

HENRIQUE MENEZES NUNES

**RECAPACITAÇÃO DE UM LEVITADOR
MAGNÉTICO E CONTROLE VIA MATLAB**

UBERLÂNDIA –MG

2019

HENRIQUE MENEZES NUNES

**RECAPACITAÇÃO DE UM LEVITADOR
MAGNÉTICO E CONTROLE VIA MATLAB**

Trabalho de Conclusão De Curso Da Engenharia De
Controle E Automação Da Universidade Federal de
Uberlândia - UFU - Campus Santa Mônica, Como
Requisito Para A Obtenção Do Título de Graduação Em
Engenharia De Controle E Automação

Universidade Federal de Uberlândia – UFU Faculdade de Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Aniel Silva de Moraes

UBERLÂNDIA –MG

2019

Nunes, Henrique

RECAPACITAÇÃO DE UM LEVITADOR MAGNÉTICO E CONTROLE VIA
MATLAB/ **Henrique Menezes Nunes**. - **UBERLÂNDIA, 2019**- 58p. : il.
(algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Aniel Silva De Moraes

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Uberlândia -
UFU Faculdade de Engenharia Elétrica. **2019**.
Inclui bibliografia.

1. Levitador Magnético 2. MATLAB 3. Plataforma Arduino I. Orientador.
II. Universidade Federal de Uberlândia. III. Faculdade de Engenharia
Elétrica. IV. Engenharia de Controle e Automação.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Mauro César Ribeiro Nunes e Gilma Menezes de Faria Nunes, aos meus irmãos, Felipe Menezes Nunes e Sara Menezes Nunes, e a minha namorada Tirzá Terence Silva.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar todas essas oportunidades acadêmicas e por ser, meu Senhor, zelando por minha vida e necessidades.

Gostaria de agradecer também aos meus pais, Mauro César Ribeiro Nunes e Gilma Menezes de Faria Nunes, por toda dedicação, suporte e apoio em toda minha vida, os quais não mediram esforços para que eu pudesse chegar até aqui.

Também deixo meus agradecimentos aos meus irmãos, Felipe Menezes Nunes e Sara Menezes Nunes, e à minha namorada Tirzá Terence Silva, por me darem todo o auxílio e ajuda necessária nos momentos de dificuldade nessa caminhada profissional, contribuindo assim para o meu crescimento.

Agradeço também aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado em toda minha trajetória. Além disso, agradeço ao Prof. Dr. Aniel Silva de Moraes pela tutoria deste projeto. Ainda agradeço à Universidade Federal de Uberlândia, à Faculdade de Engenharia Elétrica, e em especial a todo corpo discente do curso de Engenharia de Controle e Automação, por fornecerem um ensino público de qualidade.

*“Em tudo, dai graças, porque
esta é a vontade de Deus em Cristo Jesus para
convosco”,
(1 Tessalonicenses 5.18)*

RESUMO

A partir do grande crescimento nas áreas de automação industrial e controle de processos no mercado atual, o curso de Engenharia de Controle e Automação tem a necessidade de dispor de materiais para instruir com qualidade seus alunos, dentre esses podemos citar as plantas didáticas de controle. Dessa forma, na Universidade Federal de Uberlândia, foi escolhida uma dessas plantas didáticas para estudo e desenvolvimento desse trabalho, o levitador magnético. Tendo como base os estudos sobre o Maglev, o levitador magnético, foi identificada a necessidade de melhorias na planta para uma melhor instrumentação dos laboratórios de controle de processos, fornecendo assim, novas possibilidades de abordagens práticas para os discentes e docentes, incluindo a utilização de novas técnicas de controle na planta. Portanto, foi feita uma placa de circuito impresso para aquisição de dados via o software Matlab, mais especificamente, seu ambiente Simulink, por meio de comunicação com o Arduino Due. Em vista disso, um estudo mais detalhado sobre a planta foi conduzido apresentando assim como resultados o modelo não linear e linear do Maglev, sua função de transferência e um controlador discreto capaz de obter um controle satisfatório do sistema. Com isso, os parâmetros do Maglev podem ser monitorados em tempo real e propiciar o uso de novas técnicas de controle no mesmo.

Palavras-chave: Levitador magnético, Maglev, Recapacitação, Matlab, Arduino Due, Condicionamento de Sinais, Controle discreto.

ABSTRACT

Since the growth of industrial automation area and control process in the actual market, the Control and Automation Engineering course need to sort capable materials to instruct with quality yours students, between those materials there is the control system. Therefore, in the Federal University of Uberlândia, was chosen one of those control systems to study and build up this work, the magnetic levitator. Considering the studies of Maglev, the magnetic levitator, was identified the need to improve its plant to allow a qualified instrumentalization of the process control laboratories, providing new possibilities of practical approaches to students and professors, including the utilization of new control techniques on its plants. Thus, was conceived a printed circuit board purchase data via the Matlab software, precisely the Simulink, by transmission through the Arduino Due. Hence, the board detailed study led to a non-linear and linear model of Maglev, its transfer function, and a discrete controller able to offer a satisfactory control system. Then, the Maglev parameters can be monitored in real time and foster the use of new control techniques on it.

Key words: Magnetic levitator, Maglev, Recapacitation, Matlab, Arduino Due, Signal Conditioning, Discrete controller.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Amplificador Operacional.....	17
Figura 2: Amplificador Operacional Inversor	18
Figura 3: Amplificador Operacional Não Inversor	19
Figura 4: Arduino Due	19
Figura 5: Sistema em malha fechada	20
Figura 6: Algoritmo de controle PID	20
Figura 7: Esquemático básico de um levitador magnético [1]	22
Figura 8: Esquema de funcionamento do Maglev [3]	23
Figura 9: Maglev presente no laboratório.....	24
Figura 10: Circuito para o canal Set Point	28
Figura 11: Circuito para o canal Ball Position	30
Figura 12: Circuito para o canal Drive/IP.....	33
Figura 13: PCI finalizada	34
Figura 14: Adesivo para o conector destacado em vermelho.....	34
Figura 15: Legenda para o adesivo do conector destacado em vermelho	34
Figura 16: Adesivo para o conector destacado em azul.....	34
Figura 17: Legenda para o adesivo do conector destacado em azul.....	34
Figura 18: Suporte para Arduino no Ambiente Simulink	36
Figura 19: Blocos de entrada analógica.....	37
Figura 20: Simulação para retratamento dos sinais analógicos.....	38
Figura 21: Função de transferência do Maglev.....	41
Figura 22: Lugar das raízes da função de transferência sem controlador	42
Figura 23: Lugar das raízes do sistema controlado.....	44
Figura 24: Resposta do sistema controlado	45
Figura 25: Interface de controle em malha fechada	46
Figura 26: Canal A1 (Tensão X Tempo) não controlado.....	47
Figura 27: Canal A0 (Tensão X Tempo) controlado	48
Figura 28: Canal A1 (Tensão X Tempo) controlado	49
Figura 29: Controle da bola 01	50
Figura 30: Controle da bola 02	50
Figura 31: Controle da bola 03	50
Figura 32: Controle da bola 04.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros experimentais do Maglev	40
Tabela 2: Valores de Set Point	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ganho de tensão
ADC	<i>Analogic to Digital Converter</i> - Conversor Analógico para Digital
AOP	Amplificador Operacional
DAC	<i>Digital to Analogic Converter</i> - Conversor Digital para Analógico
Maglev	Levitador magnético
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> - Modulação de Largura de Pulso
PCI	Placa de circuito impresso
SISO	<i>Single Input, Single Output</i> - Entrada Única, Saída Única

SUMÁRIO

FOLHA DE ROSTO.....	2
DEDICATÓRIA.....	4
AGRADECIMENTOS	5
EPÍGRAFE.....	6
RESUMO	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	11
SUMÁRIO	12
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Justificativa	15
1.2 Objetivos Gerais do Trabalho	16
1.3 Objetivos Específicos do Trabalho	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Amplificadores operacionais.....	17
2.1.1 Curto circuito virtual.....	18
2.1.2 Amplificador Inversor.....	18
2.1.3 Amplificador Não Inversor	18
2.2 Arduino Due.....	19
2.3 Controladores	20
2.3.1 Ação Proporcional	20
2.3.2 Ação Integral.....	21
2.3.3 Ação Derivativa	21
3 DESCRIÇÃO DA PLANTA A SER READAPTADA	22
3.1 Levitador magnético.....	22

4	METODOLOGIA	25
4.1	Confecção da placa de circuito impresso	25
4.2	Comunicação Matlab com Arduino	25
4.3	Interface gráfica de controle.....	25
4.4	Implementação de técnicas de controle.....	26
4.5	Criação de roteiros para aulas práticas	26
5	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	27
5.1	Placa de circuito impresso.....	27
5.1.1	Circuito para o canal <i>Set Point</i>	27
5.1.2	Circuito para o canal <i>Ball Position</i>	28
5.1.3	Circuito para o canal <i>Drive/IP</i>	30
5.1.4	Confecção da Placa de Circuito Impresso	33
5.2	Conexão Matlab e Arduino Due	35
5.3	Interface gráfica de controle.....	36
5.4	Sistema em malha fechada	39
5.4.1	Modelo não linear	39
5.4.2	Linearização do modelo.....	39
5.4.3	Função de transferência	41
5.4.4	Aplicação do controlador.....	42
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
6.1	Controle do Sistema	47
6.2	Roteiros de laboratório	51
7	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente necessidade de profissionais que estejam preparados para as várias adversidades presentes no dia-a-dia de uma profissão de engenharia, busca-se prepará-los já na universidade para o mercado de trabalho. O curso de Engenharia de Controle e Automação conta com alguns laboratórios que buscam não apenas aplicar conhecimentos oriundos das aulas teóricas, mas também procuram atender e simular situações reais existentes na área de engenharia.

É de extrema importância então que os laboratórios sejam completos e totalmente capacitados para atenderem todas as necessidades dos docentes e discentes, de forma que possa ser apresentada de forma abrangente a parte prática das matérias que fazem parte do curso.

Em particular, as áreas de sistemas controle requerem uma atenção especial. Essas áreas são extremamente presentes em diversos processos industriais e é essencial para o aluno entender as suas teorias e conceitos e também saber aplicá-las na prática. Sendo assim, são necessárias algumas plantas didáticas de controle disponíveis em laboratórios para os docentes aprimorarem as suas aulas e para os discentes aumentarem os seus níveis de conhecimento e começarem a praticar.

1.1 Justificativa

Portanto, este trabalho de conclusão tem como pressuposto analisar e readaptar uma das plantas didáticas de controle que estão disponíveis nos laboratórios para aplicação em sua prática. Esta planta é o levitador magnético (Maglev), que está disponível nesses laboratórios para que os alunos possam colocar em prática tudo que é visto em sala de aula nas disciplinas que envolvem assuntos de controle, sistemas embarcados e afins.

Sendo assim, o grande interesse em auxiliar na melhoria da instrumentação dos laboratórios para as disciplinas práticas e o grande entusiasmo em desenvolver e estudar novas técnicas de controle foram as maiores motivações para o desenvolvimento desse projeto.

1.2 Objetivos Gerais do Trabalho

Como foi dito na seção anterior, o Maglev possui uma placa eletrônica conectada a ele e essa possibilita somente um tipo de controle e não é possível acompanhar as variáveis da planta em tempo real durante o processo. Para reutilizar a estrutura da planta para novas finalidades, é necessário sanar essas dificuldades que limitam o seu uso.

O projeto possui como principal objetivo a readaptação da planta para que possa ser utilizada com novos tipos de controle. Com isso, será possível utilizar a mesma de maneira otimizada nas diversas disciplinas do curso de Engenharia de Controle e Automação.

Para conseguir isso, deve-se começar pela confecção de uma placa de circuito impresso conectada a um microcontrolador para o tratamento dos sinais provenientes dos canais da planta. Posteriormente, criar uma interface bem simples para o controle, que desse aos usuários a liberdade de desenvolver novas técnicas de controle. No fim, desenvolver roteiros de aulas práticas para auxiliar tanto discentes como docentes nas disciplinas do curso.

1.3 Objetivos Específicos do Trabalho

- ✓ Readaptar o funcionamento da planta didática Maglev;
- ✓ Desenvolver uma interface gráfica para o algoritmo de controle;
- ✓ Criação de uma comunicação em tempo real utilizando microcontroladores;
- ✓ Implementação de novas técnicas de controle;
- ✓ Criação de roteiros para a planta ser utilizada em sala de aula.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo desse capítulo é apresentar e fundamentar alguns conceitos que serão usados no desenvolvimento do projeto proposto.

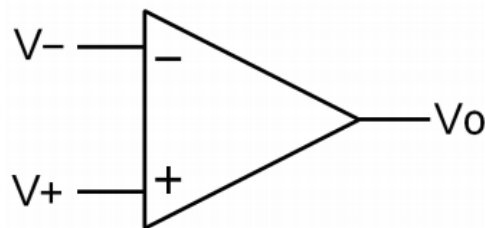
2.1 Amplificadores operacionais

O amplificador operacional (AOP) é um amplificador de corrente contínua multistágio, com entrada diferencial, ou seja, possuem duas entradas. O termo amplificador operacional, como o nome já indica, serve para uma série de operações tais como amplificação (multiplicação), adição, subtração, diferenciação e integração mediante a escolha adequada de componentes do circuito em questão (WENDLING, 2011).

Ele tem como principais características:

1. Impedância de entrada infinita;
2. Impedância de saída nula;
3. Ganho de tensão infinito;
4. Resposta de frequência infinita;
5. Insensibilidade à temperatura.

