizado e adequado aos requisitos de desempenho, pode ser transformado para sistema em tempo discreto. Ao encontrar a equação discretizada é possível analisar a sua estabilidade. No plano s a estabilidade está condicionada a localização dos polos no semiplano esquerdo no gráfico do plano s . Caso exista algum pólo no semiplano direito do plano s o sistema é instável. Se há pelo menos um pólo no eixo imaginário do plano s , o sistema é criticamente estável.

Conforme foi mostrado como funciona a estabilidade no plano s , a estabilidade no plano z é semelhante, ou seja, também depende dos polos do sistema. No plano z , a estabilidade também é de acordo com a localização dos polos, porém, dentro do círculo unitário. Se todos os polos estiverem dentro no círculo unitário, o sistema é estável, se pelo menos um pólo estiver localizado fora do círculo unitário o sistema é instável e se um dos polos estiver localizado sobre o círculo unitário o sistema é criticamente estável (LEMOS, 2004).

A equação 7.14 em tempo contínuo apresentou o melhor desempenho em relação ao M_p , T_r e T_s e por isso foi realizado o processo de discretização utilizando o MATLAB/Simulink para que o controlador seja usado em um computador/microcontrolador que, no caso, trabalha apenas com sinais discretos. Foi escolhido o período de amostragem para teste variando entre 0 a 10 s, isso feito para evitar qualquer tipo de existência de polos instáveis, de acordo com o algoritmo criado no MATLAB/Simulink feito pelo LEMOS 2004. O valor escolhido foi de $T = 0.02$ s para eliminar a existência de polos instáveis no sistema discretizado e manter a integridade do sinal da estrutura de compensação em tempo discreto.

Utilizando a transformada Z do MATLAB/Simulink, foi encontrada a forma discretizada da equação 7.11, conforme a equação 7.15.

$$G_z(z) = \frac{0.02505z^3 - 0.04488z^2 + 0.01955z + 0.0004819}{z^4 - 2.323z^3 + 1.773z^2 - 0.4449z + 3.309 \cdot 10^{-15}} \quad (7.15)$$

A resposta ao degrau em tempo discreto da equação 7.15 é representada pela figura 31.

7.4.1 Transformando Função de Transferência em Equação de Diferenças

Quando um sistema contínuo (que possui a transformada de Laplace) é discretizado para resolver a equação diferencial que o caracteriza, obtém-se uma equação de diferenças que, por sua vez, pode ser analisada pela transformada Z (TONIDANDEL, 2010). A função de transferência pode ser obtida por equação de diferenças de um sistema. A

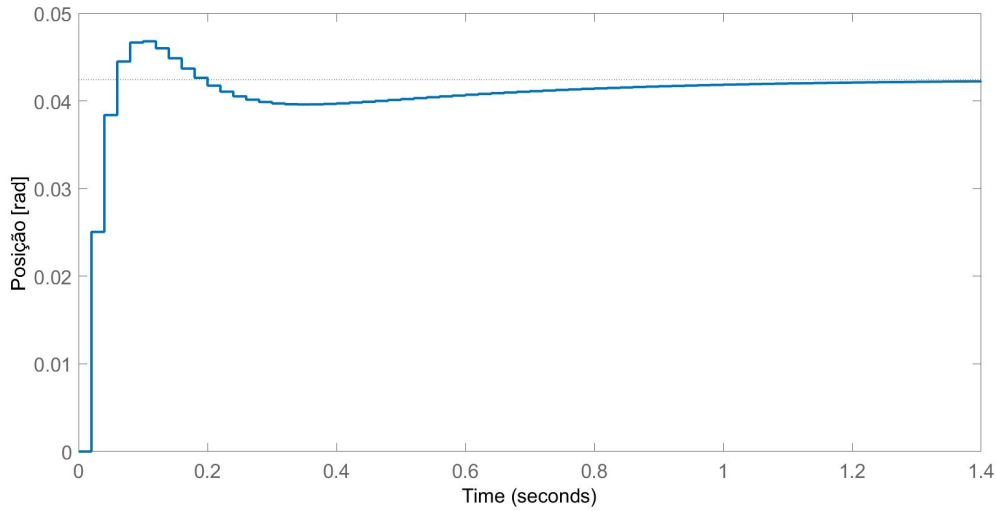


Figura 31 – Curva discretizada do sistema físico simulado com o compensador PID no terceiro ajuste.

equação de diferenças de n ordem relaciona a entrada $x[n]$ com a saída $y[n]$ como está representado na equação 7.16 (HAYKIN, 2001):

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{\sum_{k=0}^N a_k z^{-k}} \quad (7.16)$$

A função de transferência de um sistema descrita por uma equação de diferenças é uma razão de polinômios em z^{-1} e, dessa forma, é denominada função de transferência racional. O coeficiente de z^{-k} no polinômio do numerador é o coeficiente associado com $x[n-k]$ na equação de diferenças. O coeficiente de z^{-k} no polinômio do denominador é o coeficiente associado com $y[n-k]$ na equação de diferenças. Esta correspondência nos permite não somente encontrar a função de transferência dada a equação de diferenças, como também encontrar a descrição por equação de diferenças de um sistema dada uma função de transferência racional (HAYKIN, 2001).

