



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Mariana Bagni

Projeto e Implementação de um Protótipo Educativo de Esteira Industrial para Análise de Estratégias de Controle

Campinas

2024



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Mariana Bagni

Projeto e Implementação de um Protótipo Educacional de Esteira Industrial para Análise de Estratégias de Controle

Trabalho de Fim de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Matheus Souza

Este exemplar corresponde à versão final da monografia defendida pela aluna Mariana Bagni, e orientada pelo Prof. Dr. Matheus Souza.

Campinas

2024

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

B146p Bagni, Mariana, 2001-
Projeto e implementação de um protótipo educacional de esteira industrial para análise de estratégias de controle / Mariana Bagni. – Campinas, SP : [s.n.], 2024.

Orientador: Matheus Souza.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Teoria do controle. 2. Controladores PID. 3. Dispositivos eletromecânicos. 4. Projetos e construção. I. Souza, Matheus, 1990-. II. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações adicionais, complementares

Título em outro idioma: Design and implementation of an educational prototype of an industrial conveyor belt to analyze control strategies

Palavras-chave em inglês:

Control theory

PID controllers

Electromechanical devices

Design and construction

Titulação: Engenheira Eletricista

Data de entrega do trabalho definitivo: 21-06-2024

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Regina e Marcos.

Agradecimentos

Esta monografia não seria possível sem a contribuição de algumas pessoas, as quais presto minha mais sincera gratidão.

Agradeço, antes de tudo, à minha mãe Regina e ao meu pai Marcos, os quais nunca mediram esforço algum para me proporcionar a melhor caminhada que eles conseguissem. Reconheço o apoio e incentivo aos estudos, e me acalenta todo carinho diário e confiança em mim e nas minhas escolhas.

Ao meu orientador prof. Dr. Matheus Souza, desde as aulas de Princípios de Controle até a verdadeira ajuda na concretização desse trabalho. Muito obrigada por compartilhar todo conhecimento conceitual necessário, dividir a animação frente os avanços do projeto, pela companhia e pelas risadas.

Minha gratidão especial à Gabryelle, que além de companheira de curso, é também de vida e de alma. Obrigada por todo suporte incondicional e pela dedicação de fazer cada dia, um dia ainda melhor. Minha gratidão profunda ao meu irmão Felipe, companheiro desde antes do nascimento, que compartilha comigo o gosto pela área e se alegra com minhas conquistas.

Aos meus queridos amigos do peito, que sempre se fizeram presente nessa caminhada acadêmica, de longe ou de perto, por todas as conversas e desabafos, todo auxílio nos estudos, todas refeições compartilhadas, todos momentos de descontração. Faz a vida valer mais a pena.

Minha imensa gratidão aos prof. Dr. Gregory Daniel da FEM e aos técnicos da Oficina do DSI, principalmente ao Maurício, pelo auxílio na construção da esteira. Ao prof. Dr. Leandro Manera, da FEEC, e ao Bruno Battistella, do SATE, que contribuíram de bom grado para esse projeto frente a adversidades eletrônicas. Por último e muito importante, ao Me. Victor Lima, que iluminou os caminhos de modo que esse projeto tomasse forma.

Por fim, deixo aqui meu genuíno agradecimento à FEEC e à UNICAMP e todos que garantem seu bom funcionamento. A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação.

Resumo

Este Trabalho de Fim de Curso tem como objetivo central projetar e construir um protótipo de uma esteira industrial em escala reduzida para implementar e validar diferentes estratégias de controle, visando aplicações de ensino didático. A metodologia adotada para desenvolver a abordagem proposta consiste na análise dos resultados dos ensaios propostos, dado o desenvolvimento e identificação da planta educacional emuladora de esteira transportadora de carga, com controlador Proporcional Integral (PI), escolhido com base na função de transferência levantada para o processo. Foram encontrados desafios tanto sob a ótica de projeto mecânico quanto sob a ótica de projeto eletroeletrônico, mas eles foram superados de forma a resultar em um protótipo funcional com espaço para melhorias.

Palavras-chaves: teoria do controle; controladores PID; dispositivos eletromecânicos; projetos e construção.

Abstract

The main aim of this Final Paper is to design and build a prototype of an industrial conveyor belt on a reduced scale in order to implement and validate different control strategies for teaching applications. The methodology adopted to develop the proposed approach consists of analyzing the results of the proposed tests, given the development and identification of the educational plant emulating a load conveyor belt, with a Proportional Integral (PI) controller, chosen based on the transfer function surveyed for the process. Challenges were encountered both from a mechanical design perspective and from an electro-electronic design perspective, but they were overcome in such a way as to result in a functional prototype with room for improvement.

