



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

JOÃO LUIZ DE CASTRO PEREIRA

CONTROLE DE VELOCIDADE DE UMA ESTEIRA INDUSTRIAL

FORTALEZA

2022

JOÃO LUIZ DE CASTRO PEREIRA

CONTROLE DE VELOCIDADE DE UMA ESTEIRA 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

2022

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)

P492c Pereira, João Luiz de Castro.

Controle de velocidade de uma esteira industrial / João Luiz de Castro Pereira. – 2022.

62 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Wilkley Bezerra Correia.

1. Esteira transportadora. 2. Controle de velocidade. 3. Encoder. I. Título.

CDD 621.3

JOÃO LUIZ DE CASTRO PEREIRA

CONTROLE DE VELOCIDADE DE UMA ESTEIRA 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:

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Ernande Eugenio Campelo Morais
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Dr. Wellington Assunção da Silva

Aos meus pais, por todo o amor e incentivo. Sem a força e inspiração proporcionada por vocês a cada dia, eu não teria chegado até aqui. Ao porto seguro que vocês são, a todo momento

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Cleber e Hildemilia, por sempre me amarem e apoiarem em tudo que faço, por sempre acreditarem em mim e por todo o esforço que feito para que eu chegasse aqui. Vocês são minha base e sou muito grato por serem quem são.

Às amigas de longa data, Maria Eduarda e Giovanna, pela amizade, pela consideração, por todo o apoio e por sempre se fazerem presentes nos momentos importantes.

Aos primeiros amigos da Engenharia, Gabriel Costa, Gabriel Sampaio, Helena, Igor, Leticia, Lenyslara, Roger, Sarah e Andreza, que me acompanharam nas dificuldades e alegrias desde o começo do curso, passando por um período difícil de pandemia, permanecendo comigo até hoje.

À Tecsys Jr., primeiro projeto que contribuiu para o meu crescimento como profissional e ser humano dentro da Universidade.

Ao Ramo Estudantil IEEE UFC Fortaleza, projeto que ajudei a refundar e que juntamente com todos os membros ajudou a manter acesa a vontade de fazer o melhor, mesmo durante a pandemia.

Aos amigos do Laboratório de Sistemas Motrizes, Auro, Ana Carolina, Gabriel Fonseca, Gabriel Fontenele, José Eduardo e Jessica, pelo suporte, as risadas, as brincadeiras, a convivência, os conselhos, o companheirismo de todos os dias e por formarem o laboratório mais entrosado do Centro de Tecnologia.

Ao meu amigo e colega de bancada João Vítor, que me deu todo o suporte para a realização desse projeto.

Ao meu orientador, Prof. Wilkley Bezerra, pelo apoio, pelos conselhos, pela orientação que tornou este trabalho possível e pelas oportunidades concedidas desde o meu ingresso no laboratório.

Ao meu amigo Gustavo, pelo incentivo, apoio, paciência e por se tornar alguém tão importante

À minha amiga Isabela, pelos puxões de orelha, pelo carinho, pela amizade e por se fazer presente mesmo muitas vezes estando longe.

Ao meu amigo Gabriel Matos, que sempre foi ombro amigo, pela paciência, pelas conversas, pelas saídas dos fins de semana, pelas madrugadas jogando qualquer jogo e pela compreensão.

Sou muito grato a todos, pois cada um à sua maneira marcou minha vida e contribuiu

positivamente para a construção de quem sou hoje, vocês estarão guardados para sempre no meu coração.

“Quem pretende apenas a glória não a merece”

(Mario Quintana)

RESUMO

A ampla aplicabilidade de esteiras transportadoras em diferentes contextos faz com que suas características sejam diversas e que sejam objeto contínuo de estudo, buscando tornar seu funcionamento mais eficiente. Tendo isso em vista, surge a necessidade da modelagem matemática e do controle desse sistema. Com isso, o presente trabalho consiste na modelagem matemática de uma esteira transportadora e desenvolvimento de um controlador para controle de velocidade. O sistema de esteira utilizada consiste em uma esteira industrial de pequeno porte, acionada por inversor de frequência com o auxílio de um circuito eletrônico e desenvolvimento de solução para o cálculo de velocidade do sistema. A identificação do sistema é realizada por curva de reação. O projeto também apresenta as soluções desenvolvidas para a obtenção de dados da planta. Por fim, também é apresentado o projeto do controlador proporcional-integral (PI) definido para o controle do sistema.

Palavras-chave: Esteira transportadora. Controle de Velocidade. *Encoder*.

ABSTRACT

The wide applicability of conveyor belt in different context makes their characteristics diverse and a continuous object of study, in order to make their operation more efficient. Bearing this in mind, it rises the need for mathematical modeling and control. Within this context, the present work presents the mathematical modeling of a small size conveyor belt and its speed control development. The system herein is a small industrial treadmill, driven by a frequency inverter aided by an electronic circuit, along with the development of a solution for computing the speed of the system. System identification is performed by reaction curve. The design also features improved solutions for capturing plant data. Finally, the design of the proportional-integral (PI) controller defined for controlling the system is also presented.

Keywords: Conveyor belt. Speed control. Encoder.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – <i>Inline Transfer Machines</i>	19
Figura 2 – <i>Rotatory Index Table</i>	20
Figura 3 – Sistema de transferência de grãos	21
Figura 4 – Esquemático da bancada	21
Figura 5 – Sistema de esteiras	22
Figura 6 – Inversor de frequência	22
Figura 7 – Motor de indução trifásico	23
Figura 8 – Caixa de redução	23
Figura 9 – ESP32-WROOM-32	24
Figura 10 – Resposta do sistema em malha aberta	27
Figura 11 – Resposta do sistema discreto em malha aberta	28
Figura 12 – Gráfico de lugar das raízes de $G(z^{-1})$	29
Figura 13 – Gráfico de lugar das raízes de $C(z^{-1}) \cdot G(z^{-1})$	30
Figura 14 – Ganho do controlador $C(z^{-1})$	30
Figura 15 – Resposta do sistema em malha fechada	33
Figura 16 – Gráfico de Nyquist do sistema	34
Figura 17 – Diagrama de blocos no Simulink	35
Figura 18 – Diagrama de blocos no Simulink	36
Figura 19 – Bloco Signal Builder	36
Figura 20 – Sinal de referência	36
Figura 21 – Planta	37
Figura 22 – Condicionamento de leitura do <i>Encoder</i>	38
Figura 23 – Observação das bordas	38
Figura 24 – Leituras da planta	40
Figura 25 – Placa de condicionamento de sinal	41
Figura 26 – Placa de condicionamento de sinal	42
Figura 27 – Placa de condicionamento de sinal	43
Figura 28 – Sensor Indutivo Telemecanique	44
Figura 29 – Leitura do Sensor Indutivo	45
Figura 30 – Circuito de leitura do Encoder	46
Figura 31 – Esquemático do Encoder	47

Figura 32 – Encoder implementado	47
Figura 33 – Resultados de ensaio	48
Figura 34 – Sinal de controle do sistema	49
Figura 35 – Add-On Arduino Package	52
Figura 36 – Digital Input block	53
Figura 37 – PWM block	53

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>PWM</i>	Pulse-Width Modulation
<i>t</i>	Tempo
<i>V</i>	Tensão
<i>Hz</i>	Hertz
<i>PI</i>	Controlador Proporcional e Integral
<i>PID</i>	Controlador Proporcional integral derivativo
<i>IoT</i>	Internet of Things
<i>rpm</i>	Rotações por minuto
<i>FT</i>	Função de Transferência
<i>LGR</i>	Lugar Geométrico das Raízes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação	15
1.2	Justificativa	16
1.3	Organização do trabalho	16
2	SISTEMAS DE ESTEIRAS TRANSPORTADORAS	18
2.1	Tipos de esteiras transportadoras	18
2.1.1	<i>Esteiras Lineares</i>	18
2.1.1.1	<i>Inline Transfer Machines</i>	18
2.1.2	<i>Esteiras Rotatórias</i>	19
2.1.2.1	<i>Rotatory Index Table</i>	19
2.2	Aplicações de esteiras	19
2.2.1	<i>Sistema de transferência de grãos</i>	20
2.3	Esteira industrial do Lamotriz - UFC	21
2.3.1	<i>Inversor de frequência</i>	22
2.3.2	<i>Motor</i>	23
2.3.3	<i>Caixa redutora</i>	23
2.3.4	<i>Circuito de acionamento</i>	24
2.4	Controle de velocidade em esteiras transportadoras	25
3	IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA	26
3.1	Identificação do sistema de esteiras de ensaio	27
3.2	Projeto do controlador	29
3.2.1	<i>Controlador Proporcional Integral</i>	31
3.2.2	<i>Controlador</i>	31
3.3	Simulação	33
3.3.1	<i>Resposta ao degrau</i>	33
3.3.2	<i>Análise de robustez</i>	33
3.3.2.1	<i>Margem de ganho</i>	33
3.3.2.2	<i>Margem de fase</i>	34
4	DESCRIÇÃO DA BANCADA E RESULTADOS	35
4.1	Descrição do sistema embarcado Simulink-ESP	35

4.1.1	<i>Signal Builder</i>	36
4.1.2	<i>Esteira</i>	37
4.1.3	<i>Condicionamento de Leituras</i>	37
4.1.3.1	<i>Cálculo de velocidade</i>	37
4.1.3.2	<i>Filtro de média móvel</i>	39
4.1.4	<i>Leituras</i>	40
4.2	Acionamento	41
4.2.1	<i>Microcontrolador</i>	41
4.2.2	<i>Placa de Condicionamento de Sinal</i>	41
4.2.3	<i>Sistema Completo</i>	42
4.3	Sensoriamento	43
4.3.1	<i>Encoder</i>	43
4.3.2	<i>Sensor Indutivo</i>	43
4.3.3	<i>Hastes metálicas</i>	45
4.3.4	<i>Circuito de Leitura</i>	46
4.4	Dispositivo implementado	46
4.5	Resultados	48
4.5.1	<i>Sinal de controle</i>	49
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	50
	REFERÊNCIAS	51
	APÊNDICES	52
	APÊNDICE A – Simulink Suport para Arduino	52
	ANEXOS	54
	ANEXO A – Códigos desenvolvidos	55
	ANEXO B – Código - Simulação de resposta em malha fechada	61

1 INTRODUÇÃO

Por volta da segunda metade do século XIX, com o advento da 2ª Revolução Industrial e o incremento na demanda de produção de manufaturas, surgiu a necessidade do desenvolvimento de novos métodos de produção em larga escala. Sendo a etapa de montagem uma das mais importantes de qualquer processo de fabricação e que é necessária quando duas ou mais peças de componentes devem ser fixadas juntas. O desenvolvimento do processo de montagem está intimamente ligado à história do crescimento dos métodos de produção em massa, com os pioneiros da produção sendo também pioneiros nas técnicas de montagem. Suas ideias trouxeram melhorias significativas nos métodos de montagem empregados em produções de larga escala.

Entretanto, mesmo que muitos aspectos de fabricação de diferentes bens tenham sido revolucionados pela automação, com o uso de robôs de montagem ou aplicação de automação de alta velocidade, o sucesso foi limitado e muitas linhas de montagem ainda utilizam ferramentas empregadas na época da revolução industrial. Logo, é necessário que engenheiros aprendam sobre montagem automática. Assim, fornecendo meios para melhorar o design, a produtividade e a competitividade de uma linha de produção (GUPTA; WESTCOTT, 2016).

Esteiras transportadoras são usadas para transporte contínuo na linha de produção moderna e se tornou um dos três principais modos de transporte industrial, juntamente com automóveis e trens, e tem sido amplamente utilizadas em portos, usinas termoelétricas, minas de carvão, usinas siderúrgicas e outras indústrias (HE *et al.*, 2018).

1.1 Motivação

O controle de velocidade é recomendado para maior eficiência de um sistema de esteiras transportadoras, mesmo que seja ocasionalmente sofra perturbações ou interferências externas, procurando manter uma velocidade constante ou variável de acordo com a referência previamente definida e desejada. Dessa forma, pode-se garantir desde a alta quantidade do produto transportado ou em processo fabril até a continuidade de operação ao evitar falhas e quebras de lona. Atualmente, o conceito de velocidade controlada em esteiras transportadoras é comumente adotado na indústria (ZHANG; XIA, 2011).