Dividindo o numerador e denominador da equação 31 por z^4 chegou-se na equação 7.18 com uma razão de polinômios em z^{-k} (LEMOS, 2004).

$$G_z(z) = \frac{0.02505z^{-1} - 0.04488z^{-2} + 0.01955z^{-3} + 0.0004819z^{-4}}{1 - 2.323z^{-1} + 1.773z^{-2} - 0.4499z^{-3} + 3.309 \cdot 10^{-15}z^{-4}} \quad (7.17)$$

Comparando a equação 7.16 com a equação 7.17 tem-se a equação de diferenças do controlador descrita na equação 7.18.

$$y[n] = 0.02505x[n-1] - 0.04488x[n-2] + 0.01955x[n-3] + 0.0004819x[n-4]$$

$$-2.323y[n - 1] + 1.773y[n - 2] - 0.4499y[n - 3] + 3.309 \cdot 10^{-15}y[n - 4] \quad (7.18)$$

A figura 32 mostra a forma direta II da função de transferência $H(z)$ obtida a parte da equação 7.18.

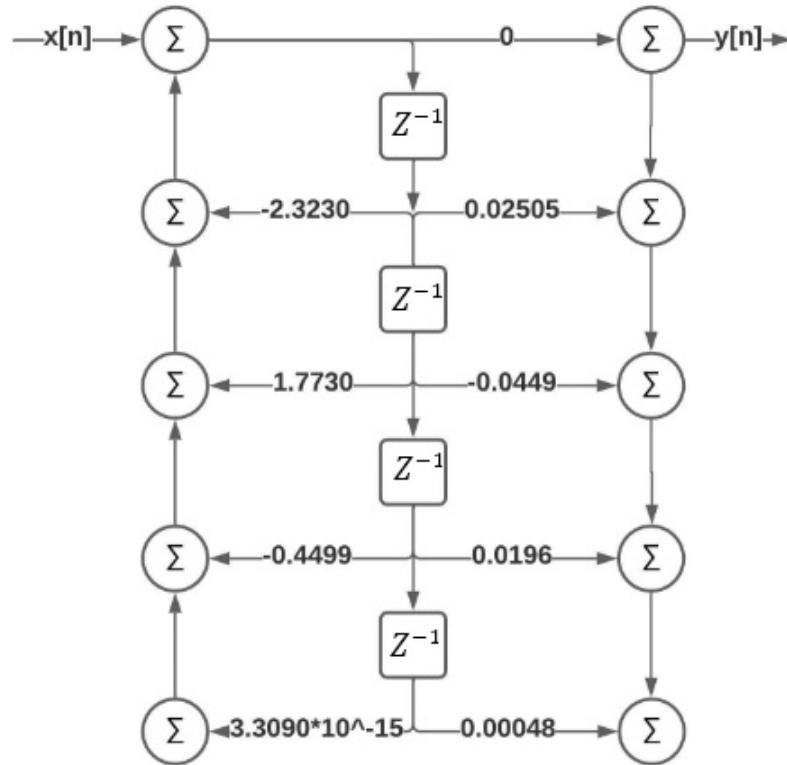


Figura 32 – Diagrama de blocos do Sistema Físico com o compensador PID no terceiro ajuste na forma direta II (Imagem modificada de HAYKIN 2001).

A figura 33 mostra o diagrama de blocos de um sistema em um computador/microcontrolador no tempo discreto com estrutura de compensação de sistema de controle PID realimentado e os conversores necessários para interligação do sistema analógico-digital (LEMOS, 2004).

