



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GABRIEL DE OLIVEIRA ALMEIDA

**INTERFACE DIDÁTICA PARA SINTONIA DE CONTROLADOR PI EM UMA
PLANTA INDUSTRIAL**

FORTALEZA

2024

GABRIEL DE OLIVEIRA ALMEIDA

INTERFACE DIDÁTICA PARA SINTONIA DE CONTROLADOR PI EM UMA PLANTA
INDUSTRIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Wilkley Bezerra
Correia.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A447i Almeida, Gabriel de Oliveira.
Interface didática para sintonia de controlador pi em uma planta industrial / Gabriel de Oliveira Almeida. – 2024.
58 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Wilkley Bezerra Correia.
1. Controlador proporcional-integral. 2. Esp32. 3. Esteira transportadora. 4. Interface didática. 5. Python. I. Título.

CDD 621.3

GABRIEL DE OLIVEIRA ALMEIDA

INTERFACE DIDÁTICA PARA SINTONIA DE CONTROLADOR PI EM UMA PLANTA
INDUSTRIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: xx/xx/xxxx.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wilkley Bezerra Correia (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Diego de Sousa Madeira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Rômulo Nunes de Carvalho Almeida
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, por terem me guiado no caminho da educação e acreditado no meu potencial. Mãe, seu carinho e zelo foram fundamentais durante toda minha jornada. Pai, obrigado por todo esforço e dedicação e por todo o investimento feito. Prometo que isso é apenas um começo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado forças para enfrentar os desafios da graduação e fé para acreditar que era possível.

Aos meus familiares, por terem sido minha base e por fornecerem todo apoio emocional que eu precisei ao longo dos anos. À minha mãe, Rita, por ter apresentado o caminho da educação, justiça, dignidade, solidariedade e amor. Ao meu pai, Genésio, que sempre esforçou-se para garantir que nada nos faltasse. Aos meus irmãos, por sempre me apoiarem, cada um da sua forma.

A todos os colegas de graduação da turma de engenharia elétrica 2016 pelas risadas e dificuldades que foram compartilhadas, tornando todo o processo mais leve.

A todos do LAMOTRIZ, por terem sido solícitos, viabilizando a conclusão desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Willkley, pela ótima orientação e suporte ao longo do desenvolvimento do trabalho, possibilitando que eu enxergasse soluções aonde havia problemas.

"É no conhecimento que existe a chance de libertação. Uma pessoa que decide não conhecer, aceita sua condição de escravo, aceita sua condição de submissão; conhecer é a condição pra eu me libertar de mim mesmo e das amarras sociais" (Leandro Karnal, 2016)

RESUMO

Esse trabalho apresenta a criação de uma interface didática desenvolvida em python e com ênfase na disciplina de controle de sistemas dinâmicos. A mesma é integrada com um sistema de acionamento de uma esteira industrial, através de uma ESP32, viabilizando a leitura e o controle da velocidade. Uma seção dedicada à simulações possibilita a sintonia de um controlador PI para o sistema, utilizando como base o modelo identificado da planta. Os parâmetros encontrados podem ser implementados no sistema real, na seção destinada ao controle. Os resultados obtidos mostram que o desempenho desejado na fase de projeto pôde ser observado no comportamento da velocidade linear da esteira, indicando a potencialidade da interface em aproximar aspectos teóricos e práticos dos sistemas de controle. A linguagem python mostrou-se versátil, com fácil implementação e baixo custo, o que pode ser explorado no desenvolvimento de novas ferramentas didáticas.

Palavras-chave: controlador proporcional-integral;esp32;esteira transportadora;interface didática;python

ABSTRACT

This work presents the creation of a didactic interface developed in python and with an emphasis on the discipline of dynamic systems control. It is integrated with an industrial conveyor belt drive system, through an ESP32, enabling speed reading and control. A section dedicated to simulations makes it possible to tune a PI controller for the system, using the identified plant model as a basis. The parameters found can be implemented in the real system, in the section dedicated to control. The results obtained show that the desired performance in the design phase could be observed in the linear speed behavior of the belt, indicating the potential of the interface in bringing together theoretical and practical aspects of control systems. The Python language proved to be versatile, easy to implement and low cost, which can be explored in the development of new teaching tools.

Keywords: proportional-integral controller;esp32;conveyor belt;teaching interface;python

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de Venn: elementos propostos na interface gráfica	18
Figura 2 – Diagrama Geral da Bancada	19
Figura 3 – Fotografia da esteira transportadora	20
Figura 4 – Fotografia do sistema de aferição de velocidade.	22
Figura 5 – Fotografia dos circuitos de tratamento de dados.	23
Figura 6 – Esquema geral da placa de aquisição de dados.	23
Figura 7 – Diagrama do circuito condicionador do sinal de leitura.	24
Figura 8 – Fotografia da ESP32.	25
Figura 9 – Fluxograma da lógica de programação.	26
Figura 10 – Diagrama do circuito condicionador do sinal de acionamento.	27
Figura 11 – Fotografia do inversor de frequência.	28
Figura 12 – Fotografia do motor de indução trifásico.	28
Figura 13 – Fotografia da caixa de redução.	28
Figura 14 – Gráfico do ensaio de identificação do sistema.	30
Figura 15 – Gráfico da aproximação entre o modelo do sistema e dados de ensaio.	30
Figura 16 – Diagrama do Lugar Geométrico das Raízes	32
Figura 17 – Gráfico da resposta ao degrau do sistema: simulação matlab	33
Figura 18 – Captura de tela da simulação comparativa entre modelos aproximados do controlador	35
Figura 19 – Gráfico da resposta do sistema para alguns modelos aproximados	35
Figura 20 – Captura de tela da interface gráfica : Início	37
Figura 21 – Captura de tela da interface gráfica : Simulação	38
Figura 22 – Captura de tela da interface gráfica : Controle	39
Figura 23 – Gráfico da resposta do sistema no ensaio realizado - simulação.	41
Figura 24 – Gráfico do Lugar Geométrico das Raízes - simulação	42
Figura 25 – Gráfico da resposta ao degrau do sistema em malha fechada - simulação	43
Figura 26 – Diagrama de Nyquist.	44
Figura 27 – Diagrama de Bode do sistema em malha aberta.	44
Figura 28 – Gráfico da resposta do sistema no ensaio realizado - velocidade.	45
Figura 29 – Gráfico da resposta do sistema no ensaio realizado - sinal de controle.	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LAMOTRIZ	Laboratório de Sistemas de Força Motriz
LGR	Lugar Geométrico das Raízes
PI	Proporcional-Integral
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PWM	Pulse Width Modulation
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

$C(s)$	Modelo projetado do controlador PI.
$G(s)$	Modelo identificado da planta.
r	Raio da polia motora.
T	Tempo entre bordas de detecção consecutivas do sensor indutivo.
K_i	Tempo integrativo do controlador PID.
K_p	Ganho proporcional do controlador PID.
T_s	Período de amostragem.
v	Velocidade linear da esteira.
ω	Velocidade angular da esteira.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Organização do trabalho	14
2	INTERFACES GRÁFICAS NO ENSINO DE CONTROLE	15
2.1	Projeto de uma interface didática: controle de uma esteira industrial . .	17
3	BANCADA DIDÁTICA	19
3.1	Correias transportadoras	19
3.2	Aferição de Velocidade	21
3.3	Placa de aquisição de dados	22
3.3.1	<i>Circuito de leitura</i>	24
3.3.2	<i>ESP32</i>	24
3.3.3	<i>Circuito de acionamento</i>	26
3.4	Atuador do Sistema	27
4	PROJETO DO CONTROLADOR	29
4.1	Identificação do Sistema	29
4.2	Projeto do Controlador PI	31
4.3	Implementação do Controlador	33
5	INTERFACE GRÁFICA	36
5.1	Desenvolvimento em Python	36
5.2	Layout e funcionalidades.	36
5.3	Roteiro Prático	40
6	RESULTADOS	41
6.1	Resultados Teóricos.	41
6.2	Resultados Práticos.	45
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	47
	REFERÊNCIAS	49
	APÊNDICE A –CÓDIGOS-FONTE	52

1 INTRODUÇÃO

As aplicações de sistemas controlados têm possibilitado o desempenho otimizado de máquinas e processos em diversas frentes de atuação, gerando benefícios nos campos da elétrica, mecânica e química. Essa interdisciplinaridade têm sido refletida nas ementas curriculares dos cursos de engenharia, onde noções sobre malhas retroalimentadas e técnicas analíticas são abordadas em disciplinas de controle. Um desafio para professores é o de equilibrar a teoria fundamentada em conceitos matemáticos complexos com os aspectos práticos de sistemas reais, considerando que a dificuldade com as ciências básicas e a ausência dos exemplos de aplicações são fatores apontados como limitantes do aprendizado e do estímulo dos estudantes (Zenger, 2018).

A utilização de softwares e experiências em laboratórios objetiva facilitar a compreensão e visualização do conteúdo. O aumento do poder computacional permitiu o surgimento de simulações cada vez mais robustas, implementando algoritmos avançados de controle e modelando sistemas complexos. A interface gráfica possibilita que os estudantes acessem esses recursos de forma intuitiva, poupando o tempo dedicado à programação (Kheir *et al.*,1996). Já o papel das atividades práticas está em apresentar as limitações e incertezas do mundo real, possibilitar o contato com equipamentos de medidas e instrumentação técnica e permitir que os conceitos aprendidos em sala sejam validados (Antsaklis *et al.*,1999).

A combinação desses recursos permite que os estudantes experienciem contextos de aprendizagem análogos à prática profissional, no qual trabalham em equipes para solucionar problemas de modelagem, análise e projeto de sistemas reais. Entretanto, questões de ordem financeira podem acabar limitando a adoção desse tipo de metodologia. Máquinas e equipamentos industriais são investimentos onerosos, o que pode levar a utilização de protótipos de baixo custo mas com pouca aplicação prática. Isso se estende para aquisição de licenças em ferramentas de software.

Como alternativa a programas comerciais, o desenvolvimento em Python oferece recursos e pacotes gratuitos que podem ser utilizados para aplicações didáticas em controle. A linguagem simples e acessível, o suporte de uma comunidade consolidada e a existência de bibliotecas versáteis para o cálculo numérico, como "Numpy" e "Scipy", são alguns fatores que têm justificado a grande utilização dessa ferramenta na engenharia (Malcoci;Ciobanu;Ciobanu, 2023). Para área de controle, a biblioteca "Python-Control" oferece um conjunto de classes e funções focadas na análise de sistemas. A sua versatilidade têm levado acadêmicos a adotar

o Python como principal ferramenta, tanto em cursos introdutórios como nas disciplinas de controle digital (Fuller *et al.*, 2021). Esses recursos podem ainda ser combinados com bibliotecas de interfaces gráficas do usuário, criando ambientes digitais interativos.

Ressalta-se que o acesso a ferramentas adequadas de projeto e o contato com bancadas industriais, são fatores que agregam na capacitação técnica dos estudantes. A geração de mão-de-obra qualificada para a indústria torna-se pertinente à medida em que os sistemas de controle contribuem para a fabricação de produtos com maior qualidade, precisão e padronização. Essas vantagens são potencializadas em linhas automatizadas, onde sistemas de controle aliados aos dispositivos elétricos, mecânicos e às tecnologias de informação, resultam no aumento da produtividade e na redução dos custos (Quesada, 2017). Nesses ambientes, destaca-se a utilização de controladores do tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID), caracterizados pela fácil implementação, versatilidade e pela possibilidade de sintonia sem o conhecimento de modelos matemáticos do sistema (Garcia, 2018). Esse cenário aponta para a necessidade de abordar projetos práticos de PID nas disciplinas de controle.

O alinhamento entre a formação acadêmica e o perfil de egresso requerido pelo mercado envolve o desenvolvimento de competências além das técnicas. Nos cursos de engenharia, as diretrizes curriculares nacionais apontam para o desenvolvimento da capacidade de comunicação, liderança em equipes multidisciplinares e na formulação e concepção de soluções (BRASIL,2019). De acordo com o Art. 6º da Resolução nº 2, de 24 de abril de 2019, "Deve-se estimular as atividades que articule simultaneamente a teoria, a prática e o contexto de aplicação, necessárias para o desenvolvimento das competências, estabelecidas no perfil do egresso, incluindo as ações de extensão e a integração empresa-escola."(BRASIL,2019). Isso exige uma adaptação das metodologias tradicionais de ensino por outras que envolvam uma maior participação ativa dos estudantes no processo de aprendizado. A introdução de problemas reais da indústria para resolução de forma cooperativa entre estudantes, têm sido uma estratégia adotada em algumas disciplinas de um curso de Engenharia de Controle, resultando em um melhor engajamento e desempenho nas notas dos estudantes (Anabuki, 2019). Essa forma de ensino propicia uma maior aproximação entre universidade e indústria, criando canais bidirecionais de troca do conhecimento aonde alunos aprendem desenvolvendo soluções para fábricas reais, e estas poupam recursos que seriam gasto em etapas de projeto (Rentzos;Mavrikios;Chryssolouris,2015).

Diante do exposto, a proposta desse trabalho é apresentar o desenvolvimento de uma interface gráfica didática com ênfase na disciplina de controle de sistemas dinâmicos, ofertada

ao curso de engenharia elétrica da UFC. A ferramenta foi criada para ser utilizada em contextos de aprendizagem ativa, onde os estudantes possam resolver um problema pertinente para a indústria. Para isso, além de explorar recursos de simulação, a interface é integrada com um sistema de acionamento de uma esteira transportadora, através de uma placa microcontroladora ESP32. Isso possibilita que os parâmetros de controle encontrados na fase de projeto possam ser implementados no sistema real.

Uma revisão bibliográfica foi feita para identificar boas práticas do uso de ferramentas digitais no ensino de controle, possibilitando um planejamento inicial para o desenvolvimento da interface gráfica. A partir disso, foram exploradas as bibliotecas da linguagem python e as funcionalidades do sistema de aquisição de dados, de forma a possibilitar uma integração da interface gráfica com a planta industrial.

1.1 Organização do trabalho

O trabalho foi dividido na forma descrita a seguir.

O segundo capítulo aborda uma revisão literária sobre o uso de ambientes digitais de aprendizado para o ensino de controle de sistemas, de forma a constituir uma base teórica que fundamente o desenvolvimento da interface gráfica proposta.

O capítulo três apresenta os dispositivos que compõem o sistema de acionamento da esteira industrial, descrevendo as configurações que foram feitas para propiciar o controle de velocidade.

A identificação do modelo do sistema é apresentado no capítulo quatro, onde é proposto um projeto de controlador.

O capítulo cinco apresenta as características da interface gráfica, iniciando com processo de desenvolvimento em python e finalizando com o seu design e funcionalidades.

O capítulo seis apresenta os resultados coletados na seção de simulação e na seção de controle, de forma que seja possível confrontar os resultados teóricos com os resultados práticos.

No capítulo sete é apresentado a conclusão com o desenvolvimento do trabalho, levando em consideração os resultados obtidos e os objetivos iniciais pretendidos. A partir disso, ideias de trabalhos futuros são sugeridos.

2 INTERFACES GRÁFICAS NO ENSINO DE CONTROLE

Interfaces gráficas são desenvolvidas para possibilitar uma comunicação homem-máquina de forma intuitiva e interativa, centrada na manipulação de elementos como barras deslizantes, botões e ícones. As aplicações didáticas na área de controle têm sido utilizadas para facilitar a compreensão de conceitos, explorando o poder da computação científica dentro de ambientes digitais amigáveis. A versatilidade das linguagens de desenvolvimento permite a criação de experiências personalizadas, atendendo as demandas específicas dos currículos e as estratégias pedagógicas adotadas pelos professores.

As representações gráficas aparecem de forma natural nessas interfaces, em virtude do papel que exerce na análise do comportamento de sistemas. Essas informações visuais contribuem para origem de conceitos, na compreensão do relacionamento entre objetos matemáticos e na própria forma como o conhecimento é transmitido (Dormindo;Esquembre;Pastor,2005). Alguns exemplos clássicos são as respostas em frequência apresentadas nos diagramas de *Bode* e *Nyquist*, o esboço do Lugar Geométrico das Raízes e os gráficos temporais das variáveis controladas.

A combinação desses elementos com o caráter interativo das interfaces permite o desenvolvimento de simulações baseadas em figuras dinâmicas, que modificam-se instantaneamente conforme as ações dos usuários (Wittenmark;Haglund;Johansson,1998). Nesse caso, a compreensão do conteúdo ocorre porque os estudantes correlacionam a variação de um conjunto de parâmetros com a resposta gráfica dos sistemas simulados. Um exemplo é apresentado em Bencomo (2003) que desenvolve um módulo *web* para estudantes de engenharia de controle, onde conceitos-chave são abordados em exemplos únicos; na seção sobre o *aliasing*, a variação da frequência de amostragem pode ser percebida dinamicamente na forma de onda do sinal amostrado. Essas características também permitem que os estudantes experienciem um projeto interativo de controle, no qual o atendimento aos requisitos de desempenho pode ser verificado conforme as alterações são feitas em cada uma das etapas (Sánchez;Dormido;Esquembre, 2005).