O controle de velocidade pode ser usado como método de redução do consumo de energia, regulando a velocidade do transportador para corresponder à taxa variável de alimenta-

ção do material transportado pela esteira. Geralmente, as esteiras transportadoras funcionam na velocidade nominal projetada e, na maioria dos casos, elas são parcialmente carregadas. Nesses casos, a velocidade do transportador pode ser ajustada para corresponder ao fluxo de material e espera-se que a taxa de carregamento do transportador melhore significativamente. Conseqüentemente, a economia de energia do transportador de correia pode ser alcançada.

Além disso, a dinâmica dos transportadores em operações transitórias torna ainda mais necessário o controle de velocidade, especialmente nos casos em que a velocidade do transportador é frequentemente ajustada para corresponder a um fluxo de material variável, que também gera a possibilidade de quebras devido a variação de tensão mecânica na lona. Logo, levando em consideração o tempo e o custo da manutenção, os riscos causados pela operação de ajuste de velocidade devem ser evitados. (HE *et al.*, 2017)

Portanto, visando contornar possíveis problemas originados pelo controle inadequado de velocidade desse tipo de sistema, faz-se necessário o projeto de um controlador para a operação.

1.2 Justificativa

Tendo em vista a ampla aplicação de esteiras transportadoras e como sua velocidade precisa ser controlada para um funcionamento adequado em diferentes aplicações, seja à plena carga ou com pouco carregamento, surge a necessidade da aplicação de um controlador. Além disso, havendo um sistema de esteiras industriais de pequeno porte no Laboratório de Sistemas Motrizes (LAMOTRIZ), sendo passivo de modelagem, como um sistema de controle de 1ª ordem, surge a possibilidade de aplicação de controladores clássicos, como o PI aplicado neste trabalho.

Por fim, há também a possibilidade de utilizar a placa ESP32 para a implementação do controlador, de modo que ela também possa ser utilizada para o acionamento remoto da planta futuramente.

1.3 Organização do trabalho

O primeiro capítulo consiste na introdução, nele é feita uma breve introdução a respeito do contexto histórico ao qual se aplica o surgimento de esteiras transportadoras e suas principais características.

O segundo capítulo aborda os diferentes tipos de esteiras transportadoras e suas

aplicações, bem como apresenta o sistema real no qual os ensaios deste trabalho foram realizados.

O terceiro capítulo aborda a identificação do sistema, onde é apresentada a importância da identificação e modelagem do sistema para a realização do controle. Além disso, nele é descrito o processo realizado para o projeto do controlador aplicado à planta.

Ademais, o quarto capítulo consiste na apresentação e no detalhamento a respeito da bancada finalizada, bem como os resultados dos experimentos realizados.

Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões finais a respeito do trabalho e também as indicações de possíveis trabalhos futuros que podem ser realizados a partir deste trabalho.

2 SISTEMAS DE ESTEIRAS TRANSPORTADORAS

O uso de esteiras para transporte está em constante desenvolvimento como um sistema de transporte industrial de alto desempenho para materiais a granel. As áreas de aprimoramento incluem principalmente a melhoria do desempenho nos seguintes aspectos: eficiência, confiabilidade e intensidade energética. Projetos de pesquisa e desenvolvimento têm sido realizados para alcançar uma maior eficiência energética dos componentes do transportador, da sua inicialização e com o objetivo de adaptar seu design para condições de instalação complexas, bem como reduzir o consumo de energia de transporte controlando a alimentação de transportadores, ou seja, controlando seu carregamento. Os campos de pesquisa também incluem o controle da velocidade linear do equipamento e a melhoria na modelagem de transportadores, além da implementação de novas soluções de acionamento. As melhorias buscadas levam a um sistema de transporte mais eficiente, econômico e confiável (BORTNOWSKI *et al.*, 2022).

Uma esteira transportadora é um equipamento automático que, como todos os outros, é composto por unidades automatizadas menores, coordenadas, sendo utilizada principalmente para realizar o transporte de componentes entre dois pontos distintos ou entre estações de trabalho, possuindo papel fundamental na intralogística de várias indústrias, sendo comumente utilizada em linhas de produção de diferentes segmentos, em conjunto com sensores que auxiliam o controle do seu funcionamento. Os mecanismos de deslocamento são divididos em dois (GUPTA; WESTCOTT, 2016):

- Mecanismo de transferência Linear;
- Mecanismo de transferência Rotacional.

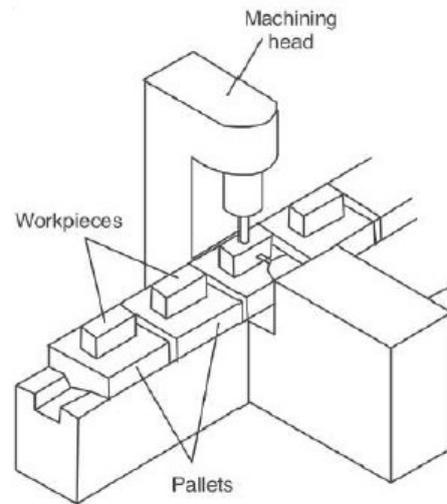
2.1 Tipos de esteiras transportadoras

2.1.1 Esteiras Lineares

2.1.1.1 *Inline Transfer Machines*

A máquina em linha de montagem é constituída por uma série de estações de trabalho localizadas ao longo de um sistema de transferência como ilustrado na Figura 1. Geralmente as esteiras em linha possuem um ponto específico de carregamento em uma extremidade e um ponto de descarga na outra extremidade. As estações de trabalho e de inspeção são organizadas ao longo da linha de produção. Os componentes são transferidos automaticamente de uma

Figura 1 – *Inline Transfer Machines*



Fonte: (GUPTA; WESTCOTT, 2016)

estação para outra, puxando os trilhos de suporte por meio de um transportador de corrente ou empurrando os trilhos contínuos com ar ou pressão hidráulica. Os componentes são carregados manualmente ou automaticamente (GUPTA; WESTCOTT, 2016).

2.1.2 Esteiras Rotatórias

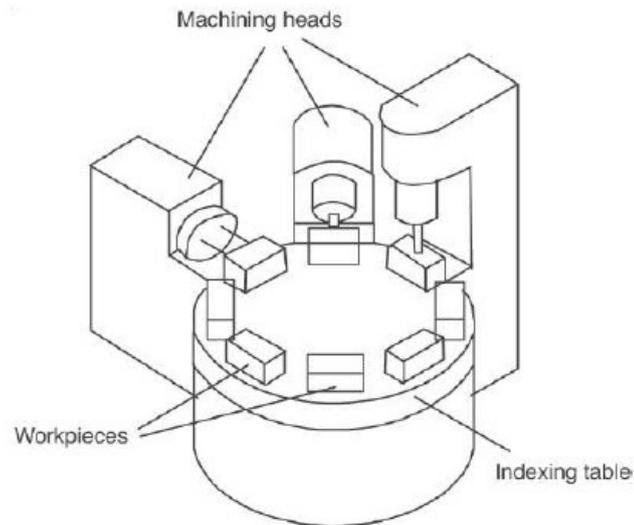
2.1.2.1 Rotatory Index Table

Nas máquinas rotativas, as peças de trabalho são localizadas e percorrem um caminho circular conforme mostrado na Figura 2. A mesa gira em torno de um eixo vertical e seu movimento pode ser contínuo ou intermitente. Esse tipo de esteira é capaz de alimentar várias estações de trabalho simultaneamente. A esteira rotativa move uma peça de trabalho de uma estação para outra através de uma mesa giratória, com operações realizadas em cada estação (GUPTA; WESTCOTT, 2016).

2.2 Aplicações de esteiras

Um sistema automatizado é aquele em que um processo é executado sem a participação direta de um trabalhador humano. Todo o sistema automatizado é construído a partir de unidades automatizadas menores adequadamente coordenadas. Esteiras geralmente são utilizadas em ambientes industriais, mas também podem possuir outras aplicações.

Figura 2 – *Rotatory Index Table*



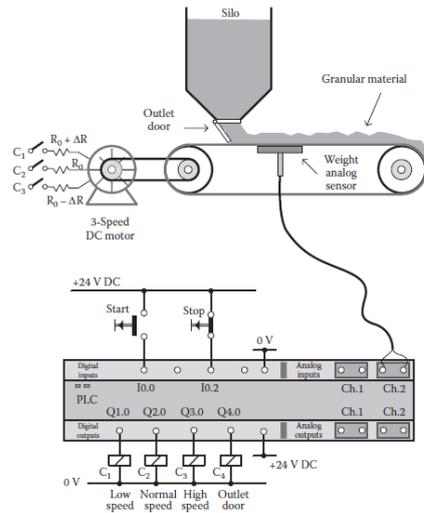
Fonte: [1] (indust. auto. rob.)

2.2.1 *Sistema de transferência de grãos*

A Figura 3 mostra um sistema transportador para transferência de grãos de um silo. O silo possui uma porta de saída acionada eletricamente, que está aberta quando a saída Q4.0 observada na Figura é energizada. O motor move a correia transportadora. O peso dos grãos é medido com o auxílio de um transdutor. Assim, a correia transportadora opera em uma determinada velocidade quando o peso medido é igual a um valor pré-definido de 1kg. A velocidade desejada é alcançada pela ativação da saída Q2.0 (C2). Devido as quantidades e pesos variáveis do material que pode vir a sair do silo, o peso medido pode sofrer alterações. Quando o peso medido é inferior a 1 Kg, a velocidade do transportador diminui. Já quando o peso medido é superior a 1 Kg, a velocidade do transportador aumenta (MANESIS; NIKOLAKOPOULOS, 2018).

O sistema transportador exemplificado pode ser implementado em CLP para regular a velocidade da correia transportadora automaticamente de acordo com as especificações e a necessidade do sistema.

Figura 3 – Sistema de transferência de grãos

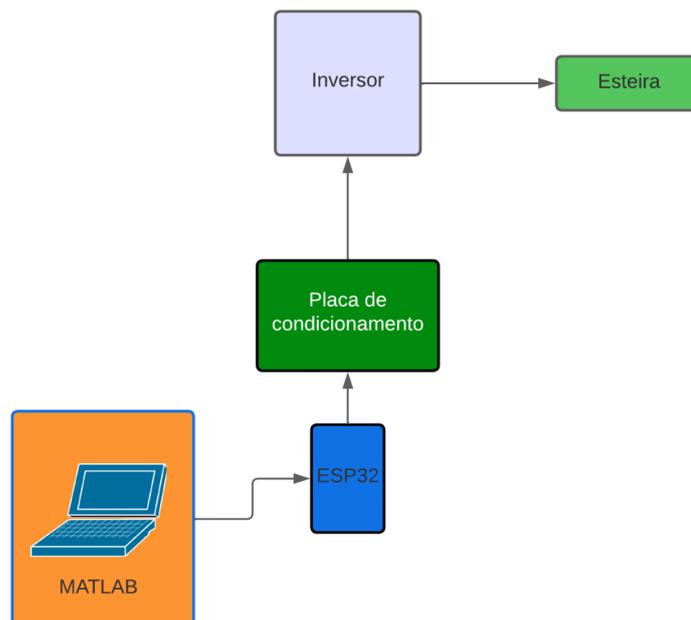


Fonte: (MANESIS; NIKOLAKOPOULOS, 2018)

2.3 Esteira industrial do Lamotriz - UFC

O sistema de esteiras do Lamotriz é composto por quatro esteiras transportadoras, sendo uma utilizada no trabalho, acionada por um inversor de frequência, que utiliza um circuito eletrônico controlado para o acionamento. O circuito esquemático da planta pode ser observado na Figura 4, bem como o sistema real na Figura 5.

Figura 4 – Esquemático da bancada



Fonte: O próprio autor

Figura 5 – Sistema de esteiras



Fonte: O próprio Autor

2.3.1 Inversor de frequência

O inversor de frequência é um dispositivo utilizado para possibilitar a variação de velocidade no motor que compõe a planta. O dispositivo utilizado é do modelo Altivar 31 da Telemecanique, que atua em frequências entre 0 e 60 hz.

O equipamento pode ser controlado manualmente via IHM do aparelho, ou via sinal externo, que deve variar entre 0 e 10 V.