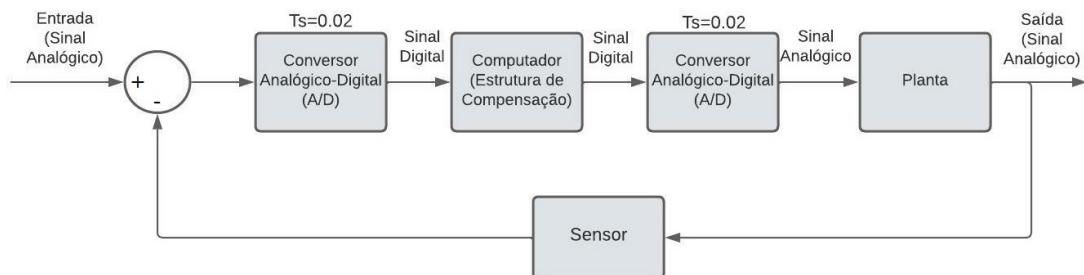


Figura 33 – Diagrama de blocos do Sistema Físico com o compensador PID no terceiro ajuste para implementar em um microcontrolador (Figura modificada de LEMOS 2004).

Este sistema do diagrama de blocos da figura 33 será implementado em trabalhos futuros.

7.5 Considerações finais

Os tópicos abordados neste capítulo serviram para entender o funcionamento adequado dos métodos de controles utilizados para estabilizar um sistema instável. Assim sendo, foi realizado o cálculo do ganho do sensor para incluir no cálculo do sistema realimentado, logo em seguida, foi calculado a constante de proporcionalidade da força eletromagnética e por fim realizou-se a simulação do compensador PID na planta do sistema. Para que os cálculos fossem realizados, foi necessário simular valores do sistema físico e encontrar o ganho e período crítico por meio do método de oscilação por tentativa e erro. Tendo encontrado os valores de K_{cr} e P_{cr} , foi realizado o método de sintonia de Ziegler-Nichols para o primeiro ajuste e o método por tentativa e erro para os demais ajustes, sendo que isto, foi necessário para que fossem encontrados os valores de K_p , K_i e K_d . Assim, como foi dito, no primeiro ajuste foi utilizado a sintonia de Z&N, porém, esta técnica não apresentou resultado satisfatórios, tendo um sistema estável, porém, com algumas oscilações, com isto, foram realizados mais dois ajustes por tentativa e erro, sendo que o terceiro ajuste apresentou os melhores parâmetros de controle para estabilizar a planta. Por fim, ao estabilizar a planta do sistema com o terceiro ajuste, foi realizado a discretização da função de transferência e encontrado o gráfico, função de transferência em tempo discreto, a forma direta II e a equação das diferenças que pode ser utilizado em um computador/microcontrolador.

Parte II

Aspectos Finais

8 Conclusão

Foram realizadas pesquisas bibliográficas de diferentes autores, para analisar o que é, como funciona e o comportamento da levitação magnética e suas aplicações em diferentes áreas da engenharia.

O eletroimã modelado matematicamente teve a tarefa de funcionar como atuador e foi modelado para sustentar a viga a uma inclinação de $\theta = \mathbf{0.0028 \text{ rad}}$, fazendo com que a viga permanecesse em paralelo com o atuador. Os parâmetros encontrados do eletroimã como força magnética, resistência e indutância, são fundamentais para levantar uma viga de massa (m), sendo que, os valores encontrados foram adequados para realizar este processo, pois, a distância calculada para o eletroimã atuar com a força magnética é maior do que a necessária para este trabalho, com isso, a força magnética é suficiente caso o sistema receba uma viga de massa (m) maior que o projetado.

O sistema físico foi equacionado integrando-se ao eletroimã. As equações foram desenvolvidas usando equações diferenciais em espaço de estados para encontrar a função de transferência da planta do sistema. A equação da planta encontrada, é não linear e instável, por isso, foi necessário linearizar e estabilizar ao redor do ponto de equilíbrio que é o valor próximo de zero, a saber $\theta = \mathbf{0.001 \text{ rad}}$, utilizando um método matemático e um controlador.

O sensor Hall foi simulado para obter a posição da viga de acordo com os dados próximos a trabalhos correlatos, por isso, antes de calcular a planta com o controlador PID, foi necessário calcular seu ganho. Sendo assim, com os valores da posição angular e tensão lidos pelo sensor, o valor obtido ao calcular o ganho foi de $K_{SH} = \mathbf{23.58 \text{ V/m}}$, e este valor de ganho foi utilizado para realizar o processo de realimentação do sistema.

O controlador utilizado foi do tipo PID. Este controlador garante bom desempenho e estabilidade robustos ao sistema em que a não linearidade influencia no controle da viga. Foi verificado com o critério de estabilidade o comportamento do sistema, sendo que, através do controlador PID utilizado na planta, foram encontrados os pólos e verificado se o sistema é ou não instável. Na primeira simulação sem o controlador PID, notou-se a instabilidade do sistema devido aos pólos estarem na origem do eixo imaginário, figura 22, isto tornou-se o sistema muito oscilatório, figura 23, ou criticamente estável, sendo necessário o uso do compensador para estabilizar.