Somente as funcionalidades das simulações não garantem que os objetivos didáticos da interface sejam alcançados, principalmente quando a utilização da ferramenta ocorre em ambientes sem a supervisão dos professores. Aldrich (2005) também aponta como essenciais para experiências educacionais baseadas em computador: elementos pedagógicos, que atuam para direcionar a compreensão do conteúdo abordado; elementos de jogos, que são responsáveis por aumentar o entusiasmo na utilização da ferramenta. Essas ideias são incorporadas em Rosas e

Fernandéz (2022) através de uma ferramenta para simulações de sistemas de primeira e segunda ordem, aonde questionários são utilizados para direcionar e avaliar o aprendizado dos estudantes, com um sistema de pontuação que fornece recompensas para aqueles com mais acertos.

Outra abordagem ocorre quando o controle de sistemas reais são incorporados na forma de problemas para resolução dos estudantes, sendo que a interface gráfica funciona como uma ferramenta de modelagem, análise e projeto. A utilização de plantas simuladas é uma opção quando os equipamentos não estão fisicamente disponíveis. Além disso, permite uma maior segurança na exploração de cenários, sem a preocupação com possíveis danos na manipulação de equipamentos. Guzman *et al.* (2023) apresenta algumas aplicações interativas que reproduzem o comportamento de um sistema bola-barras e de um pêndulo invertido, com análises gráficas que subsidiam a aplicação de controladores PID.

Uma maior experiência em aplicações práticas ocorre quando existe uma integração com bancadas físicas, originando sistemas supervisórios de controle e monitoramento. A implementação digital de controladores aliado a diversos tipos de sensores e dispositivos de aquisição de dados, permite flexibilidade para a abordagem de conteúdos específicos. Em Franco *et al.* (2021) um Arduino é responsável pela integração de uma planta didática de controle de nível com uma interface que realiza a sintonia de um PID através da técnica *shooting*. Algo semelhante é encontrado no sistema desenvolvido por Júnior (2020) para sintonia automática e auto-ajuste de PID no controle de velocidade e posição de um motor CC. Em ambos, a utilização do Matlab/Simulink justifica-se pela facilidade na construção de interfaces gráficas e pela disponibilidade dos pacotes de comunicação com hardware. Entretanto é um software pago, representando uma desvantagem econômica quando não existe licenças acadêmicas.

A integração entre sistemas físicos e digitais também possibilita o desenvolvimento de interfaces didáticas com seções dedicadas ao uso de simulações, e outras dedicadas a interação com plantas reais. Essa abordagem permite que os estudantes tenham uma visão holística da disciplina de controle, no qual resultados obtidos na fase de projeto possam ser verificados em uma aplicação prática. Almeida *et al.* (2019) utilizam dessa configuração, construindo um programa para a sintonia de controladores PID em um sistema de acionamento de uma esteira industrial. Um conceito análogo é empregado em simulações do tipo (*Hardware-in-the-Loop*), onde a junção entre elementos reais e virtuais, dentro de uma malha fechada, permite que sejam feitos testes de desempenho, reunindo informações abrangentes e, conseqüentemente, reduzindo as perdas econômicas no desenvolvimento de unidades de controle embarcadas (Mihali; Trunti;

Hren, 2022).

Por fim, ressalta-se que a utilização de interfaces gráficas permite que os estudantes de controle participem de forma mais ativa do processo de aprendizado. Isso ocorre quando aprendem novos conceitos através de aplicações interativas ou quando os consolida através da experimentação com sistemas reais. A grande potencialidade das aplicações digitais está em servir como "ferramenta mental" para organização dos pensamentos, no qual os estudantes sejam levados a refletir criticamente sobre o conteúdo e construir as suas próprias idéias (Jonassen; Carr; Yueh, 1998).

2.1 Projeto de uma interface didática: controle de uma esteira industrial

Esse trabalho propõem uma interface didática para aplicação nas aulas de laboratório da disciplina de "controle de sistemas dinâmicos", ofertada aos alunos do sexto período do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará (UFC). O intuito é abordar o projeto de controladores Proporcional-Integral (PI), com uma seção dedicada a simulação e outra dedicada ao controle e monitoramento da velocidade linear de uma esteira industrial. Dessa forma, os resultados teóricos podem ser comparados com resultados práticos. O trabalho apresenta uma contribuição ao processo de ensino da disciplina (Departamento de Engenharia Elétrica, 2005), ao introduzir uma planta com aplicação industrial como bancada didática.

Considerando os três elementos essenciais que compõem as simulações computacionais (Aldrich, 2005; Rosas e Fernandes, 2023) uma adaptação proposta para o desenvolvimento desse trabalho é apresentada na figura 1. A aplicação real assume um papel semelhante aos elementos de jogos, no sentido de promover o entusiasmo dos estudantes para a prática profissional (Bazzo;Pereira, 2005).

Assim, a interface gráfica foi desenvolvida para fornecer os seguintes elementos:

- simulação: fornecer informações sobre o comportamento de sistemas no domínio do tempo e na frequência;
- elementos pedagógicos: auxiliar os estudantes na compreensão das relações entre os modelos matemáticos e suas diversas representações do sistemas, além de esclarecer as funcionalidades de cada um dos elementos que compõem a bancada didática.
- aplicação real: integração da interface com uma planta industrial real, de forma que os parâmetros de controle encontrados na fase de projeto possam ser aplicados na pratica.

Figura 1 – Diagrama de Venn: elementos propostos na interface gráfica



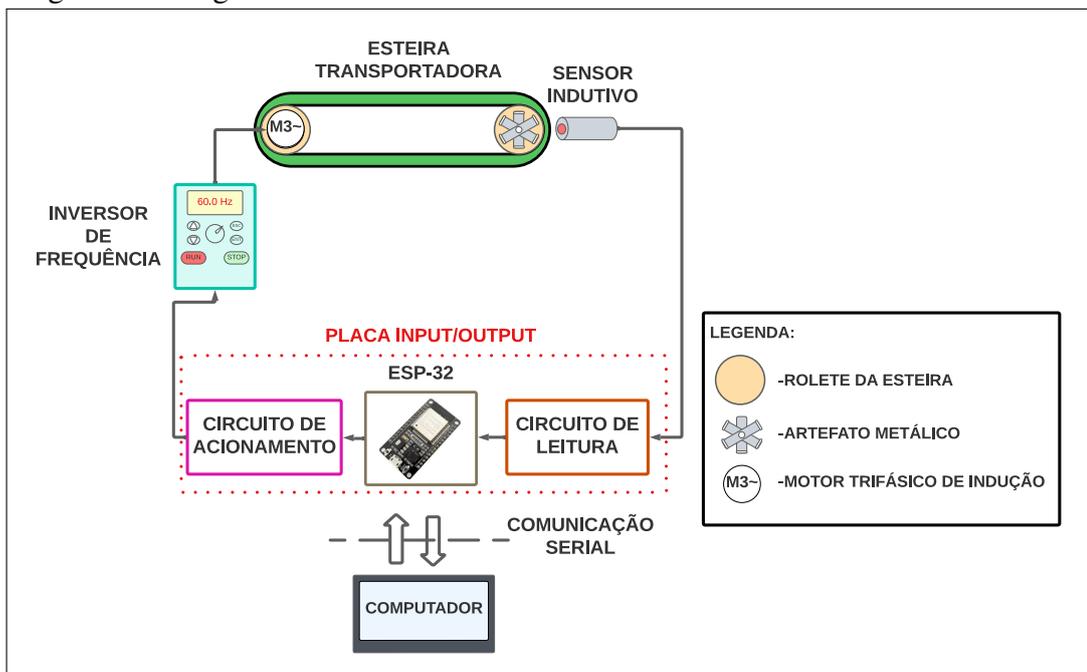
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

3 BANCADA DIDÁTICA

Os elementos da bancada foram arrançados de modo a constituírem um sistema de controle de velocidade, aplicado em uma esteira industrial. Em sistemas modernos os controladores são implementados de forma digital, o que apresenta vantagens defronte à implementação analógica. Destaca-se o aumento da sensibilidade de medição, sensibilidade reduzida aos ruídos e flexibilidade na mudança do algoritmo de controle (Dorf; Bishop, 2001).

A integração do sistema com a interface didática possibilita que os parâmetros de controle sejam ajustados dentro de um ambiente amigável, com o objetivo de atendimento às especificações desejadas de velocidade. O diagrama da figura 2 apresenta a configuração geral dos elementos da bancada, sendo melhor descritos nas seções seguintes.

Figura 2 – Diagrama Geral da Bancada



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.1 Correias transportadoras

O Laboratório de Sistemas de Força Motriz (LAMOTRIZ) da UFC possui quatro esteiras industriais que são dispostas sequencialmente de forma análoga ao que ocorre em linhas de produção. Uma única esteira foi utilizada nesse trabalho com as seguintes características: distância de 4.38 m entre os eixos da polia motora e da polia de retorno; material da correia feito de lona; acoplamento da polia motora com o motor de indução através de uma caixa de

redução; acionamento via inversor de frequência. O funcionamento é baseado na transmissão do movimento circular da polia motora para um movimento linear da correia. Uma fotografia da planta é apresentada na figura 3.

Figura 3 – Fotografia da esteira transportadora



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A utilização da esteira como planta didática visa incorporar problemas reais no aprendizado de controle de sistemas. A locomoção de matérias primas ou produtos acabados constitui uma necessidade constante no âmbito industrial, sendo os sistemas de correias amplamente utilizados pelo melhor desempenho, rapidez, economia de tempo e a melhor relação custo-benefício em diversos segmentos (ABECOM, 2023).

Um exemplo de aplicação em larga escala pode ser observado na mineração a céu aberto, onde longas linhas de correias realizam o transporte do carvão para alimentação das termelétricas (Bebic; Ristic, 2018). No contexto da automação industrial, as esteiras transportadoras permitem a transferência das peças entre as diversas estações de trabalho de uma linha de produção, destacando-se pela capacidade de locomover itens com diferentes pesos e formatos (Gupta; Arora; Westcott, 2017).

A capacidade de integrar os diversos pontos de trabalho implica na necessidade de adequar a velocidade das esteiras ao ritmo produtivo desejado, de forma a não sobrecarregar ou

tornar ociosa determinadas partes do sistema. A seleção de velocidade também relaciona-se com a operação saudável das correias, sendo ajustada para reduzir tensões excessivas e desgastes da cobertura, e com um valor próximo ao da frequência de carregamento (ABECOM, 2023). Esses aspectos são considerados em He *et al.* (2018), que propõem um método para determinação do tempo mínimo de aceleração a ser observado no controle de velocidade, considerando um modelo de elementos finitos para estudar o impacto da aceleração em quesitos como o deslizamento e tensões excessivas nas correias.

Outra motivação para o controle de velocidade refere-se a eficiência energética dos sistemas, principalmente em aplicações de larga escala. Em Ji *et al.* (2020) é proposto um método para determinação de um valor ótimo de velocidade que minimize as perdas elétricas e mecânicas, obtido em função da taxa de carregamento da esteira.

3.2 Aferição de Velocidade

Para o sensoriamento da velocidade da esteira foi utilizado o mecanismo desenvolvido por Pereira (2022) e apresentado na figura 4. O mesmo é composto pelos seguintes elementos:

- a) Um artefato metálico, constituído de três tiras retangulares sobrepostas e espaçadas em um ângulo de 60° em relação ao eixo que passa no seu centro. As extremidades das tiras são dobradas, formando seis abas perpendiculares. O eixo do artefato é acoplado no eixo da polia motora;
- b) Um sensor indutivo NPN da *Telemecanique*, modelo XSA-HO5723H23, com alimentação na faixa de 12 – 48 V.

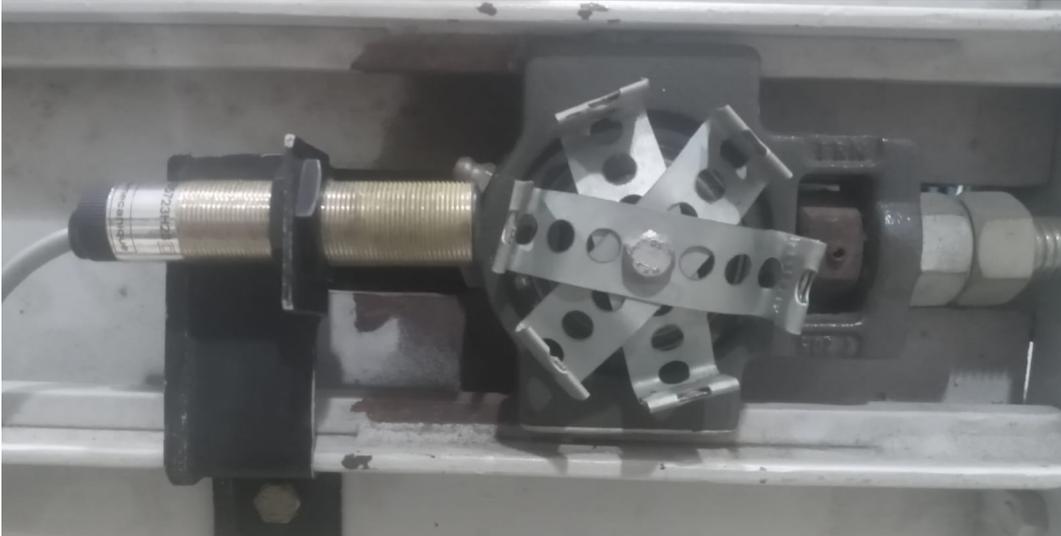
Os sensores de proximidade indutivo possuem um circuito oscilador que gera um campo eletromagnético de alta frequência. Quando materiais metálicos são colocados face ao campo, correntes são induzidas no metal, reduzindo a energia do oscilador. Um circuito comparador é utilizado para converter essa perda em um sinal bem definido (Thomazini; Albuquerque, 2005). No sensor utilizado, a amplitude desse sinal é de 24 V.

Dessa forma, com a combinação apresentada na figura 4, o sinal de saída do sensor varia entre 0 V e 24 V de acordo com a rotação do artefato metálico. O tempo entre bordas consecutivas é utilizado para o cálculo da velocidade linear.

A velocidade linear v pode ser expressa pela relação entre a velocidade angular ω e o raio da polia motora r . A velocidade angular, por sua vez, é obtida através da relação do

espaçamento entre abas ($\frac{\pi}{3} \text{ rad/s}$) e o tempo T entre duas bordas de subida consecutivas. Dessa forma, a equação 3.3 pode ser utilizada para o cálculo da velocidade linear.

Figura 4 – Fotografia do sistema de aferição de velocidade.



Fonte: Próprio autor.

$$v = \omega . r \tag{3.1}$$

$$\omega = \frac{\pi}{3.T} \tag{3.2}$$

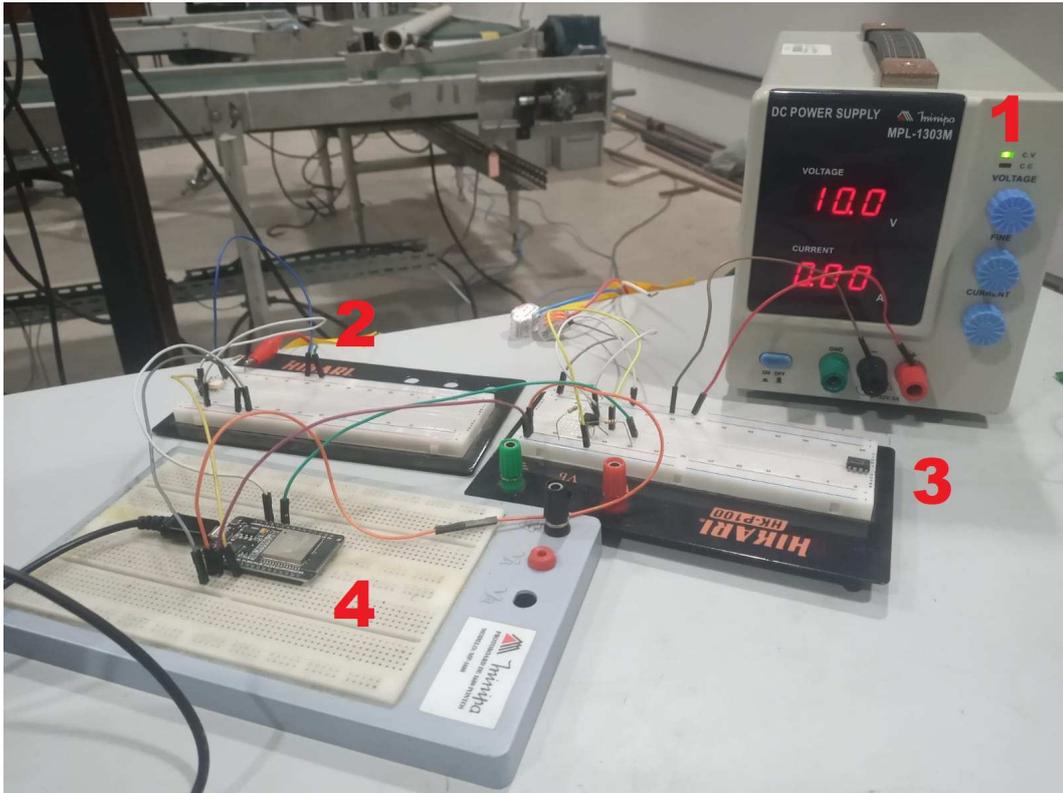
$$v = \frac{\pi . r}{3.T} \tag{3.3}$$

3.3 Placa de aquisição de dados

Uma conjunto de circuitos foram montados em *protoboards* para funcionar como uma placa de aquisição de dados, recebendo o sinal de leitura do sensor indutivo e enviando o sinal de controle para o atuador do sistema. Os seguintes elementos foram utilizados:

1. Fonte de tensão contínua, fabricante MINIPA modelo MPL-1303M;
2. Circuito de Leitura;
3. Circuito de Acionamento;
4. ESP32.