Figura 1: Amplificador Operacional



- V_- = entrada inversora
- V_+ = entrada não inversora
- V_o = saída

O AOP possui duas entradas e uma saída onde a função é apresentar na saída o múltiplo da diferença entre as duas entradas, onde A é o ganho de tensão do Amplificador Operacional. A equação que mostra seu funcionamento é a seguinte:

$$V_o = [(V_+) - (V_-)] * A \quad (1)$$

2.1.1 Curto circuito virtual

Considerando que o ganho AOP seja infinito como dito anteriormente, podemos então reescrever a equação (1) como:

$$[(V+) - (V-)] = \frac{V_o}{A} \approx 0 \quad (2)$$

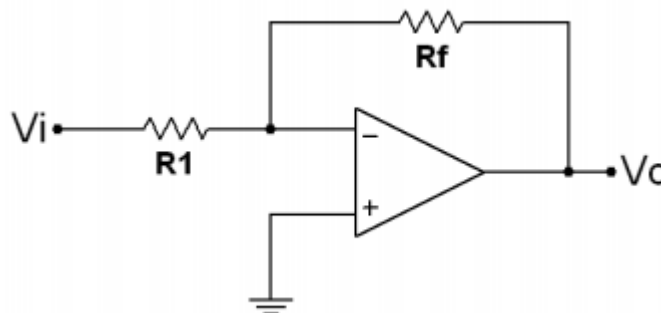
Desta forma, pode-se perceber que a tensão de entrada é igual (tendendo) ao valor de tensão de saída. Em outras palavras, é como se as duas entradas estivessem sido curto circuitadas. Com isso, não existe corrente por onde tem um curto momentâneo.

Denominou-se então o termo curto circuito virtual para designar este estado onde as tensões em dois pontos distintos são idênticas (como em um curto-circuito) e suas correntes são nulas.

2.1.2 Amplificador Inversor

O amplificador inversor possui a seguinte configuração:

Figura 2: Amplificador Operacional Inversor



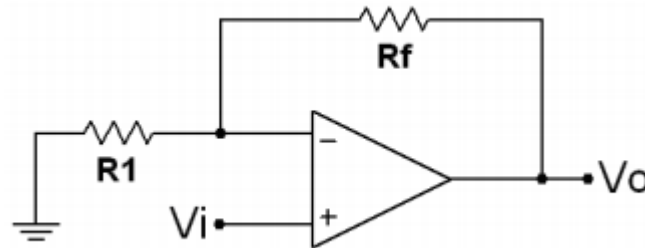
A saída do AOP é obtida pela multiplicação da entrada por um ganho (A) constante, fixado pelo resistor de entrada R1 e o resistor de realimentação Rf. A mesma saída possui o sinal contrário a entrada. Utilizando o conceito de curto circuito virtual, sua equação pode ser definida como:

$$V_o = \frac{R_f}{R_1} * V_i \quad (3)$$

2.1.3 Amplificador Não Inversor

O amplificador não inversor possui a seguinte configuração:

Figura 3: Amplificador Operacional Não Inversor



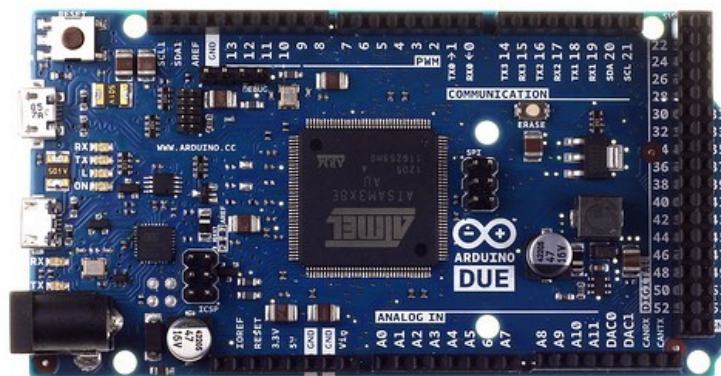
Na configuração não inversora, a fase do sinal de saída é a mesma do sinal de entrada. O ganho é determinado pela resistência de realimentação (R_f). Utilizando o conceito de curto circuito virtual, sua equação pode ser definida como:

$$V_o = \left(\frac{R_f}{R_1} + 1 \right) * V_i \quad (4)$$

2.2 Arduino Due

O Arduino Due é uma placa baseada em um microcontrolador arm de 32 bits, o Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3. Comparado ao Arduino UNO, que é muito mais comum, essa placa tem maior poder de processamento.

Figura 4: Arduino Due



Fonte: Arduino (2019)

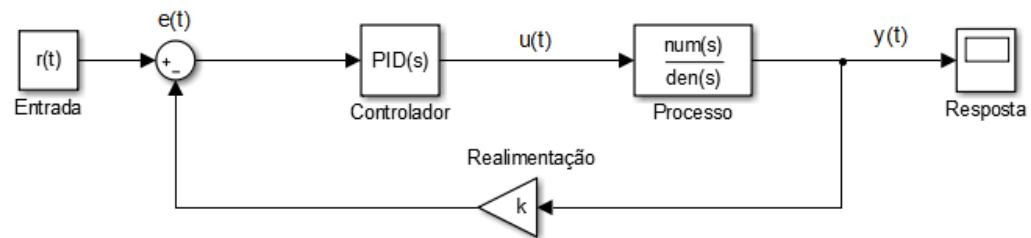
A placa possui 54 pinos digitais de entrada ou saída, onde 12 desses podem ser utilizados para controle PWM, e 12 entradas de ADC, com 12 bits de resolução. Além disso, possui dois conversores digital-analógicos (DAC) de 12 bits, o que permite muito mais versatilidade a diferentes aplicações.

Suas portas digitais suportam uma tensão de 0 a 3,3 V e suas entradas DAC suportam uma tensão de 0,55 a 2,75 V.

2.3 Controladores

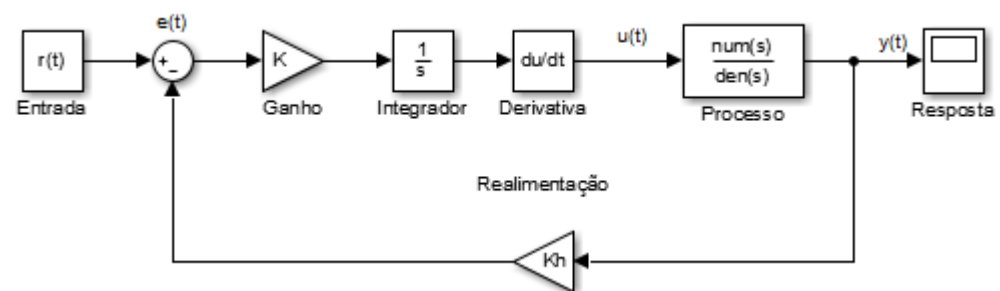
No controle em malha fechada, o comportamento da saída é utilizado para determinar o sinal de controle que deve ser aplicado ao processo em um instante específico. Isto é feito a partir de uma realimentação da saída para a entrada. Além disso, para um melhor resultado, o sinal de saída é comparado com um sinal de referência (chamado de set-point) e o desvio (erro) entre estes dois sinais é utilizado para determinar o sinal de controle que deve efetivamente ser aplicado ao processo (GOODWIN; GRAEBE; SALGADO, 2000).

Figura 5: Sistema em malha fechada



O dispositivo que utiliza o sinal de erro para determinar ou calcular o sinal de controle a ser aplicado à planta é chamado de controlador ou compensador. A seguir, será apresentada as diversas características de um controlador do tipo PID (ação proporcional, integral e derivativa).

Figura 6: Algoritmo de controle PID



2.3.1 Ação Proporcional

A componente proporcional do PID depende apenas da diferença entre o set point e a variável de processo (conforme a Figura 8), que é chamada de erro. O ganho proporcional (K_c) determina a taxa de resposta de saída para o sinal de erro. Em geral, aumentando o ganho proporcional resultará em um aumento da velocidade da resposta do sistema.

$$y(t) = K_c * e(t) \quad (5)$$

2.3.2 Ação Integral

A componente integral soma o termo de erro ao longo do tempo. O resultado é que mesmo um pequeno erro fará com que a componente integral aumente lentamente, o que irá deixar a resposta mais lenta. Porém, o efeito durante esse tempo é de conduzir o erro de estado estacionário para zero.

$$y(t) = \frac{1}{\tau_i} * \int e(t) dt \quad (6)$$

Onde τ_i é a constante de tempo integral.

2.3.3 Ação Derivativa

A ação derivativa age proporcionalmente à derivada do erro do sistema. Aumentar o parâmetro do tempo derivativo (T_d) fará com que o sistema de controle reaja de forma mais rápida às mudanças no parâmetro de erro aumentando a velocidade da resposta global de controle do sistema. Essa ação também atua para melhorar na estabilidade do sistema, porém pode ser problemático em sistemas com muitos ruídos.

$$y(t) = T_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

3 DESCRIÇÃO DA PLANTA A SER READAPTADA

Neste capítulo, estão descritos os conceitos teóricos da planta didática e as suas características físicas.

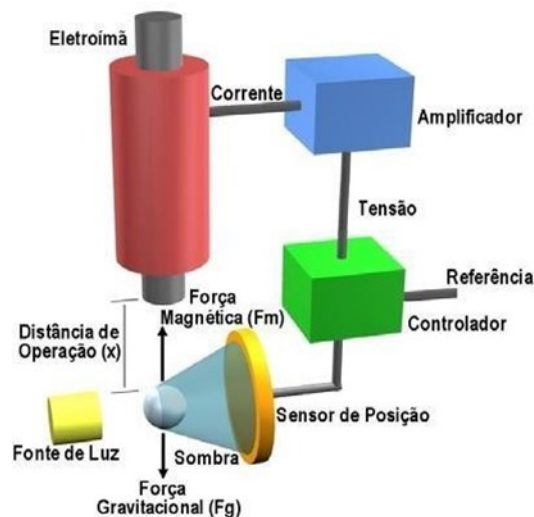
3.1 Levitador magnético

A levitação magnética é um método no qual um objeto é suspenso a partir de campos magnéticos, não sendo necessário nenhum outro tipo de suporte. Um levitador magnético usa esse princípio em seu funcionamento. Ele é composto basicamente de um eletroímã controlado por corrente elétrica, que consegue suspender um objeto metálico a uma determinada altura de acordo com o campo magnético gerado pela corrente elétrica que circula no solenoide.

Assim, a planta didática utilizada nesse trabalho tem seu funcionamento resumido em fazer uma pequena esfera metálica levitar, a partir da geração de um campo eletromagnético. Com isso, o dispositivo consiste em um modelo simplificado dos mecanismos que contam com propriedades eletromagnéticas, característica que se faz cada vez mais presente em aplicações baseadas em dispositivos como trens e rolamentos magnéticos, bombas, ventiladores, turbinas, entre outros.

Para que um sistema deste porte opere com precisão, é necessário um bom condicionamento em seu sistema de controle, encontrando um equilíbrio entre a força gravitacional do objeto, e a força magnética do eletroímã já que se utilizam diferentes objetos metálicos, sendo assim, diferentes massas (BARBOSA; COSTA; LUDWIG, 2014).

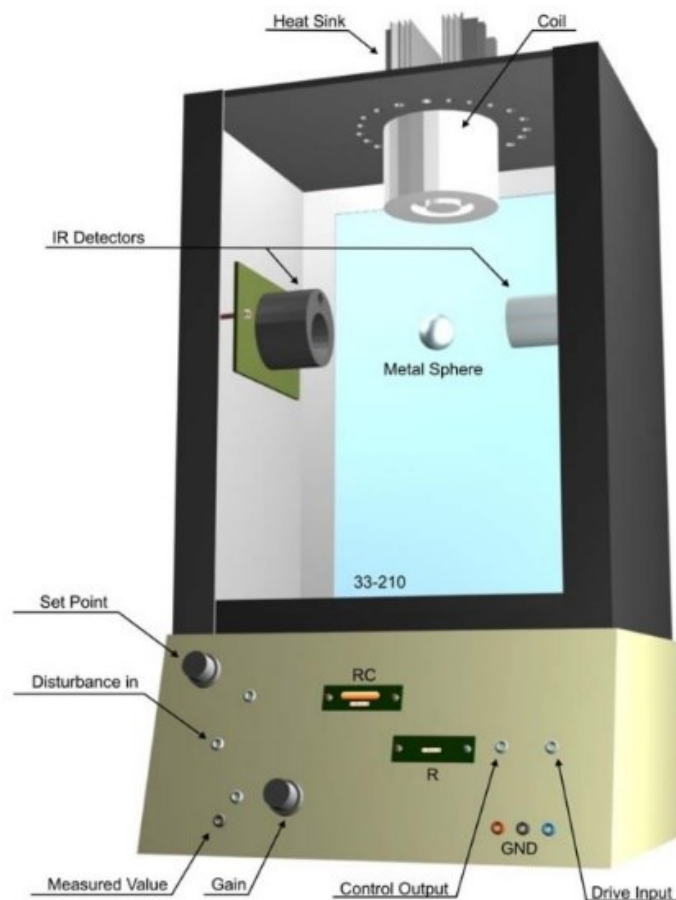
Figura 7: Esquemático básico de um levitador magnético



Fonte: BARBOSA, Luis Filipe

Neste sistema de controle, o eletroímã e o driver são os atuadores. Para que o objeto metálico a ser utilizado possa levitar, é fundamental que ele entre em estado de equilíbrio, ou seja, a corrente elétrica que percorre o indutor do eletroímã deverá variar conforme a força eletromagnética que compensa a força gravitacional. Adotando essas etapas, o objeto deixa de colidir com o eletroímã, ou então, cair no suporte do levitador (CASTRO; RODRIGUES, 2011).