Por isso, foram realizados três ajustes finos no controle do sistema em malha fechada. Nos três ajuste, os pólos encontraram-se a esquerda do eixo imaginário do plano (s), de acordo com as figuras 24 e 26, porém, o terceiro ajuste foi considerado o melhor de acordo com a tabela 8, devido aos pólos estarem mais distantes, ou seja, mais a esquerda do

eixo imaginário que nas simulações anteriores, figura 28, e também por não apresentarem muitas oscilações devido aos pólos serem reais, tornando o sistema em malha fechada mais rápido e conseqüentemente melhorando os parâmetros do sistema, deixando-o mais rápido que os anteriores, como mostra a figura 29.

Assim sendo, foi utilizado o método de Ziegler-Nichols como ponto de partida no primeiro ajuste para encontrar os ganhos iniciais, no entanto, foram realizados mais dois ajustes por tentativa e erro no controlador, para obter melhores resultados acerca dos parâmetros necessários, para melhorar a estabilidade do sistema. Como foi dito anteriormente, e de acordo com a tabela 7 e 8 o terceiro ajuste foi melhor que o primeiro e segundo, devido ao menor overshoot $M_p = 10.6\%$, tempo de subida de $T_r = 0.036$ s, tempo de acomodação de $T_s = 0.86$ e erro em regime permanente nulo, fazendo com que o sistema estabilizasse na posição desejada e com maior rapidez, para isso, os ganhos proporcional, integrativo e derivativo foram alterados para $K_p = 37.15$, $K_i = 87.09$ e $K_d = 3.82$, de forma cautelosa, evitando com que o sistema entrasse em instabilidade.

Por fim, o terceiro ajuste que apresentou o melhor resultado foi escolhido, para discretizar a equação em malha fechada, com o intuito de em trabalhos futuros criar um algoritmo da planta controlada e estabilizada em um computador/microcontrolador. Para isto foi encontrado o período de amostragem adequado no valor de $T_{amostragem} = 0.02$ s para preservar as informações e evitar qualquer tipos de perdas do sistema ao realizar a discretização. Após ocorrer a discretização do sistema, foi possível encontrar a equação de diferenças que é o cálculo fundamental para ser usado em forma de algoritmo por um computador/microcontrolador e o diagrama de forma direta II para demonstrar o funcionamento de forma lógica.

Portanto, os estudos realizados neste trabalho foram de grande importância para se aprofundar em conceitos importantes da matemática e da física como o magnetismo, a modelagem matemática do sistema, o controlador que estabiliza o sistema em tempo contínuo e discreto podendo ser implementado em um sistema de compensação em computadores/microcontroladores. Por meio de simulações foi possível verificar os erros e corrigí-los através do controlador e também prever possíveis erros de instabilidades que façam com que o sistema não funcione adequadamente.

8.1 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, pode-se implementar o sistema de Levitação Magnética experimentalmente realizando a montagem do sistema físico junto com os sensores e um sistema de potência. Criar um algoritmo com a equação de diferenças encontrada, para implementar em um computador/microcontrolador. Realizar uma análise minuciosa da margem de erro do sensor Hall. Com um osciloscópio pode-se obter os dados das curvas

da planta sem o controlador e com o controlador PID, logo após, realizar comparações com todos os dados obtidos pelas simulações realizadas no MATLAB/Simulink. Outra proposta é a de realizar mais estudos acerca de outras técnicas de controladores para implementar nesta planta. Por fim, é necessário realizar um estudo termodinâmico, simular a temperatura do eletroímã e calcular o consumo necessário de corrente do sistema para evitar danos que comprometam a estrutura.