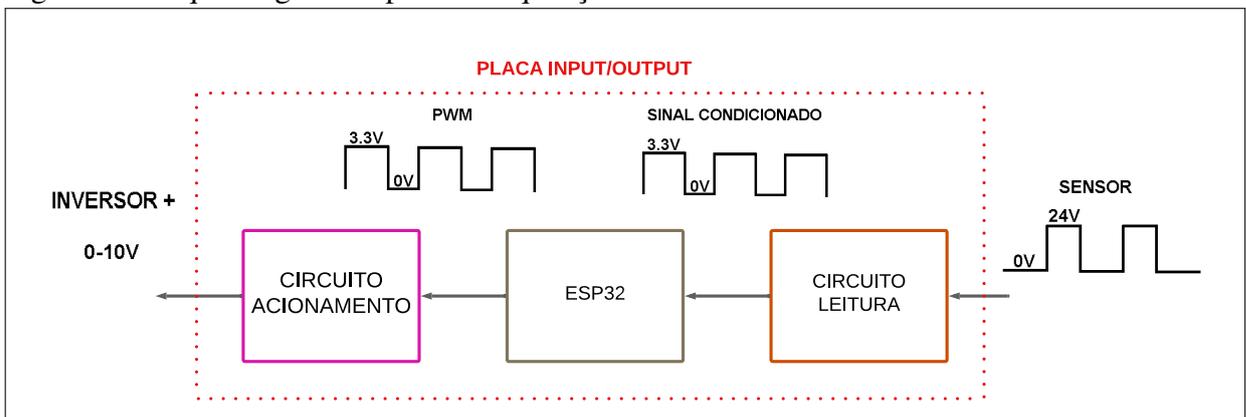
Figura 5 – Fotografia dos circuitos de tratamento de dados.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O esquemático da figura 6 demonstra o papel da placa de aquisição de dados no sistema, recebendo como entrada uma sequência de pulsos digitais do sensor indutivo e enviando como saída um sinal analógico de 0 à 10 V para o inversor de frequência. Um código é embarcado na ESP32 de forma a possibilitar que o fluxo de dados seja controlado através da comunicação serial. Os circuitos de acionamento e leitura são projetados para adequar os níveis de tensão em valores compatíveis com o microcontrolador. O conjunto ESP32-acionamento-leitura configura-se de forma análoga a um sistema de aquisição de dados.

Figura 6 – Esquema geral da placa de aquisição de dados.

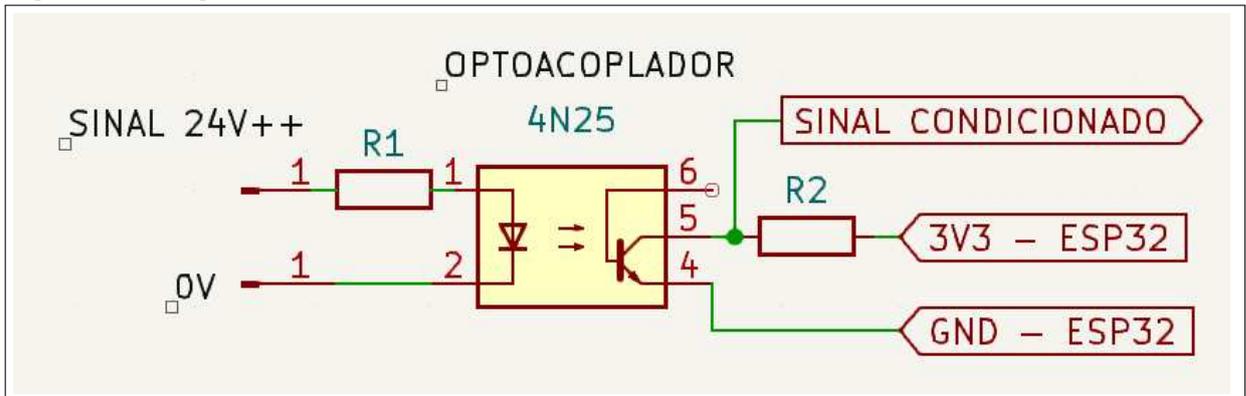


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.3.1 Circuito de leitura

O circuito de leitura reduz o sinal digital do sensor para níveis de tensão compatíveis com a placa ESP32, preservando a forma de onda dos pulsos e mantendo a informação de tempo entre bordas consecutivas. O mesmo é composto por um circuito integrado 4N25, que contém um elemento optoacoplador, e dois resistores limitadores de corrente, sendo $R1 = 1,5 \text{ k}\Omega$ e $R2 = 1,2 \text{ k}\Omega$.

Figura 7 – Diagrama do circuito condicionador do sinal de leitura.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A frequência de pulsos enviados pelo sensor é a mesma frequência de chaveamento do transistor. Como o circuito do transistor é alimentado por 3,3 V da placa, o sinal condicionado espelha uma versão reduzida do sinal de entrada.

3.3.2 ESP32

A ESP32-WROOM é um módulo microcontrolador desenvolvido pela *Expressif Systems*. Possui como núcleo o chip ESP32-D0WDQ6, que contém dois processadores com frequência de clock ajustável entre 80 a 240 MHz. O modelo utilizado possui 30 pinos, sendo 25 destinados para entrada/saída de sinais na faixa de operação de 0 – 3,5V. A placa também possui 16 canais para a geração de sinais Pulse Width Modulation (PWM). O módulo utilizado é apresentado na figura 8.

Para a programação foi utilizado o *software* ARDUINO IDE®, ambiente de desenvolvimento que possui compatibilidade com a placa ESP32. O programa desenvolvido foi embarcado na placa, habilitando a mesma a funcionar como um dispositivo de aquisição de dados e envio do sinal de controle. A comunicação serial é o que permite a manipulação das informações de entrada e saída.

Figura 8 – Fotografia da ESP32.

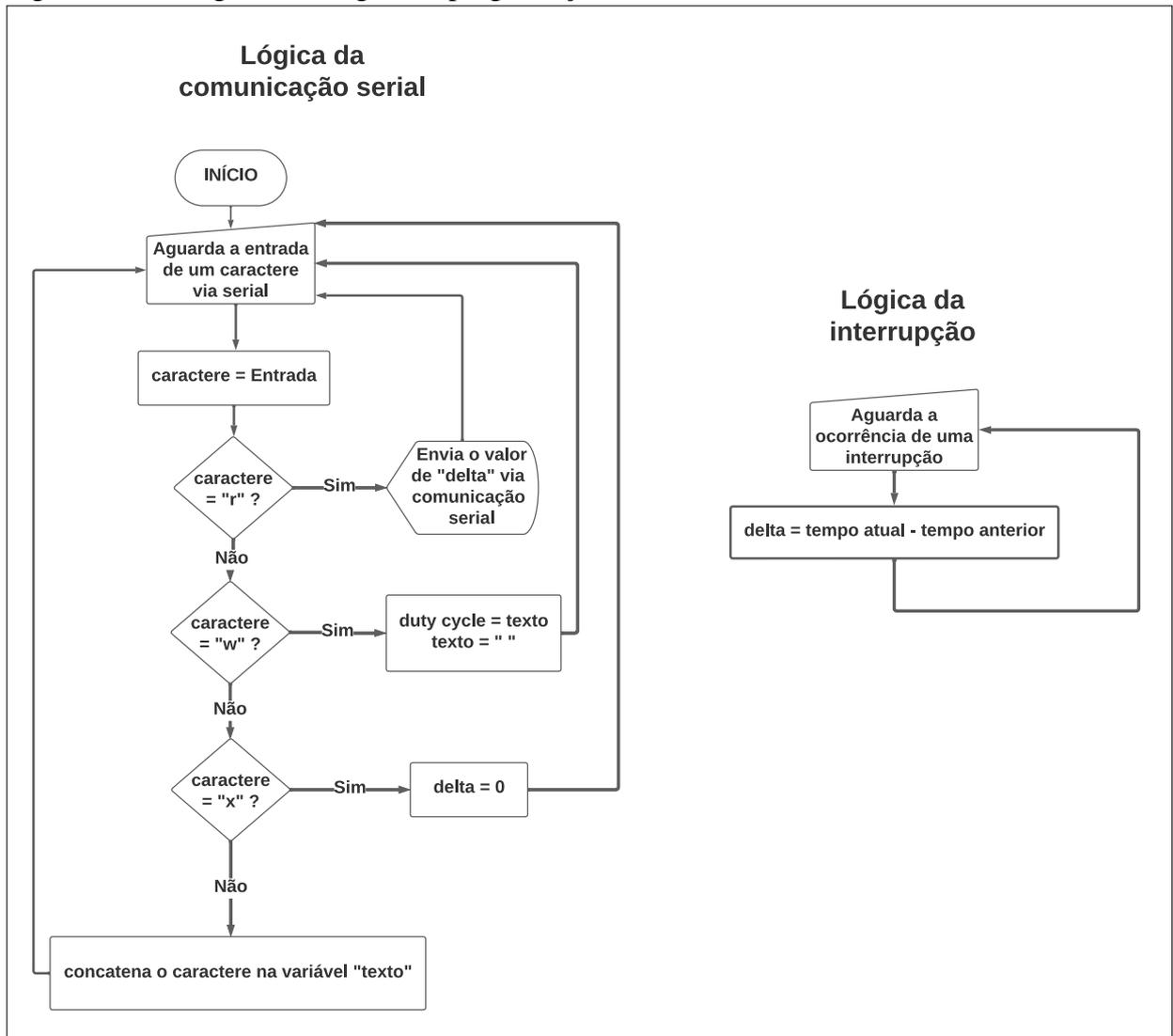


Fonte: Próprio autor.

A lógica do programa é representada no fluxograma da figura 9, sendo dividido nos seguintes blocos lógicos:

- bloco de interrupção: uma função interrupção que é chamada quando ocorre uma borda de subida digital do pino 14, que é conectado na saída do sensor indutivo. A função é responsável por armazenar o tempo T entre dois eventos consecutivos.
- bloco de controle: o pino 4 envia um sinal PWM para o circuito de acionamento. O *duty cycle* possui uma resolução de 10 bits, podendo ser modificado através de um comando serial.
- bloco de comunicação serial: um laço *while* verifica as entradas da porta serial e toma decisões de acordo com os caracteres recebidos. O caractere "x" é utilizado para zerar o valor de T ; com "r" a placa retorna o valor atual de T pela comunicação serial ; "w" é utilizado como último caractere de um comando de potência, sendo precedido por um número com resolução de 10 bits (0 – 1023) correspondente à um determinado *duty cycle* do PWM.

Figura 9 – Fluxograma da lógica de programação.

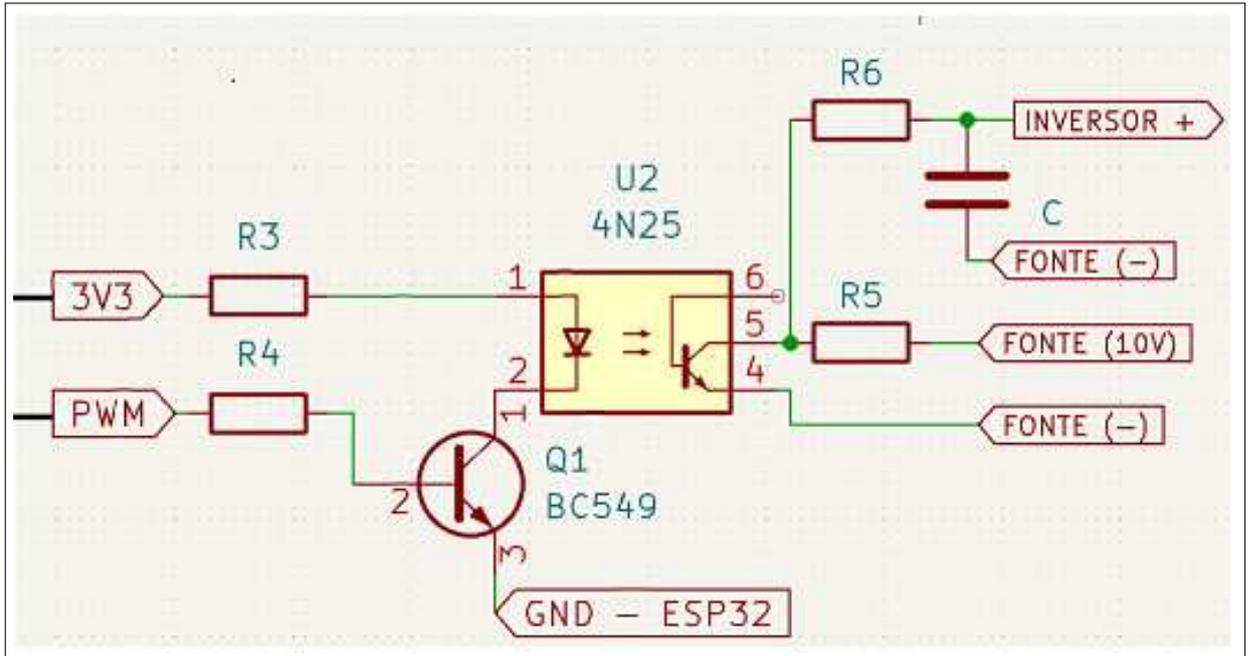


Fonte: Próprio autor.

3.3.3 Circuito de acionamento

O circuito de acionamento foi projetado para adequar o nível de tensão do PWM gerado na placa (0 – 3,3 V) para um sinal analógico de tensão entre 0 e 10 V. O circuito é composto por um optoacoplador que realiza a interface entre os dois níveis de tensão. No lado da placa, um transistor NPN opera como chave com o sinal da base sendo alimentado pelo PWM gerado. No lado da tensão de 10 V a bateria alimenta um resistor $R5 = 1\text{ k}\Omega$, de tal forma que a saída (INVERSOR +) transita entre dois estados de tensão (0 – 10 V). Um filtro passa-baixa é utilizado para a obtenção da componente contínua do sinal, consistindo de um sinal analógico de tensão proporcional ao *duty cycle* do PWM, que envia 0V para 100% e 10V para 0%. O circuito é apresentado na figura 10.

Figura 10 – Diagrama do circuito condicionador do sinal de acionamento.



Fonte: Próprio autor.

3.4 Atuador do Sistema

Um motor de indução acionado via inversor de frequência, opera como atuador do sistema. O inversor utilizado é o modelo ALTIVAR 31 *Telemecanique*, com range de frequência 0 – 60 Hz. O parâmetro "LSr" foi programado para permitir uma referência de frequência via entrada analógica de tensão (SCHNEIDER,2016). Uma fotografia retirada desse elemento é apresentada na figura 11.

O motor é da fabricante WEG, modelo 18JANO5, possuindo uma potência de 1,1 kW (1,5 cv), rendimento de 81,5 %, fator de potência igual a 0,82 e uma velocidade nominal de 1700 rpm. O motor é apresentado na figura 12.

Uma caixa de redução é utilizada para adequar a velocidade do motor para valores compatíveis com o sistema de esteiras. A mesma é da fabricante Cestari, possuindo uma relação de transformação com valor igual a 80. O acoplamento com a polia motora permite a transmissão do movimento circular. Uma fotografia da caixa de redução é apresentada na figura 13.

Figura 11 – Fotografia do inversor de frequência.



Fonte: Próprio autor.