Figura 8: Esquema de funcionamento do Maglev



Fonte: CASTRO, Mainda Quintela da Silva Araujo Rafael

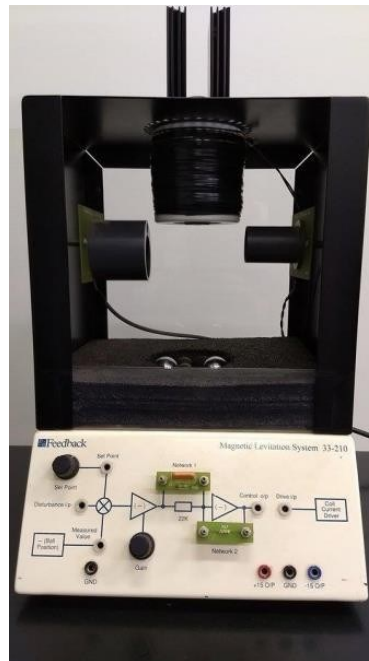
Como indica a Figura 8, o Maglev apresenta um sensor infravermelho (IRD) para medir a posição da esfera e uma bobina, responsável por gerar o campo eletromagnético a partir do fluxo de corrente nela estabelecido.

Ele é um modelo SISO (Single Input, Single Output) não linear. A posição da esfera é a saída do modelo e a tensão é o sinal de entrada. Na malha de realimentação existe um transdutor que converte a posição da esfera em um sinal de tensão.

O sistema possui alguns canais (Set Point, Ball Position e DRIVE I/P). O DRIVE I/P possui a função de receber um valor de tensão que varia de -5 a 5 Volts para realizar o controle

final. O canal Ball Position envia um valor de tensão que varia proporcionalmente à posição da bola em uma faixa aproximada de -2.8 a 9.5 Volts que foi determinada a partir da realização de testes de afastamento e aproximação da esfera metálica de um determinado referencial durante o funcionamento geral dos hardwares. Já o canal Set Point possui a função de enviar um valor de tensão que percorre a faixa de -5 a 5 Volts.

Figura 9: Maglev presente no laboratório



Como indica a Figura 9, o Maglev possui uma placa eletrônica analógica conectada a ele para fazer o controle manual do objeto. Essa placa contém os componentes para controlar a esfera conforme um Set Point e um Ganho estabelecido com ajustes manuais nos botões, sendo necessário efetuar testes na planta até encontrar o ponto em que o objeto é controlado. Ou seja, não é possível efetuar simulações gráficas na planta ou alterar a forma de controle, utilizando novos controladores ou diferentes técnicas de controle.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo, estão descritas as etapas para a realização do projeto proposto neste trabalho.

4.1 Confeção da placa de circuito impresso

Será necessário a confecção de uma placa de circuito impresso para fazer a conexão das entradas do Maglev e do microcontrolador Arduino Due. Essa placa será necessária para fazer o tratamento dos sinais, tanto em amplitude como em sentido (tornar um sinal positivo ou negativo), para que os limites das entradas possam ser respeitados. Esse tratamento será feito por meio de vários componentes eletrônicos, dentre eles, AOPs que já tiveram suas funções explicadas anteriormente.

4.2 Comunicação Matlab com Arduino

A MathWorks, que é a empresa que desenvolveu o Matlab, disponibiliza pacotes capazes de interagir com a maior parte das placas Arduino. Isso possibilita realizar uma comunicação serial com o microcontrolador, controlar entradas e saídas digitais ou analógicas, PWMs entre outros. Além disso, o ambiente Simulink já possui outros pacotes o que permite manusear de forma interativa o conteúdo completo contido neste software.

Outro fato importante é que o software Matlab possui um ambiente próprio de programação, com isso, é possível a criação de códigos e/ou bibliotecas por terceiros. Esses também podem ser compatíveis com as plataformas Arduino, se possuírem os códigos fonte e das bibliotecas usados na IDE Arduino.

4.3 Interface gráfica de controle

Para a interface gráfica de controle, foi escolhido a utilização do software Matlab e, de forma mais específica, o ambiente Simulink. Essa escolha foi feita pois o software foi utilizado nas matérias específicas de controle do curso e já existe um melhor conhecimento sobre as suas ferramentas. Além disso, o software disponibiliza versões gratuitas para estudantes por meio de um cadastro no site oficial.

Esse ambiente possui diversas ferramentas em que é possível fazer as simulações de

sistemas de controle, simulando entradas, funções de transferência, controladores e saídas. Além disso, é possível obter gráficos em tempos reais, o que possibilita uma melhor análise das variáveis desejadas. Existem também bibliotecas que comunicam com as placas da família Arduino que serão descritas no próximo tópico.

4.4 Implementação de técnicas de controle

A partir das etapas descritas acima, será possível realizar testes na planta para entender melhor o seu funcionamento. Esses testes consistem na montagem no Simulink de sistemas de controle e analisar as saídas obtidas, se estas estão com muito ruído, oscilatórias, fora da zona de funcionamento, etc. Com isso, haverá a possibilidade de estudar novas técnicas de controle para a melhoria do funcionamento da planta. Por exemplo, a implementação de novos controladores utilizando as técnicas e cálculos estudados durante as disciplinas de controle ou até mesmo técnicas que ainda não foram vistas durante o curso.

4.5 Criação de roteiros para aulas práticas

Sendo essa a última etapa do projeto, após a realização de todas as outras, é esperado que seja criado novos roteiros para as aulas práticas dos laboratórios. É importante pois, como descrito no item 1.1, os novos roteiros gerarão novas oportunidades para os professores ministrarem as disciplinas e possibilitarão aos alunos aplicarem o que aprendem nas aulas teóricas.

5 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Neste capítulo, estão descritos como as etapas citadas no capítulo anterior foram realizadas.

5.1 Placa de circuito impresso

Os circuitos de condicionamento de sinais para o Maglev foram necessários para suprir à amplitude e sinal de tensão entre a placa do Arduino Due e a planta. Foram realizados três circuitos descritos pelas simulações a seguir.

5.1.1 Circuito para o canal *Set Point*

Neste circuito, o canal de *Set Point*, que é de origem do Maglev, possui o range de -5 a 5 Volts de tensão. Já a entrada analógica do Arduino (A0_SP) possui o range de 0 a 3.3 Volts de tensão.

Utilizando o conceito de curto circuito virtual, tópico 2.1.1, temos que a soma das correntes que chegam no nó destacado em vermelho na Figura 10 é igual a zero. A saída do divisor RV1 é 5V devido ao ajuste manual do trimpot.

- Para *Set Point* = 5V

$$i1 + i2 + i3 = 0 \quad (8)$$

$$\frac{V0}{33k} + \frac{5}{100k} + \frac{5}{100k} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{V0}{33k} + \frac{10}{100k} = 0 \quad (10)$$

$$V0 = -\frac{33k}{100k} * 10 \quad (11)$$

$$V0 = -3.3V \quad (12)$$

- Para *Set Point* = -5V

$$i1 + i2 + i3 = 0 \quad (13)$$

$$\frac{V0}{33k} + \frac{5}{100k} - \frac{5}{100k} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{V0}{33k} = 0 \quad (15)$$

$$V0 = 0 \quad (16)$$

Para conseguir essas adequações nas tensões, os valores dos resistores foram escolhidos como resultado das equações demonstradas anteriormente. O outro amplificador utilizado é somente para inversão do sinal de tensão, assim, a tensão de saída AO_SP fica da seguinte forma:

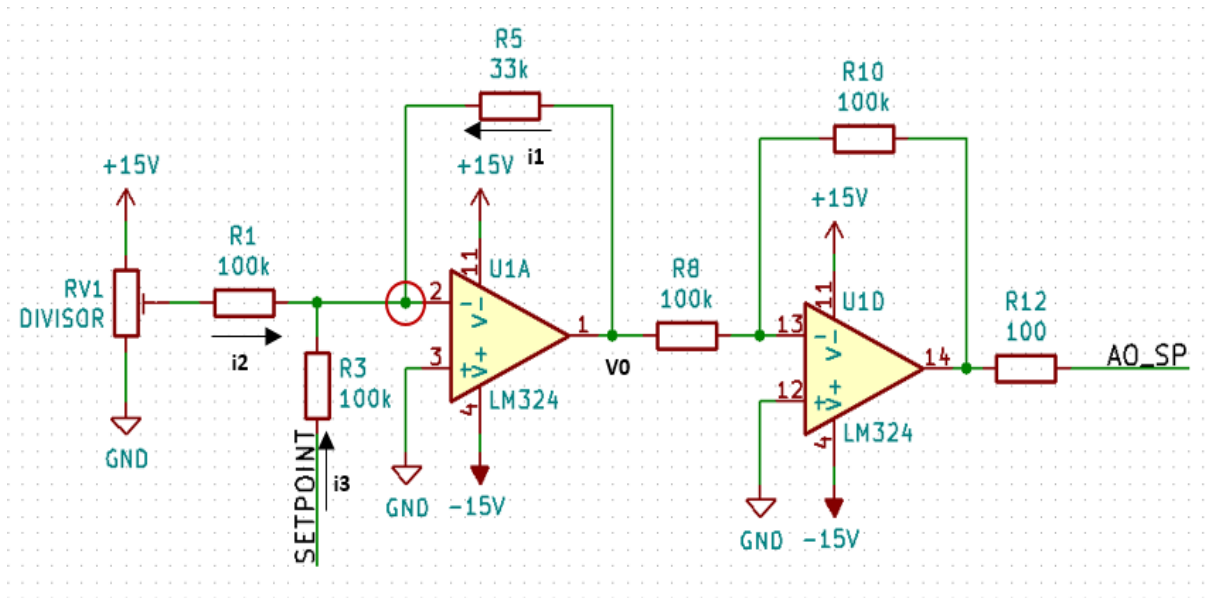
- Para *Set Point* = 5V

$$V(AO_SP) = 3.3V \quad (17)$$

- Para *Set Point* = -5V

$$V(AO_SP) = 0V \quad (18)$$

Figura 10: Circuito para o canal *Set Point*



5.1.2 Circuito para o canal *Ball Position*

Neste circuito, o canal *Ball Position*, que é de origem do Maglev, possui o range de -2.8 a 9.5 Volts de tensão. Já a entrada analógica do Arduino (A1_SP) possui o range de 0 a 3.3 Volts de tensão.

Utilizando o conceito de curto circuito virtual, tópico 2.1.1, temos que a soma das correntes que chegam no nó destacado em vermelho na Figura 11 é igual a zero. A saída do divisor RV2 é 2.8V devido ao ajuste manual do trimpot.

- Para *Ball Position* = 9.5V

$$i1 + i2 + i3 = 0 \quad (19)$$

$$\frac{V0}{27k} + \frac{2.8}{100k} + \frac{9.5}{100k} = 0 \quad (20)$$

$$\frac{V0}{27k} + \frac{12.3}{100k} = 0 \quad (21)$$

$$V0 = -\frac{27k}{100k} * 12.3 \quad (22)$$

$$V0 = -3.3V \quad (23)$$

- Para *Ball Position* = -2.8V

$$i1 + i2 + i3 = 0 \quad (24)$$

$$\frac{V0}{27k} + \frac{2.8}{100k} - \frac{2.8}{100k} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{V0}{27k} = 0 \quad (26)$$

$$V0 = 0V \quad (27)$$

Para conseguir essas adequações nas tensões, os valores dos resistores foram escolhidos como resultado das equações demonstradas anteriormente. O outro amplificador utilizado é somente para inversão do sinal de tensão, assim, a tensão de saída A1_SP fica da seguinte forma:

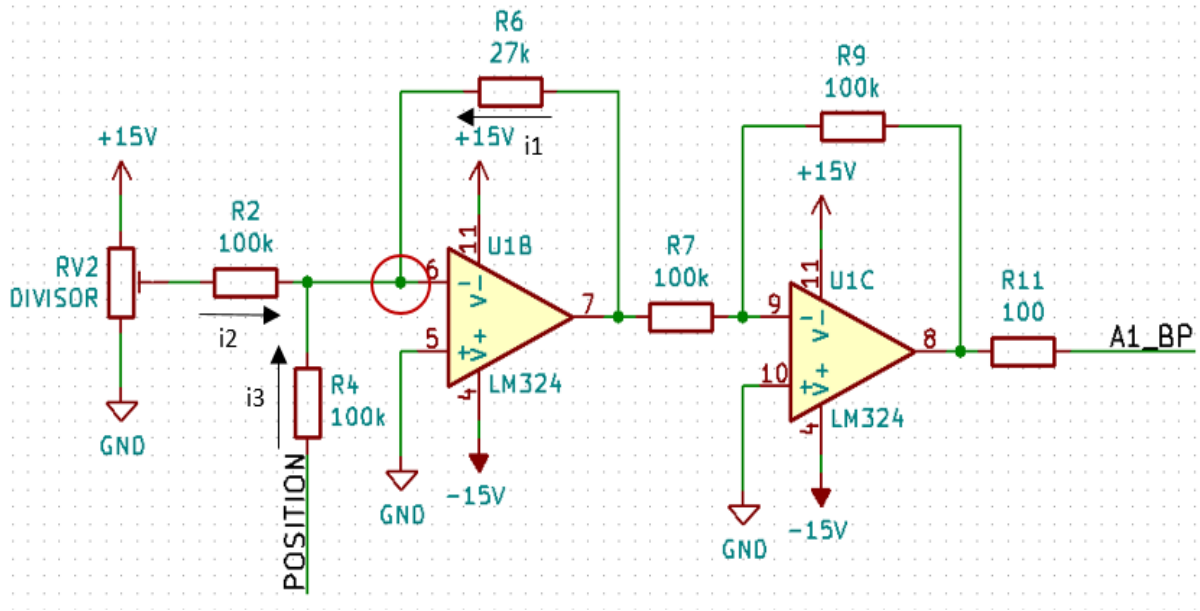
- Para *Ball Position* = 9.5V

$$V(A1_SP) = 3.3V \quad (28)$$

- Para *Ball Position* = -2.8V

$$V(A1_SP) = 0V \quad (29)$$

Figura 11: Circuito para o canal *Ball Position*



5.1.3 Circuito para o canal *Drive/IP*

Este circuito é para o condicionamento de sinal para o canal *Drive/IP* do Maglev. A saída DAC do Arduino utilizada, possui o range de 0.55 a 2.75 Volts de tensão. Já o canal *Drive/IP*, que é de origem do Maglev, possui o range de -5 a 5 Volts de tensão.