Keywords: control theory; PID controllers; electromechanical devices; design and construction.

“A vida se organiza no movimento.”

Natália Sousa

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Motivação e Justificativa	14
1.1.1	Motivação Prática: Controle de Esteiras Transportadoras	14
1.1.2	Motivação Pedagógica: Plantas para Ensino de Controle	15
1.1.3	Abordagem e Justificativa	16
1.2	Objetivos	16
1.3	Organização da Monografia	17
2	Fundamentos	18
2.1	Elementos de Sinais e Sistemas	18
2.2	Sistemas de Controle, Resposta Dinâmica e Desempenho	19
2.3	Controladores e Implementação	21
2.3.1	Estratégias Clássicas de Controle	21
2.3.2	Implementação Digital	22
3	Construção e Montagem da Planta	25
3.1	Projeto Mecânico	25
3.2	Projeto Elétrico e Eletrônico	28
3.2.1	Motor	29
3.2.2	<i>Encoder</i>	30
3.2.3	Fonte	31
3.2.4	Microcontrolador	32
3.3	Integração Eletromecânica e Funcionamento	32
4	Projeto e Implementação do Controlador	38
4.1	Identificação da Planta	38
4.2	Projeto e Implementação do Controlador PI	39
4.3	Aquisição e Tratamento dos Dados	40
5	Ensaio	41
5.1	Malha Aberta	41
5.2	Malha Fechada	41
6	Conclusões e Comentários Finais	46
6.1	Limitações e Melhorias Futuras	46
6.2	Viabilidade para Uso Didático	47
A	Códigos Desenvolvidos	48
A.1	Controle em Malha Aberta	48
A.2	Controle em Malha Fechada	50

A.3 Aquisição e Tratamento de Dados	54
Referências	57

1 Introdução

Um sistema de controle é um conjunto de componentes e dispositivos projetados a fim de produzir uma resposta desejada a um sistema dinâmico de interesse, tipicamente chamado de planta. A área da Engenharia que estuda sistemas de controle integra elementos teóricos das áreas de sistemas dinâmicos e da realimentação com elementos de física das áreas de mecânica, de eletromagnetismo, de termodinâmica e da teoria de comunicações para formular problemas de projeto de controle bem postos. As aplicações típicas no setor industrial envolvem o controle de sistemas eletromecânicos e fluidotérmicos (DORF, 1998).

Em especial, sistemas de controle retroalimentados representam uma parte essencial da engenharia moderna, permeando diversos campos da vida cotidiana e evoluíram significativamente ao longo da história. As primeiras aplicações de controle com realimentação surgiram na Grécia, entre 300 e 1 a.C. (MAYR, 1970), com o desenvolvimento do mecanismo regulador de boia, usado no relógio d'água, lampião de óleo e, posteriormente, citado como forma de mecanismo de nível de água no livro *Pneumatica* (DORF, 1998), durante o primeiro século depois de Cristo. É usado ainda hoje, conhecido como válvula flutuante, em reservatório de água do vaso sanitário, por exemplo (FRANKLIN J. DAVID POWELL, 2010 (1986)). Com o passar dos anos, com o advento da Revolução Industrial e da automação, houve um avanço significativo nessa área, com o desenvolvimento de métodos mais sofisticados para controlar máquinas e processos industriais, tornando-se complexas redes de controle. Hoje, encontramos sistemas de controle em diversas aplicações, desde os controles de temperatura em aparelhos domésticos até os sistemas de navegação de carros e aeronaves. A capacidade de controlar com precisão o comportamento de sistemas físicos é fundamental para garantir eficiência, segurança e desempenho otimizado em uma ampla gama de contextos, visando o benefício da sociedade.

1.1 Motivação e Justificativa

1.1.1 Motivação Prática: Controle de Esteiras Transportadoras

A principal motivação prática deste trabalho é o controle de esteiras industriais, como ilustrado na Figura 1.1. Esteiras são extremamente comuns atualmente. Intrinsecamente ligadas à ideia de movimento, seu princípio de funcionamento é simples: fluxo contínuo de operação, que requer uma correia sem fim feita, tipicamente, de material



Figura 1.1 – Correia transportadora de lona para aplicações industriais. (EVOLUTION, 2024).

flexível. Estes equipamentos estão presentes em todo o mundo em uma ampla gama de operações, seja como transportadoras de materiais dos mais diversos tipos e tamanhos, dentro de indústrias, supermercados, aeroportos ou em locais de difícil acesso, seja como meio de transporte de pessoas, em *shoppings centers* ou corredores extensos, ou ainda como máquina ergonômica para prática de exercício físico. No âmbito industrial, que é o foco do presente trabalho, é fato que o uso de esteiras transportadoras aumentou muito a produtividade e teve um grande impacto no desenvolvimento econômico. Embora a tecnologia tenha melhorado com o passar dos anos, os princípios operacionais fundamentais dos transportadores de correia implementados no final do século XIX não mudaram (ZRNIĆ *et al.*, 2024).