Figura 6 – Inversor de frequência



Fonte: O próprio Autor

2.3.2 Motor

O motor utilizado foi um motor de indução de 1,5 CV(1,1 kW), 1700 rpm com fator de potência de $\phi = 0,82$ e rendimento nominal de 81,5%, informado pelo fabricante, modelo 18JANO5, da WEG.

Figura 7 – Motor de indução trifásico



Fonte: O próprio Autor

2.3.3 Caixa redutora

A caixa de redução utilizada na planta é de 80, da marca Cestari, e é capaz de suportar até 1750 rpm.

Figura 8 – Caixa de redução



Fonte: O próprio Autor

2.3.4 Circuito de acionamento

O circuito de acionamento utiliza um microcontrolador ESP32 em conjunto com uma placa de condicionamento de sinal, capaz de acionar diretamente o inversor de frequência, que cumpre o papel de atuador no sistema, de modo a dar partida no motor.

Figura 9 – ESP32-WROOM-32



Fonte: O próprio Autor

ESP32 é uma placa de desenvolvimento com processador dual core, com até 240MHZ de velocidade, contando ainda com conexão *Bluetooth* e *Wi-fi*, permitindo-a acesso à internet. Tal placa foi utilizada como mecanismo de aquisição de dados, bem como elemento parte do circuito de acionamento da planta, através do *Simulink Support Package for Arduino Hardware*, que permite a utilização de blocos no Simulink capazes de interagir diretamente com a placa, como é demonstrado no Apêndice A. Ademais, o *Support Package* cumpre o papel de transformar o circuito de blocos implementado no Simulink em um código em linguagem C, que é embarcado na ESP32.

2.4 Controle de velocidade em esteiras transportadoras

Esteiras transportadoras desempenham importante papel logístico em diversos setores, havendo muitas em operação na mineração, em usinas termoelétricas a carvão, na indústria siderúrgica, entre outras aplicações.

Nas últimas décadas, vários métodos diferentes de economia de energia foram estudados com o objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica em sistemas de transporte. Focando em diferentes aspectos de esteiras transportadoras. As diferentes abordagens de economia de energia são classificados em alguns grupos, métodos que buscam componentes mais eficientes, por exemplo, utilizando correias com menor coeficiente de atrito ou com peso menor, ou mesmo motores de alta eficiência; métodos de otimização do *layout* do equipamento transportador, que podem ser instalados em locais de difícil acesso; ou métodos de otimização da operação do sistema, como controlar as sequências do motor ou ajustando a velocidade do transportador. O método de ajuste da velocidade do mecanismo transportador é chamado de controle de velocidade (HE *et al.*, 2016).

O controle de velocidade é um método promissor para reduzir o consumo de energia de mecanismos transportadores. Entretanto, operações transitórias inadequadas podem gerar prejuízos como derramamento de material para longe da esteira transportadora. Os riscos de operação limitam a aplicabilidade do controle de velocidade. Alguns estudos sobre o controle de velocidade têm o foco principal na projeção de modelos que usam menor energia ou na construção de algoritmos de controle do acionamento de sistemas com velocidade variável, enquanto menos pesquisas levam em consideração os riscos do regime transitório em operações e o desempenho dinâmico de transportadores sob controle de velocidade (HE *et al.*, 2018).

3 IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

A identificação do sistema consiste na determinação de um modelo matemático capaz de representar as principais características da planta a ser trabalhada. E pode ser realizada das seguintes maneiras:

- Análise físico-matemático: modela-se um sistema a partir das leis da física que o caracterizam, como as leis de momento, conservação de energia e massa.
- Análise experimental: realizada a partir de medidas ou observações do sistema.

Processos de identificação permitem a obtenção de modelos que representem a dinâmica de um sistema para utilização para fins de controle, desta forma, não se faz necessário um modelo exato, mas um que se adeque a determinadas condições de aplicação, pois utiliza-se na prática a premissa de que não se necessita obrigatoriamente de modelos complexos (COELHO; COELHO, 2020).

O modelo de um sistema consiste em uma equação matemática usada para responder questões a respeito do sistema sem que seja necessária a realização de experimentos. Podendo o sistema ser testado através de simulações, por exemplo, reduzindo custos operacionais, entretanto, a qualidade dos resultados obtidos estará diretamente ligada a qualidade do modelo matemático do sistema.

O uso de modelos matemáticos, para descrever diversos processos de automação industriais, possui alguns propósitos:

- Previsão: A criação de um modelo é uma tentativa de prever resultados futuros do sistema, estando sujeita a perturbações.
- Análise e projeto de sistemas de controle: Abre um amplo campo para a aplicação de controladores clássicos, sínteses de algoritmos tanto adaptativos como preditivos e na estimação de variáveis não-mensuráveis, como a estimação de velocidade.
- Supervisão: A simulação é utilizada com base no modelo matemático criado para observar características operacionais do sistema, sendo usada também para a detecção de erros e possibilitando a realização de diagnósticos da planta.
- Otimização: Aplicado na observação do sistema de forma geral, possibilitando a avaliação de possibilidade de escalonamento da atividade, na necessidade de manutenção e na economia gerada pelo sistema.

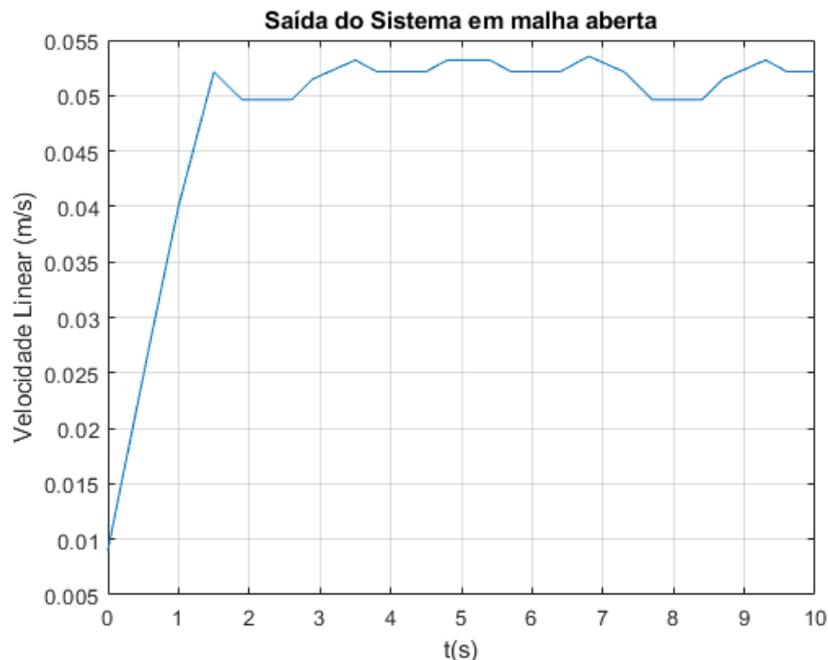
3.1 Identificação do sistema de esteiras de ensaio

A observação da dinâmica dos sistema nos permitiu detectar a linearidade da resposta à variação na entrada do sistema, conforme é possível observar na Figura 10, sendo assim, o sistema modelado deve ser de primeira ordem.

A identificação considerada neste trabalho é a resposta do sistema ao degrau, conhecida como identificação por *curva de reação* (AGUIRRE, 2015). Nesta abordagem emprega-se um degrau de valor conhecido, neste caso em específico, a variação do degrau é de 95% para 50% no valor de *duty cycle* do PWM (Pulse-width modulation) da entrada do sistema, que consiste na tensão aplicada na entrada do inversor de frequência que atua na planta de modo a gerar um crescimento na velocidade da planta.

A curva de resposta ao degrau do sistema apresentada na Figura 10 serviu como base para a identificação do sistema. Deste modo, a constante de tempo τ do sistema de primeira ordem consiste no tempo que o sistema leva para ir de seu valor inicial até o equivalente a 63,2% do valor final da resposta do sistema. (MAYA; LEONARDI, 2010)

Figura 10 – Resposta do sistema em malha aberta



Fonte: O próprio Autor

Além disso, o ganho do sistema é determinado pela razão:

$$K = \frac{V_1}{V_0} = -45 \quad (3.1)$$

Sendo:

- V_0 : velocidade inicial do sistema
- V_1 : velocidade final

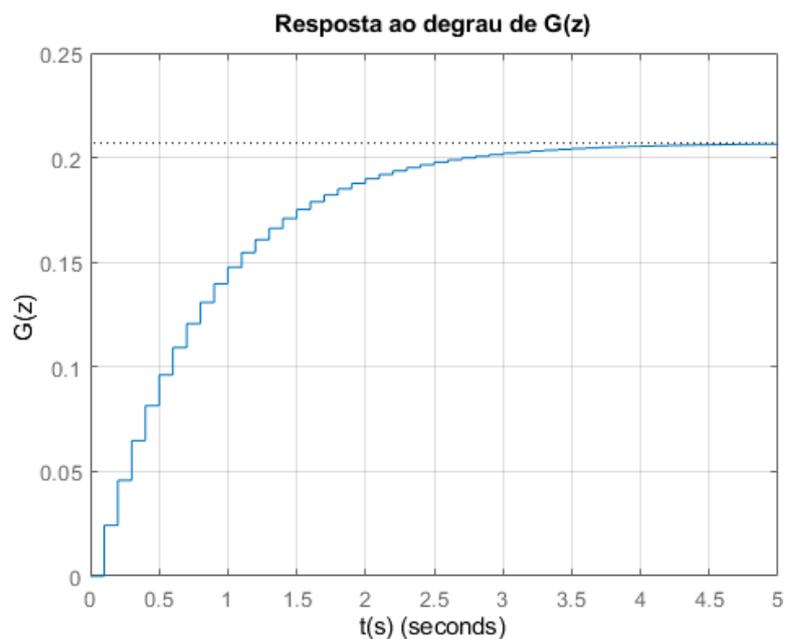
Logo, foi encontrado o seguinte modelo contínuo para o sistema apresentado na equação (3.2).

$$G(s) = \frac{-0.2069}{0.8 \cdot s + 1} \quad (3.2)$$

Utilizando o comando "c2d" do MATLAB, foi encontrado o modelo discreto para a planta com tempo de amostragem de 0.1 segundos, que é apresentado na equação (3.3) e apresenta a resposta ao degrau que pode ser vista na Figura 11.

$$G(z) = \frac{-0.0242}{z - 0.8825} \quad (3.3)$$

Figura 11 – Resposta do sistema discreto em malha aberta



Fonte: O próprio Autor

3.2 Projeto do controlador

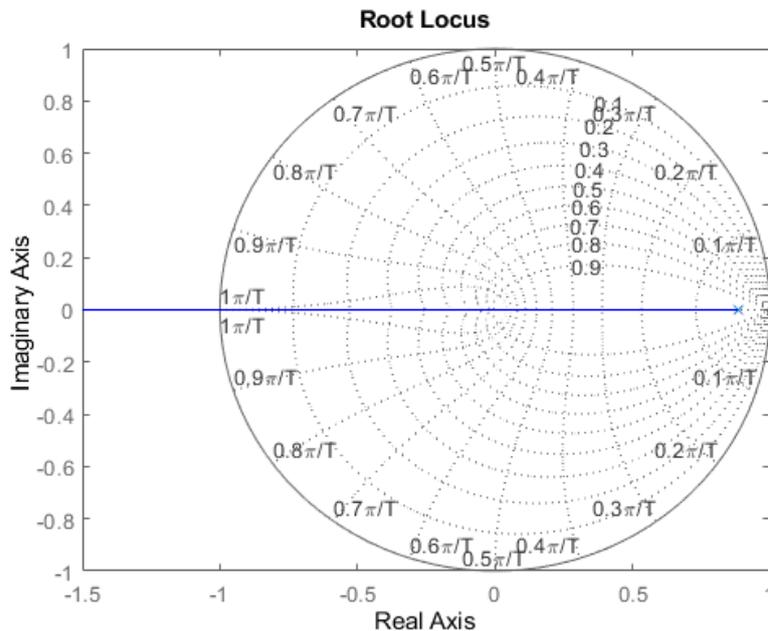
O controlador implementado neste trabalho é do tipo proporcional-integral (PI), cuja representação por função de transferência é apresentada na equação (3.4).

$$C(z^{-1}) = K \cdot \frac{1 - n \cdot z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (3.4)$$

Para o projeto deste controlador, a principal característica desejada é a robustez, de modo a garantir a segurança do sistema. Uma das ferramentas que se pode considerar é o posicionamento de polos através do lugar geométrico das raízes (LGR). Neste caso, pode-se obter o traçado do LGR através da função *rlocus* do MATLAB.