Utilizando o conceito de curto circuito virtual, tópico 2.1.1, e analisando o circuito inferior da esquerda, temos que a soma das correntes que chegam no nó destacado em vermelho na Figura 12 é igual a zero.

- Para $DAC = 0.55V$

$$i1 + i2 = 0 \quad (30)$$

$$\frac{V1}{36k} - \frac{0.55}{10k} - \frac{0.55}{36k} = 0 \quad (31)$$

$$\frac{V1}{36k} - \frac{1.98}{36k} - \frac{0.55}{36k} = 0 \quad (32)$$

$$V1 = 1.98 + 0.55 \quad (33)$$

$$V1 = 2.53V \quad (34)$$

- Para $DAC = 2.75V$

$$i1 + i2 = 0 \quad (35)$$

$$\frac{V1}{36k} - \frac{2.75}{10k} - \frac{2.75}{36k} = 0 \quad (36)$$

$$\frac{V1}{36k} - \frac{9.9}{36k} - \frac{2.75}{36k} = 0 \quad (37)$$

$$V1 = 9.9 + 0.55 \quad (38)$$

$$V1 = 12.65V \quad (39)$$

No circuito superior da esquerda, temos um divisor de tensão na fonte de $-15V$, e com isso, o valor de $V2$ é igual a $-7.5V$. Como o amplificador é somente um buffer, a sua saída $V2$ será igual a $-7.5V$.

Utilizando o conceito de curto circuito virtual, tópico 2.1.1, e analisando o circuito, temos que a soma das correntes que chegam no nó destacado em azul na Figura 12 é igual a zero.

- Para $V1 = 2.53V$

$$i3 + i4 = 0 \quad (40)$$

$$\frac{V1 - V3}{10k} + \frac{V2 - V3}{10k} = 0 \quad (41)$$

$$\frac{2.53 - V3}{10k} + \frac{-7.5 - V3}{10k} = 0 \quad (42)$$

$$-2 * V3 = 4.97 \quad (43)$$

$$V3 = -2.49V \quad (44)$$

- Para $V1 = 12.65V$

$$i3 + i4 = 0 \quad (45)$$

$$\frac{V1 - V3}{10k} + \frac{V2 - V3}{10k} = 0 \quad (46)$$

$$\frac{12.65 - V3}{10k} + \frac{-7.5 - V3}{10k} = 0 \quad (47)$$

$$-2 * V3 = -5,15 \quad (48)$$

$$V3 = 2.51V \quad (49)$$

Utilizando o conceito de curto circuito virtual, tópico 2.1.1, e analisando o circuito, temos que a soma das correntes que chegam no nó destacado em verde na Figura 12 é igual a zero.

- Para $V3 = -2.49V$

$$i5 + i6 = 0 \quad (50)$$

$$\frac{-V3}{10k} + \frac{V0 - V3}{10k} = 0 \quad (51)$$

$$\frac{2.49}{10k} + \frac{V0 + 2.49}{10k} = 0 \quad (52)$$

$$2.49 + V0 + 2.49 = 0 \quad (53)$$

$$V0 = -5V \quad (54)$$

- Para $V3 = 2.51V$

$$i5 + i6 = 0 \quad (55)$$

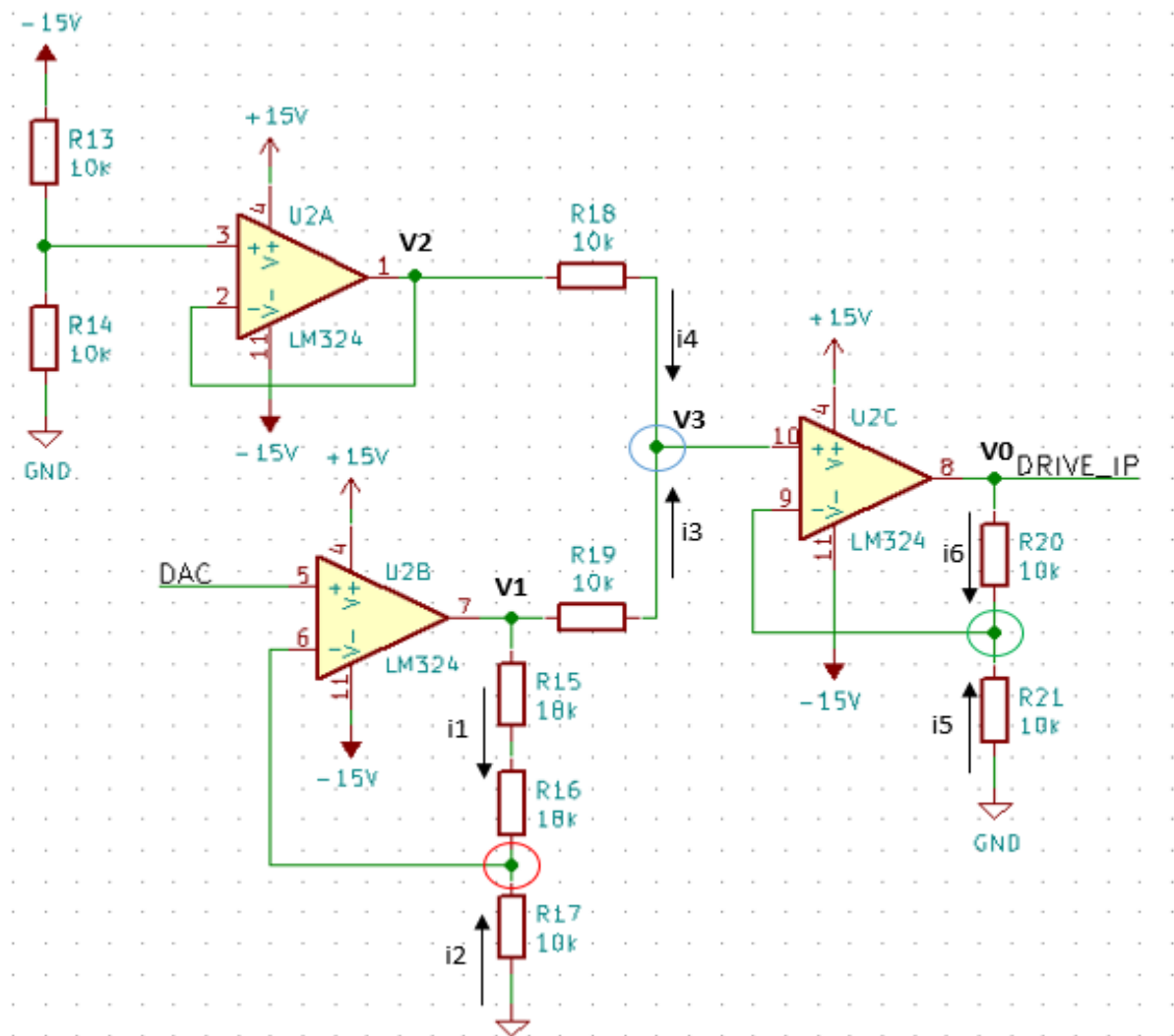
$$\frac{-V3}{10k} + \frac{V0 - V3}{10k} = 0 \quad (56)$$

$$\frac{-2.51}{10k} + \frac{V0 - 2.51}{10k} = 0 \quad (57)$$

$$-2.51 + V0 - 2.51 = 0 \quad (58)$$

$$V0 = 5V \quad (59)$$

Temos então que o valor de $V0$ será o valor injetado na entrada $DRIVE_IP$ da Figura 12. Essa entrada simboliza o canal *Drive/IP* do Maglev.

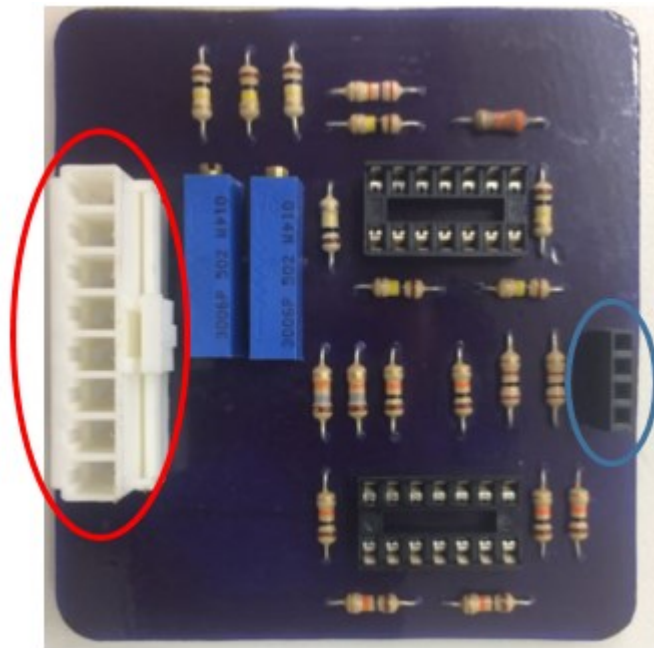
Figura 12: Circuito para o canal *Drive/IP*

5.1.4 Confeção da Placa de Circuito Impresso

A partir das simulações descritas anteriormente e os resultados apresentados, a realização da placa foi iniciada utilizando o software do KiCad. Por meio dele, foi possível modelar as trilhas e os componentes necessários para a placa.

O processo utilizado para a confecção da PCI foi o processo de fototransferência e o material escolhido para a placa foi a de fibra de vidro (BASSAN; CUSTÓDIO, 2014). O resultado de todo o processo está apresentado na Figura 13.

Figura 13: PCI finalizada



Para auxiliar na utilização dessa PCI, foi impresso alguns adesivos e suas respectivas legendas para auxiliar o usuário que estiver utilizando o Maglev. O conector destacado em vermelho é para os canais oriundos do Maglev e o conector destacado em azul é para as entradas do Arduino Due. As Figuras 14 e 15 representam os adesivos usados para orientar as ligações no conector destacado em vermelho e as Figuras 16 e 17 no conector destacado em azul. Todos os adesivos foram colados na placa e na parte lateral da planta.

Figura 14: Adesivo para o conector destacado em vermelho

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

Figura 15: Legenda para o adesivo do conector destacado em vermelho

1. GND	3. SETPOINT	5.X 6.-15V
2.DRIVEIP	4. POSITION	7.X 8.15V

Figura 16: Adesivo para o conector destacado em azul

4	3	2	1
---	---	---	---

Figura 17: Legenda para o adesivo do conector destacado em azul

1.GND	2.DAC0	3.A0	4.A1
-------	--------	------	------

Com todos esses circuitos descritos neste item deste trabalho e a PCI confeccionada, foi possível realizar o condicionamento dos sinais necessários para a comunicação da planta de controle com o Arduino Due. No próximo item será descrito como foi feita essa comunicação via software.

5.2 Conexão Matlab e Arduino Due

O software escolhido para fazer essa comunicação entre a planta de controle e o Arduino foi o Matlab, mais precisamente, seu ambiente Simulink. Esse software foi escolhido por diversas razões, dentre elas pode-se citar:

- Combinar um ambiente de área de trabalho ajustado para análise iterativa e processos de design com sua própria linguagem de programação.
- Executar análises em clusters, GPUs e nuvens com apenas pequenas alterações no código. Não há necessidade de reescrever seu código ou aprender técnicas de programação de big data e memória insuficiente.
- Ter uma interface de comunicação simples com possibilidades de alteração do código em tempo real, o que possibilita mais velocidade e praticidade na realização de testes.