1.1.2 Motivação Pedagógica: Plantas para Ensino de Controle

Duas linhas de pensamento estão se tornando cada vez mais importantes na prática do ensino superior. A primeira deriva da teoria da aprendizagem construtivista, o qual compreende uma família de teorias, mas todas têm em comum a centralidade das atividades dos estudantes na criação de significado. A segunda, por sua vez, advém da literatura sobre *design instrucional* e enfatiza o alinhamento entre os objetivos de aprendizagem de um curso ou unidade e as estratégias de avaliação do desempenho dos estudantes (BIGGS, 1992). No nosso contexto, as Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia ((CNE), 2019) têm moldado o ensino de engenharia, incentivando a formação de estudantes mais autônomos e preparados para os desafios interdisciplinares que caracterizam o mundo contemporâneo. Destaca-se, portanto, a importância da interdisciplinaridade, promovendo a integração de conhecimentos de diversas áreas para resolver problemas complexos e a implementação de estratégias de aprendizagem ativa, como projetos práticos para aplicação dos conceitos. O chamado "alinhamento constru-

tivo" representa uma união das duas linhas e pode ser uma ferramenta fundamental para promover a aprendizagem significativa dos estudantes.

1.1.3 Abordagem e Justificativa

Este trabalho se concentra justamente na aplicação prática dos conhecimentos de estratégias de controle simples em uma esteira industrial em escala reduzida. A necessidade de controlar o fluxo de massa constantemente para uma carga tipicamente batelada, em um sistema naturalmente perturbado, representa um desafio que pode demandar uma abordagem multifacetada. Além de contribuir para o presente Trabalho de Conclusão de Curso, este projeto tem o potencial de gerar benefícios significativos em termos de sua aplicabilidade didática e potenciais usos em pesquisas acadêmicas mais avançadas (SANTOS, 2022). O projeto em questão não apenas serve como uma ferramenta prática para demonstrar os conceitos teóricos de controle em um contexto industrial, mas também pode ser adaptado para explorar cenários mais complexos e desafiadores, estimulando o desenvolvimento contínuo de novas pesquisas.

1.2 Objetivos

Este Trabalho de Fim de Curso possui, como objetivo central, projetar e construir um protótipo de uma esteira industrial em escala reduzida para implementar e validar diferentes estratégias de controle, visando aplicações de ensino didático. Com este fim, os objetivos específicos deste plano de trabalho, de maneira resumida, apresentam-se a seguir:

1. Estudo e domínio do referencial teórico sobre teoria e estratégias de Controle.
2. Projeto e manufatura de uma esteira industrial em escala reduzida.
3. Definição e implementação da eletrônica embarcada necessária para o funcionamento da esteira, de forma eficiente e econômica.
4. Identificação e levantamento do modelo dinâmico da planta eletromecânica composta, primordialmente, de esteira e motor.
5. Implementação, validação e testes das estratégias de controle simples no protótipo real da esteira industrial.
6. Levantamento de possibilidades para uso didático.
7. Documentação das etapas do projeto e resultados obtidos.

8. Análise de resultados, comparações, conclusão e consequências da implementação obtida.
9. Levantamento de limitações e possíveis melhorias para a planta.

1.3 Organização da Monografia

O restante deste texto está organizado da seguinte forma. No Capítulo 2, apresentamos os fundamentos teóricos utilizados no desenvolvimento do texto. O Capítulo 3 apresenta as principais escolhas de projeto adotadas na montagem da esteira e o Capítulo 4 expõe as principais considerações de projeto do controlador. No Capítulo 5, ilustramos alguns ensaios realizados com o sistema e fechamos o texto com as conclusões e comentários finais no Capítulo 6. Códigos são incluídos no Apêndice.

2 Fundamentos

2.1 Elementos de Sinais e Sistemas

Um **signal** é uma função f que associa cada *instante de tempo* em um conjunto \mathbb{T} em um valor em \mathbb{R}^n . O *conjunto de instantes de tempo* \mathbb{T} pode ser **contínuo** (tipicamente \mathbb{R}_+ ou **discreto** (tipicamente \mathbb{N}). Sinais tipicamente representam grandezas físicas, econômicas, biológicas ou demográficas de interesse e que variam com o tempo (DORF, 1998; FRANKLIN J. DAVID POWELL, 2010 (1986)).