Figura 12 – Fotografia do motor de indução trifásico.



Fonte: Próprio autor.

Figura 13 – Fotografia da caixa de redução.



Fonte: Elaborado pelo Próprio autor.

4 PROJETO DO CONTROLADOR

Nessa seção será descrito o procedimento adotado para a definição do modelo de um controlador Proporcional-Integral a ser implementado na malha de velocidade da esteira . Uma identificação foi feita para encontrar um modelo matemático aproximado do sistema. Com o modelo obtido, a técnica de alocação dos polos foi utilizada para a sintonia do controlador.

4.1 Identificação do Sistema

O objetivo da técnica de identificação é encontrar um modelo matemático que representa, de maneira aproximada, o comportamento de um determinado sistema. O modelo obtido pode ser aplicado na análise de sistemas de controle, possibilitando o projeto de controladores.

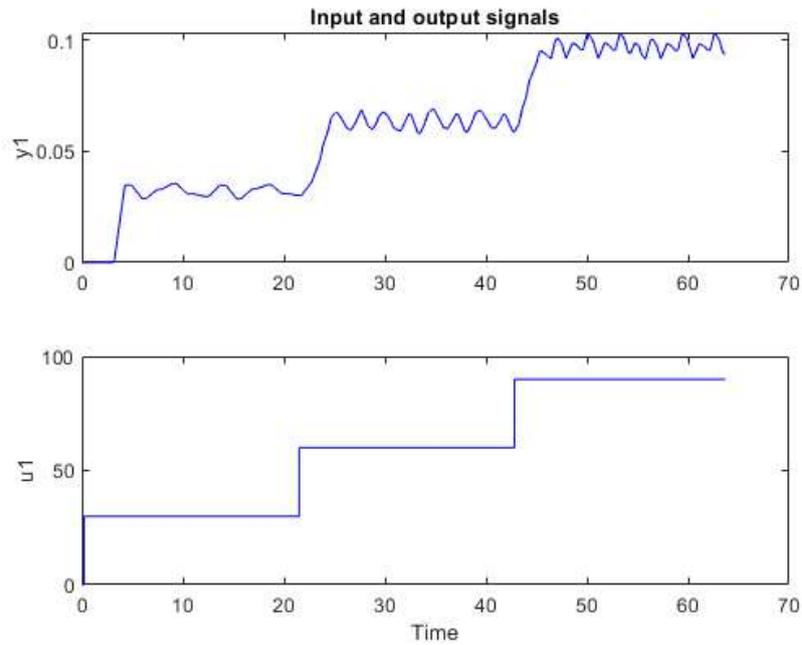
Os tipos de modelagem de sistemas podem ser classificados em (Aguirre,2004): caixa branca, no qual a modelagem é feita a partir leis físicas que regem o sistema; caixa preta ou empírica, no qual a modelagem é feita a partir da coleta de dados de entrada e saída do sistema. Nesse trabalho foi utilizada uma modelagem empírica, com os dados experimentais obtidos através da excitação do inversor em diferentes níveis de tensão. Para efetuar o ensaio foi implementado um programa em python no editor de código VS Code®, que realiza a comunicação serial com a ESP32 através dos caracteres de comando.

As seguintes considerações foram feitas no tratamento de dados:

- tratamento do sinal de velocidade: o sinal de velocidade é obtido através da aplicação do intervalo delta, fornecido pela ESP32, como tempo T na equação 3.3. Para a redução de ruídos oriundos do sistema de aferição, foi aplicado um filtro de média móvel com cinco amostras.
- tratamento do sinal de acionamento: o sinal de acionamento foi normalizado entre 0 – 100% de forma a representar o *duty cycle* do PWM e, conseqüentemente, um nível de tensão proporcional no inversor de frequência.

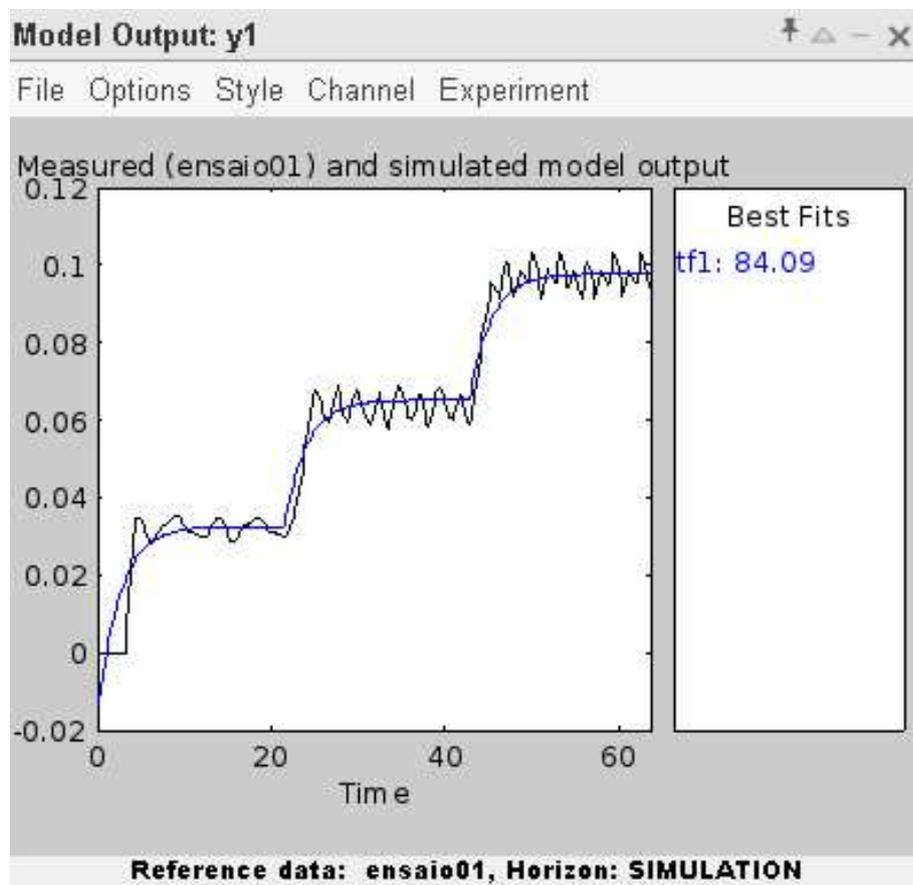
O código comentado é apresentado no apêndice A e os resultados do ensaio são apresentados na figura 14. Foram aplicados três ciclos de trabalhos distintos (30%, 60% e 90%) durante intervalos de 21 s. Na identificação do sistema, os dados de ensaios foram aplicados no *System Identification Toolbox* do MATLAB ®. O modelo de primeira ordem é apresentado na equação 4.1, através do qual foi obtido uma aproximação de 84,09 % em relação aos dados de ensaios, conforme mostra a figura 15.

Figura 14 – Gráfico do ensaio de identificação do sistema.



Fonte: Próprio autor.

Figura 15 – Gráfico da aproximação entre o modelo do sistema e dados de ensaio.



Fonte: Próprio autor.

$$G(s) = \frac{4,334 \times 10^{-4}}{s + 0,39}. \quad (4.1)$$

4.2 Projeto do Controlador PI

O controlador do tipo PID pode ser definido de acordo com a função de transferência apresentada na equação 4.2, sendo caracterizado pelos termos proporcional (K_p), integral (K_i) e derivativo (K_d) (Ogata, 2011). Uma variação ocorre quando o termo derivativo é nulo, originando o modelo PI mostrado na equação 4.3.

$$C(s) = \frac{K_p \cdot s + K_i + K_d \cdot s^2}{s} \quad (4.2)$$

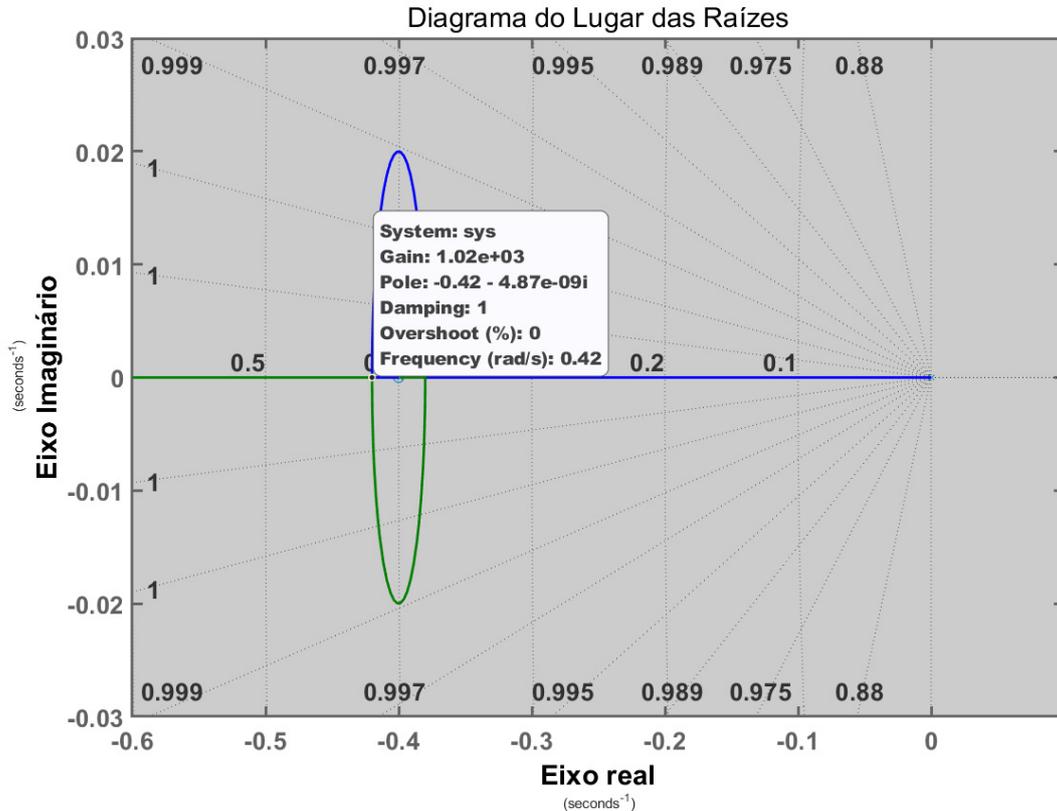
$$C(s) = \frac{K_p \cdot s + K_i}{s} \quad (4.3)$$

O PI foi escolhido no intuito de combinar um comportamento transitório mais rápido com um erro nulo em regime permanente. Uma vez identificado o modelo dinâmico da planta, conforme apresentado na equação 4.1, técnicas analíticas podem ser utilizadas para a determinação dos parâmetros do controlador. Em específico, utilizou-se o Lugar Geométrico das Raízes (LGR) para técnica de alocação dos polos do sistema. A equação 4.4 foi utilizada para a construção do diagrama, no qual o zero do controlador foi colocado mais à direita do polo da planta, no ponto $(-0,4;0)$, e a variação do ganho K define o comportamento dos polos em malha fechada.

$$C(s) = K \cdot \frac{s + 0,4}{s} \quad (4.4)$$

Utilizando do comando *rlocus* do MATLAB, foi plotado o respectivo LGR do sistema. Os resultados são apresentados na figura 16. O ponto destacado corresponde ao valor de $K = 1023$. Com esse ganho, o sistema apresenta dois polos reais e iguais. Isso implica em uma resposta sem *overshoot* e com um fator de amortecimento unitário. Os polos do sistema para esse valor de K localiza-se no eixo real, no ponto $x = -0,422$.

Figura 16 – Diagrama do Lugar Geométrico das Raízes



Fonte: Próprio autor.

Utilizando-se o valor de K encontrado e correlacionando com a função de transferência do controlador PI apresentado em 4.3, o modelo do controlador será dado pela equação 4.5, com o valor de K_p sintonizado em 1023 e o valor de K_i em 409.2.

$$C(s) = \frac{1023.s + 409,2}{s} \quad (4.5)$$

Uma simulação com o sistema controlado foi feito no Matlab, no qual observou-se o comportamento para uma entrada do tipo degrau unitário. Os resultados são apresentados na figura 17. Observa-se que o sistema atinge o erro nulo em regime permanente, com um tempo de acomodação em torno de 10 s. Esses parâmetros de desempenho serão utilizados como referência para o projeto efetuado pelos estudantes através da interface gráfica.

Figura 17 – Gráfico da resposta ao degrau do sistema: simulação matlab



Fonte: Próprio autor.

4.3 Implementação do Controlador

É de interesse prático que a função de transferência apresentada na equação 4.5 possa ser transformada em uma equação a diferenças, de forma que seja possível implementação via algoritmo. A modelagem e o projeto de controladores quando tratados no domínio discreto, utilizando-se da transformada Z, possibilita encontrar tais equações através do uso da transformada inversa.

Com o intuito de preconizar os objetivos pedagógicos e sabendo-se que a disciplina de "Controle de Sistemas Dinâmicos" possui uma maior ênfase nos sistemas contínuos, a implementação do controlador foi feita a partir da discretização de um controlador PI contínuo. A relação entre o sinal de controle $U(s)$ e o erro $E(s)$ é manipulada para a obtenção da equação 4.6. A partir dessa, a transformada inversa é aplicada e os termos derivativos são aproximados pela diferença entre amostras consecutivas.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p \cdot s + K_i}{s} \quad (4.6)$$

$$s \cdot U(s) = K_p \cdot s \cdot E(s) + K_i \cdot E(s) \quad (4.7)$$

$$\frac{du}{dt} = K_p \cdot \frac{de}{dt} + K_i \cdot e(t) \quad (4.8)$$

$$\frac{u(k) - u(k-1)}{T_s} = \frac{K_p(e(k) - e(k-1))}{T_s} + K_i \cdot e(k) \quad (4.9)$$

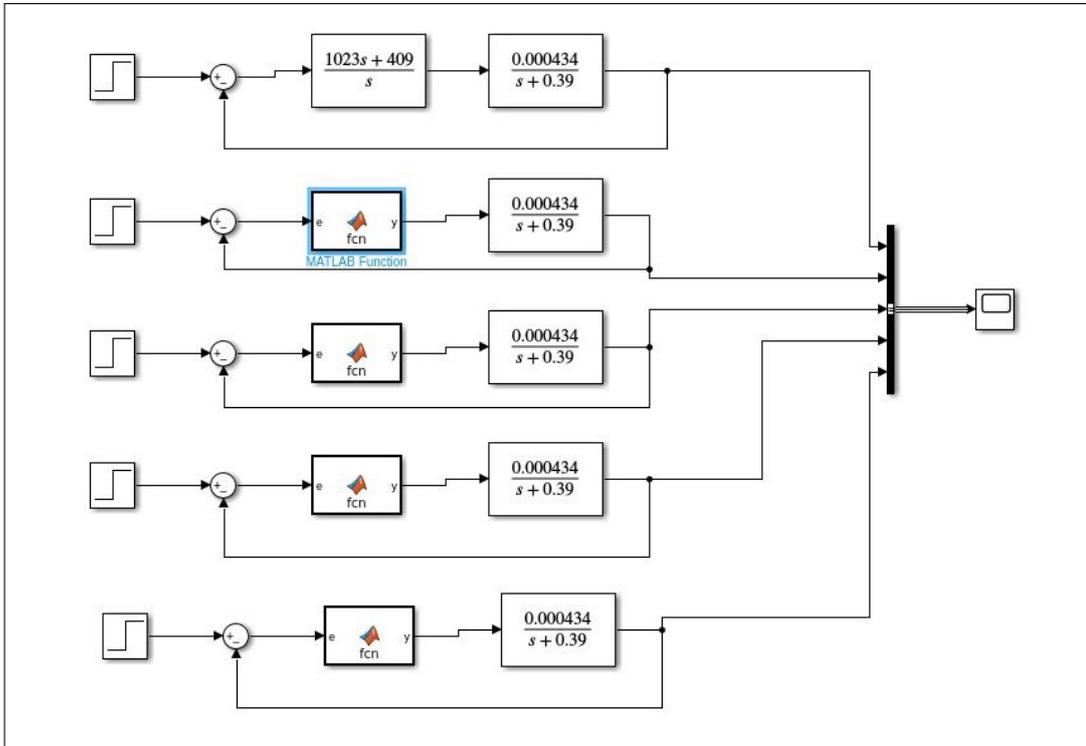
$$u(k) = u(k-1) + K_p \cdot (e(k) - e(k-1)) + K_i \cdot e(k) \cdot T_s \quad (4.10)$$