Para o projeto do controlador considerado neste trabalho, considera-se o traçado da função de transferência (FT) discreta (3.4) conforme apresentado na Figura (12).

Figura 12 – Gráfico de lugar das raízes de $G(z^{-1})$

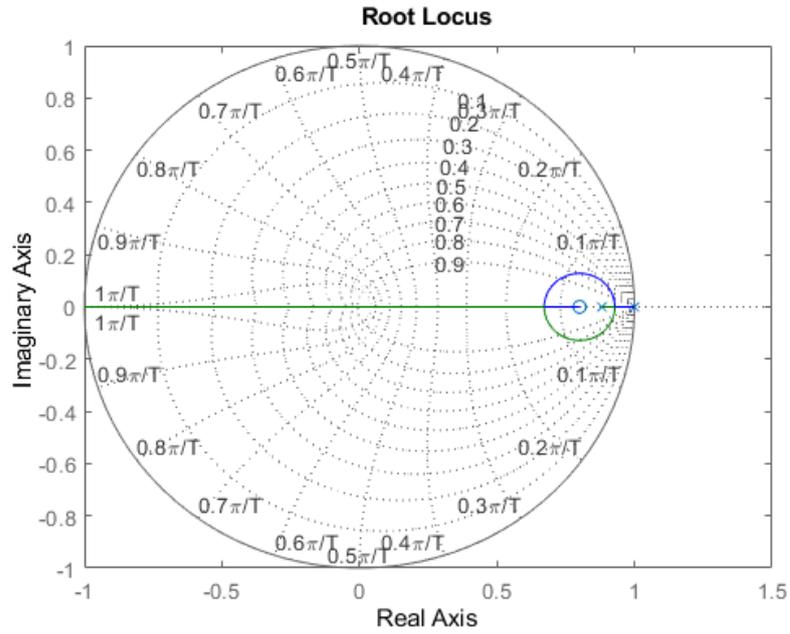


Fonte: O próprio Autor

A partir dele, o zero foi alocado na posição -0.8, à esquerda do polo do sistema, com o objetivo de obter uma resposta mais rápida. Logo, na equação (3.4) “n” será 0.8 e o gráfico de Lugar da Raízes do sistema em malha fechada fica como apresentado na Figura 13.

A partir do diagrama do lugar das raízes ampliado do controlador $C(z^{-1})$ apresentado na Figura 14, foi definido o menor ganho para controle e ganho de velocidade do sistema.

Figura 13 – Gráfico de lugar das raízes de $C(z^{-1}) \cdot G(z^{-1})$

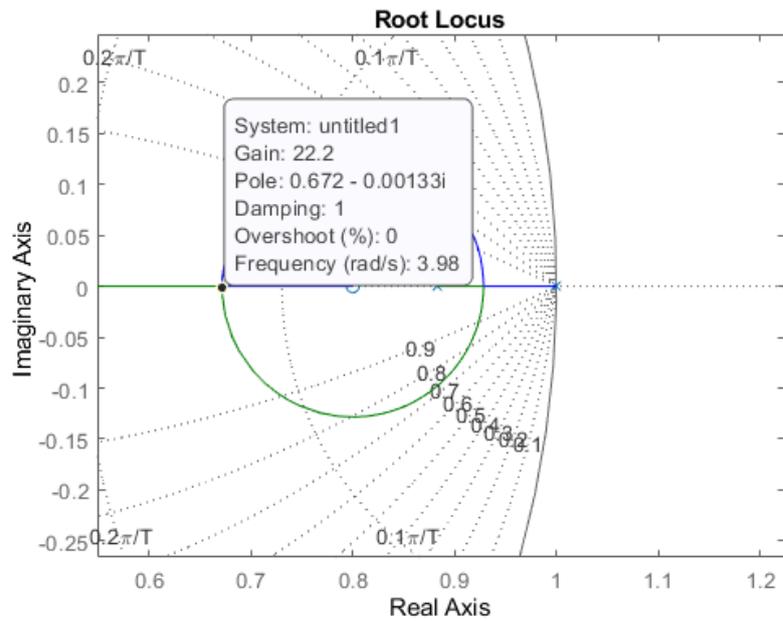


Fonte: O próprio Autor

Logo:

$$K = 22.2$$

Figura 14 – Ganho do controlador $C(z^{-1})$



Fonte: O próprio Autor

3.2.1 Controlador Proporcional Integral

Um controlador amplamente utilizado para o controle de processos industriais é o PID, que possui três termos e tem a função de transferência discreta apresentada na equação (3.5) (PHILLIPS *et al.*, 1990)

$$G_c(z^{-1}) = K_p + \frac{K_I}{1 - z^{-1}} + K_D \cdot s(1 - z^{-1}) \quad (3.5)$$

O controlador leva o nome de PID por conter três termos, sendo um proporcional, um integral e um derivativo, representados por K_p , K_I e K_D .

Logo, ajustando $K_D = 0$, é possível obter o controlador proporcional integral

$$G_c(z^{-1}) = K_p + \frac{K_I}{1 - z^{-1}} \quad (3.6)$$

3.2.2 Controlador

A partir do que foi visto anteriormente, é possível encontrar os parâmetros do controlador realizando a comparação apresentada na equação (3.7), que é deduzida a seguir, de modo que os valores de K_p e K_I são determinados como é possível ver nas equações (3.8) e (3.9).

$$\begin{aligned} \frac{-17.76 \cdot z^{-1} + 22.2}{1 - z^{-1}} &= K_p + \frac{K_I}{1 - z^{-1}} \\ &= \frac{K_p \cdot (1 - z^{-1}) + K_I}{1 - z^{-1}} \\ &= \frac{K_p - K_p \cdot z^{-1} + K_I}{1 - z^{-1}} \\ &= \frac{-K_p \cdot z^{-1} + (K_p + K_I)}{1 - z^{-1}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

O sistema linear obtido a partir da Eq. (3.7) leva a

$$K_p = 17.76 \quad (3.8)$$

$$K_I = 4.44 \quad (3.9)$$

Portanto, substituindo os valores determinados na Eq. (3.4), é possível encontrar a FT (3.10) e, por fim, o controlador projetado na equação (3.10)

$$C(z^{-1}) = 22.2 \cdot \frac{(1 - 0.8 \cdot z^{-1})}{1 - z^{-1}} \quad (3.10)$$

Sendo assim, o controlador no tempo discreto é implementado no formato de equações de diferenças, de modo que o sinal de controle do sistema é calculado a cada iteração do sistema, que tem o tempo de amostragem definido como 0.1s. A equação de diferenças é demonstrada a seguir e definida na equação (3.13). (PHILLIPS *et al.*, 1990)

$$\frac{u(k)}{e(k)} = \frac{22.2 - 17.76 \cdot z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (3.11)$$

$$u(k) - u(k-1) = -17.76 \cdot e(k-1) + 22.2 \cdot e(k) \quad (3.12)$$

$$u(k) = u(k-1) - 22.2 \cdot e(k-1) + 17.76 \cdot e(k) \quad (3.13)$$

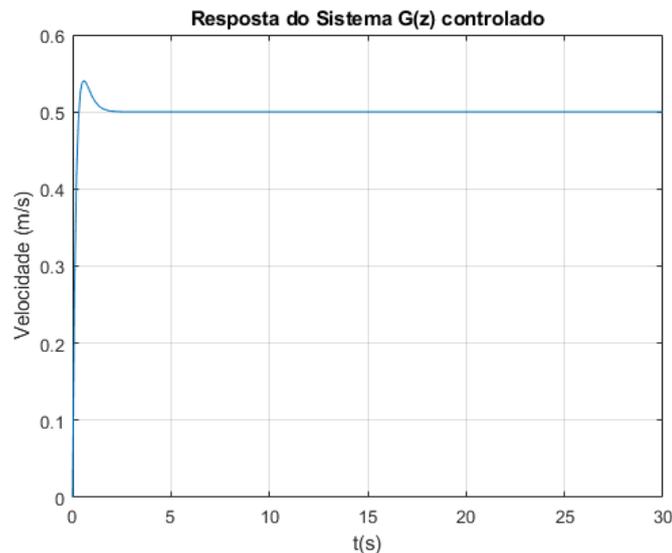
3.3 Simulação

Visando analisar a atuação do controlador, uma simulação foi realizada no MATLAB.

3.3.1 Resposta ao degrau

A referência de entrada foi definida como sendo 0.5, de modo que foi possível observar a resposta obtida na Figura 15. Assim, é possível chegar a conclusão de que o ganho definido foi o suficiente para uma resposta rápida do sistema.

Figura 15 – Resposta do sistema em malha fechada



Fonte: O próprio Autor

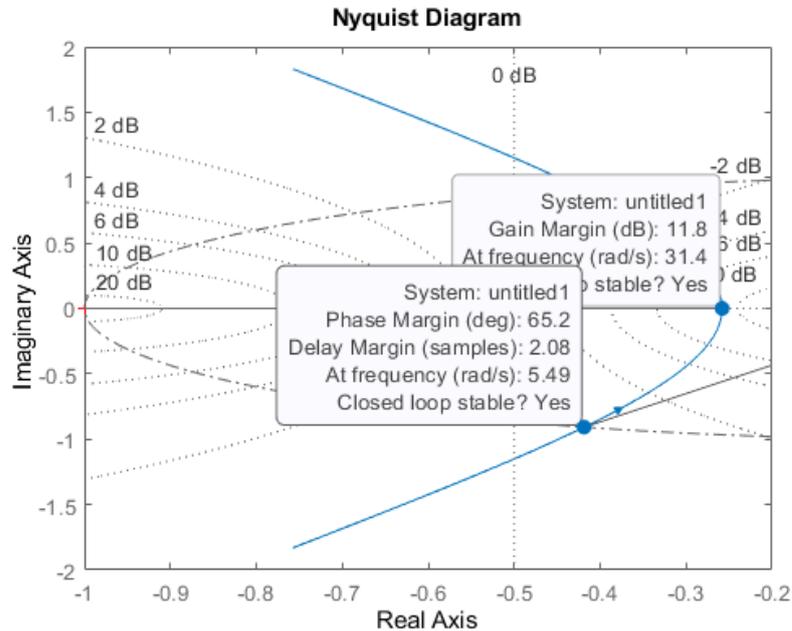
3.3.2 Análise de robustez

Para analisar a robustez do controlador projetado, foi realizada uma análise com base no método de Nyquist, de modo a observar as margens de fase e de ganho do sistema controlado, que será instável sempre que o seu contorno de Nyquist englobar o valor -1. É possível observar as margens obtidas para o sistema na Figura 16 (DORF; BISHOP, 2020).

3.3.2.1 Margem de ganho

Margem de ganho é um acréscimo no ganho do sistema quando a fase for de -180° que irá gerar como resultado um sistema marginalmente estável, com interseção do ponto $-1 + j0$ no diagrama de Nyquist. A margem de ganho do sistema em malha fechada é de 11.8 dB, de

Figura 16 – Gráfico de Nyquist do sistema



Fonte: O próprio Autor

modo que é possível perceber uma margem considerável, capaz de garantir com segurança a estabilidade da planta (DORF; BISHOP, 2020).

3.3.2.2 Margem de fase

Margem de fase é a quantidade de deslocamento de fase de $L(j\omega)$ com magnitude unitária que resultará em um sistema marginalmente estável, com a interseção do ponto $-1 + j0$ no diagrama de Nyquist. A margem de fase do sistema em malha fechada para o sistema é de 65.2° , de modo que é possível observar novamente valores elevados, capazes de garantir com segurança a estabilidade da planta (DORF; BISHOP, 2020).

4 DESCRIÇÃO DA BANCADA E RESULTADOS

A bancada de trabalho é formada por diferentes dispositivos com configurações específicas que são apresentadas neste capítulo, bem como os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados visando a observação do controle de velocidade da planta.