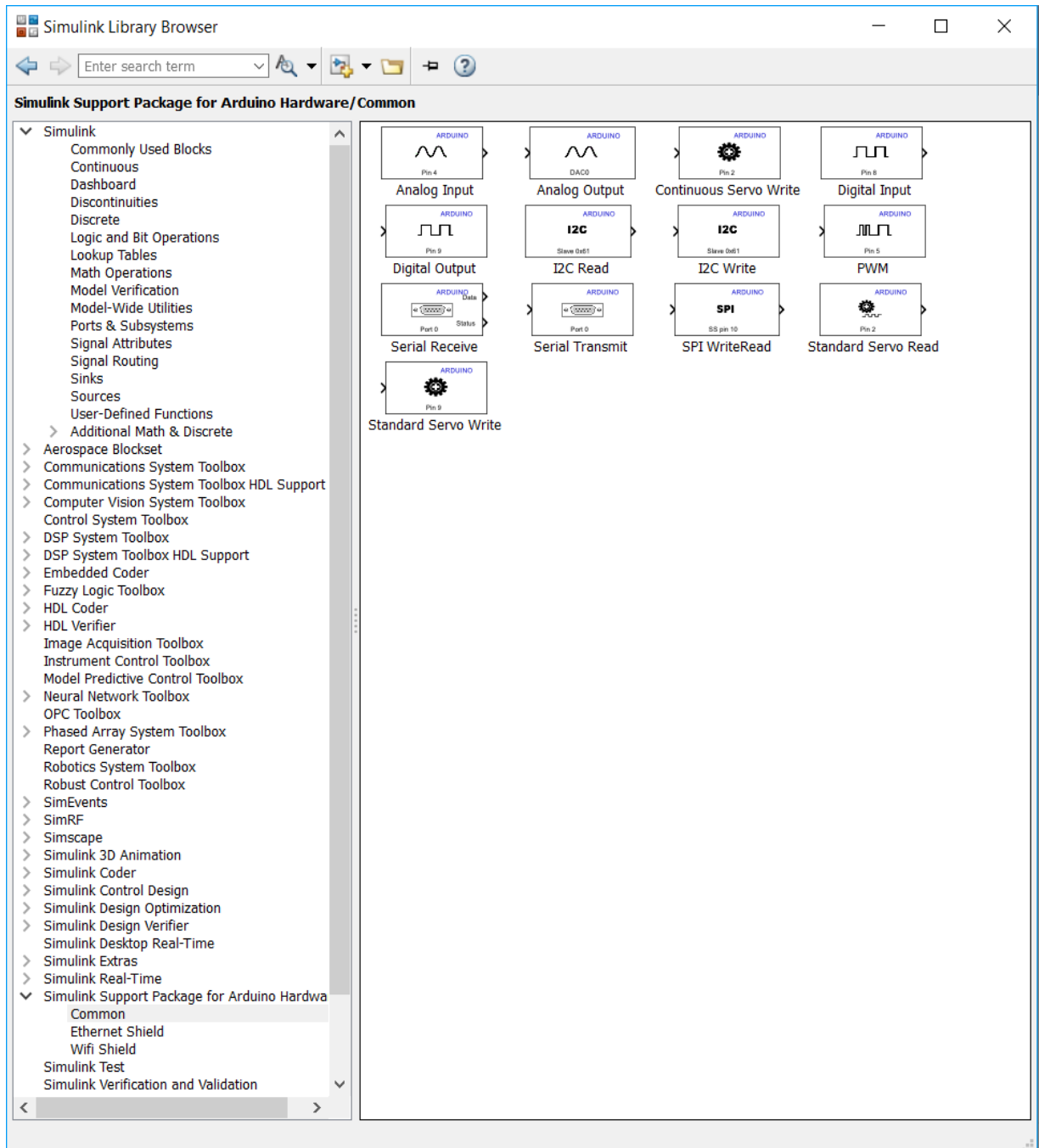
A *MathWorks*, que é a empresa que desenvolve o Matlab, desenvolveu e disponibilizou pacotes capazes de interagir com a maior parte das placas Arduino. Sendo assim possível estabelecer uma comunicação serial com o microcontrolador, controlar AI/AO, DI/DO, PWMs, DACs, entre outros canais (HURST, 2019). Além disso, o ambiente Simulink nos permite manusear de forma interativa o conteúdo completo contido neste pacote e usufruir de todos os demais blocos e funções contidos em sua vasta biblioteca.

Um fato que deve ser ressaltado é que o Matlab possui um ambiente próprio de programação, possibilitando a criação de códigos, bibliotecas e o incremento de novas funções para o uso de sensores e componentes que não estão presentes no pacote original para a biblioteca do *Simulink*. Toda lógica construída com diagrama de blocos no ambiente *Simulink* pode ser convertida em um algoritmo na linguagem C, o que possibilita a execução do código também na IDE própria do Arduino.

A utilização desse software e dessas bibliotecas citadas anteriormente só foram possíveis pois a *MathWorks* disponibiliza o download destes pacotes gratuitamente, desde que o seu uso seja inteiramente acadêmico mediante cadastro em seu sistema. Na Figura 13,

observa-se o pacote suporte disponibilizado para a comunicação entre o Matlab e o Arduino, podendo ser utilizado como suporte em diversos modelos de placas Arduino.

Figura 18: Suporte para Arduino no Ambiente Simulink



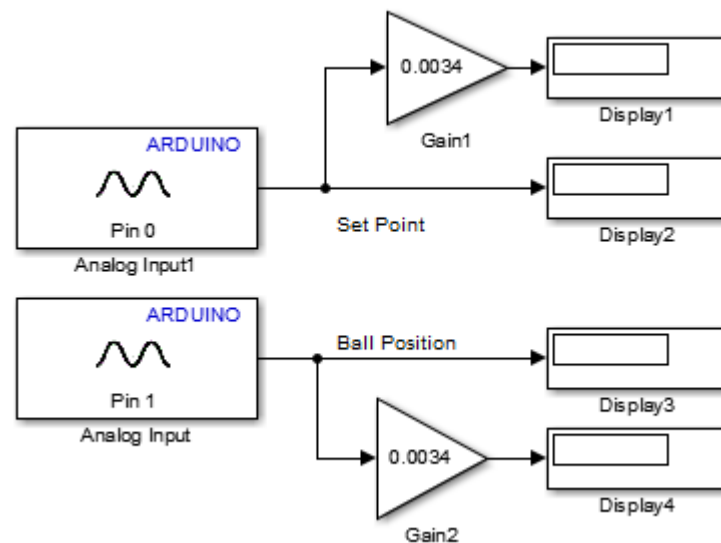
5.3 Interface gráfica de controle

A partir da placa de circuito impresso feita no tópico 5.1 e da conexão com o Matlab descrita no tópico 5.2, foi possível iniciar a interface gráfica de controle pelo ambiente Simulink. Para iniciar a interface, foi adicionado os blocos de comunicação com as entradas

analógicas e alguns blocos de ganho. Os blocos de ganho foram necessários pois como os blocos de leitura das entradas analógicas variam de 0 a 1023 bits, foi preciso a utilização desse ganho para transformar em valores de tensão, de 0 a 3.3V (o range da porta analógica do Arduino).

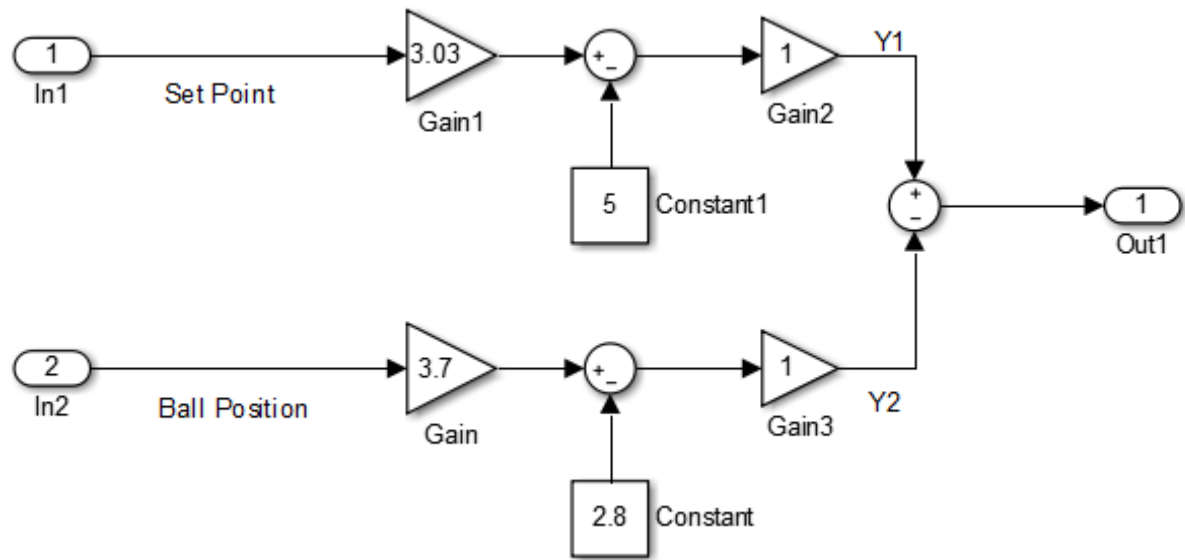
O bloco *Gain 1* e *Gain 2* foram os utilizados anteriormente citados. O *Display1* mostra o valor em bits na porta analógica 0 e o *Display 2* o valor em tensão. Já o *Display3* mostra o valor em bits na porta analógica 1 e o *Display 4* o valor em tensão.

Figura 19: Blocos de entrada analógica



Após isso, foi realizado na simulação, o caminho inverso descrito no item 5.1 deste trabalho, ou seja, o retratamento dos sinais das portas analógicas da placa Arduino. Foi feito isso pois, era necessário utilizar os valores originais oriundos dos canais do Maglev para poder utilizar como as entradas do controlador que será explicado posteriormente. Com isso, a simulação foi montada conforme a Figura 20.

Figura 20: Simulação para retratamento dos sinais analógicos



A entrada In1 é oriunda da porta analógica 0 e a In2 é da porta analógica 1. Como descrito no item 5.1.1, o barramento In1 recebe o canal *Set Point* tratado, e a partir do item 5.1.2, temos que o barramento In2 recebe o canal *Ball Position* tratado. Com essas informações, os cálculos dos valores dos ganhos e das constantes representadas na Figura 20 serão descritos a seguir:

- Para o canal *Set Point* (item 5.1.1)
 - Entrada analógica 0 = 0V

$$Y1 = (0 * 3.03 - 5) * 1 \quad (60)$$

$$Y1 = -5V \quad (61)$$

- Entrada analógica 0 = 3.3V

$$Y1 = (3.3 * 3.03 - 5) * 1 \quad (62)$$

$$Y1 = 5V \quad (63)$$

- Para o canal *Ball Position* (item 5.1.2)
 - Entrada analógica 1 = 0V

$$Y2 = (0 * 3.7 - 2.8) * 1 \quad (64)$$

$$Y2 = -2.8V \quad (65)$$

- Entrada analógica 1 = 3.3V

$$Y2 = (3.3 * 3.7 - 2.8) * 1 \quad (66)$$

$$Y2 = 9.5V \quad (67)$$

Com os valores já retratados, foi possível calcular o valor do erro (*Set Point* menos *Ball Position*) que será inserido na entrada do controlador (Out1). O controlador será descrito no próximo item deste trabalho.

5.4 Sistema em malha fechada

A partir da interface de controle implementada, foi possível dar início aos estudos para implementação do controlador. Para começar, foi feito o cálculo da função de transferência da planta.

5.4.1 Modelo não linear

O modelo mais simples para o levitador magnético relacionando a posição da esfera e a corrente no indutor é dado pela equação (68). A equação descreve que massa vezes aceleração é igual à força peso mais a força eletromagnética.

$$m * \frac{d^2x}{dt^2} = m * g - f(x, i) \quad (68)$$

Na equação (69) temos que a equação da força eletromagnética em função da corrente e da posição da esfera. Com isso, as equações (68) e (69) constituem um modelo não linear do Maglev.

$$f(x, i) = -k * \left(\frac{i}{x}\right)^2 \quad (69)$$

5.4.2 Linearização do modelo

Para analisar o modelo deste sistema e projetar um controlador, o modelo deve ser linearizado. Através dos *datasheets* do Maglev, os seguintes parâmetros experimentais foram retirados:

Tabela 1: Parâmetros experimentais do Maglev

$i0 = 0.8216A$	$x0 = 22mm$	$kb = 1.477 * 10^{-4} \frac{Nm^2}{A^2}$
$m = 21g$	$g = 9.81m/s^2$	$ki = 0.15; kh = 1230$

Reorganizando a equação (68), obtemos:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = g * \frac{f(x,i)}{m} \quad (70)$$

Substituindo a equação (69) na (70), obtemos:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = g - \frac{kb}{m} \left(\frac{i(t)}{x(t)} \right)^2 \quad (71)$$

Aplicando série de Taylor truncada e considerando as condições iniciais nulas na equação 71, obtemos:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = a * \Delta x + b * \Delta i \quad (72)$$

$$a = \frac{\partial \ddot{x}}{\partial x}(x0, i0) \quad (73)$$

$$a = -\frac{kb}{m} * i0^2 * (-2) * x0^{-3} \quad (74)$$

$$a = \frac{2 * k * i0^2}{m * x0^3} \quad (75)$$

$$a = 891.8192 \quad (76)$$

$$b = \frac{\partial \ddot{x}}{\partial i}(x0, i0) \quad (77)$$

$$b = \frac{-2 * kb * i0}{m * x0^2} \quad (78)$$

$$b = -23.8793 \quad (79)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{2 * kb * i0}{m * x0^2} * \left(\frac{i0}{x0} * \Delta x - \Delta i \right) \quad (80)$$

Aplicando transformada de Laplace na equação (80), obtemos:

$$s^2 * X(s) = a * X(s) + b * I(s) \quad (81)$$

$$(s^2 - a) * X(s) = b * I(s) \quad (82)$$

Temos então que o modelo linearizado é dado por:

$$G(s) = \frac{X(s)}{I(s)} \quad (83)$$

$$G(s) = \frac{b}{s^2 - a} \quad (84)$$

$$G(s) = \frac{\left(\frac{-2 * kb * i0}{m * xo^2}\right)}{s^2 - \left(\frac{2 * kb * i0^2}{m * xo^3}\right)} \quad (85)$$

Substituindo os valores da Tabela 1 na equação (85), temos que o modelo linearizado é dado pela equação (86) ou (87):

$$G(s) = \frac{-23.879}{(s + 29.863) * (s - 29.863)} \quad (86)$$

$$G(s) = \frac{-23.879}{s^2 - 891.79}$$

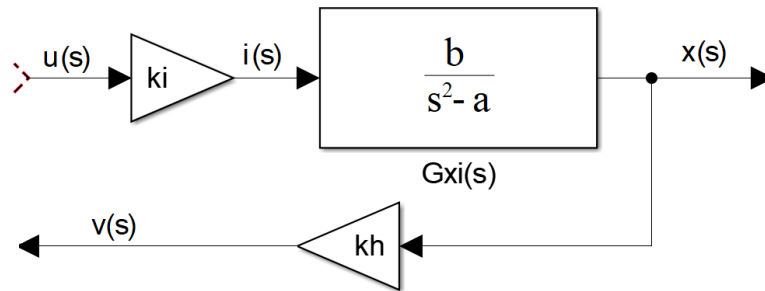
5.4.3 Função de transferência

Com o modelo já linearizado, agora é possível encontrar a função de transferência. Pelas informações contidas nos *datasheets* do Maglev, pode-se observar que a corrente no indutor é obtida em função da tensão aplicada a ele, pois o controlador aplica tensão ao driver que aciona o eletroímã. Onde $u(s)$ é a tensão aplicada ao driver, temos que a corrente é dada por:

$$i(s) = ki * u(s) \quad (87)$$

Como já dito na seção 3.1, o Maglev é uma planta SISO. A posição da esfera $x(s)$ é a saída do modelo e a tensão $u(s)$ é o sinal de entrada. Na malha de realimentação existe um transdutor que converte a posição da esfera em um sinal de tensão $v(s)$. A planta pode ser descrita conforme a Figura 21.