Foi feita uma comparação entre o comportamento do sistema com o modelo contínuo e com modelos aproximados. Um bloco de função do *Simulink* foi utilizado para implementar a equação (4.10) para diferentes períodos de amostragem T_s , conforme é descrito no código apresentado no apêndice A. Os parâmetros selecionados do controlador foram escolhidos de acordo com os parâmetros (K_p , K_i) obtidos na fase de projeto. A referência do tipo degrau unitário foi aplicada no instante $T = 1s$. A figura 18 apresenta o diagrama de blocos da simulação. O controlador contínuo foi empregado através da utilização de um bloco de função de transferência. A semelhança entre os resultados é apresentada graficamente através da figura 19. Observa-se que a aproximação torna-se mais precisa à medida em que T_s aproxima-se de 0,213 s, e as características transitórias são perdidas à medida em que esse valor cresce na direção da constante de tempo do sistema (2 s). Isso ocorre porque a derivada da função é o limite da aproximação sugerida em 4.10. Ressalta-se que a escolha do período de amostragem foi feita considerando-se o valor das características transitórias da resposta de $G(s)$. Para sistemas de primeira ordem, uma opção razoável é considerar um valor de 4 a 10 para a razão entre a constante de tempo e o período de amostragem selecionado (Astrom; Wittenmark, 1997). Uma vez que a constante de tempo é de aproximadamente 2 s, o período de amostragem encontra-se dentro do intervalo:

$$0,2s \leq T_s \leq 0,5s \quad (4.11)$$

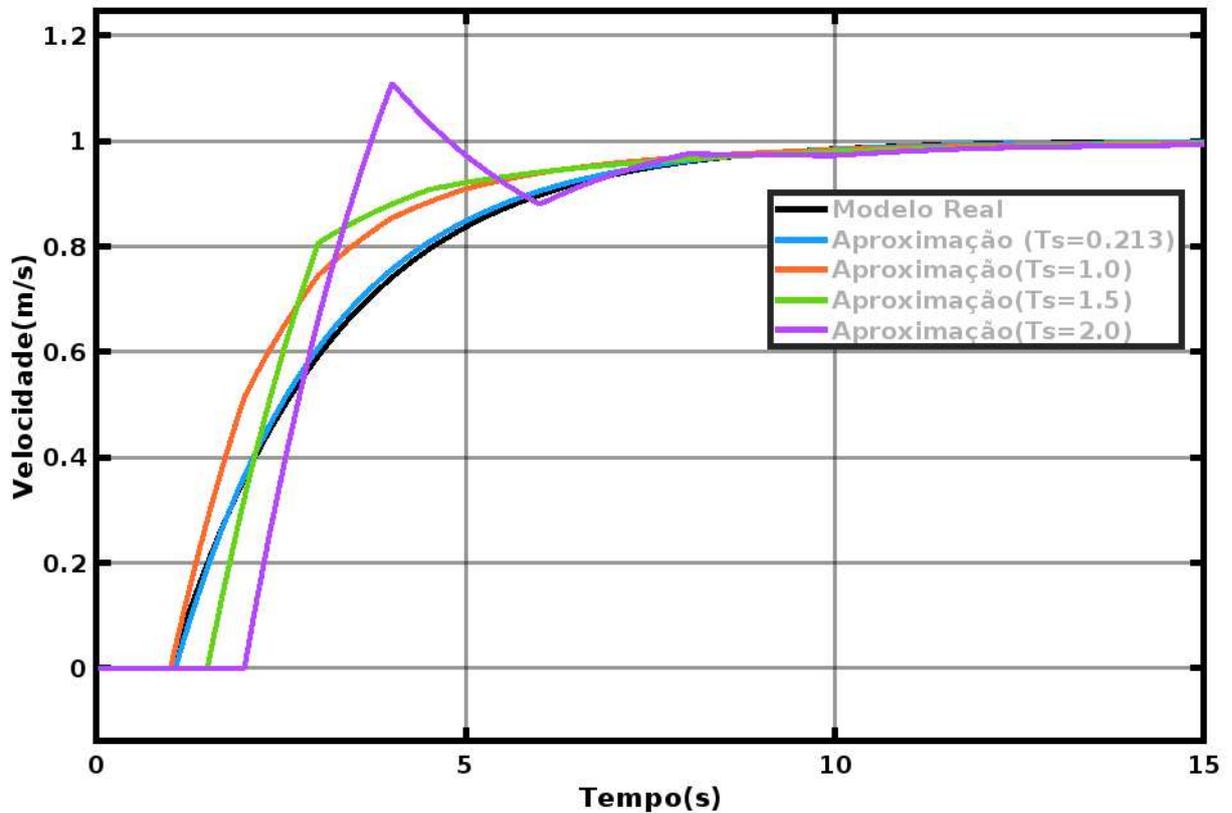
O limite inferior é um parâmetro importante em implementações de baixo custo, visto que a redução do período de amostragem pode aumentar os custos referentes aos dispositivos de aquisição de dados. Já o limite superior indica um valor a partir do qual parte das informações são perdidas no processamento dos dados. Nesse trabalho, o período de amostragem foi selecionado próximo ao limite inferior por proporcionar uma melhor aproximação do controlador contínuo, sendo que o ajuste fino em 0,213 s foi feito observando-se o tempo de execução no código final.

Figura 18 – Captura de tela da simulação comparativa entre modelos aproximados do controlador



Fonte: Próprio autor.

Figura 19 – Gráfico da resposta do sistema para alguns modelos aproximados



Fonte: Próprio autor.

5 INTERFACE GRÁFICA

5.1 Desenvolvimento em Python

A interface gráfica foi desenvolvida utilizando o editor VSCode® para a programação em Python. Foi feita uma combinação entre elementos da biblioteca "Python-control" com o módulo "Tkinter".

A biblioteca "control" implementa operações que possibilita a análise e o projeto de sistemas de controle. As principais classes e funções utilizadas da biblioteca foram:

- Representação de sistemas lineares através de funções de transferências, utilizando a classe "TransferFunction()";
- Criação de malhas de controle realimentadas usando a função "Feedback()";
- Simulação da resposta no tempo, utilizando a função "impulse_response()" para uma entrada do tipo impulso e "step_response()" para a entrada degrau;
- Análise da resposta em frequência através dos diagramas de Bode e Nyquist, usando as classes "Bode()" e "Nyquist()" respectivamente.

O design da interface foi criado a partir do módulo tkinter, que disponibiliza classes de objetos interativos como: botões, listas de seleção, caixas de texto e caixas de entrada. As propriedades desse elementos foram alteradas de acordo os aspectos visuais desejados e o posicionamento geométrico foi feito através de coordenadas cartesianas.

Para o controle da esteira foi implementado a equação 4.10 dentro de um função iterativa, que calcula o sinal de controle com um intervalo de amostragem de $0,213ms$. O sinal de erro é obtido a partir do procedimento de leitura de velocidade apresentado em 3.3.2. O código de programação da interface é apresentado no apêndice A.

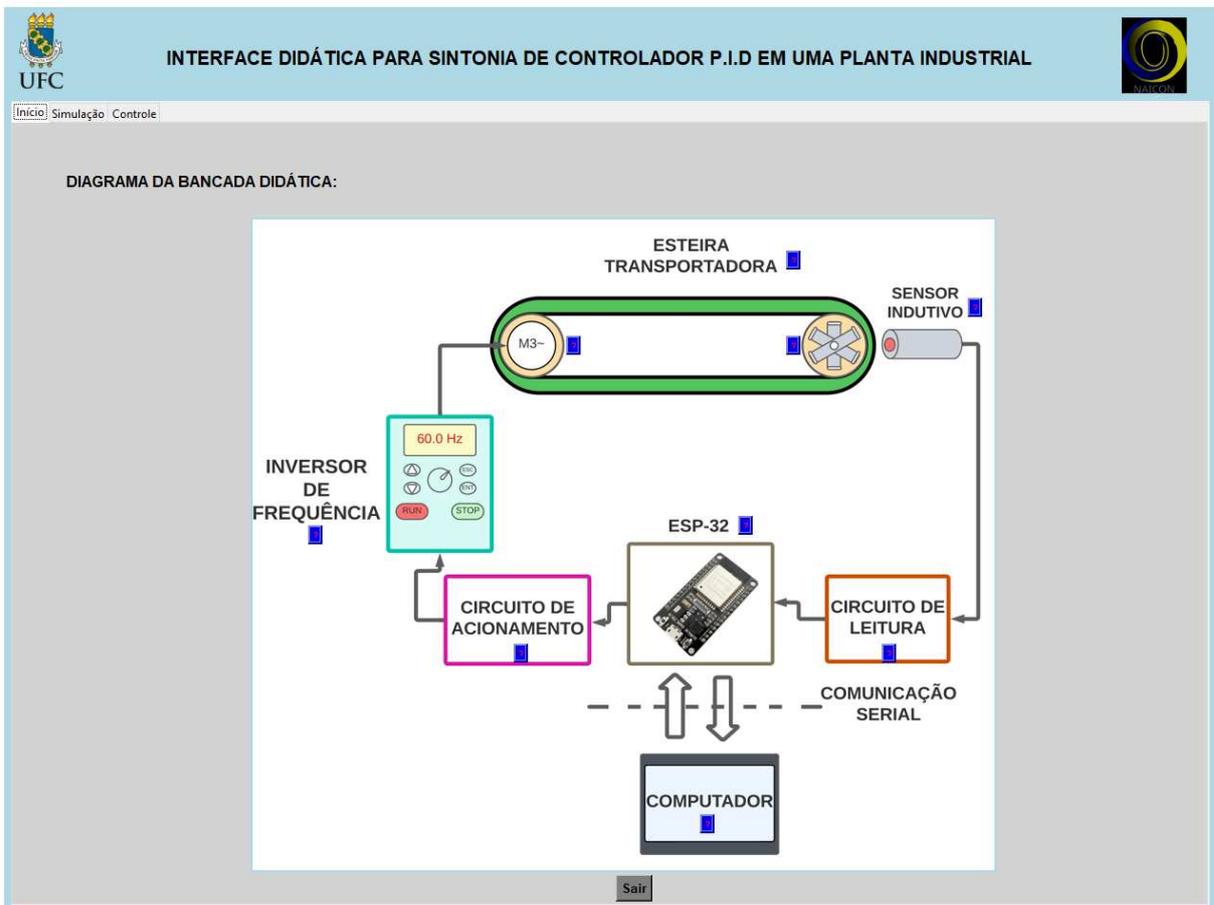
5.2 Layout e funcionalidades.

A interface foi desenvolvida para permitir que os usuários explorem ferramentas analíticas de projeto e análise de sistemas de controle. Com o modelo da esteira transportadora identificado na seção 4.1, a sintonia de um PI pode ser efetuada. Ao fim, o modelo do controlador pode ser implementado na planta real, permitindo o monitoramento da velocidade linear e do sinal de controle. Os alunos podem comparar os resultados teóricos com os práticos.

Foram criadas tres abas principais intituladas de "Início", "Simulação" e "Controle".

Na aba "Início" é apresentado um diagrama que representa todos os elementos da bancada didática e suas interconexões. Cada elemento é dotado de um botão informativo que, quando acionado, abre uma janela *pop-up* contendo informações técnicas e as funcionalidades de cada item. O objetivo dessa seção é familiarizar os usuários com os dispositivos presentes no sistema, apresentando elementos típicos de malhas de controle reais. Uma captura dessa aba é apresentada na figura fig 20.

Figura 20 – Captura de tela da interface gráfica : Início



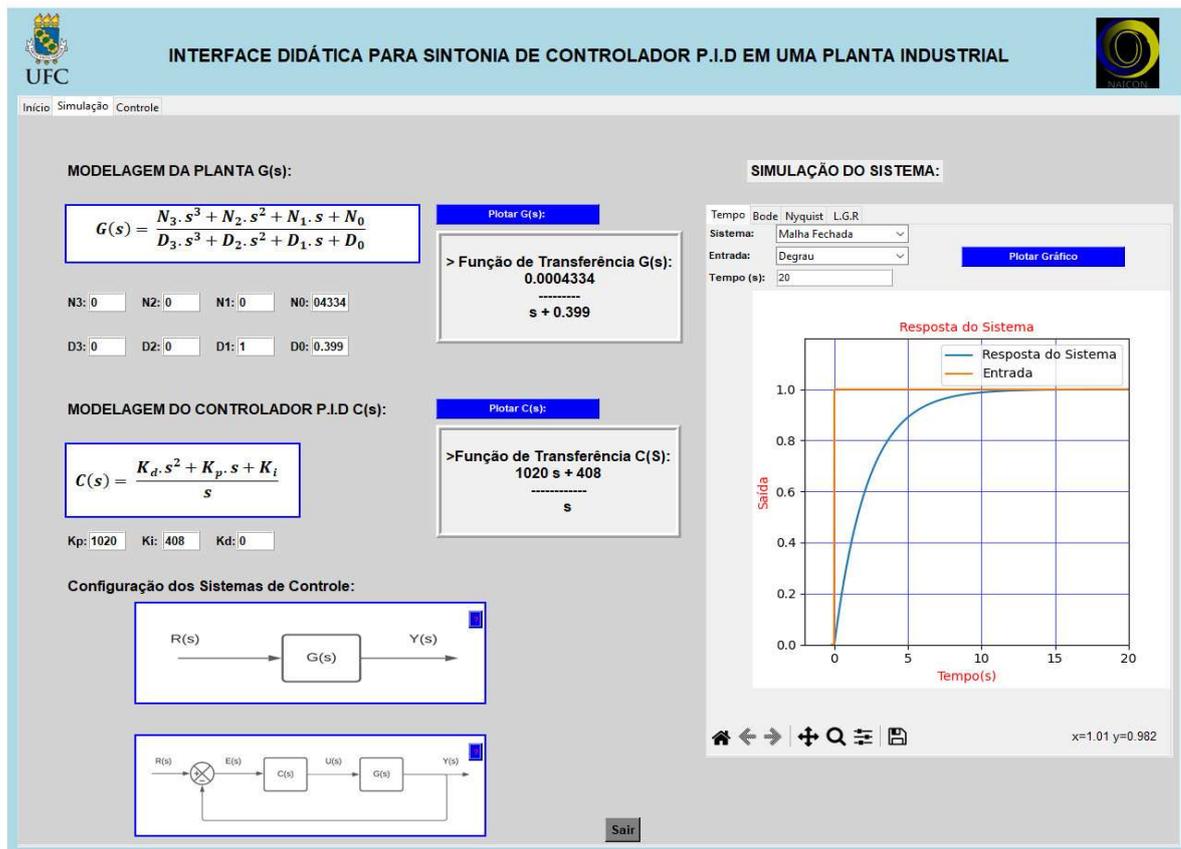
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Na aba "Simulação" foram disponibilizadas ferramentas para análise e projeto de sistemas de controle. No lado esquerdo, através do preenchimento de campos de entrada, o usuário pode repassar os coeficientes para definição de um modelo de função de transferência da planta $G(s)$ e do controlador $C(s)$. Dois diagramas de blocos são utilizados para elucidar as diferenças entre as configurações do sistema em malha aberta e fechada.

Uma vez criado os modelos, no lado direito uma série de ferramentas gráficas podem ser utilizadas para simulação:

- Respostas no tempo: resposta do sistema à entradas do tipo impulso, degrau, rampa e parábola. O usuário pode escolher se a simulação será feita com a planta $G(s)$ em malha aberta, ou com a inserção do controlador $C(s)$ em malha fechada. O tempo de simulação pode ser ajustado.
- Diagrama de Bode: comportamento do ganho e fase do sistema, malha aberta ou fechada, para uma variação de frequência.
- Diagrama de Nyquist: comportamento dos componentes reais e imaginários do sistema, mediante variação de frequência.
- Diagrama do Lugar Geométrico das Raízes: comportamento dos polos do sistema mediante a variação do ganho de malha K .