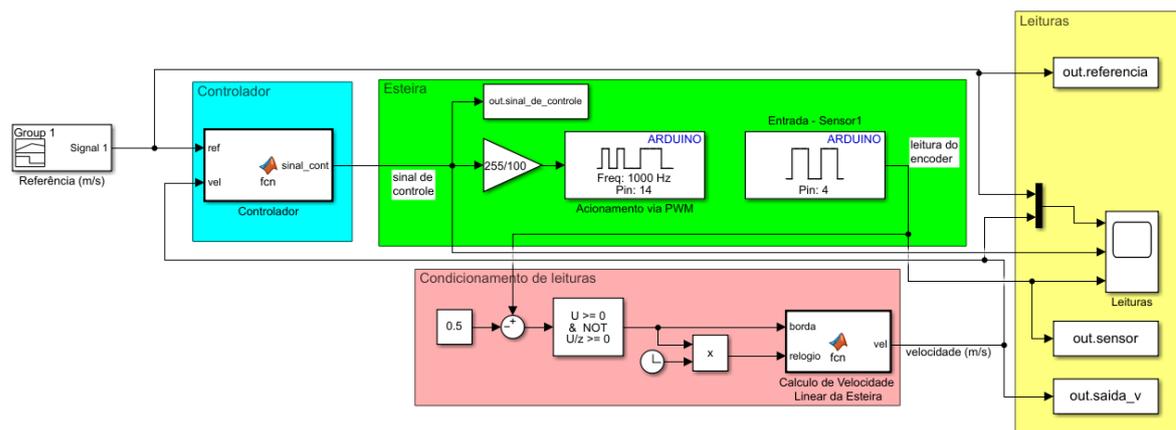
4.1 Descrição do sistema embarcado Simulink-ESP

A implementação do sistema embarcado se deu com o auxílio do pacote de suporte ao arduino compatível com o *Simulink*. A partir dele, o sistema da esteira foi emulado de forma a se assemelhar ao que seria o diagrama de blocos do sistema dinâmico

Foram usadas duas *MATLAB Functions*, a primeira para cálculo de velocidade da esteira, utilizando o tempo entre a detecção de dois pulsos consecutivos emitidos pelo sensor indutivo para calcular a velocidade angular do sistema e posteriormente a sua velocidade linear, de modo a permitir a visualização adequada do funcionamento da planta e suas características.

Já a segunda *MATLAB Function* foi utilizada para a implementação do controlador do sistema, que consistem em um PI digital. Os códigos de implementação das funções estão disponíveis no Anexo A

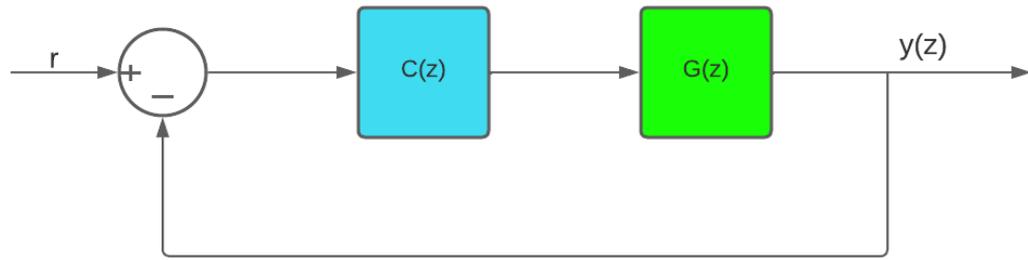
Figura 17 – Diagrama de blocos no Simulink



Fonte: O próprio Autor

O sistema foi dividido em blocos, que representam o Controlador, a Planta e o condicionamento da leitura do sinal do sensor, de forma a emular o diagrama de blocos clássico de um sistema de controle, conforme é possível observar na Figura 18. Além deles, o bloco *Signal Builder* foi utilizado para a geração do sinal de referência usado, de modo a automatizar os ensaios realizados.

Figura 18 – Diagrama de blocos no Simulink



Fonte: O próprio Autor

4.1.1 *Signal Builder*

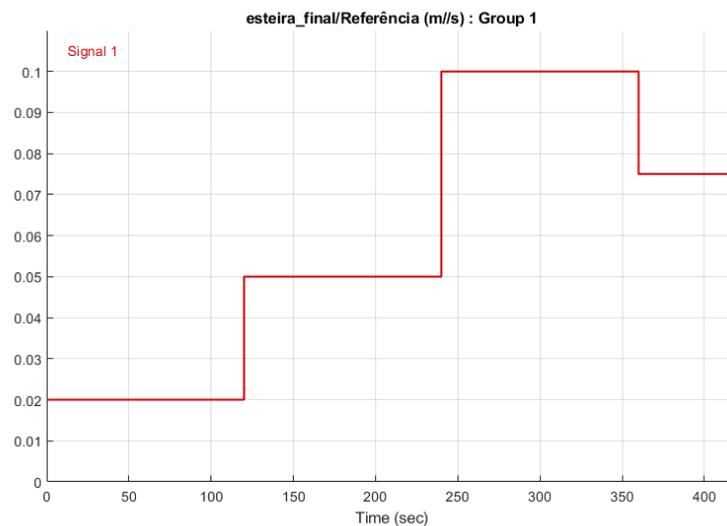
O *Signal Builder* permite a criação de um sinal com características variáveis com o tempo, possibilitando a criação de um sinal de referência conforme a Figura 20 para a realização dos ensaios como o que foi utilizado e pode ser visualizado na Figura 17.

Figura 19 – Bloco Signal Builder



Fonte: O próprio Autor

Figura 20 – Sinal de referência

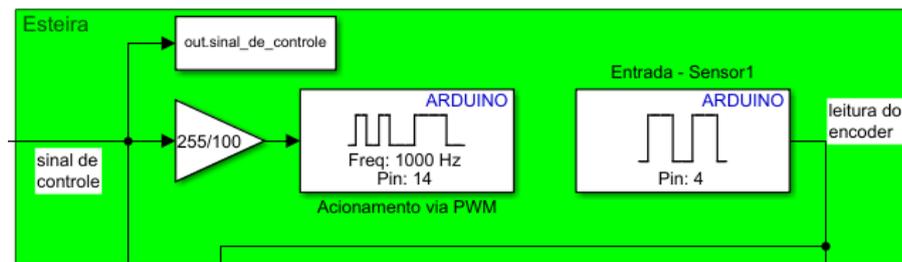


Fonte: O próprio Autor

4.1.2 Esteira

O bloco “PWM” do pacote de suporte, foi empregado atuando como porta de saída do sinal utilizado para acionamento do sistema, podendo ter seu *duty cycle* entre 0 e 100%. Entretanto o bloco recebe como sinal de entrada um valor entre 0 e 255. Assim, visando a normalização do sinal de controle em valores entre 0 e 100, facilitando a associação com a porcentagem de *duty cycle* do sinal de PWM a ser enviado pela placa, foi adicionado um ganho de $\frac{255}{100}$ ao circuito implementado, que passa a ser parte da planta, de modo a atender as restrições do bloco e mantendo o funcionamento do sistema.

Figura 21 – Planta



Fonte: O próprio Autor

O bloco “Digital Input“, nomeado como “Entrada - Sensor 1“ foi utilizado para a leitura das informações advindas do sensor indutivo empregado, que fornece um trem de pulsos que por sua vez é condicionado pelo circuito implementado no Simulink.

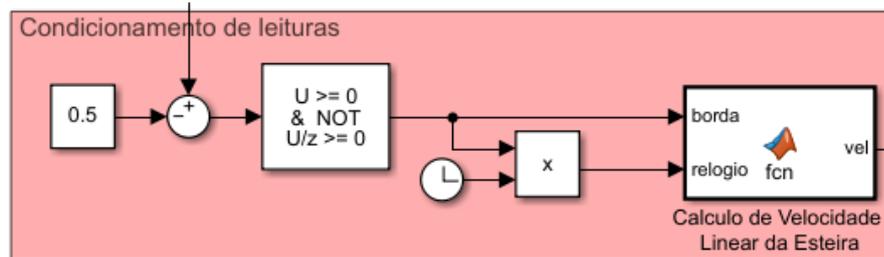
Embora os blocos na Figura 21 apresentem o nome “Arduino“, eles são compatíveis com a placa ESP32.

4.1.3 Condicionamento de Leituras

O sinal recebido do *encoder* é condicionado com o auxílio do bloco *Detect Rise Nonnegative*, de modo que a cada borda de subida do sinal detectada, um pulso com largura de uma amostra é enviada à MATLAB Function “Calculo de velocidade“, onde o dado é tratado e serve de referência para o cálculo da velocidade da esteira.

4.1.3.1 Cálculo de velocidade

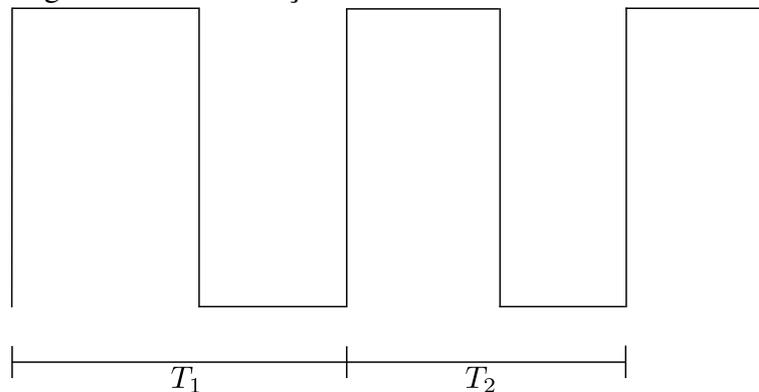
A função desenvolvida para o cálculo da velocidade da planta foi implementada na MATLAB Function “Calculo de Velocidade Linear da Esteira“, utilizando o tempo entre a detecção das bordas de subida de dois pulsos enviados pelo *encoder*, como é possível observar

Figura 22 – Condicionamento de leitura do *Encoder*

Fonte: O próprio Autor

na Figura 23, de modo que tal tempo é usado como parte da equação da velocidade (4.1).

Figura 23 – Observação das bordas



Fonte: O próprio Autor

$$V(t) = \omega \cdot R \quad (4.1)$$

$$\omega = \frac{\pi}{3 \cdot T} \quad (4.2)$$

$$V(t) = \frac{\pi \cdot R}{3 \cdot T} \quad (4.3)$$

Sendo:

- ω : Velocidade angular;
- R: Raio do acoplamento de hastes;
- T: Período entre dois pulsos.

Além disso, também foi implementado um filtro de média móvel, de modo a atenuar os ruídos de medição utilizando sempre uma média entre os últimos 15 valores de velocidade registrado, conforme descrito na seção 4.1.3.2 com o código mostrado no Anexo A.

4.1.3.2 Filtro de média móvel

O filtro de média móvel implementado é obtido calculando-se a média de quinze valores, sempre adicionando um novo valor ao conjunto e desconsiderando o mais antigo. Não é uma média de um conjunto isolado de valores. O filtro de média móvel é representado porpela equação (4.4).

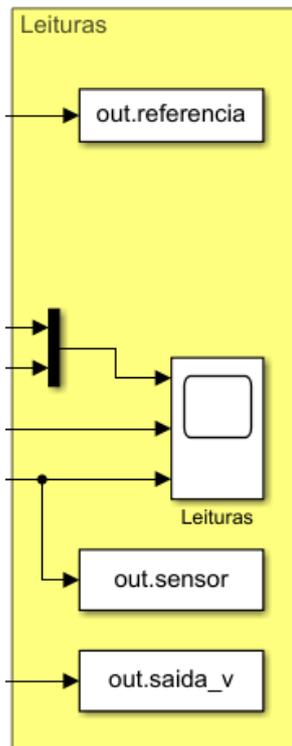
$$y[n] = \frac{1}{N+1} \cdot \sum_{k=0}^N x[n-k] \quad (4.4)$$

A inclusão do filtro o torna como parte da planta, podendo influenciar sua dinâmica, por ter sido implementando posteriormente à identificação do sistema.

4.1.4 Leituras

Os blocos *To workspace* também foram utilizados para a aquisição de dados, atuando como meio pelo qual é realizado o registro das grandezas observadas na execução do processo de acionamento e controle da planta, enviando os dados adquiridos para a *workspace* do MATLAB e criando novas variáveis.

Figura 24 – Leituras da planta



Fonte: O próprio Autor

Os dados observados são:

- Sinal de Controle;
- Sinal do sensor;
- Velocidade da esteira;
- Sinal de referência.