Um sistema dinâmico \mathcal{S} pode ser visto como uma transformação que associa um sinal de entrada u em um espaço de sinais admissíveis \mathbb{U} em um sinal de saída $y = \mathcal{S}[u]$. Nosso foco neste trabalho está nos sistemas dinâmicos lineares e invariantes com o tempo (LTI). Sistemas lineares são aqueles para os quais vale o *princípio da sobreposição*.

$$\mathcal{S}[\alpha u + \beta v] = \alpha \mathcal{S}[u] + \beta \mathcal{S}[v], \quad \forall u, v \in \mathbb{U}, \forall \alpha, \beta \in \mathbb{R}. \quad (2.1)$$

Sistemas invariantes com o tempo não alteram o seu comportamento conforme o tempo passa; se uma ação for aplicada em $t_0 \in \mathbb{T}$ ou em $t_0 + \tau \in \mathbb{T}$, os efeitos serão os mesmos, apenas deslocados de τ . Isto significa que o operador \mathcal{S} comuta com o operador atraso no tempo (OPPENHEIM *et al.*, 1997).

Sistemas LTI de dimensão finita são tipicamente descritos por equações diferenciais ou a diferenças, dependendo se o tempo for contínuo ou discreto. Além disso, a relação entrada-saída neste tipo de sistema também pode ser expressa, em termos de transformada de Laplace ou transformada \mathcal{Z} , na forma de uma **função de transferência**, definida como

$$G(\xi) = \frac{\hat{y}(\xi)}{\hat{u}(\xi)}, \quad (2.2)$$

sendo $\xi = s$ no caso contínuo, $\xi = z$ no caso discreto e \hat{y} e \hat{u} as respectivas transformadas dos sinais de saída e de entrada. Com base na função de transferência, análises quantitativas e qualitativas sobre a estabilidade, a resposta transitória e a resposta em regime do sistema \mathcal{S} pode ser feita de forma sistemática (FRANKLIN J. DAVID POWELL, 2010 (1986); OGATA, 1997). Diagramas de blocos permitem uma abordagem intuitiva de sistemas dinâmicos complexos, compostos da interligação de diversos componentes, cada um representado por uma função de transferência (DORF, 1998).

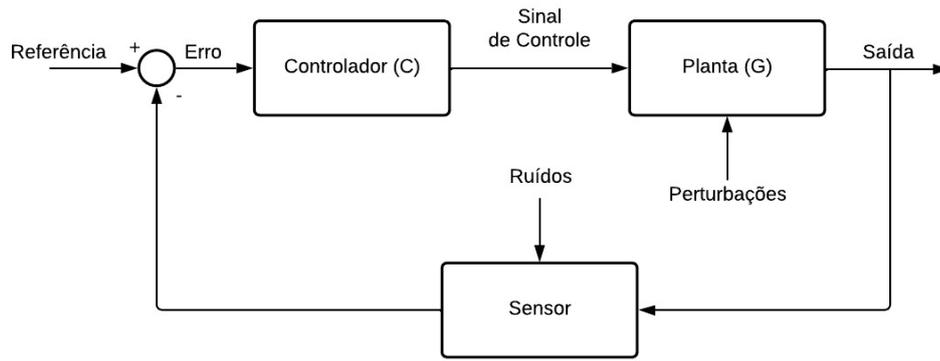


Figura 2.1 – Sistema de controle em malha fechada.

2.2 Sistemas de Controle, Resposta Dinâmica e Desempenho

Controle é o processo de fazer com que uma variável de um determinado sistema dinâmico, denominado planta, se aproxima o máximo possível de um dado sinal de referência (FRANKLIN J. DAVID POWELL, 2010 (1986)). Em diversas aplicações, esta referência é um sinal constante por partes e modela a regulação do sistema em torno de um ou mais pontos de operação. A planta normalmente é o sistema dinâmico composto de atuador, dispositivo que pode influenciar a variável controlada, e do processo, componente central em um sistema realimentado (DORF, 1998). A regulação da variável controlada em torno da referência deve ser **robusta** a possíveis perturbações e dinâmicas não-modeladas. Estratégias de controle por *malha fechada* processam o *erro de regulação*, definido como o erro entre a saída medida, que corresponde a uma estimativa da variável controlada obtida por meio de um **sensor**, e a referência, e o **realimentam** por meio do sinal de controle para compensar estes possíveis efeitos externos com o objetivo de restabelecer a condição de equilíbrio, em que os erros envolvidos são baixos. Este processamento fica sob responsabilidade do **controlador**. Esta interconexão de elementos está ilustrada como diagrama de blocos na Figura 2.1.