Figura 21: Função de transferência do Maglev



Dessa forma, a função de transferência no tempo contínuo pode ser definida como (utilizando o valor de k_i conforme a Tabela 1):

$$Gxu(s) = k_i * G(s) \quad (88)$$

$$Gxu(s) = \frac{-3.6}{s^2 - 891.8} \quad (89)$$

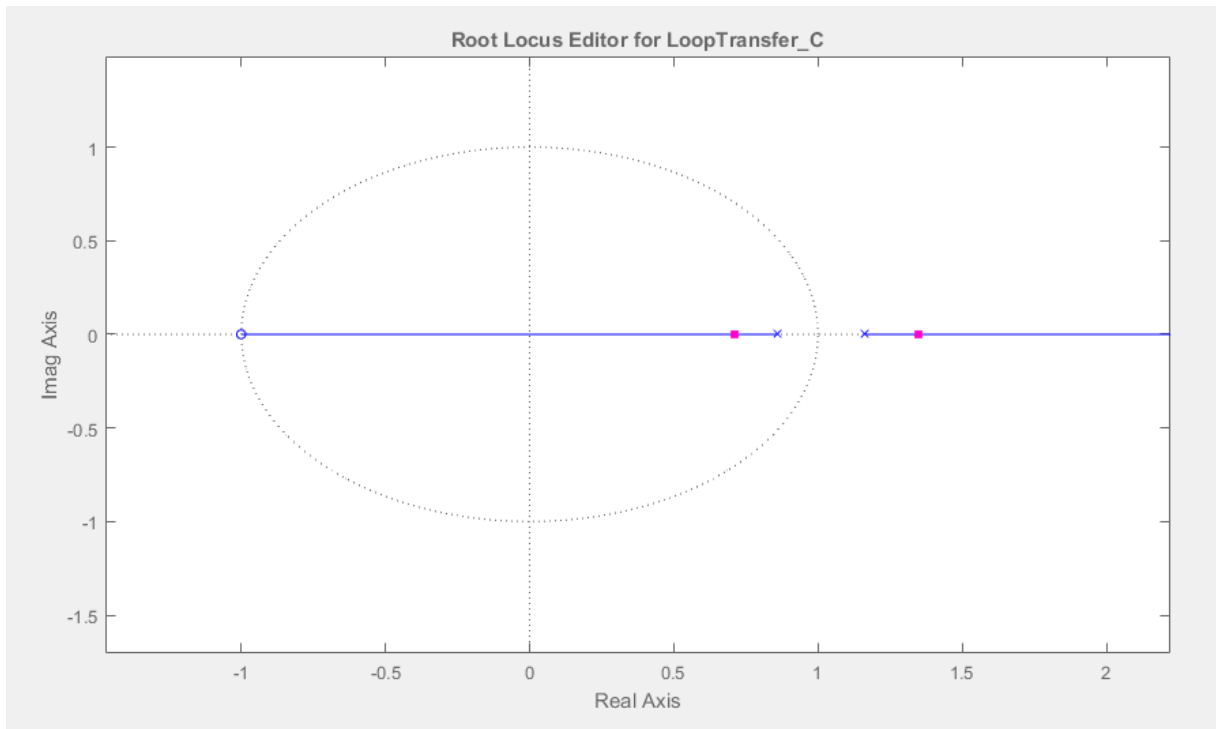
Utilizando a função *c2d* do Matlab, que utiliza o método de discretização ZOH, e um tempo de amostragem de 5 milissegundos, a função Gxu foi discretizada. Para apresentá-la em uma forma de polos e zeros, foi usado a função *zpk* do Matlab. Temos que a função de transferência no tempo discreto foi encontrada como:

$$GzXu(z) = \frac{-4.486 * 10^{-5}(z + 1)}{(z - 1.161) * (z - 0.861)} \quad (90)$$

5.4.4 Aplicação do controlador

A partir da função de transferência encontrada, pode-se começar os cálculos para encontrar um controlador que fosse adequado para a planta. Para isso, foi utilizada ferramenta chamada *SisoTool* do Matlab. Essa ferramenta permitiu plotar o lugar das raízes da função de transferência encontrada no item anterior, apresentado na Figura 22, para analisar o seu comportamento e poder projetar o controlador.

Figura 22: Lugar das raízes da função de transferência sem controlador



Utilizando a mesma ferramenta citada anteriormente e analisando o lugar das raízes, optamos por usar um controlador proporcional derivativo. Foi adicionado então o zero do controlador bem próximo ao polo da função de transferência ($p_1 = 0.861$). Não optando por fazer cancelamento de polos e zeros pois na prática, os valores reais não são exatamente iguais aos teóricos, somente aproximados. O valor do zero escolhido foi de 0.8. Para que a função se tornasse própria, ou seja, o número de polos fosse igual ao número de zeros, foi necessário a adição de um polo no compensador. O polo do controlador PD é igual 0, porém para a implementação na prática foi escolhido o valor 0.172. Com isso, o controlador utilizado ficou da seguinte forma:

$$C(z) = k * \frac{(z - 0.8)}{(z - 0.172)} \quad (91)$$

Para o cálculo do ganho k , foi utilizado a equação característica do sistema.

$$1 + (C * G_{zXu} * kh) = 0 \quad (92)$$

O tempo de acomodação de 2% do sistema escolhido foi de 50 milissegundos. A partir disso, foi possível estimar um dos polos de malha fechada do sistema (que determinam a sua resposta de malha fechada). Para isso, foram feitos os seguintes cálculos.

$$t_{2\%} = \frac{4}{\sigma} \quad (93)$$

$$\sigma = \frac{4}{0.05} \quad (94)$$

$$\sigma = 80 \quad (95)$$

Mapeando o polo de malha fechada para o plano z , foram feitos os seguintes cálculos.

$$z_{MF} = e^{-\sigma * T} \quad (96)$$

$$z_{MF} = e^{-80 * 0.005} \quad (97)$$

$$z_{MF} = 0.67 \quad (98)$$

Em posse de um dos z_{MF} e substituindo na equação (92), foi possível então isolar e encontrar o ganho do controlador, nas equações abaixo, que nos dê o tempo de acomodação desejado.

$$1 + (C * G_{zXu} * kh) = 0 \quad (99)$$

$$1 + k * \left(\frac{z - 0.8}{z - 0.172} \right) * \left(\frac{-4.486 * 10^{-5} * (z + 1)}{(z - 1.161) * (z - 0.861)} \right) * 1230 = 0 \quad (100)$$

$$1 + k * \left(\frac{0.67 - 0.8}{0.67 - 0.172} \right) * \left(\frac{-4.486 * 10^{-5} * (0.67 + 1)}{(0.67 - 1.161) * (0.67 - 0.861)} \right) * 1230 = 0 \quad (101)$$

$$1 + k * \left(\frac{-0.13}{0.498} \right) * \left(\frac{-6.68 * 10^{-5}}{(-0.491) * (-0.19131)} \right) * 1230 = 0 \quad (102)$$

$$1 + k * (-0.261) * \left(\frac{-6.68 * 10^{-5}}{0.0939} \right) * 1230 = 0 \quad (103)$$

$$1 + k * (-0.261) * (-7.1139 * 10^{-4}) * 1230 = 0 \quad (104)$$

$$1 + k * 0.2284 = 0 \quad (105)$$

$$k = \frac{-1}{0.2284} \quad (106)$$

$$k = -4 \quad (107)$$

Com o valor do ganho encontrado e utilizando a ferramenta *SisoTool*, foi possível estimar os outros dois polos de malha fechada do sistema, apresentado na Figura 23, e a resposta ao degrau com o tempo de acomodação desejado, simbolizada pela Figura 24.

Figura 23: Lugar das raízes do sistema controlado

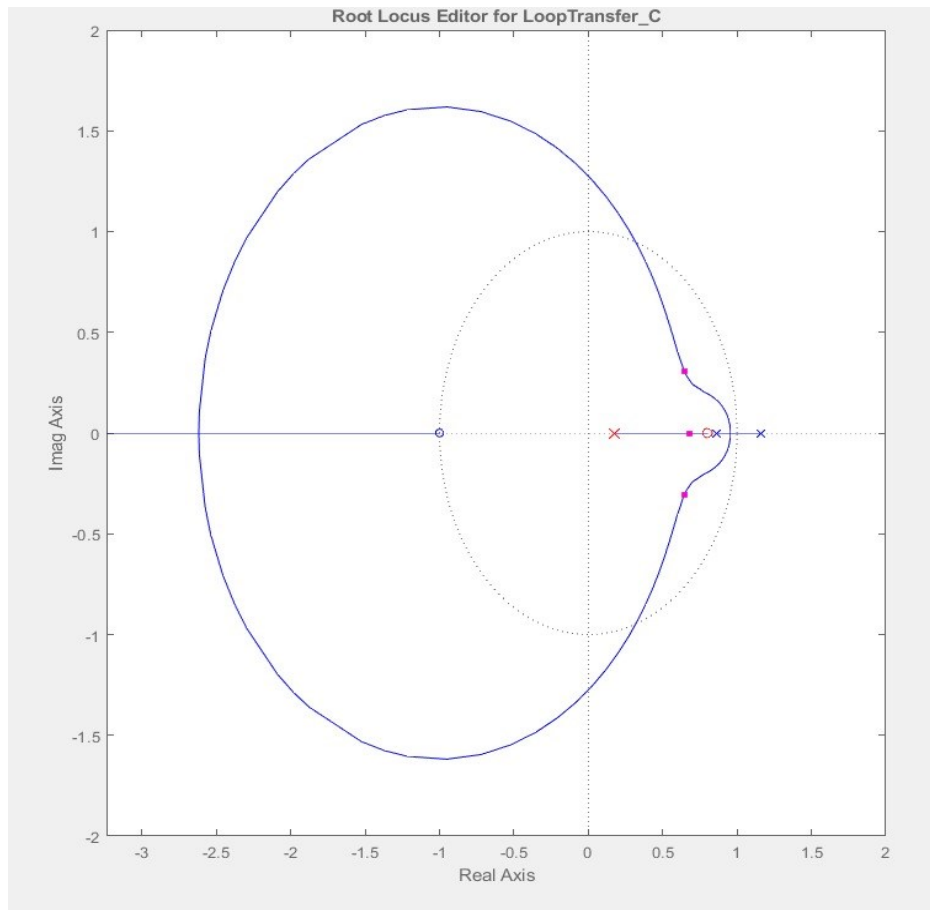
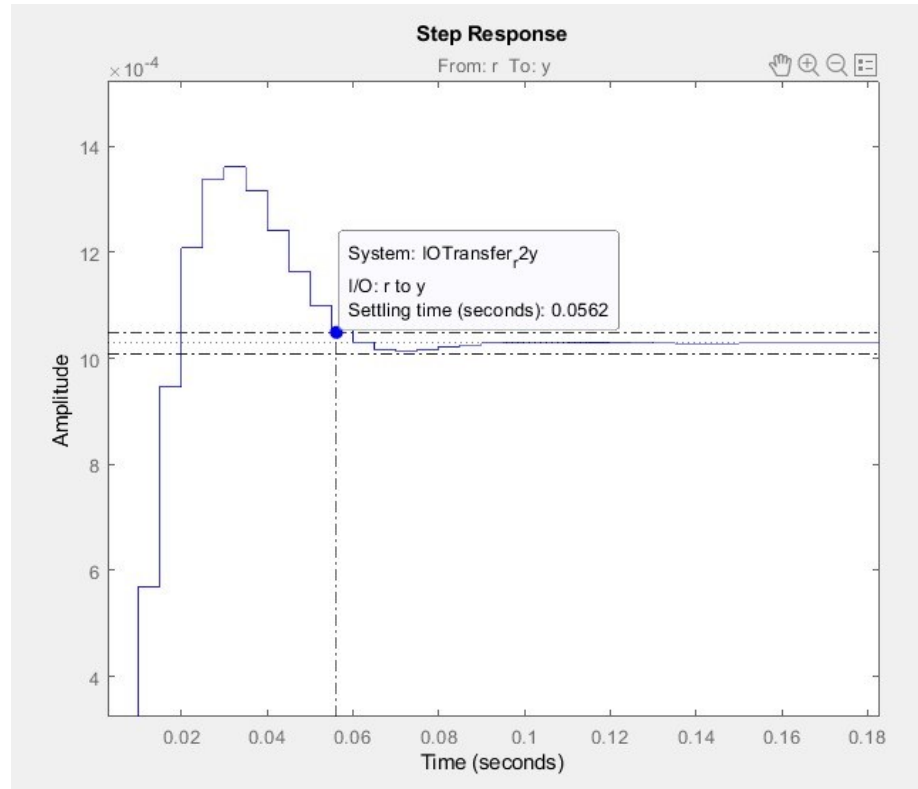