Figura 21 – Captura de tela da interface gráfica : Simulação



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

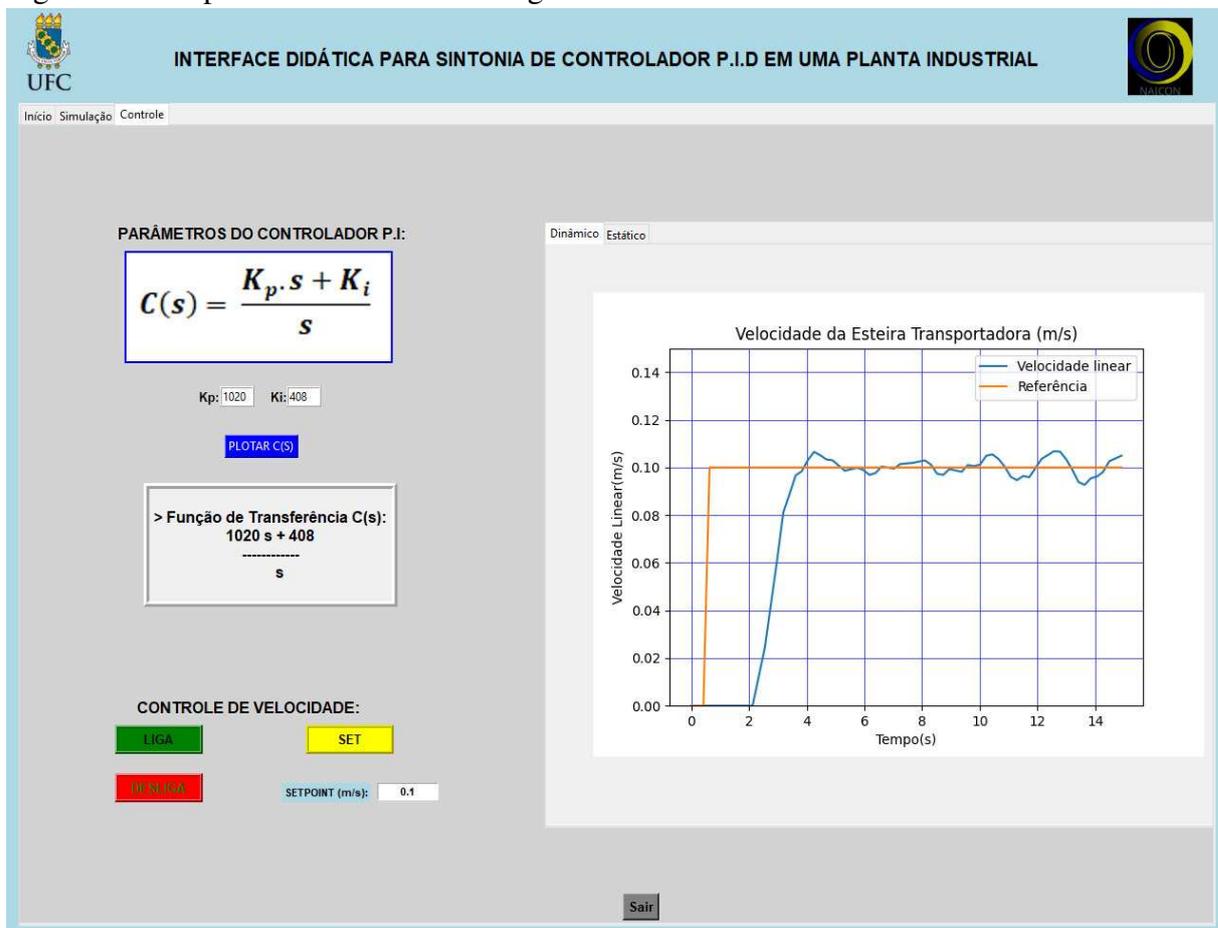
Partindo-se do modelo identificado da planta e um conjunto de especificações desejadas para resposta do sistema, essa aba da interface propicia o ajuste dos parâmetros do controlador (K_p , K_i e K_d) para obtenção dos resultados desejados. Todos os resultados obtidos

podem ser salvos em um arquivo "png" através de uma janela de ferramentas localizado abaixo do gráfico. A aba é apresentada na figura 21.

Na seção "Controle" os alunos podem implementar o controlador projetado na planta real. Os parâmetros K_p e K_i do controlador PI podem ser digitados nos campos de entrada. No canto inferior esquerdo um conjunto de elementos permitem o controle da esteira:

- Botão "Liga" = Inicia o controle da esteira transportadora, acionando o loop de cálculo definido pela equação à diferenças;
- Botão "Desliga" = Pausa o cálculo do controlador, resetando as variáveis do sistema, levando a esteira para o repouso;
- Botão "Set" = Seta uma referência de velocidade para a Esteira Transportadora, limitada em 0,10 m/s. Um campo de entrada é utilizado para que o usuário escolha a velocidade desejada.

Figura 22 – Captura de tela da interface gráfica : Controle



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os usuários podem optar por escolher acompanhar a velocidade em tempo real no modo "dinâmico", ou verificar os resultados do último ensaio no modo "estático".

5.3 Roteiro Prático

Uma idéia de roteiro prático será sugerido para indicar como a interface gráfica pode ser utilizada, sendo que variações podem ser feitas de acordo com os objetivos didáticos. O roteiro é dividido nos seguintes passos:

1. A partir do modelo de primeira ordem da planta $G(s)$ encontrado na seção 4.1, os alunos devem indentificar a constante de tempo e o ganho. Essas informações são utilizadas para inferir sobre a resposta do sistema em malha aberta, podendo ser verificada simulando-se o comportamento do modelo para uma entrada degrau;
2. Na etapa de sintonia, os alunos são levados a encontrar um modelo de controlador PI para o sistema, através da definição dos parâmetros K_p e K_i . As especificações requeridas são um erro estacionário nulo e uma resposta transitória com um tempo de assentamento de 10 s. O diagrama do lugar das raízes é usado para a técnica de alocação de polos e os resultados podem ser verificados em simulação;
3. A análise de robustez do sistema é feito a partir da simulação em frequência do sistema. O diagrama de Nyquist fornece uma verificação gráfica da estabilidade do sistema e o diagrama de bode para informações sobre a margem de fase e ganho do sistema;
4. Na etapa final, os parâmetros encontrados na fase de projeto podem ser implementados na malha de controle de velocidade da esteira industrial. Os resultados práticos podem ser salvos e comparados com a resposta obtida em simulação.

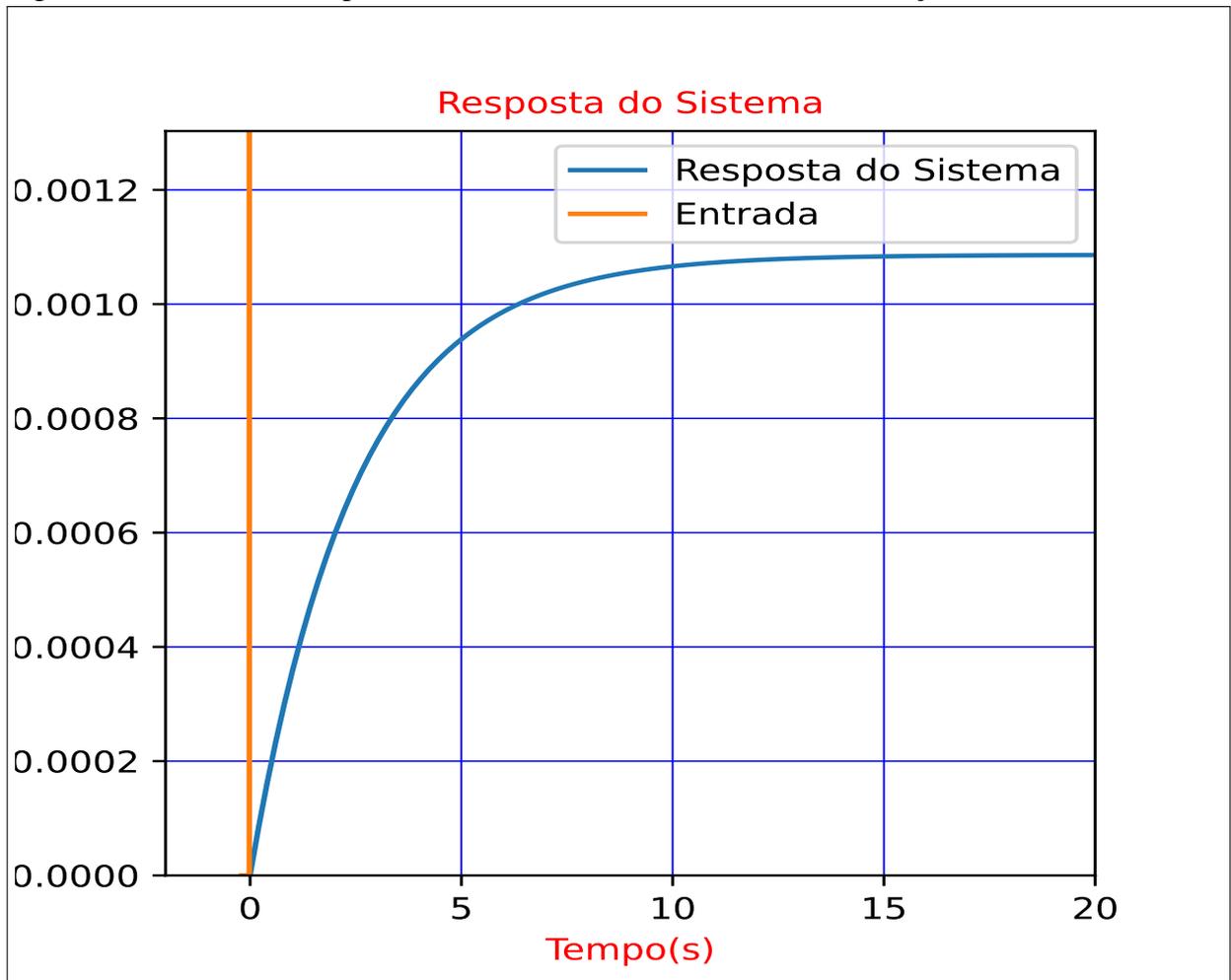
6 RESULTADOS

A interface gráfica foi utilizada para obtenção de resultados teóricos e práticos, seguindo as orientações do roteiro apresentado na seção 5.3. Utilizando a aba "simulação", o modelo da planta e do controlador foram configurados em malha fechada, verificando-se a resposta do sistema para uma entrada do tipo degrau. A mesma análise foi efetuada através da implementação real do controlador no acionamento da esteira, através da aba "controle".

6.1 Resultados Teóricos.

Inicialmente, foi identificado o comportamento da planta $G(s)$ para uma entrada do tipo degrau. O resultado obtido é apresentado através da figura 23. O propósito dessa etapa é permitir que os estudantes correlacionem o modelo de primeira ordem da planta com as características transitórias da resposta.

Figura 23 – Gráfico da resposta do sistema no ensaio realizado - simulação.

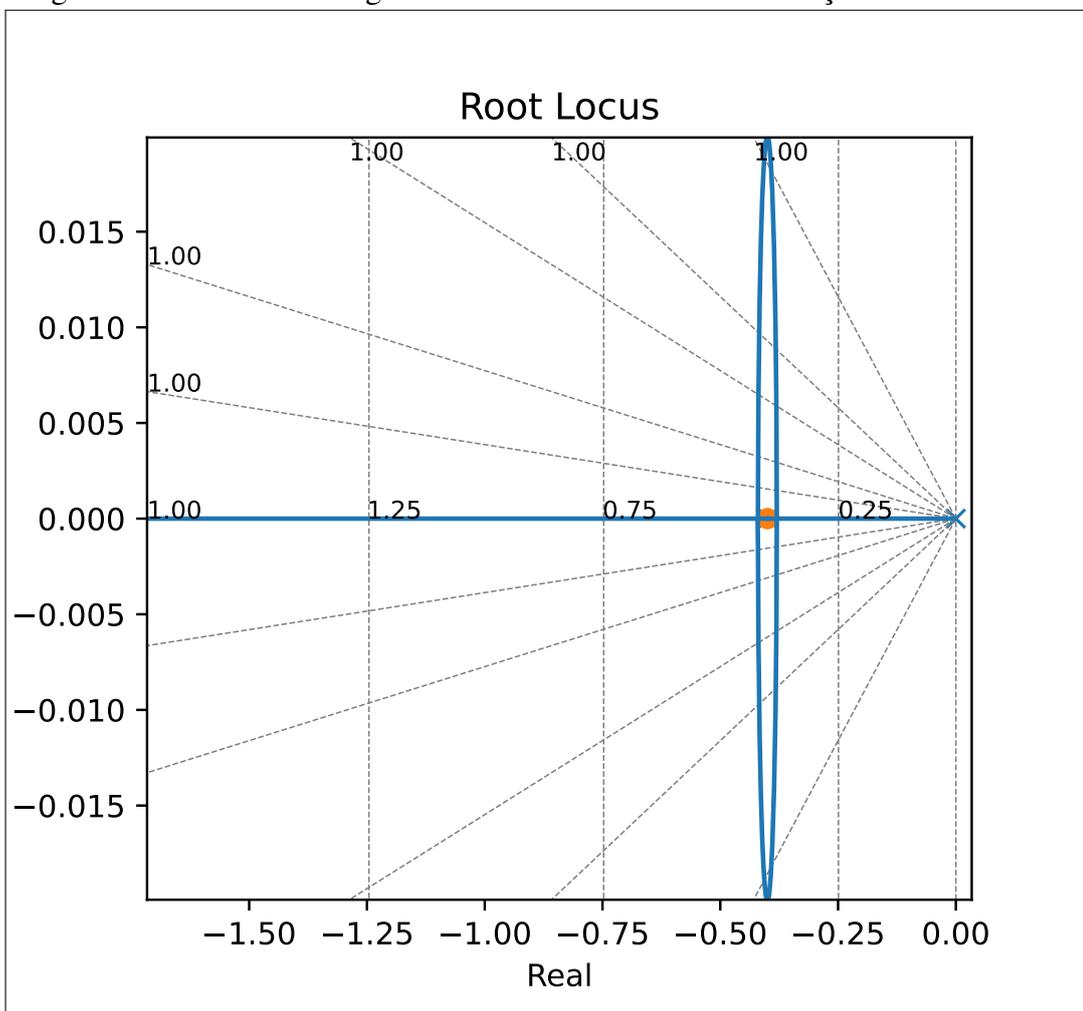


Fonte: elaborada pelo autor.

O modelo de primeira ordem apresentado na equação 4.1 indica um ganho equivalente a $1,09 \times 10^{-3}$ e uma constante de tempo de 2,51 s. Esses valores podem ser comprovados no gráfico, com o auxílio da barra de ferramentas para indicar as coordenadas de pontos específicos.

A aba "LGR" fornece o diagrama do lugar geométrico das raízes, através do qual é possível efetuar o projeto do controlador PI. A estratégia utilizada foi a mesma da seção 4.2, no qual o zero do controlador foi posicionado à esquerda do polo da planta. O esboço do diagrama é apresentado na figura 24.

Figura 24 – Gráfico do Lugar Geométrico das Raízes - simulação

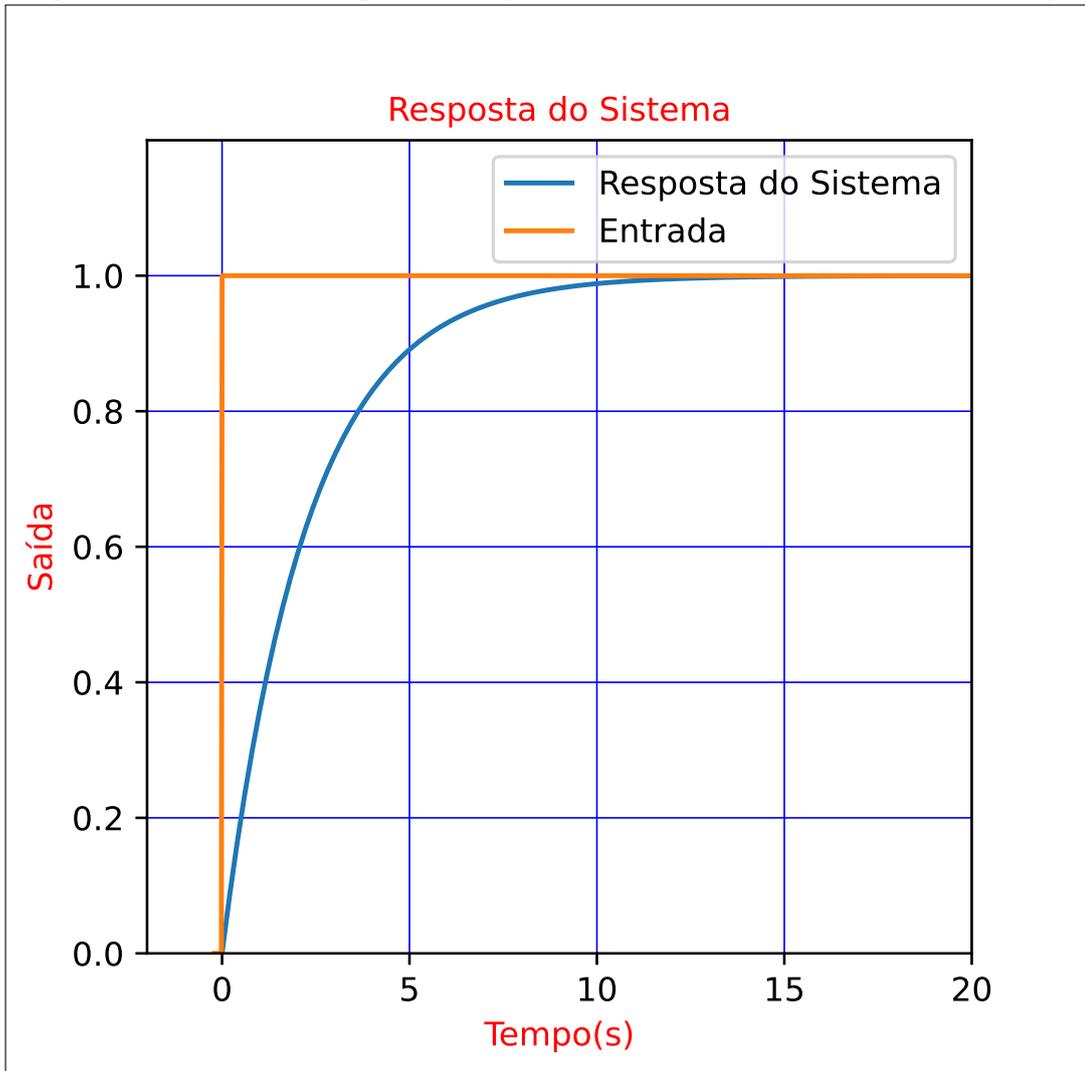


Fonte: elaborada pelo autor.