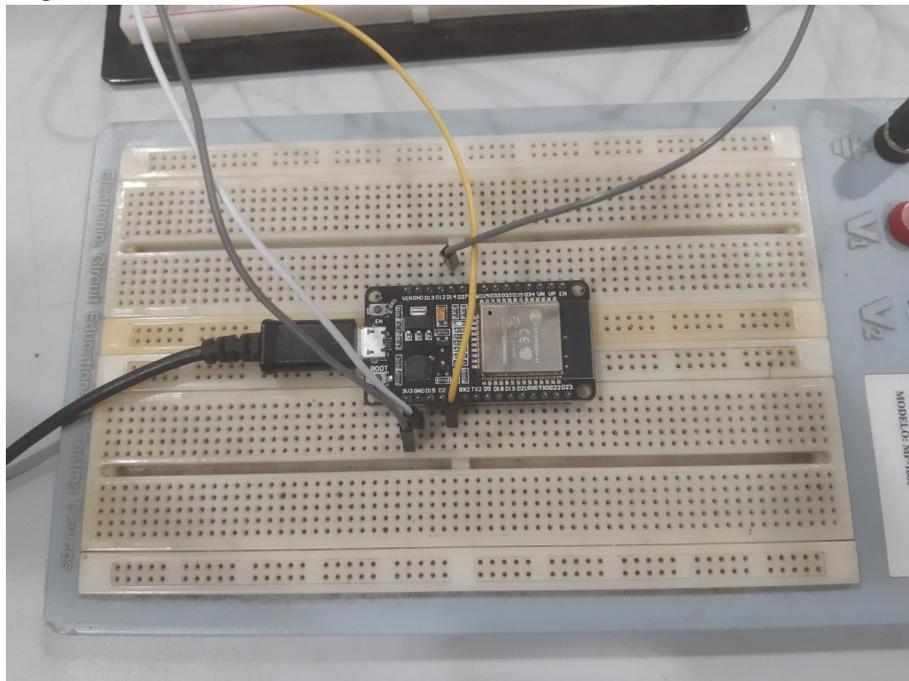
4.2 Acionamento

4.2.1 Microcontrolador

A ESP32 empregada como placa de aquisição de dados no sistema utilizou um único pino GPIO para acionamento da esteira. Tal pino foi definido com o uso do bloco "PWM" no Simulink.

O acionamento ocorre através da geração de um sinal de PWM pela placa, com amplitude de 3,3 V, que é enviado diretamente à placa de condicionamento do sistema, onde o sinal é tratado e posteriormente enviado ao inversor de frequência para o acionamento da esteira.

Figura 25 – Placa de condicionamento de sinal



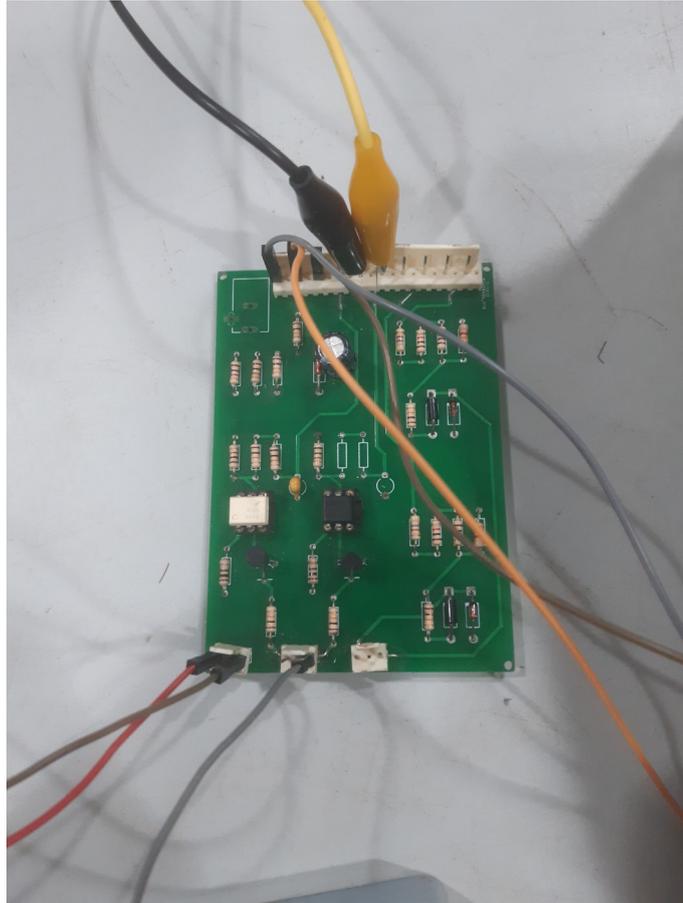
Fonte: O próprio Autor

4.2.2 Placa de Condicionamento de Sinal

Uma placa de condicionamento de sinal foi utilizada juntamente com a ESP32 de modo a transformar o sinal enviado pelo microcontrolador - que consiste em um sinal de PWM com amplitude de 3,3 V - de forma que o sinal na saída da placa passa a possuir uma amplitude de 10 V.

Entretanto, o sinal condicionado possui lógica invertida, de modo que o valor de *duty cycle* na entrada, gera um sinal de saída com valor complementar ao fornecido pela ESP32.

Figura 26 – Placa de condicionamento de sinal



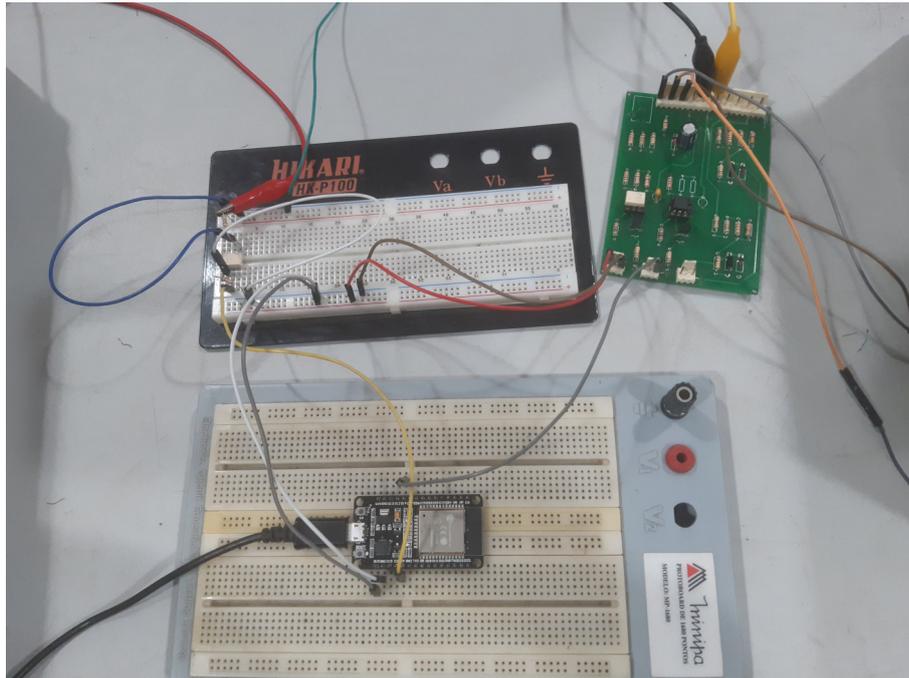
Fonte: O próprio Autor

A placa utilizada foi constantemente alimentada por uma fonte de tensão contínua com 10 V, responsável por alimentar o circuito condicionador.

4.2.3 Sistema Completo

A junção do sistema embarcado na ESP32 e o circuito de condicionamento de sinal, compõem juntamente com o inversor o sistema de acionamento da planta, operando na sequência observada no esquemático da Figura 4.

Figura 27 – Placa de condicionamento de sinal



Fonte: O próprio Autor

4.3 Sensoriamento

4.3.1 Encoder

Encoders são dispositivos capazes de converter um deslocamento linear ou angular em um trem de pulsos, que podem ser interpretados de maneira a nos fornecer a velocidade de deslocamento de um determinado objeto. A partir dessa premissa, foi desenvolvido um dispositivo para leitura das informações que podem ser fornecidas pelo sistema de esteiras, auxiliando a determinação da velocidade em que o sistema estiver operando. (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2020).

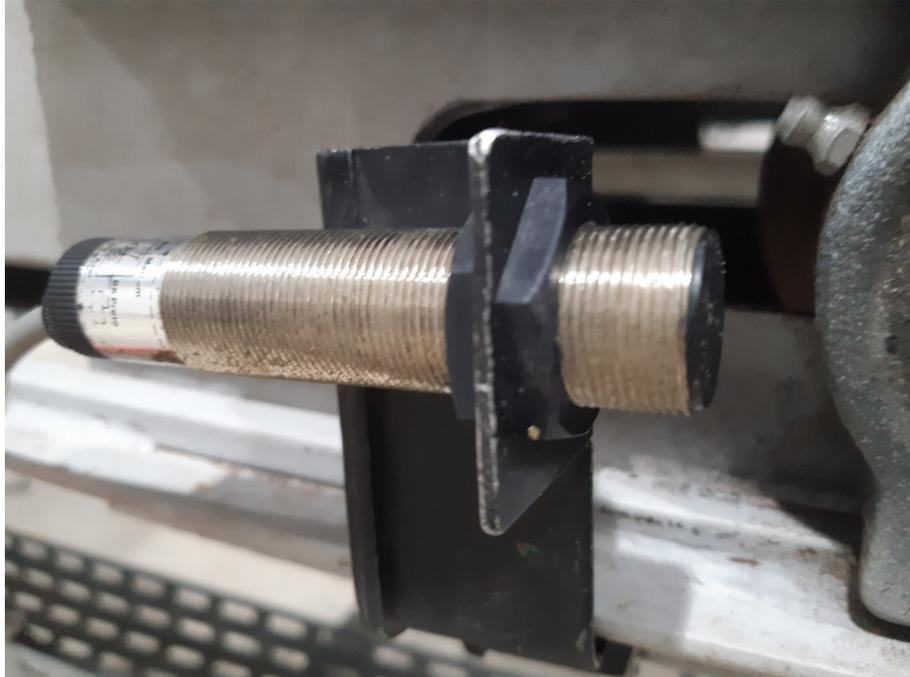
4.3.2 Sensor Indutivo

Um sensor indutivo é um dispositivo de proximidade capaz de detectar a presença de objetos metálicos. O sensor utiliza um circuito oscilador LC, um chaveador e um comparador de sinal. A bobina do circuito oscilador gera um campo eletromagnético à face do sensor. Caso um objeto metálico se aproxime do sensor, correntes de Foucault são induzidas. As perdas tiram energia do oscilador. Assim, o comparador de sinal é capaz de gerar um sinal a ser emitido (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2020).

O sensor utilizado foi o Telemecanique XSA-HO5723H23 que possui lógica invertida

e é apresentado na Figura 28. Emitindo um sinal de tensão igual ao que o alimenta, que passa a ser um sinal nulo quando próximo de algum objeto metálico.

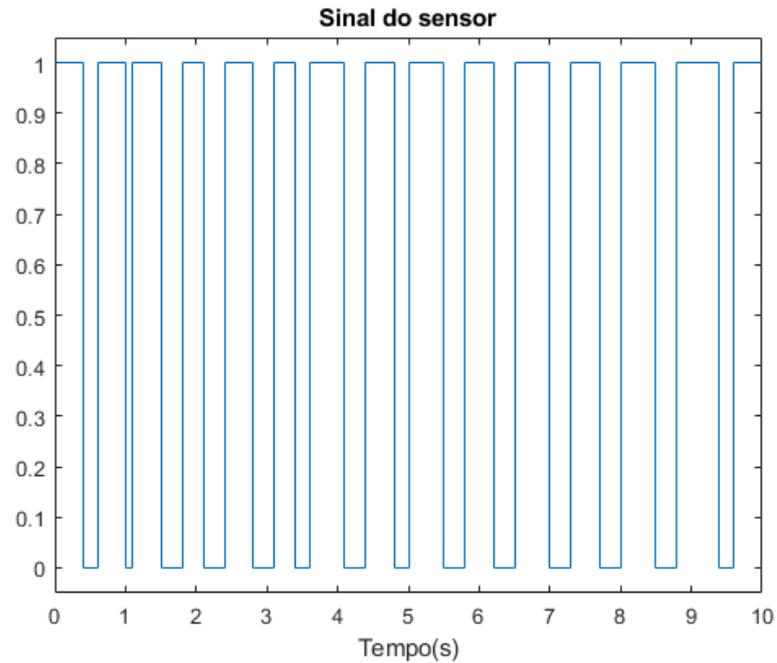
Figura 28 – Sensor Indutivo Telemecanique



Fonte: O próprio Autor

A leitura do sensor ocorre como apresentado na Figura 29. Tal sinal é trabalhado pelo condicionamento de leitura apresentado na seção 4.1.3 de modo a prepará-lo para uso no cálculo da velocidade do sistema e deixá-lo como um sinal de natureza lógica, variando apenas entre os valores 0 e 1.