Figura 24: Resposta do sistema controlado

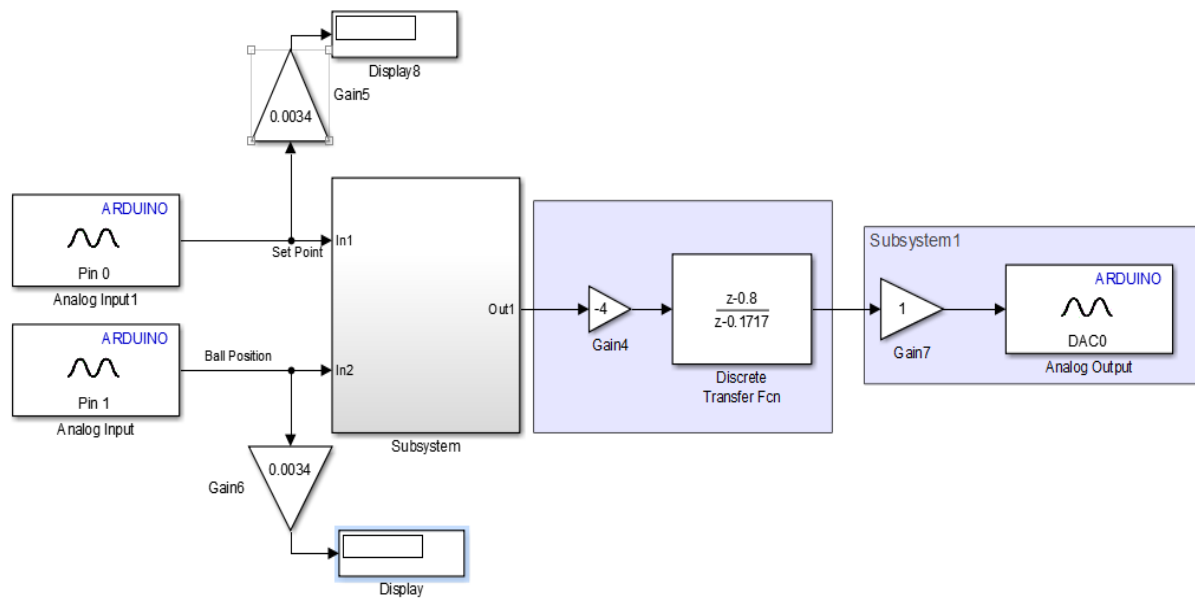


Por fim, o controlador pode ser descrito como:

$$C(z) = -4 * \frac{(z - 0.8)}{(z - 0.172)} \quad (108)$$

Com isso, foi possível finalizar a interface gráfica de controle descrita no item 5.3 e representa pela Figura 25. Foi adicionado um bloco de ganho e um bloco com as informações do controlador encontrado. Sua saída foi ligada a porta DAC do Arduino, que com o circuito descrito no item 5.1.3, será tratado e enviado para o canal *Drive/IP* do Maglev.

Figura 25: Interface de controle em malha fechada



6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

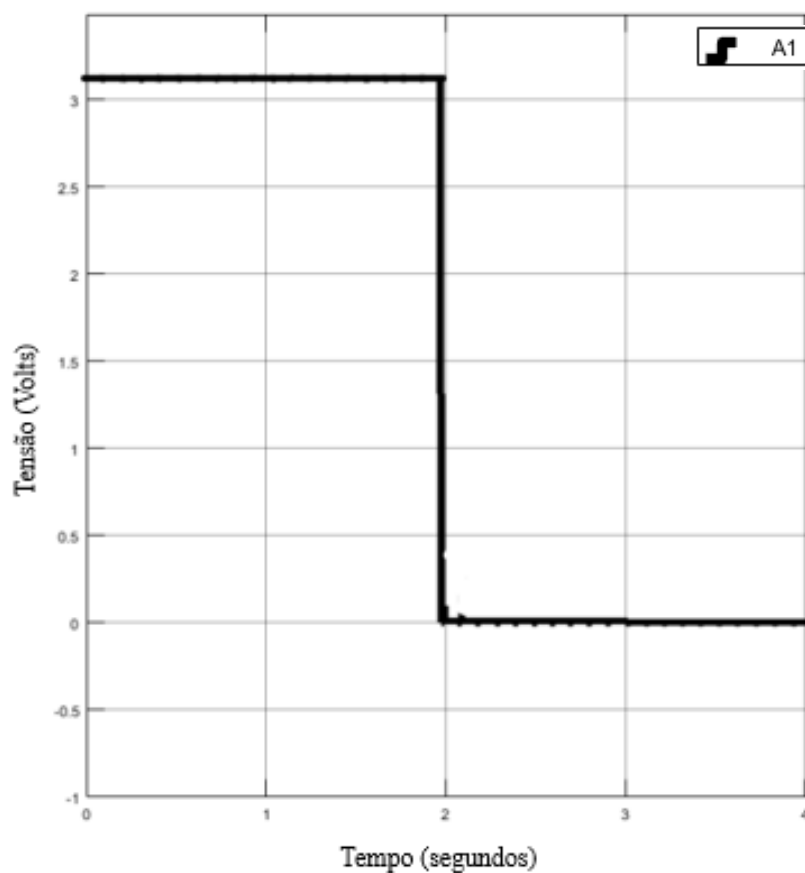
Neste capítulo, estão descritos os resultados do controlador obtido e aplicado ao sistema e as discussões propostas.

6.1 Controle do Sistema

Através do desenvolvimento do projeto descrito no capítulo 5, foi possível obter o controle desejável para o sistema. Para demonstrar esse efeito, alguns gráficos serão apresentados a seguir para apresentar como eram as variáveis do sistema em malha aberta e como ficaram a partir da adição do controlador e fechamento da malha.

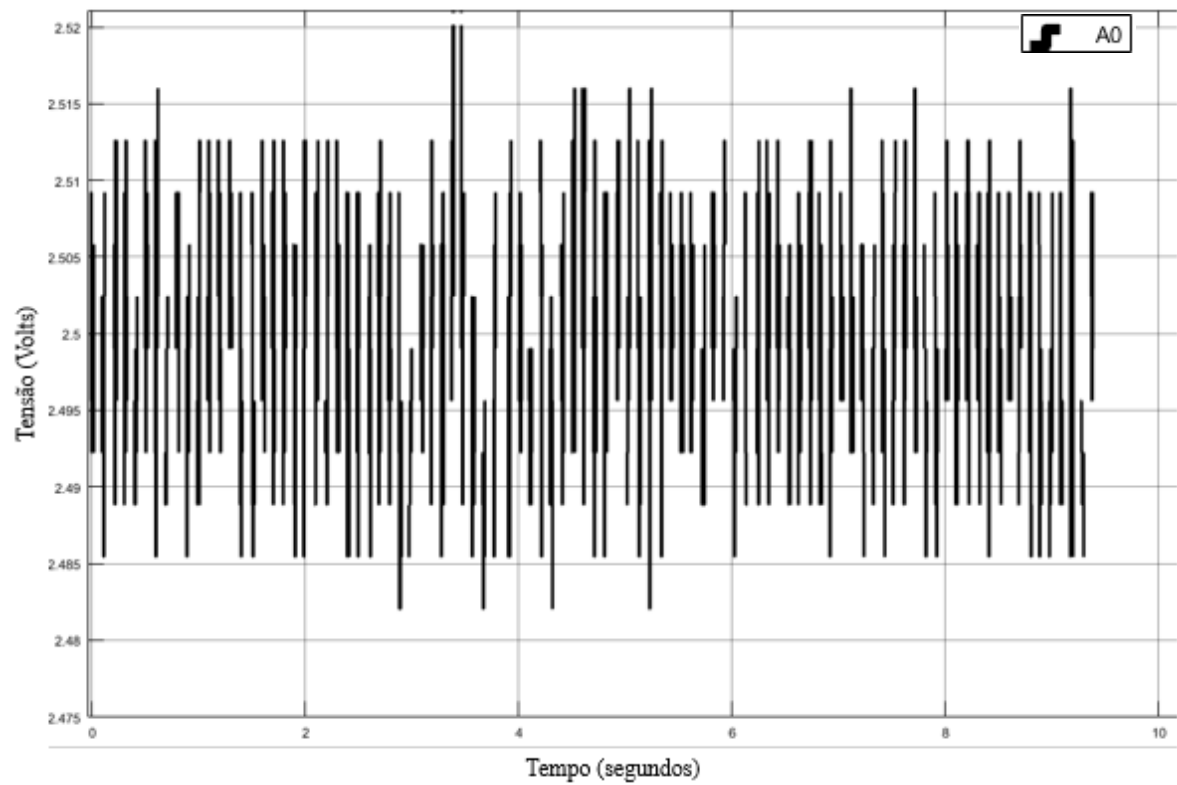
A Figura 26 são os valores do canal A1 do Arduino com o sistema em malha aberta. Esse canal varia seus valores de 0 a 3.3 Volts de tensão e está relacionado ao canal *Ball Position* do Maglev.

Figura 26: Canal A1 (Tensão X Tempo) não controlado



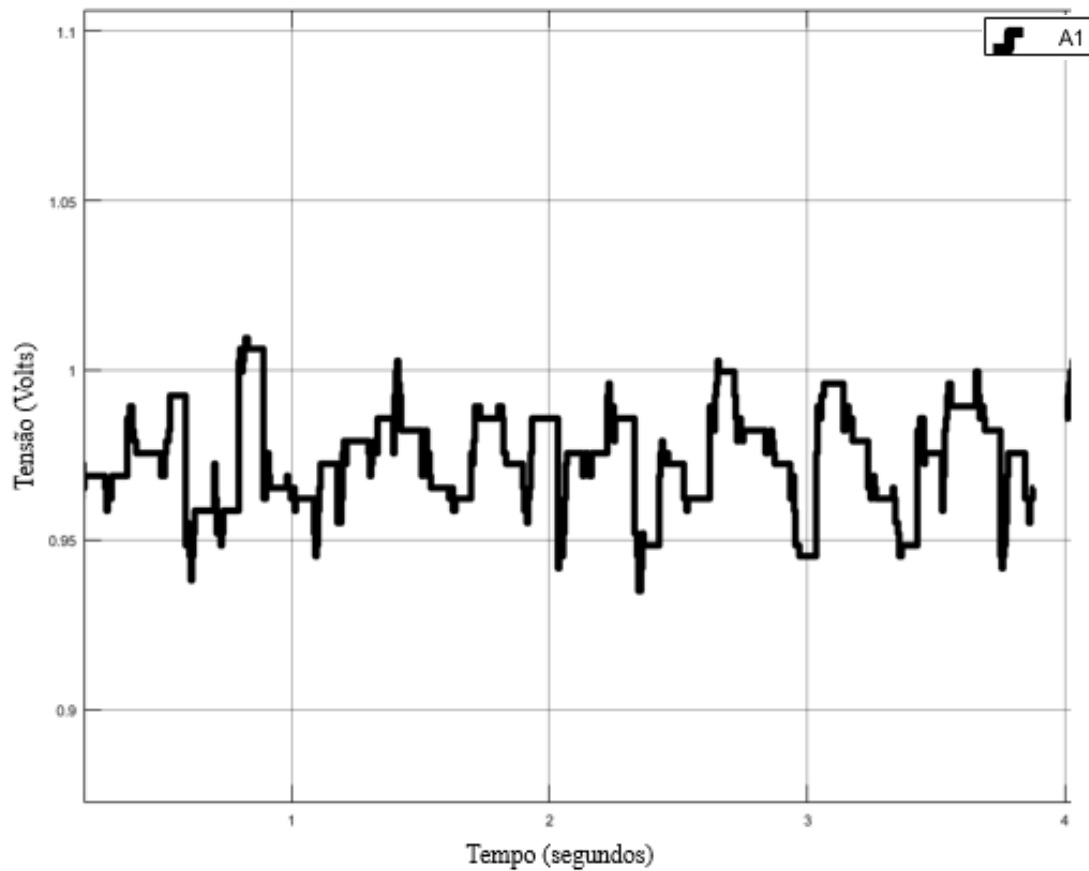
A Figura 27 são os valores do canal A0 do Arduino com o sistema em malha fechada e sob a função do compensador. Esse canal varia seus valores de 0 a 3.3 Volts de tensão e está relacionado ao canal *Set Point* do Maglev.

Figura 27: Canal A0 (Tensão X Tempo) controlado



A Figura 28 são os valores do canal A1 do Arduino com o sistema em malha fechada e sob a função do compensador. Esse canal varia seus valores de 0 a 3.3 Volts de tensão e está relacionado ao canal *Ball Position* do Maglev.

Figura 28: Canal A1 (Tensão X Tempo) controlado



A partir desses gráficos, é possível observar o controle do sistema. Pela Figura 28, pode-se concluir que a posição da bola de metal se alterou muito pouco ao decorrer do tempo, com uma variação de apenas 0.05 Volts entre os valores de 0.95 e 1.05 Volts, demonstrando assim, que o objeto estava flutuando. E pela Figura 27, é possível afirmar que o Set Point estipulado no controle se manteve constante, as pequenas alterações apresentadas são provenientes dos erros das leituras das portas analógicas do Arduino.

A seguir, estão apresentadas as imagens dos objetos sendo controlados pela planta a partir do desenvolvimento desse projeto. Também está exibida uma tabela com os valores de *Set Point* e as bolas de metal utilizadas, esses valores são os intervalos de estabilidade do sistema com a determinada esfera, ou seja, são os valores que devem ser ajustados ao canal *Set Point* que está ligado a entrada analógica 0 do Arduino Due.