O sistema com o controlador projetado na seção 4.2 foi simulado, sendo os resultados apresentados na figura 25. Observa-se que o sistema atende o critério de erro nulo em regime permanente, mas as características transitórias são semelhantes ao do sistema em malha aberta. Isso pode ser atribuído à proximidade existente entre o zero do controlador e o polo do modelo

identificado.

Figura 25 – Gráfico da resposta ao degrau do sistema em malha fechada - simulação

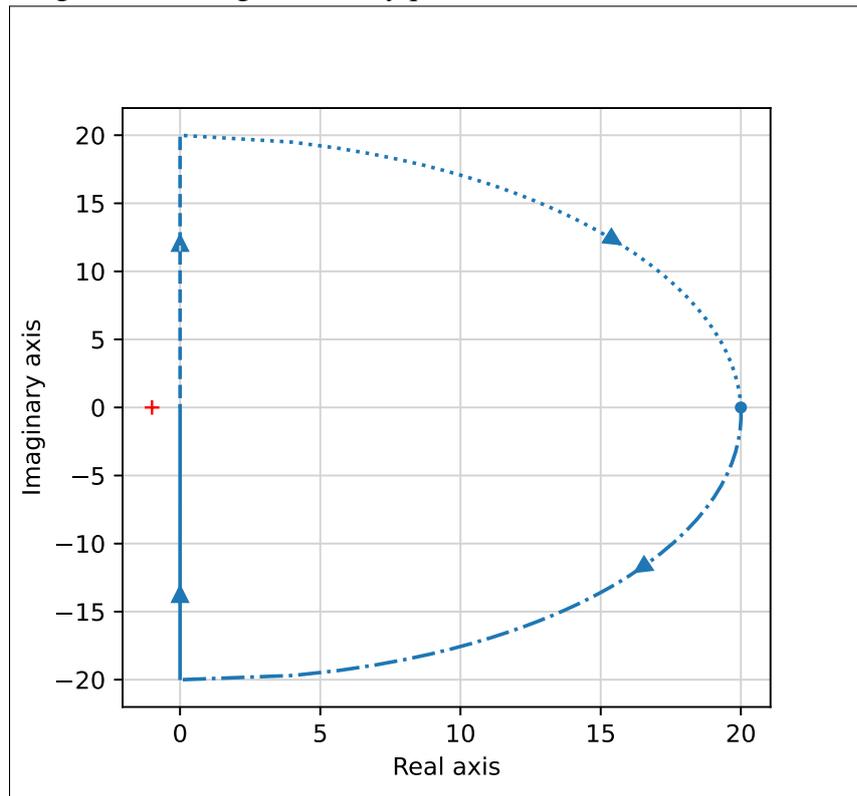


Fonte: elaborada pelo autor.

O comportamento em frequência do sistema $C(s).G(s)$ foi analisado para obter informações sobre a estabilidade. Através do diagrama de Nyquist, apresentado na figura 26, observa-se que o traçado não envolve o ponto $(-1, 0)$ sobre o eixo real. Considerando o critério de Nyquist (Dorf; Bishop, 2001) e a inexistência de polos positivos em malha aberta, constata-se a estabilidade do sistema em malha fechada.

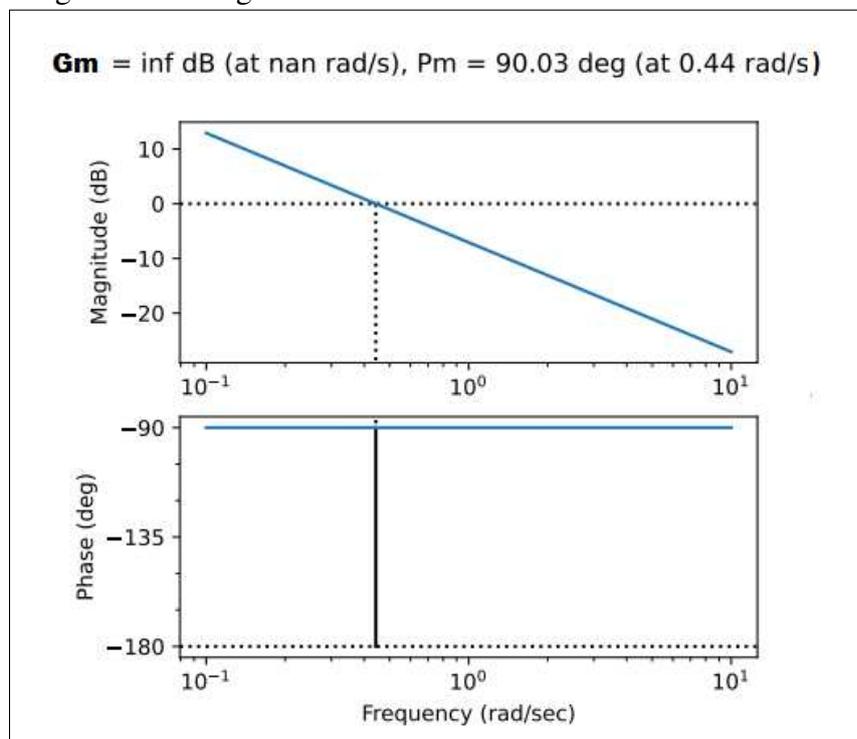
Informações complementares são apresentadas no diagrama de Bode da figura 27. O aumento do ganho do sistema desloca o traçado de *Nyquist* na direção do semiplano positivo e mantendo a estabilidade. Entretanto, um deslocamento angular de 90° é suficiente para que o sistema atinja o limite de estabilidade.

Figura 26 – Diagrama de Nyquist.



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 27 – Diagrama de Bode do sistema em malha aberta.

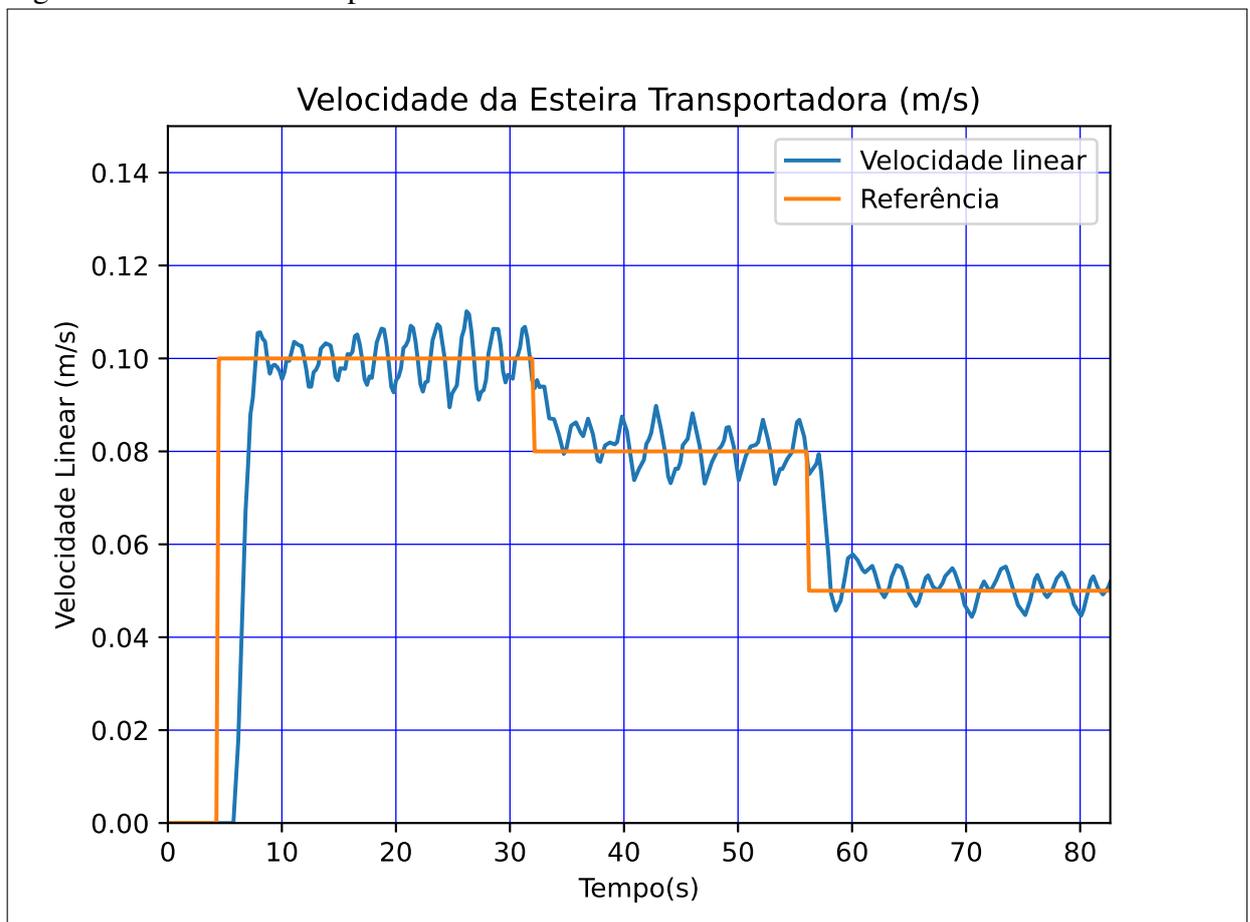


Fonte: elaborada pelo autor.

6.2 Resultados Práticos.

Utilizando-se do modo "controle dinâmico", foi realizado um ensaio para a verificação do comportamento da malha de velocidade da esteira mediante aplicação do controlador PI projetado. O ensaio foi realizado da seguinte maneira: no instante de tempo $t = 4 \text{ s}$ foi aplicada uma referência do tipo degrau igual a $0,10 \text{ m/s}$; no instante de tempo $t = 32 \text{ s}$ alterou-se o valor da referência para $0,08 \text{ m/s}$; no instante de tempo $t = 56 \text{ s}$, o valor de referência foi modificado para $0,05 \text{ m/s}$. O comportamento da velocidade linear no ensaio é mostrado na figura 28.

Figura 28 – Gráfico da resposta do sistema no ensaio realizado - velocidade.



Fonte: elaborada pelo autor.

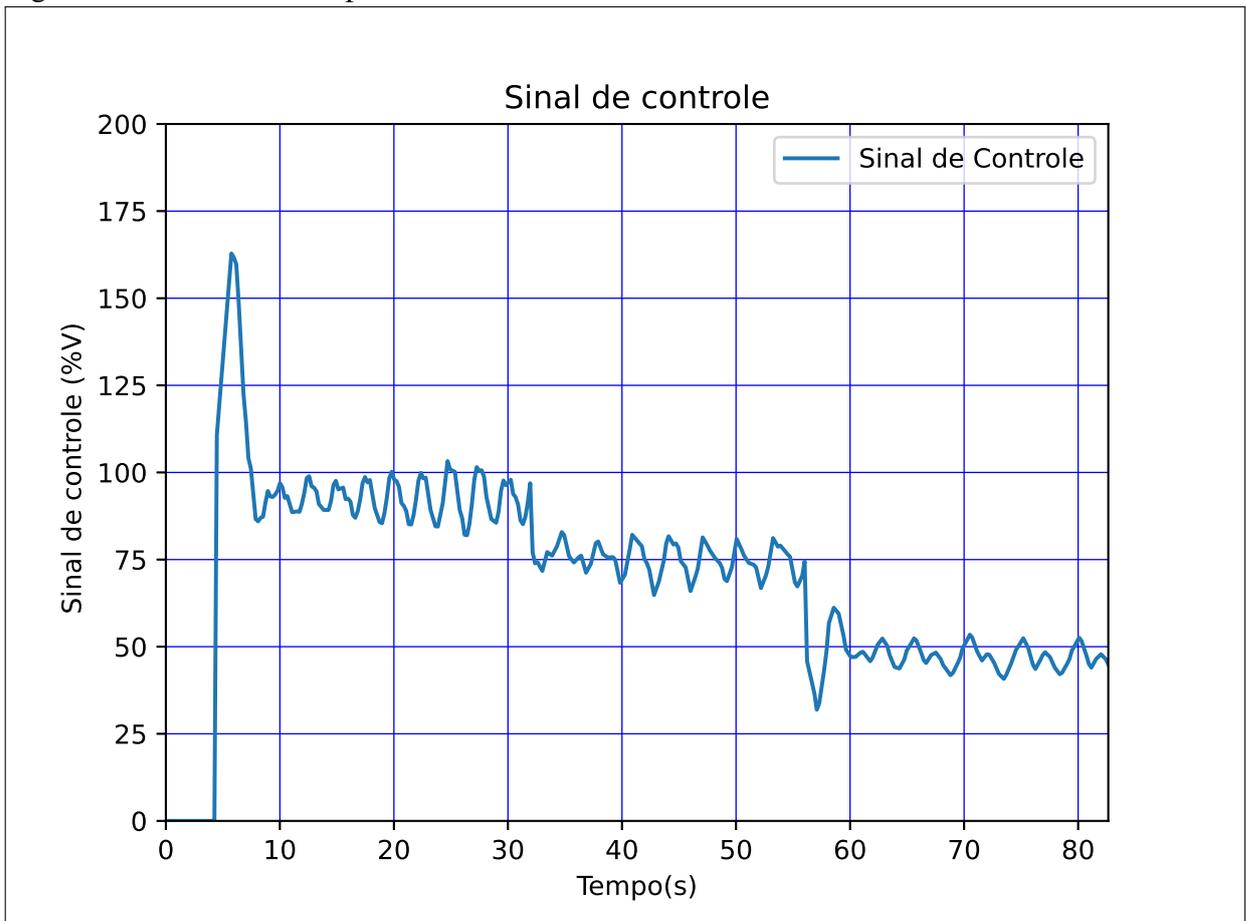
Observa-se na aplicação do primeiro setpoint que o sistema apresenta um pequeno atraso na resposta, saindo do repouso cerca de 2 s após a aplicação do degrau. Isso ocorre devido as características de processo de leitura, que aguarda cinco amostras consecutivas para o cálculo da média móvel e que necessita de duas bordas de detecção consecutivas para a primeira amostra.

As características transitórias do sistema foram identificadas observando o comportamento nos outros instantes de aplicação do degrau. O tempo de assentamento da velocidade

linear, para a entrada degrau aplicada nos instantes $t= 32 s$ e $t= 56 s$, foi cerca de $10 s$. Esse valor é compatível tanto com os valores obtidos na etapa de simulação, como nos valores previstos na etapa de projeto.

Outro parâmetro a ser considerado é o comportamento do sinal de controle, apresentado na figura 29. Verifica-se que na aplicação da primeira referência degrau, o sinal de controle ultrapassa o valor máximo de 100%, causando uma saturação inicial.

Figura 29 – Gráfico da resposta do sistema no ensaio realizado - sinal de controle.



Fonte: elaborada pelo autor.

Ademais, observou-se um comportamento bastante oscilatório do sinal aferido de velocidade, o que dificulta a identificação das características transitórias do sistema. O tempo de assentamento aqui discutido foi encontrado à medida em que a resposta apresentou um padrão de oscilação em torno da referência selecionada. Esse caráter oscilatório deve-se ao mecanismo de aferição do sistema, nos quais falhas na superfície do artefato metálico podem conduzir à uma falsa identificação do metal. Conforme discutido, esse problema foi atenuado em código com a utilização de um filtro de média móvel e a retirada de *outliers* na leitura.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Esse trabalho apresentou o desenvolvimento de uma interface didática para projeto de controlador PI em uma planta industrial. O uso de simulações e a integração com o sistema de acionamento de uma esteira transportadora, resulta em uma ferramenta que apoia os estudante desde a fase de projeto até a fase de implementação. Os resultados obtidos demonstram atendimento satisfatório aos parâmetros de desempenho especificados, evidenciado pelo tempo de 10 s para o assentamento da velocidade linear. Isso possibilita que os estudantes estabeleçam conexão entre a teoria e prática, levando em consideração o efeito dos ruídos nas incertezas de medição.