Referências

- AGUIAR, G. L.; VENDRAMINI, G. Estudo e análise das ações de controle pid em um determinado sistema em malha fechada. *Revista Científica Semana Acadêmica. Fortaleza, ano MMXVIII*, n. 000137, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 71 e 75.
- ALLEGRO. *Datasheet Sensor Hall Allegro A1308/A1309*. 2017. Disponível em: <<https://www.allegromicro.com/en/Products/Sense/Linear-and-Angular-Position/Linear-Position-Sensor-ICs/A1308-9>>. Acesso em: 26 nov. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 48.
- ANTUNES, P. I. T. d. C. *Medição de posição de rotor em mancal magnético através de sensor Hall*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012. Citado na página 47.
- ARAÚJO, M. S. T. de; MÜLLER, P. “levitação magnética”: Uma aplicação do eletromagnetismo. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 19, n. 1, p. 115–120, 2002. Citado na página 27.
- ASSIS, A. K. Teorias de ação a distância—uma tradução comentada de um texto de james clerk maxwell. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, v. 7, p. 53–76, 1992. Citado na página 27.
- AZEVEDO, D. L. de. *Interface para Sintonia de Controladores PID*. 2009. [Online; accessed 15-março-2022]. Disponível em: <<http://dSPACE.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/17407/DIEGO%20LINHARES%20DE%20AZEVEDO%20-%20TCC%20ENG.%20EL%20TRICA%202009.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Citado na página 61.
- BAYER, F. M.; ARAÚJO, O. C. B. d. Controle automático de processos. 2016. Citado 3 vezes nas páginas 13, 59 e 60.
- BOJORGE, N. Estabilidade método critério de routh-hurwitz casos especiais. 2017. Citado 3 vezes nas páginas 13, 64 e 65.
- CABRAL, T. D. F. Dinâmica e controle de um sistema maglev simplificado. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2015. Citado na página 28.
- CAMPESTRINI, L. Sintonia de controladores pid descentralizados baseada no método do ponto crítico. 2006. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 59.
- CARDOSO, M. *CONTROLO INTELIGENTE DE UM SISTEMA DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 13, 28, 29 e 38.
- CHAPRA, S. C. *Métodos Numéricos Aplicados com MATLAB® para Engenheiros e Cientistas-3*. [S.l.]: AMGH Editora, 2013. Citado na página 67.
- COSTA, E. A. d. *Controle da suspensão eletromagnética de um veículo MAGLEV*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2004. Citado na página 28.

COVACIC, M. R. et al. Síntese de sistemas estritamente reais positivos através do critério de routh-hurwitz. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, SciELO Brasil, v. 21, n. 3, p. 215–223, 2010. Citado na página 66.

D. MICHAELIS. *Eletromagnetismo*. 2019. Disponível em: <<http://michaelis.uol.com.br/busca?r=0&f=0&t=0&palavra=magnetismo>>. Citado na página 27.

DAVID, E. G. et al. Feasibility study of an hts-maglev line at the federal university of rio de janeiro. *Proc. of MAGLEV 2006*, p. 749–752, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.

DESOUSA, M. A. et al. Desenvolvimento de uma bancada didática para as disciplinas de sistemas de controle com identificação de planta e projeto de controlador pid via simulação computacional. Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 74 e 75.

DIAS, D. H. N. Comportamento da força de levitação em mancais lineares frente a oscilações do supercondutor. *Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.

EM, U. D. P. Moisés duarte filho. 2014. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 77.

FACCIN, F. Abordagem inovadora no projeto de controladores pid. 2004. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 56.

FRANÇA, F. F. Controlador pid para controle de temperatura de uma carga resistiva ac. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2018. Citado na página 55.

FRANÇA, T. N. *ESTUDO DA LEVITACÃO ELETRODINÂMICA APLICADA A VEÍCULOS MAGLEV*. 2019. Disponível em: <<http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2019-1/2016033359--172/file>>. Acesso em: MAI. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 35.

GOMES, E. P. A. Controle digital para um sistema de levitação magnética. 2016. Citado 5 vezes nas páginas 13, 47, 48, 67 e 68.

GOMES, R. R.; SOTELO, G. G.; STEPHAN, R. M. Desenvolvimento de um sistema dático para levitação eletromagnética com o auxílio do método dos elementos finitos. In: *Congresso Brasileiro de Automática, Gramado*. [S.l.: s.n.], 2004. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 34.

GOMES, R. R.; STEPHAN, R. M. Um experimento para ilustrar o sistema de levitação eletromagnética utilizado em trens maglev. *Semana da Eletrônica/UFRJ*, v. 1, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 13, 35 e 36.

HAYKIN, B. V. V. S. *Sinais e Sistemas*. 1.ed. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. ISBN 85-7307-741-7. Citado 3 vezes nas páginas 14, 80 e 81.

HORIZONTE, B. Projeto e implementação de estratégias de controle clássicas aplicadas a um sistema de levitação magnética. Citado na página 29.

II, S. C. P. Design, fabrication and control of a single actuator magnetic levitation system. *Senior Honors Thesis, Texas A&M University, College Station, TX*, Citeseer, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 47, 48 e 67.