Figura 29 – Leitura do Sensor Indutivo



Fonte: O próprio Autor

4.3.3 Hastes metálicas

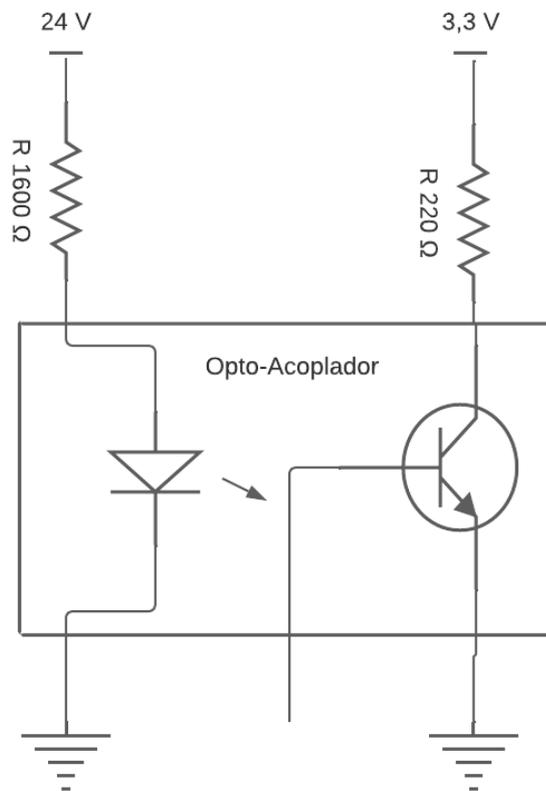
Foram construídas 3 hastes metálicas utilizando braçadeiras de metal, juntamente com pequenas partes de folhas de alumínio, que assumem a função de objeto metálico a ser detectado pelo sensor indutivo, de maneira a proporcionar o funcionamento do encoder construído que observa um objeto metálico a cada 60° de separação entre as extremidades de cada haste.

4.3.4 Circuito de Leitura

A leitura dos pulsos do sensor indutivo se deu apenas com a redução da tensão do sinal enviado de 24 V na qual o sensor opera para os 3,3 V suportados pela ESP32, sendo assim foi utilizado um circuito composto por resistores e um opto-acoplador como no esquemático apresentado na Figura 30

Quando o opto-acoplador for energizado, excitará a porta do transistor, de maneira que ele permitirá a passagem de corrente, que vai permitir a leitura do sensor pela ESP32.

Figura 30 – Circuito de leitura do Encoder



Fonte: O próprio Autor

4.4 Dispositivo implementado

Um sensor indutivo foi utilizado juntamente com um conjunto de três hastes metálicas para a criação de um mecanismo semelhante a um Encoder, que foi contruído da seguinte maneira:

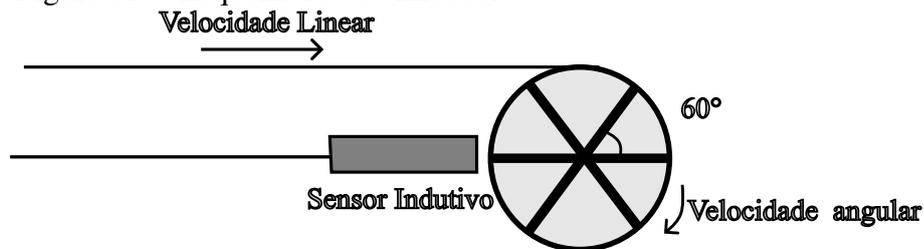
Três hastes foram fixadas a um dos eixos da esteira, com espaçamento de 60° entre elas, como demonstrado no esquemático da Figura 31, estando próximas ao sensor, como é

possível observar na Figura 32. Assim, a cada giro de 60° do eixo da esteira o sensor muda de nível baixo para nível alto. Assim, tomando-se o tempo entre dois pulsos de subida consecutivos pode-se calcular a velocidade angular do cilindro que movimenta a lona da esteira. Este procedimento está descrito na seção 4.1.3.1. O cálculo da velocidade linear é realizado pelo código escrito na MATLAB Function 1, de modo a tornar possível o conhecimento da velocidade na qual a esteira estava operando, a partir da Eq.(4.5).

$$v = \omega \cdot r, \quad (4.5)$$

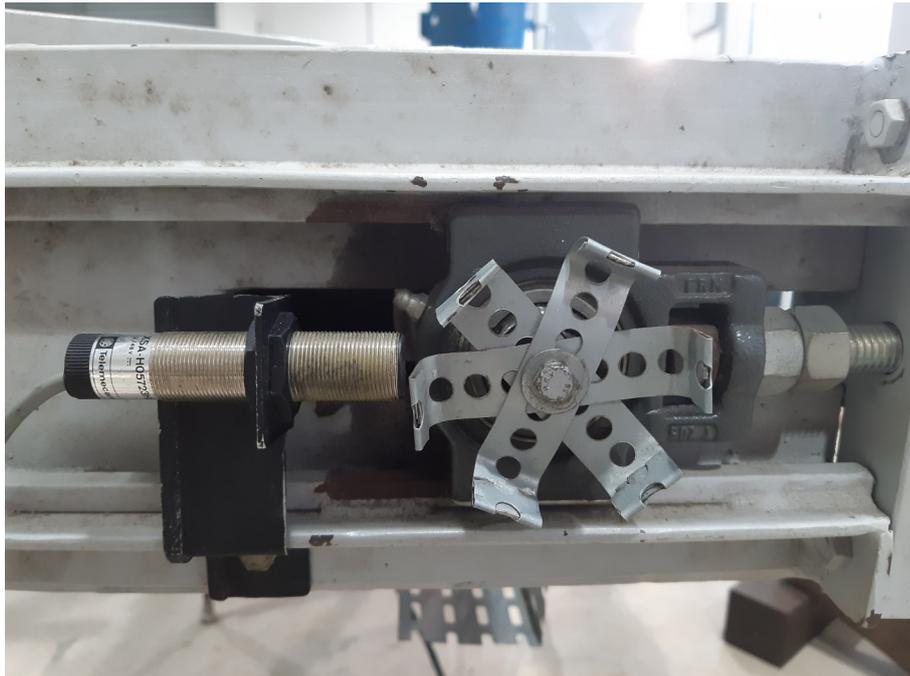
sendo v a velocidade linear da lona, r o raio do cilindro da esteira e ω a velocidade angular calculada cuja implementação foi descrita acima. Desta forma, o dispositivo se assemelha a um encoder e foi construído apenas utilizando equipamentos presentes no laboratório.

Figura 31 – Esquemático do Encoder



Fonte: O próprio Autor

Figura 32 – Encoder implementado

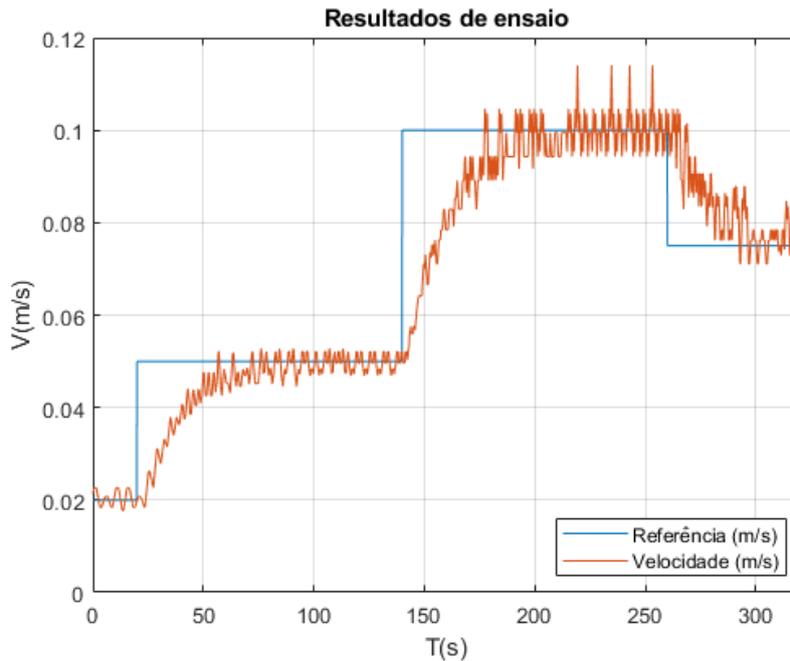


Fonte: O próprio Autor

4.5 Resultados

Foi realizado um ensaio em bancada, sendo o sinal de entrada do sistema (referência), a onda gerada pelo *Signal builder*, conforme apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Resultados de ensaio



Fonte: O próprio Autor

Os valores de velocidade da saída do sistema foram armazenados com o auxílio de blocos do Simulink como apresentado na seção 4.1.4

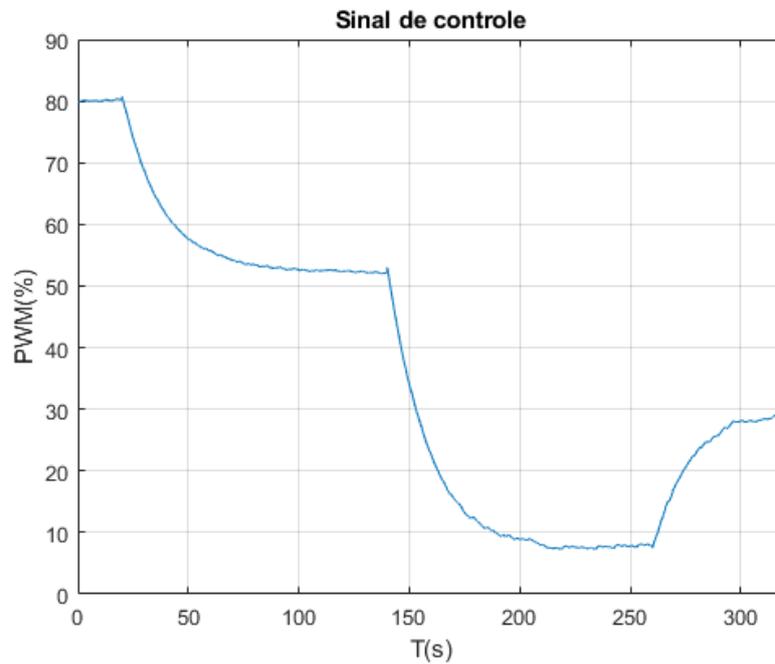
A partir dos resultados obtidos na Figura 33, pudemos concluir que a resposta do sistema atendeu à dinâmica desejada, seguindo a referência determinada na entrada do sistema sem a presença de *Overshoot*. Tal resposta também demonstra a atuação acertiva do controlador implementado, que atuou com êxito no sistema, permitindo seu funcionamento adequado e atuando suavemente no controle da planta.

Entretanto, o resultado encontrado demonstra lentidão quando comparada a simulação apresentada na Figura 15, fato que pode ser resultado da influência do filtro de média móvel implementado, que faz parte da planta.

4.5.1 Sinal de controle

O sinal de controle do sistema consiste no PWM enviado pelo controlador, que pode variar entre 0 e 100%, de modo a alterar a frequência do inversor responsável pelo acionamento do motor da esteira entre 0 e 60 Hz. O sinal obtido no ensaio realizado é apresentado na Figura 34.