A equação de controle implementada, obtida a partir da aproximação discreta dos termos integrais e derivativos do PI contínuo, mostrou-se uma aproximação válida para $T_s = 0.213$ s. Conforme havia sido apresentado na figura 19, os resultados de controle tornam-se mais próximos à medida em que o período de amostragem aproxima-se de zero. Isso possibilita que a fase de projeto possa ser executado utilizando o domínio de tempo contínuo, conforme o assunto é tratado nas ementas de disciplinas introdutórias.

Em relação aos objetivos inicialmente propostos para a interface didática, os seguintes quesitos foram alcançados: simulações, que permitiram analisar a resposta do sistema no domínio do tempo e da frequência; elementos pedagógicos, permitindo a correlação entre modelos de função de transferência e respostas gráficas, e informando sobre as funcionalidades de cada um dos elementos físicos presentes no sistema de controle; aplicação real, através do controle e monitoramento da velocidade linear da esteira.

A ferramenta didática destaca-se por permitir que os estudantes desenvolvam a competência necessária para sintonizar controladores PI em uma esteira industrial. Alguns aprimoramentos podem ser realizados no que tange ao aspecto pedagógico, realizando a inclusão de elementos que agregam o conteúdo teórico na interface e permitem que os estudantes acessem informações necessárias para o desenvolvimento do projeto. Novas abas podem ser criadas reunindo referencial teórico que expliquem, por exemplo, a técnica de alocação dos pólos via lugar geométrico das raízes. Dessa forma, estabelece-se uma melhor conexão com o conjunto de conhecimentos que precisam ser mobilizados para a aplicação prática.

O roteiro prático foi proposto para apresentar um panorama das funcionalidades da interface, sendo possível a adoção de outras metodologias de acordo com o docente. A aba "simulação", por exemplo, pode ser utilizada de forma independente para abordar o comportamento dos sistemas de primeira e segunda ordem, com análises no domínio do tempo e da frequência.

A acessibilidade da linguagem python possibilita a execução do programa em ambientes além do acadêmico, sendo uma ferramenta que serve para a resolução de exercícios orientados ou para experimentação dos conceitos pelos estudantes.

A linguagem de programação python mostrou-se uma ferramenta versátil para o desenvolvimento de aplicações didáticas na área de controle. Outras funcionalidades da biblioteca "python-control" podem ser exploradas para abranger assuntos abordados em disciplinas mais avançadas. A aba de "simulação" poderia ser reformulada para análises com sistemas discretos, substituindo a transformada de Laplace pela transformada Z. Em termos de código, isso é feito através da definição de um período de amostragem como argumento da função de construção do sistema. Essa adaptação permitiria a adoção da bancada na disciplina de controle discreto.

Alguns elementos da bancada podem ser aperfeiçoados com o intuito de melhorar os resultados de controle. A aferição de velocidade apresentou ruídos e valores discrepantes que foram tratados em código com a implementação de filtros digitais. A substituição do artefato metálico de medição por outro de superfície mais regular, ou a troca do conjunto de medição por um dispositivo encoder compatível com a placa ESP-32, são algumas soluções tangíveis para melhorar o sinal de leitura. Além disso, a troca das placas *protoboards* por placas de circuitos impressos, pode reduzir eventuais problemas de descontinuidades nos circuitos de condicionamento e acionamento.

Por fim, ressalta-se que o presente trabalho teve foco apenas na síntese da interface didática. Análises mais precisas sobre a eficiência da ferramenta devem ser feitas após a aplicação da mesma nas turmas de controle. Questionários, por exemplo, podem ser aplicados para indicar a satisfação de alunos e professores. Os resultados obtidos servirão como base para aprimoramentos futuros.

REFERÊNCIAS

- ABECOM. **Tudo sobre correias transportadoras**. Disponível em: <https://rolamentos.abecom.com.br/correiastransportadoras>. Acesso em: 20 out. 2023.
- AGUIRRE, L. A. **INTRODUÇÃO À IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS**: Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2004.
- ALDRICH, C. **LEARNING BY DOING**: A comprehensive guide to simulations, computer games, and pedagogy in e-learning and other educational experiences. Hoboken, NJ: Pfeiffer, 2005.
- ALMEIDA, G. O.; FILHO, J. T.; CAMPOS, F. A. A.; CORREIA, W. B.; COSTA, E. M. Interface didática para sintonia de controlador p.i.d em planta industrial. ABENGE, 2019.
- ANABUKI, E. T. Aprendizagem baseada em problemas e aprendizagem colaborativa no ensino de engenharia de controle e automação. **Educitec - Revista de Estudos e Pesquisas sobre Ensino Tecnológico**, v. 5, n. 10, mar. 2019. Disponível em: <https://sistemascmc.ifam.edu.br/educitec/index.php/educitec/article/view/469>.
- ANTSAKLIS, P.; BAŞAR, T.; DECARLO, R.; MCCLAMROCH, N.; SPONG, M.; YURKOVICH, S. Report on the nsf/css workshop on new directions in control engineering education. **Control Systems, IEEE**, v. 19, p. 53 – 58, 11 1999.
- ARDUINO. **Arduino IDE**. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/software>.
- ASTROM, K. J.; WITTENMARK, B. **COMPUTER-CONTROLLED SYSTEMS**: Theory and design. 3. ed. [S. l.]: PRENTICE HALL, 1997.
- BAZZO, W. A.; PEREIRA, L. T. d. V. **INTRODUÇÃO À ENGENHARIA**: Conceitos, ferramentas e comportamentos. Florianópolis: Editora da UFSC, 2006.
- BEBIC, M. Z.; RISTIC, L. B. Speed controlled belt conveyors: Drives and mechanical considerations. **Advances in Electrical and Computer Engineering**, v. 18, n. 1, p. 51–60, 2018.
- BENCOMO, S. D. The role of interactivity in control learning. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 36, n. 10, p. 1–12, 2003. ISSN 1474-6670. 6th IFAC Symposium on Advances in Control Education 2003, Oulu, Finland, 16-18 June 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017336467>.
- BRASIL. Resolução nº 2, de 24 de abril de 2019. institui as diretrizes curriculares nacionais do curso de graduação em engenharia. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2019. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/component/content/article?id=12991>. Acesso em: 2024-02-01.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Modernos**. Rio de Janeiro, RJ: LTC EDITORA, 2001.
- DORMIDO, S.; ESQUEMBRE, F.; PASTOR, R. Interactive learning of control concepts using easy java simulations. In: . [S. n.], 2005. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16496596>.

FRANCO, I.; SANTOS, C. D.; LEONARDI, F.; AGUIAR, R.; MENEZES, M. Desenvolvimento de um sistema supervisorio utilizando matlab/simulink® para uma planta didática de controle de nível via arduíno. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 7, n. 3, p. 12676–01, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/12676>.

FULLER, S.; GREINER, B.; MOORE, J.; MURRAY, R.; PAASSEN, R. van; YORKE, R. The python control systems library (python-control). In: **2021 60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)**. [S. l.: s. n.], 2021. p. 4875–4881.

GARCIA, C. **Controle de processos industriais: estratégias convencionais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2018.

GUPTA, A.; ARORA, S.; WESTCOTT, J. **INDUSTRIAL AUTOMATION AND ROBOTICS**. Dulles, VA: MERCURY LEARNING AND INFORMATION LLC, 2017.

GUZMAN, J. L.; BERENGUEL, M.; DORMIDO, S.; COSTA-CASTELLÓ, R. Using interactive tools to connect theory and practice. **IFAC-PapersOnLine**, v. 56, n. 2, p. 9606–9611, 2023. ISSN 2405-8963. 22nd IFAC World Congress. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240589632300616X>. Acesso em: 10 jan. 2024.

HE, D.; PANG, Y.; LODEWIJKS, G.; LIU, X. Healthy speed control of belt conveyors on conveying bulk materials. **Powder Technology**, v. 327, p. 408–419, 2018. ISSN 0032-5910.

JI, J.; MIAO, C.; LI, X. Research on the energy-saving control strategy of a belt conveyor with variable belt speed based on the material flow rate. **PLOS ONE**, Public Library of Science (PLoS), v. 15, n. 1, 2020.

JONASSEN, D.; CARR, C.; YUEH, H.-P. Computers as mindtools for engaging learners in critical thinking. **Techtrends**, v. 43, p. 24–32, 03 1998.

JÚNIOR, J. R. d. O. **Sistema didático de sintonia automática e auto-ajuste de controlador PID em controle de velocidade e de posição de motor CC**. 101 f. Monografia (Monografia) – Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

KHEIR, N.; ÅSTRÖM, K.; AUSLANDER, D.; CHEOK, K.; FRANKLIN, G.; MASTEN, M.; RABINS, M. Control systems engineering education. **Automatica**, v. 32, n. 2, p. 147–166, 1996. ISSN 0005-1098. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0005109896855464>.

MALCOCI, I.; CIOBANU, O.; CIOBANU, R. Coding in python for mathematics, science and engineering. **ACTA TECHNICA NAPOCENSIS - Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and ENGINEERING**, v. 65, n. 4S, 2023. ISSN 2393–2988. Disponível em: <https://atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/2050>. Acesso em: 28 jan. 2024.

MIHALI, F.; TRUNTI, M.; HREN, A. Hardware-in-the-loop simulations: A historical overview of engineering challenges. **Electronics**, 2022. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:251483662>.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2011.

PEREIRA, J. L. d. C. **Controle de velocidade de uma esteira industrial**. 62 f. Monografia (Monografia) – Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

QUESADA, R. C. **Controle e automação de processos industriais**. Londrina — PR: Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2017.

RENTZOS, L.; MAVRIKIOS, D.; CHRYSOLOURIS, G. A two-way knowledge interaction in manufacturing education: The teaching factory. **Procedia CIRP**, v. 32, p. 31–35, 2015. ISSN 2212-8271. 5th Conference on Learning Factories.

ROSAS, E. E. V.; FERNANDÉZ, C. G. Pedagogical framework to develop interactive virtual tools for the teaching and learning of dynamic systems in control engineering. **IFAC-PapersOnline**, v. 55, n. 17, p. 218–223, 2022. ISSN 2405-8963. 13th IFAC Symposium on Advances in Control Education ACE 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896322015191>. Acesso em: 28 out. 2023.

SCHNEIDER. **Manual de operação Altivar 11**: Inversores de frequência para motores assíncronos. [S. l.]. Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/faqs/FA279259/>. Acesso em: 28 oct. 2023.

SÁNCHEZ, J.; DORMIDO, S.; ESQUEMBRE, F. The learning of control concepts using interactive tools. **Computer Applications in Engineering Education**, v. 13, n. 1, p. 84–98, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/227624964_The_learning_of_control_concepts_using_interactive_tools. Acesso em: 28 nov. 2023.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. **Sensores Industriais**: Fundamentos e aplicações. São Paulo: Érica Ltda, 2005.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA. **Programa da disciplina: Controle de Sistemas Dinâmicos**. Fortaleza, 2005. Disponível em: <https://cee.ufc.br/wp-content/uploads/2022/05/th0178-controle-de-sistemas-dinamicos-ok.pdf>. Acesso em: 20 dez.2023.

WITTENMARK, B.; HAGLUND, H.; JOHANSSON, M. Dynamic pictures and interactive learning. **Control Systems, IEEE**, v. 18, p. 26 – 32, 07 1998.

ZENGER, K. Challenges and new directions in control engineering education. In: . [S. l.: s. n.], 2018. (Proceedings of The 9th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation (EUROSIM 2016), The 57th SIMS Conference on Simulation and Modelling (SIMS 2016)), p. 819–823.

APÊNDICE A – CÓDIGOS-FONTE

Código-fonte 1 – Código de programação da ESP32

```
1
2 // Definicao de variaveis
3
4 String texto;
5 char caractere;
6
7 int n= 0;
8 int ledAzul = 2;
9 int ledPWM = 14;
10 int entrada = 4;
11 unsigned long k = 1000;
12
13 int pulso = 0;
14 unsigned long delta = 0;
15 unsigned long tempoant = 0;
16 float Rpm = 0;
17 float A = 0;
18 int PWM_int;
19 int a;
20
21
22 //funcao interrupcao.
23
24 void IRAM_ATTR funcao_ISR()
25 {
26     if(n==0)
27     {
28         tempoant = millis();
29         n = 1;
```

```
30 }
31 else if (n==1)
32 {
33     delta = (millis()-tempoant);
34     tempoant = millis();
35 }
36 }
37
38
39 //Configuracao do sistema
40
41 void setup() {
42     Serial.begin(9600);
43     // Inicia a comunicacao serial da ESP-32
44
45     attachInterrupt(entrada, funcao_ISR, RISING);
46     // Define o "gatilho" da interrupcao como "entrada"
47
48     ledcAttachPin(ledPWM,0);
49     // Associa o canal 0 ao GPIO "ledPWM"
50
51     ledcSetup(0,490,10);
52     // Cria um PWM no canal 0
53     //frequencia de 490 Hz
54     //resolucao duty cycle de 10 bits
55
56
57     ledcWrite(0,1023);
58     // Define o duty cycle inicial do PWM
59 }
60
61
```

```
62 // Loop do sistema
63
64 void loop() {
65 // Realiza a comunicacao serial, enviando o tempo entre
66 //bordas consecuiuas ou recebendo e alterando o valor
67 // do duty cycle
68
69 if(Serial.available() > 0)
70 {
71     caractere = Serial.read();
72     if (caractere == 'r')
73     {
74         Serial.println(delta);
75     }
76
77     else if (caractere == 'x')
78     {
79         delta = 0;
80         n = 0;
81         ledcWrite(0,1023);
82     }
83
84     else if (caractere == 'w')
85     {
86         PWM_int = texto.toInt();
87         ledcWrite(0,PWM_int);
88         texto = "";
89     }
90     else texto.concat(caractere);
91 }
92
93 }
```

Código-fonte 2 – Código de programação da identificação do sistema

```
1
2 import numpy as np
3 from scipy import *
4 import time
5 import serial
6 import scipy.io
7 from datetime import datetime
8
9
10 # Conjunto de dados de entrada (Validacao)
11 P = [30 60 90]
12
13 n = 0
14 d = 2500
15 C = [None]*300
16 V = [None]*300
17 pi = 3.14159
18
19 #Cria o vetor de entradas.
20
21 for i in range(3):
22     for l in range (100):
23
24         C[l+n*100] = P[i]
25         n = n + 1
26
27 # inicia a comunicacao serial
28 ser = serial.Serial('COM3', 9600)
29 ler = 'r'
30
31 # Fator de conversao do eixo da esteira
```

```
32 r = 0.0475
33
34 t_0 = 0
35 t_1 = 0
36 t_2 = 0
37 t_3 = 0
38 t_4 = 0
39 n= 0
40
41
42 for i in range(300):
43     C2 = C[i]*(1023/100)
44     C2 = 1023 - C2
45     C2 = int(C2)
46     Cstring = str(C2)
47     Cstring = Cstring + 'w'
48
49 #Realiza a leitura do tempo T entre bordas de deteccao.
50
51     try:
52
53         ser.write(Cstring.encode())
54         ser.write(ler.encode())
55         tempo = ser.readline()
56         tempo = float(tempo)
57
58     except:
59         pass
60
61     t_4 = t_3
62     t_3 = t_2
63     t_2 = t_1
```

```
64     t_1 = t_0
65
66     #Aguarda a deteccao
67
68     if (tempo == 0):
69         t_0 = t_1
70     else:
71         t_0 = (((pi)/3)/(tempo))*47.5
72
73
74     #Define um outlier para a leitura do sistema.
75
76     if (t_0 >= 0.200):
77         t_0 = t_1
78
79
80     #Calcula a media movel de cinco amostras.
81
82     if (n >= 4):
83         V[i] = (t_4 + t_3 + t_2 + t_1 + t_0)/5
84     else:
85         V[i] = 0
86
87     n= n + 1
88     now = datetime.now()
89     print(now)
90     time.sleep(0.2)
91
92 print(C)
93 print(V)
94 print("Identificacao PRBS terminou")
```

Código-fonte 3 – Código de programação do bloco de função Matlab

```
1
2 function y=fcn(e)
3 %definicao variaveis
4
5 persisten e_ant
6 if isempty(e_ant)
7 e_ant = 0;
8 end
9
10 persisten u_ant
11 if isempty(u_ant)
12 u_ant = 0;
13 end
14
15 %equacao do controlador
16 ctl = u_ant + 1023*(e-e_ant)+409.2*e*0.213
17
18 %atualizacoes
19 e_ant = e
20 u_ant = ctl
21
22 y =ctl;
```

Código-fonte 4 – Código de programação da interface gráfica

```
1
2 # Dispon vel em:
3 https://github.com/GabrielOliveiraAlmeida/T.C.C.git
```