- IMAMAGNETS. *Aplicacoes de eletroimã na medicina. Quais aplicações os eletroimãs tem na medicina?* 2019. Disponível em: <<https://www.imamagnets.com/pt-pt/blog/aplicacoes-de-eletroimas-na-medicina/>>. Citado na página 27.
- JUNIOR, C. A. V. V. Linearização exata por realimentação de estados aplicada ao controle de um sistema de levitação magnética. Instituto de Matemática, 2010. Citado na página 29.
- KATSUHIKO, O. *Engenharia de controle moderno*. [S.l.]: São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010. Citado 9 vezes nas páginas 13, 15, 55, 56, 57, 58, 61, 62 e 63.
- LEMO, S. C. A. Simulação de controle de sistema de levitação magnética. 2004. Citado 8 vezes nas páginas 14, 29, 47, 48, 67, 79, 80 e 81.
- LOURENÇO, J. Sintonia de controladores pid. *Escola superior de tecnologia*, 1997. Citado na página 55.
- MAITELLI, A. L.; CARVALHO, F. C. A. de. Programa computacional interativo para simulação e otimização de controladores pid. In: *Artigo de Congresso.[sd]*. [S.l.: s.n.], 2003. Citado na página 61.
- MILHOMEM, R. L. et al. Construção de uma bancada didática de processo de levitação magnética–maglev. 2010. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- MOURA, V. R. de. Análise energética do módulo de transporte do maglev cobra. *Monografia Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 37.
- MUNIZ, S. R. Resumo sobre controladores pid. 2017. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4132451/mod_resource/content/0/Resumo_controladores_PID.pdf>. Citado 4 vezes nas páginas 15, 56, 57 e 61.
- NISE, N. S. *Control systems engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 13, 57 e 58.
- OLIVEIRA, J. P. A. et al. Control plant generic pid controllers using the second tuning method ziegler-nichols. *ITEGAM-JETIA*, v. 2, n. 8, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 62, 71 e 72.
- OPPENHEIM, A. V. et al. *Signals & systems*. [S.l.]: Pearson Educación, 1997. Citado na página 64.
- PATSKO, L. F. Tutorial–aplicações, funcionamento e utilização de sensores. *Maxwell Bohr: Instrumentação eletrônica*, p. 84, 2006. Citado na página 47.
- PEGUEROS, M. C. et al. Modelado y control de un sistema de levitación magnética basado en un cojinete magnético activo. *Nova scientia*, Universidad de La Salle Bajío AC, Coordinación de Investigación, v. 9, n. 19, p. 229–254, 2017. Citado 11 vezes nas páginas 13, 28, 29, 33, 47, 48, 51, 67, 68, 69 e 70.
- PONTAROLO, L. A. *Ajuste de controlador PID por método de autossintonia baseado em estimativa de robustez*. Dissertação (Mestrado) — Brasil, 2019. Citado na página 78.

PUDENZI, O. P. D. M. A. *Levitação Magnética*. Tese (Doutorado) — Instituto de Física Gleb Wataghin. Citado na página 27.

RAJESHKANNA, G. Design, development and testing of an electromagnet for industrial waste metal scraps cleaning. *International Journal of Electrical Engineering & Technology (IJEET)*, v. 3, n. 3, p. 1–7, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 41, 43 e 45.

SALVARANI, R. D. O. Análise da estabilidade do controle proporcional de um processo químico. 2015. Citado 3 vezes nas páginas 15, 65 e 66.

SANTOS, A. M. M. *Controlo por computador de um sistema de levitação magnética*. Tese (Doutorado) — Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 13, 28 e 59.

SANTOS, H. d. S. Ajuste de controle pid utilizando algoritmo genético. 2009. Citado na página 78.

SARAIVA, F. d. A. Métodos de sintonia em controladores pid. *Projeto de graduação, Centro Universitário La Salle, Canoas, RS, Brasil*, 2011. Citado na página 29.

SHU'AIBU, D. S.; ADAMU, S. S. *Design, Development and Testing of an Electromagnet for magnetic levitation system*. [S.l.]: Nigeria. Acedido a. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 42.

SOUSA, W. D. et al. Projeto maglev cobra-levitação supercondutora para transporte urbano. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 38, n. 4, p. e4308, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.

STEPHAN, R. et al. Experiências de levitação magnética. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA'2002*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 309–312. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 35.

SUCENA, M. P.; STEPHAN, R. M. Modelo para gestão ambiental de sistemas de transporte urbano por levitação magnética com aplicação da teoria fuzzy. *Journal of Transport Literature*, SciELO Brasil, v. 6, p. 152–179, 2012. Citado na página 28.

TANNURI, E. A. Apostila sobre pid e métodos de sintonia. Citado na página 71.

TAVARES, L. G. Desenvolvimento de uma planta didática para estudo e demonstração de controle pid de velocidade de motores de corrente contínua. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 58.