Figura 34 – Sinal de controle do sistema



Fonte: O próprio Autor

É possível perceber que os ruídos do sinal de saída no sistema interferem de forma praticamente irrisória no sinal de controle, deste modo, é possível concluir que os ruídos observados podem ser ruídos de medição, se caracterizando pela média nula, podendo serem classificados como ruído branco. Além disso, a pouca influência do ruído percebido nos resultados apresentados na Figura 33 sobre o sinal de controle também é capaz de indicar indiretamente a robustez do controlador projetado.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A modelagem do sistema foi realizada de forma analítica, utilizando o Teorema do Valor Final e então validada efetivamente através da experimentação prática do modelo construído, permitindo por exemplo a observação de divergências que ocorreram entre o modelo projetado e os resultados obtidos, que podem sofrer influência de diversos elementos, como imperfeições no *encoder desenvolvido*, bem como de ruídos produzidos pelos equipamentos usados, como problemas de comunicação devido a implementação de alguns circuitos em *protoboard*.

Além disso, foi possível projetar um controlador do tipo PI, que garantiu o seguimento de referência, atendendo o principal critério de robustez observado, permitindo que o sistema tenha uma margem de estabilidade garantida, de maneira a contribuir com a segurança da planta, por exemplo.

Trabalhos futuros que podem ser gerados a partir deste. Um deles, por exemplo, é o estudo de controladores adaptativos ou até mesmo não-lineares à planta, visto que a operação de uma esteira industrial pode ocorrer em diferentes contextos, estando sujeita ao surgimento de não-linearidades no seu funcionamento com a variação de carga, por exemplo, bem como também mudanças no atuador. Além disso, o sistema em operação efetivamente permite a implementação de seu acionamento remoto, a partir da rede de internet do laboratório, com o uso da placa de desenvolvimento ESP32, possibilitando a realização de estudos voltados para IoT. Por fim, outra possibilidade de trabalho seria a criação de uma Interface de programação de aplicações (API na sigla em inglês) para o sistema embarcado na ESP32 a ser usado para fins didáticos nas disciplinas de laboratório de Controle de Sistemas Dinâmicos e também de Controle e Automação Industrial, de modo que o usuário possa projetar seu próprio controlador e implementá-lo efetivamente, de modo a fortalecer o aprendizado dos usuários.

Visto tudo isso, pode-se afirmar que os objetivos do trabalho foram alcançados de forma satisfatória.

REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, L. A. **Introdução à Identificação de Sistemas. Técnicas Lineares e não Lineares Aplicadas a Sistemas. Teoria e Aplicação.** [S.l.: s.n.], 2015.
- BORTNOWSKI, P.; KRÓL, R.; NOWAK-SZPAK, A.; OZDOBA, M. A preliminary studies of the impact of a conveyor belt on the noise emission. **Sustainability**, MDPI AG, v. 14, n. 5, p. 2785, Feb 2022. ISSN 2071-1050. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/su14052785>>.
- COELHO, A. A. R.; COELHO, L. dos S. **Identificação de sistemas dinâmicos lineares.** [S.l.: s.n.], 2020.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Modernos.** [S.l.: s.n.], 2020.
- GUPTA, S. A. A.; WESTCOTT, J. **Industrial Automation And Robotics.** [S. l.]: Mercury Learning and Information, 2016. v. 1.
- HE, D.; PANG, Y.; LODEWIJKS, G. Green operations of belt conveyors by means of speed control. **Applied Energy**, Elsevier, v. 188, p. 330–341, 2017.
- HE, D.; PANG, Y.; LODEWIJKS, G.; LIU, X. Determination of acceleration for belt conveyor speed control in transient operation. **International Journal of Engineering and Technology**, Science Publishing Corporation Inc, v. 8, n. 3, p. 206–211, 2016.
- HE, D.; PANG, Y.; LODEWIJKS, G.; LIU, X. Healthy speed control of belt conveyors on conveying bulk materials. **Powder technology**, Elsevier, v. 327, p. 408–419, 2018.
- MANESIS, S.; NIKOLAKOPOULOS, G. **Introduction to Industrial Automation.** [S.l.: s.n.], 2018.
- MAYA, P. A.; LEONARDI, F. **Controle Essencial.** [S.l.: s.n.], 2010. v. 1.
- PHILLIPS, C. L.; NAGLE, H. T.; CHAKRABORTTY, A. **Digital control system analysis and design.** [S.l.]: Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, 1990. v. 2.
- THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. de. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações.** [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2020.
- ZHANG, S.; XIA, X. Modeling and energy efficiency optimization of belt conveyors. **Applied energy**, Elsevier, v. 88, n. 9, p. 3061–3071, 2011.

APÊNDICE A – SIMULINK SUPORT PARA ARDUINO

Foi utilizado o *Add-Ons* do MATLAB *Simulink Support Package for Arduino Hardware*, que permite a integração do Simulink com as placas:

- Arduino Uno
- Arduino Mega 2560
- Arduino Mega ADK
- Arduino Leonardo
- Arduino Micro
- Arduino Robot Motor
- Arduino Robot Control
- Arduino Due Program
- MKR 1000
- MKRZero
- MKR WiFi 1010
- Nano 33 Iot
- Nano 33 BLE Sense
- ESP32 Wroom

Figura 35 – Add-On Arduino Package

The screenshot shows the MATLAB Add-Ons gallery page for the 'Simulink Support Package for Arduino Hardware'. The page header includes 'R2022b now available' and a search bar. The package title is 'Simulink Support Package for Arduino Hardware' by MathWorks Simulink Team (STAFF). It features a 'Hardware Support' icon and buttons for 'Learn More' and 'Install'. The page includes a 'Contents' section with a list of topics, a 'Requires' section indicating it needs Simulink, 'MATLAB Release Compatibility' (Created with R2014a, Compatible with R2014a to R2022b), and 'Platform Compatibility' (Windows, macOS, Linux). There are also 'Reviews (139)' and 'Discussions (228)' tabs.

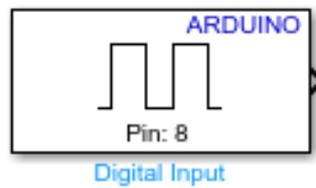
Fonte: MATLAB Add-Ons

O bloco "Digital Input" foi utilizado para a leitura do sensor indutivo. O bloco recebe

como parâmetros:

1. Número do pino digital para entrada
2. Modo do pino
3. Tempo de amostragem

Figura 36 – Digital Input block

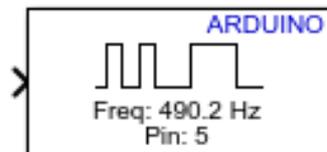


Fonte: MATLAB Add-Ons

O bloco "PWM" foi utilizado para emissão do sinal de controle do sistema em direção ao inversor de frequência que aciona a esteira. O bloco recebe como parâmetros:

1. Número do pino digital de saída
2. Frequência do sinal

Figura 37 – PWM block



Fonte: MATLAB Add-Ons

Além disso, o bloco aceita como entrada valores entre 0 e 255. A entrada controla o valor de *duty cycle* da onda quadrada emitida. Um valor de entrada 0 gera um *duty cycle* de 0% e uma entrada de 255 produz um *duty cycle* de 100%. Sendo assim, foi necessário a inclusão de um ganho equivalente a $\frac{255}{100}$ antes da entrada do bloco, para normalização do sinal enviado ao bloco para acionamento adequado do sistema.

ANEXO A – CÓDIGOS DESENVOLVIDOS**Código-fonte 1 – MATLAB Function para cálculo de velocidade**

```
1 function vel = fcn(borda, relógio)
2
3 %definicão das variáveis persistentes
4 persistent v_linear_f
5 if isempty(v_linear_f)
6     v_linear_f=0;
7 end
8
9 persistent vaux
10 if isempty(vaux)
11     vaux=0;
12 end
13
14 persistent aux
15 if isempty(aux)
16     aux=0;
17 end
18
19 persistent va
20 if isempty(va)
21     va=0;
22 end
23
24 persistent vb
25 if isempty(vb)
26     vb=0;
27 end
28
29 persistent vc
```

```
30 if isempty(vc)
31     vc=0;
32 end
33
34 persistent vd
35 if isempty(vd)
36     vd=0;
37 end
38
39 persistent ve
40 if isempty(ve)
41     ve=0;
42 end
43
44 persistent vf
45 if isempty(vf)
46     vf=0;
47 end
48
49 persistent vg
50 if isempty(vg)
51     vg=0;
52 end
53
54 persistent vh
55 if isempty(vh)
56     vh=0;
57 end
58
59 persistent vi
60 if isempty(vi)
61     vi=0;
```

```
62 end
63
64 persistent vj
65 if isempty(vj)
66     vj=0;
67 end
68
69 persistent vk
70 if isempty(vk)
71     vk=0;
72 end
73
74 persistent vl
75 if isempty(vl)
76     vl=0;
77 end
78
79 persistent vm
80 if isempty(vm)
81     vm=0;
82 end
83
84 persistent vn
85 if isempty(vn)
86     vn=0;
87 end
88
89 persistent vo
90 if isempty(vo)
91     vo=0;
92 end
93
```

```
94 persistent vp
95 if isempty(vp)
96     vp=0;
97 end
98
99 persistent t_ant v_linear
100 if isempty(t_ant)
101     t_ant = 0;
102     v_linear = 0;
103 end
104
105 persistent vaf_ant
106 if isempty(vaf_ant)
107     vaf_ant=0;
108 end
109
110 %calculo da velocidade
111 if borda > 0
112     delta_t = relógio-t_ant;
113
114     v_linear = (pi*0.0475)/(3*delta_t)
115
116     v_ant = v_linear
117
118     t_ant=relógio;
119 else
120     v_linear = v_linear
121 end
122
123
124 vp=vo;
125 vo=vn;
```

```
126 vn=vm;
127 vm=vl;
128 vl=vk;
129 vk=vj;
130 vj=vi;
131 vi=vh;
132 vh=vg;
133 vg=vf;
134 vf=ve;
135 ve=vd;
136 vd=vc;
137 vc=vb;
138 vb=vaux;
139 vaux=v_linear
140 va=v_linear;
141
142 if vp~=0
143     v_linear_f = (va+vb+vc+vd+ve+vf+vg+vh+vi+vj+vk+vl+vm+vn
144                 +vo+vp)/16
145     va=v_linear_f
146
147
148 vel = va
```

Código-fonte 2 – MATLAB Function do Controlador

```
1 %definicao das variaveis persistentes:
2 persistent erro_ant
3 if isempty(erro_ant)
4     erro_ant=0;
5 end
6
7 persistent sinal_ant
8 if isempty(sinal_ant)
9     sinal_ant=0;
10 end
11
12 er = ref-vel
13
14 %controlador:
15 ctl = sinal_ant -22.2*erro_ant+17.76*er;
16
17 %atualizacoes:
18 sinal_ant = ctl;
19 erro_ant = ref-vel;
20
21 if ctl>100
22     ctl=100;
23 end
24 if ctl<0
25     ctl=0;
26 end
27
28 sinal_cont = ctl;
```

ANEXO B – CÓDIGO - SIMULAÇÃO DE RESPOSTA EM MALHA FECHADA

Código-fonte 3 – Simulação do sistema em malha fechada

```
1      %% Planta:
2
3  %continua:
4  num = 0.206931;
5  den = [0.8 1];
6  gc = tf(num,den)
7
8  figure;step(gc)
9  grid on
10 title('Resposta ao degrau de G(s)')
11 xlabel('t(s)')
12 ylabel('G(s)')
13
14
15 %discreta
16 gd = c2d(gc,Ts)
17
18 figure(2);step(gd)
19 grid on
20 title('Resposta ao degrau de G(z)')
21 xlabel('t(s)')
22 ylabel('G(z)')
23
24 figure(3);rlocus(gd)
25 grid on
26
27 %% Controlador:
28
29 numc = 22.2*[1 -0.8];
```

```
30 denc = [1 -1];
31 c = tf(numc,denc,Ts)
32
33 figure(4);
34 rlocus(c*gd)
35 grid on
36
37 w = [0.3:0.01:50];
38 figure(5);
39 nyquist(w,c*gd)
40 grid on
41 %% Plot
42 f = feedback(c*gd,1);
43 tp = [0:0.1:30];
44 y = lsim(f,0.5*ones(1,length(tp)),tp)
45
46 figure(6);
47 plot(tp,y)
48 grid on
49 title('Resposta do Sistema G(z) controlado')
50 xlabel('t(s)')
51 ylabel('Velocidade (m/s)')
```