Figura 29: Controle da bola 01

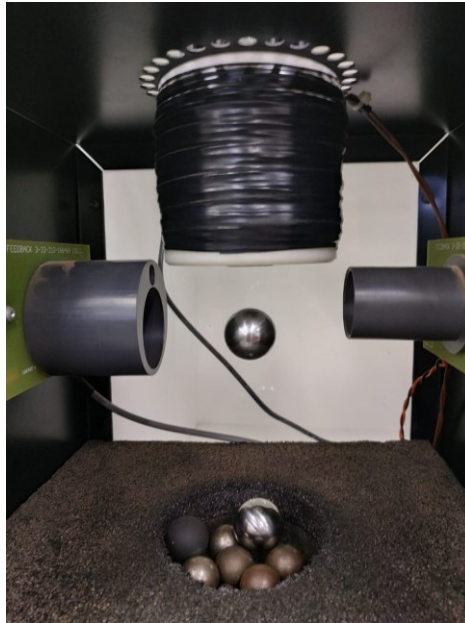


Figura 30: Controle da bola 02

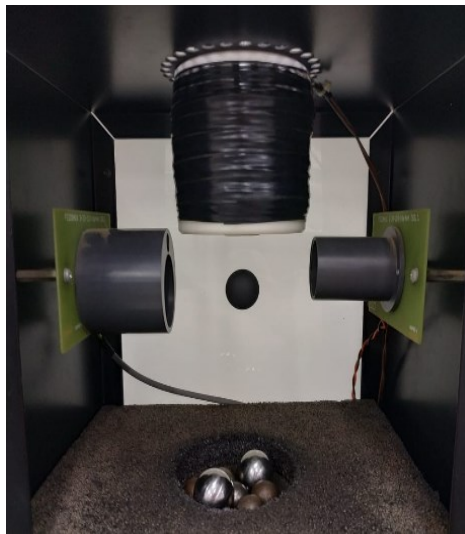


Figura 31: Controle da bola 03

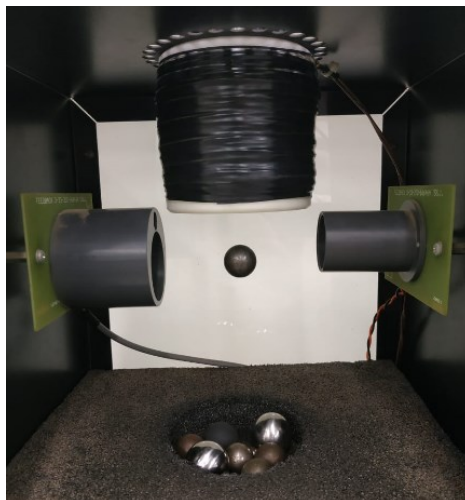


Figura 32: Controle da bola 04

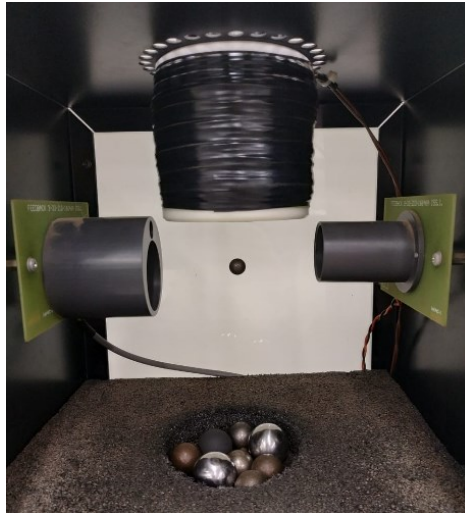
Tabela 2: Valores de *Set Point*

Figura	Bola	<i>Set Point</i>
29	01	3.93 a 5 V
30	02	1.82 a 2.57 V
31	03	2.57 a 3.64 V
32	04	4.39 a 5 V

6.2 Roteiros de laboratório

Por fim, com a readaptação da planta, a implementação da interface de controle e com o sistema funcionando em malha fechada, foi possível a criação de roteiros de laboratório. Esses roteiros são utilizados pelo Professor Dr. Aniel Moraes nas aulas de controle nos cursos que compõe a Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia. Está anexado no anexo 02 um dos roteiros desenvolvidos como exemplo.

7 CONCLUSÃO

Em síntese, neste trabalho foi descrito a recapacitação de um levitador magnético presente na Universidade Federal de Uberlândia. Os objetivos específicos do trabalho foram atingidos com sucesso e com muito esforço, tornando o funcionamento da planta didática um novo instrumento para os laboratórios. Essa proposta foi atingida em algumas etapas, dentre elas estão: a construção de uma placa de circuito impresso para tratamento dos sinais do Maglev, a comunicação feita via Matlab e Arduino Due, a interface de controle criada e todos os cálculos e estudos para conseguir chegar ao sistema em malha fechada.

A construção da placa de circuito impresso teve como finalidade o condicionamento dos sinais da planta didática. Por meio dessa placa e dos circuitos citados anteriormente, foi possível converter os sinais oriundos do Maglev a fim de possibilitar a leitura futura dos mesmos pelos canais analógicos do Arduino Due.

A conexão do software Matlab com o microcontrolador Arduino Due, teve como objetivo possibilitar a leitura dos dados do Arduino por meio de bibliotecas disponíveis para download. Esse software foi escolhido devido ao seu ambiente Simulink disponibilizar esses objetos capazes de fazer essa comunicação e leitura dos dados. Com isso, foi possível criar a interface gráfica de controle do projeto. Houve a necessidade de fazer um novo tratamento dos sinais para retornarem aos seus valores originais.

O sistema em malha fechada foi o objetivo final do projeto, conseguir realizar o cálculo de um controlador com uma resposta satisfatória para o sistema. Todo o processo foi descrito no item 5.4 e teve como resultado um controle de alta qualidade, possibilitando assim, a utilização de diversas bolas metálicas na planta. Este processo foi realizado calculando o modelo linear e não linear do Maglev, a sua função de transferência e um controlador discreto por meio de ferramentas do Matlab. Por fim, este trabalho também possibilitou a criação de roteiros de laboratórios para instruir e agregar os alunos nas aulas de controle de processos.

REFERÊNCIAS

- [1] BARBOSA, Luis Filipe Wiltgen; COSTA, Francisco E. D. F.; LUDWIG, Gerson Otto. CONTROLE ANALÓGICO DE UM LEVITADOR MAGNÉTICO (MAGLEV) DE SIMPLES CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO. 2000. 111 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000. Disponível em:
<https://www.academia.edu/3035050/Controle_anal%C3%B3gico_de_um_levitador_magn%C3%A9tico_MagLev_de_simples_constru%C3%A7%C3%A3o_e_operac%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 15 jan. 2019.
- [2] BASSAN, Guilherme Morgado; CUSTÓDIO, Luís Paulo. TUTORIAL CONFECÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO PELO PROCESSO DE FOTOTRANSFERÊNCIA. 2014. Tutorial (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em:
http://paginapessoal.utfpr.edu.br/amauriassef/disciplinas/sistemas-microcontrolados/material-de-apoio/TUTORIAL_Confeccao_PCB.pdf/at_download/file. Acesso em: 22 maio 2019.
- [3] CASTRO, Mainda Quintela da Silva Araujo Rafael; RODRIGUES, Abrantes Tadeu José Silva. Prática 06 – Levitação Eletromagnética – Maglev. 2011. 2 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em:
<<https://www.ebah.com.br/content/ABAAAFXcsAH/control-posicao-vertical-esfera-metalica-levitador-magnetico>>. Acesso em: 20 jan. 2019.
- [4] GOODWIN, Graham C.; GRAEBE, Stefan F.; SALGADO, Mario E.. CLASSICAL PID CONTROL. In: GOODWIN, Graham C.; GRAEBE, Stefan F.; SALGADO, Mario E.. CONTROL SYSTEM DESIGN. Valparaíso: -, 2000. p. 157-174. Disponível em:
<http://ftp.feq.ufu.br/Luis_Claudio/Books/E-Books/Control/Livro_CONTROL.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2019.
- [5] HURST, Joshua. Rensselaer Arduino Support Package Library (RASPLib). Disponível em: www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/62702-reusselaer-arduino-support-package-library-rasplib.
- [6] WENDLING, Marcelo. **Amplificadores Operacionais**. 2010. 44 f. Tese (Doutorado) - Curso de Colégio Técnico Industrial, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010

ANEXO 01

Este anexo contém o código **.m** que foi utilizado para os cálculos e análises no projeto do referido documento.

```

clc
clear
T=0.005;
s=tf('s');
z=tf('z',T);

i0=0.8216;
x0=22e-3;
kb=1.477e-4;
m=21e-3;
g=9.81;
ki=0.15;
kh=(9.5+2.8)/10e-3; % Converte a saída de metros para tensão. O sinal do
                    % ball position do maglev, varia entre -2,8 v a 9,5 v,
                    % para uma faixa de variação da posição entre 15 mm e
                    % 25 mm.

a=2*g/x0;
b=-2*g/i0;
Gxi=b/(s^2-a);
Gxu=ki*Gxi;
Gvu=kh*Gxu;

R1=100;
R2=22e3;
R3=22e3;
C1=1e-6;
C2=10e-9;

Z1=R2*(s*R1*C1+1)/(s*(R1+R2)*C1+1);
Z2=R3/(s*R3*C2+1);
C=-Z2/Z1;
C=zpk(C);
C=zpk(C);
%

%% Análise do compensador e planta discretos

Gzxu=c2d(Gxu,T);
Gzxu=zpk(Gzxu);

```

sisotool(Gz xu,kh)



Reorganizando a equação (1) obtém-se a equação (3).

$$\ddot{x} = g + \frac{f(i, x)}{m} \quad (3)$$

Substituindo a equação (2) obtém-se a (4)

$$\ddot{x} = g - \frac{k_b}{m} \cdot \left(\frac{i}{x}\right)^2 \quad (4)$$

Para o ponto de equilíbrio (i_0, x_0) e $\ddot{x} = 0$, portanto:

$$g = \frac{-f(i_0, x_0)}{m} = \frac{k_b}{m} \cdot \left(\frac{i_0}{x_0}\right)^2 \quad (5)$$

Vamos linearizar a equação (3), utilizamos a série de Taylor truncada, obtemos (6).

$$\ddot{x} = \left(\frac{\partial \ddot{x}(i, x)}{\partial x} \right)_{i_0, x_0} \cdot \Delta x + \left(\frac{\partial \ddot{x}(i, x)}{\partial i} \right)_{i_0, x_0} \cdot \Delta i \quad (6)$$

Substituindo a equação (2) em (6) obtemos (7).

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} \cdot \left(\frac{\partial f(i, x)}{\partial x} \right)_{i_0, x_0} \cdot \Delta x + \frac{1}{m} \cdot \left(\frac{\partial f(i, x)}{\partial i} \right)_{i_0, x_0} \cdot \Delta i \quad (7)$$

Aplicando a transformada de Laplace:

$$s^2 x(s) = a x(s) + b i(s) \quad (8)$$

$$G_x(s) = \frac{x(s)}{i(s)} = \frac{b}{s^2 - a} = \frac{b}{(s + a)(s - a)} \quad (9)$$

Em (10) temos função de transferência entre a corrente no eletroímã $i(s)$ e a posição $x(s)$:

$$G_x(s) = \frac{\left(-\frac{2k_b i_0}{m x_0^2} \right)}{s^2 - \left(\frac{2k_b i_0^2}{m x_0^3} \right)} = \frac{\left(-\frac{2g}{i_0} \right)}{s^2 - \left(\frac{2g}{x_0} \right)} \quad (10)$$

Os polos da planta podem ser calculados através da equação (11).

$$s_{1,2} = \pm \sqrt{a} = \pm \sqrt{\frac{2g}{x_0}} \quad (11)$$

A corrente no indutor é função da tensão aplicada a ele, pois o controlador aplica tensão ao driver que aciona o eletroímã. Onde $u(s)$ é a tensão aplicada ao driver

$$i(s) = k_i \cdot u(s) \quad (12)$$

O Maglev é uma planta SISO (Single Input, Single Output) não linear. A posição da esfera $x(s)$ é a saída do modelo e a tensão $u(s)$ é o sinal de entrada. Na malha de realimentação existe um transdutor que converte a posição da esfera em um sinal de tensão $v(s)$.



Universidade Federal de Uberlândia
Engenharia de Controle e Automação
Sistemas de Controle Moderno
Professor: Aniel Moraes, aniel@ufu.br, sala 3N222

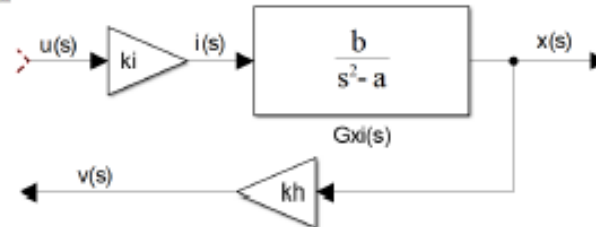


Figura 3 – Função de transferência do Maglev, $G_{vu}(s)$.

Em (13) temos função de transferência entre a tensão no driver $u(s)$ e a posição da esfera $x(s)$. O ganho kh é o ganho da realimentação da planta.

$$G_m(s) = k_i \frac{x(s)}{u(s)} = k_i \frac{\left(\frac{-2g}{i_0} \right)}{s^2 - \left(\frac{2g}{x_0} \right)} \quad (13)$$

Atividades em laboratório:

1. Utilize a linearização descrita acima e encontre as funções de transferência $G_m(s)$ e $G_{mv}(s)$.
2. Discretizar a planta e encontrar a planta $G(z)$ com $T=5\text{ms}$ ($T=0,005 \text{ seg.}$).
3. Projete um compensador $C(s)$ para $G(s)$ e um compensador $C(z)$ para $G(z)$ utilizando o sisotool (somente se estiver utilizando o Matlab).
4. Simule no Simulink / Xcos o sistema híbrido (planta contínua – controlador discreto).
5. Implemente o controlador contínuo abaixo e esboce o lugar das raízes:

$$C(s) = K \frac{(s+z)}{(s+p_1)(s+p_2)} = -10^6 \frac{(s+45)}{(s+10^4)(s+4500)}$$

6. Implemente o controlador discreto abaixo para $T=5\text{ms}$ e esboce o lugar das raízes:

$$C_{PD}(z) = K \frac{(z-\beta)}{z} = -4 \frac{(z-0.8)}{z}$$

7. Projete o seu próprio controlador usando o comando “rltool”.