THERAJA, B. *A textbook of electrical technology*. [S.l.]: S. Chand Publishing, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 43.

TIWARI, S.; SARASVAT, V.; PAL, A. K. Tyre safety by electromagnetic field. *SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology*, v. 6, n. 01, p. 01–06, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 45.

TONIDANDEL, D. A. V. Decifrando a transformada z. In: *XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito*. [S.l.: s.n.], 2010. Citado na página 79.

TORRES, J. I. G.; ORTIZ, J. H. G. Área transversal de un cable y su calibre awg (american wire gauge). *Conciencia Tecnológica*, Instituto Tecnológico de Aguascalientes, n. 46, p. 43–47, 2013. Citado na página 44.

WIKIPEDIA. *Wikipedia*. [S.l.]: PediaPress, 2004. Citado na página [42](#).

WINIK, S. V. Estudo das tecnologias da levitação magnética: modelagem matemática e computacional. 2015. Citado 2 vezes nas páginas [13](#) e [34](#).

WU, H.; WANG, Z.; LV, X. Design and simulation of axial flow maglev blood pump. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business*, Citeseer, v. 3, n. 2, p. 42, 2011. Citado 2 vezes nas páginas [37](#) e [38](#).

Apêndices

APÊNDICE A – Modelagem matemática do Eletroímã

```

format long; %maior casa decimal
u0=(4*pi)*e-07; %constante de permissividade no ar
m=15e-03; %massa do objeto a ser levantado
d_polar=0.035; %diametro sem
d_formado=0.015; %diametro formado pelo fio
r_formado=d_formado/2; %raio formado pelo fio
largura_formada=0.06; %largura formada pelo fio
g=9.81; %gravidade
L_distancia=60e-03;
N=1200; % número de voltas da bobina
Fmag=m*g; % força magnética
A_polar=(pi*d_polar^2)/4; % área da superfície da bobina
% magnitude do campo magnético
B=sqrt((2*u0*Fmag)/(A_polar)); %Wb/m^2
%área do cilindro
At_cilindro=(2*pi*r_formado*largura_formada) + (2*pi*r_formado^2); %m^2
% fluxo magnético
phi=B*At_cilindro; %Wb
% magnitude do campo magnético no entreferro
H=B/u0; %AT/m
%força magneto motriz
AT=H*L_distancia;%o mesmo que MMF
MMF=AT;
%Corrente da bobina
I=MMF/N;

```

%indutância da bobina

$$L=(N*\phi)/I;$$

%força máxima do eletroímã

$$F_cilindro=(B*B*At_cilindro)/(2*u0);$$

APÊNDICE B – Planta linearizada utilizando o método de espaço de estados e dos ganhos PID

```

clc; %limpa os dados da tela
clear; %limpa os dados de cache
m=0.595; %kg
l=0.2; %m
r=0.009; %m
J=0.01; %kgm
R=4.5; %ohm
L=0.2703; %H
g=9.8; %m/s^2
x1=0.001; %m
Ce=1.1252e-06; %Nrad/A^2
Var1 = (2*Ce*(csc(x1))^2*sqrt((g*l^2*m*r*cos(x1)*(sin(x1))^2)/Ce))/(J*l^2);
A=[0 1 0;(1/J)*(g*m*r-2*g*m*r*(cot(x1))^2)*sin(x1) 0 Var1;0 0 (-R/L)];
B=[0;0;(1/L)];
C=[1 0 0];
%calcular a equação da planta por espaço de estados
% ao redor do ponto de equilíbrio
[b,a] = ss2tf(A,B,C,0);
%cálculo da função de transferência
Func_Transfer=tf(b,a)
%Cálculo do ganho crítico e período
Kcr = margin(Func_Transfer)
lgr = rlocus(Func_Transfer, Kcr);
Re = real(lgr);

```

```
Ref = fix(Re);  
fRezero = find(Ref == 0);  
Im = imag(lgr(fRezero));  
w = Im(1);  
Pcr = 2*pi/w; %Período crítico  
%cálculo do ganho Kp Ki Kd  
Kp = 0.6*Kcr; %cálculo ganho proporcional  
Ti = 0.5*Pcr; %tempo integrativo  
Td = 0.125*Pcr; %tempo derivativo  
Ki = Kp/Ti % ganho integrativo  
Kd = Kp*Td %ganho derivativo
```

APÊNDICE C – Gráfico da posição angular e corrente do eletroímã

```
clear all;
clc;
%variação da posição angular
thetaReal=[-0.029, -0.022,-0.019,-0.014,-0.009,
-0.004,0.004,0.009,0.013,0.015,0.019,0.022,0.024,0.026,0.028];
%variação da corrente da bobina
iReal=[0.31, 0.32,0.33, 0.34,0.37, 0.4 ,0.42, 0.45, 0.48, 0.49, 0.53, 0.57, 0.61,
0.65, 0.69];
x=thetaReal;
y=iReal;
eq3=polyfit(x,y,3) %MMQ(método mínimo quadrado)
plot(x,y,'o','LineWidth',1.5)
hold on
plot(x,polyval(eq3,x),'black','LineWidth',1.5)
xlabel('Posição da Viga( $\theta[rad]$ )')
ylabel('Corrente(i[A])')
```


APÊNDICE D – Constante da força eletromagnética - Ce

```

clc;
clear;
format long;
thetaReal=[-0.029, -0.022,-0.019,-0.014,-0.009,
-0.004,0.004,0.009,0.013,0.015,0.019,0.022,0.024,0.026,0.028];
iReal=[0.31, 0.32,0.33, 0.34,0.37, 0.4 ,0.42, 0.45, 0.48, 0.49, 0.53, 0.57, 0.61,
0.65, 0.69];
FmagReal=1.47; % magnitude força magnética
%FmagReal=4.5;
lReal=0.23; %largura da viga
a=(lReal*sin(thetaReal))'.^2';
b=iReal'.^2';
cReal=[a(1)/b(1), a(2)/b(2), a(3)/b(3), a(4)/b(4), a(5)/b(5), a(6)/b(6), a(7)/b(7),
a(8)/b(8), a(9)/b(9), a(10)/b(10), a(11)/b(11), a(12)/b(12), a(13)/b(13),
a(14)/b(14), a(15)/b(15)];
%constante da força eletromagnética
CeReal=FmagReal*(cReal);
eqReal=polyfit(thetaReal,CeReal,3);
x=thetaReal;
y=CeReal;
coef=polyfit(x,y,3)
ya=polyval(coef,x);
res=y-ya;
ResiduoMMQ=res'*res;
[sx, k]=sort(x);

```

```
sya=y-ya(k);
```

```
sy=y(k);
```

```
%gráfico do MMQ
```

```
plot(sx, sy, 'b*', sx, sy(k), '-')
```

APÊNDICE E – PID contínuo e discreto realimentado com o ganho do sensor

```

clc;
clear;
np = 736 %numerador
dp = [1 1667 42.56 7.094e04] %denominador
printsys(np,dp) ;
% função de transferência do sistema físico
FT_SIST_FISICO = tf(np,dp);
rlocus(FT_SIST_FISICO);
Kp = 0.44; %ganho proporcional
Ki = 0.91; %ganho integrativo
Kd = 0.052; %ganho derivativo
nk = [Kd Kp Ki];
dk = [1 0];
%convolução do numerado pid e sistema físico;
nma = conv(nk, np);
%convolução do denominador pid e sistema físico;
dma = conv(dk, dp);
FT_PID_SISTEMAFISICO = tf(nma, dma);
%Func. de transf. resultante do sistema realimentado em malha fechada
realimentacao=feedback(FT_PID_SISTEMAFISICO,23.57);
%sistem realimentado com controlador PID malha fechada
rlocus(realimentacao) % LGR do sistema realimentado com malha fechada
xlabel('Eixo Real')
ylabel('Eixo Imaginário')
%algoritmo para obter a variação de valores do íodo de amostragem

```

```
for t=0.001:0.001:10
    z=c2d(Gc,t);
    p=pole(z);
    for i=1:1:4
        if abs(p(i))>0
            break
            tfinal=t
        end
    end
end
end
%função de transferência da planta discretizada
Gz=c2d(realimentacao,0.02)
%curva da função de transferência da planta discretizada
step(Gz)
```

APÊNDICE F – Ganho do sensor

```
clear all;

clc;

%variação da posição angular
x=[-0.029, -0.022,-0.019,-0.014,-0.009,-0.004,
0.004,0.009,0.013,0.015,0.019,0.022,0.024,0.026,0.028];

%variação da tensão
y=[1.003, 1.129, 1.238, 1.315, 1.413, 1.545,
1.711, 1.833, 1.961, 2.02, 2.094, 2.165, 2.251, 2.298, 2.313];

eq3=polyfit(x,y,1); %(MMQ)
plot(x,y,'o','LineWidth',1.5)

hold on

%gráfico do (MMQ)
plot(x,polyval(eq3,x),'black','LineWidth',1.5)

xlabel('Distância da viga ao sensor (rad)')
ylabel('Leitura do sensor (V)')
```