No nosso caso, o atuador é o motor, que recebe o sinal de controle, o processo é a esteira, cuja saída é a velocidade, e as perturbações são as cargas adicionadas. O sensor é o *encoder*, que fornece a saída medida. Esta estimativa de velocidade é subtraída da referência para gerar o sinal de erro de regulação, que é a entrada do controlador.

É importante ressaltar que a arquitetura de sistemas de controle baseada em realimentação não é única e permite diversas configurações, envolvendo malhas entrelaçadas e elementos de alimentação direta (*feedforward*) (FRANKLIN J. DAVID POWELL, 2010 (1986)). Existe ainda a estratégia de controle em *malha aberta*, que está exclusivamente baseada na atuação sobre a planta, sem levar em conta a medida da variável controlada ou usar qualquer tipo de realimentação. Esta estrutura, embora mais simples

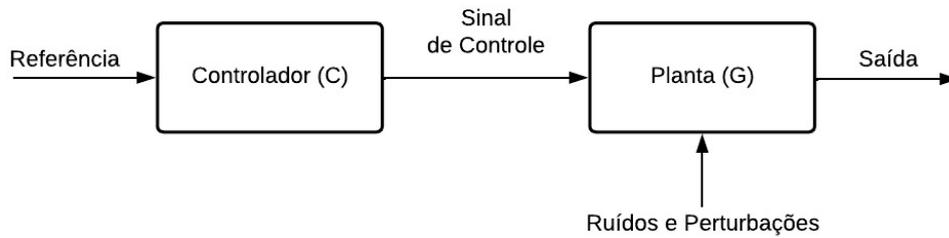


Figura 2.2 – Sistema de controle em malha aberta.

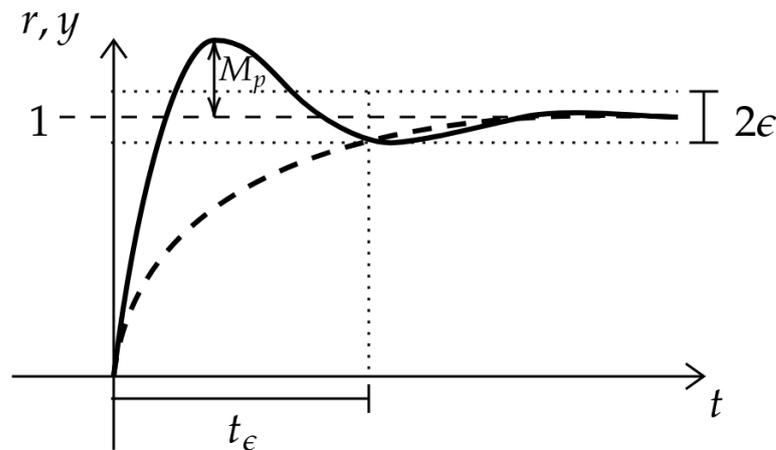


Figura 2.3 – Respostas de sistemas dinâmicos a entradas do tipo degrau unitário. As curvas contínua e tracejada representam as respostas de sistemas com características próximas a sistemas LTI de segunda e primeira ordens, respectivamente. Na figura, ϵ representa a precisão desejada, t_ϵ representa o tempo de estabilização em torno da entrada e M_p a sobrelevação máxima observada na resposta do sistema.

(ver Figura 2.2), apresenta sensibilidade elevada a perturbações e não é adequada na maioria dos cenários (FRANKLIN J. DAVID POWELL, 2010 (1986)).

Qualitativamente, a resposta de um sistema de controle realimentado a uma referência constante pode ser representada pelas curvas na Figura 2.3. A resposta de um sistema em malha fechada pode ser avaliada por uma série de índices de desempenho, que quantificam a qualidade do transitório e do regime permanente da resposta. Supondo-se que a resposta em regime permanente do sistema em análise para uma entrada do tipo degrau unitário seja 1, adotamos os seguintes indicadores clássicos da qualidade do transitório (FRANKLIN J. DAVID POWELL, 2010 (1986)):

- **Tempo de estabilização:** indicado por t_ϵ é o tempo que a resposta de um sistema leva para sair de 0 e se acomodar em torno de 1, dada uma tolerância $\epsilon > 0$. Isto significa que $|1 - y(t)| \leq \epsilon$ para todo $t \geq t_\epsilon$.

- **Sobressinal máximo:** ou sobrelevação máxima, indicado por M_p , é o excedente (relativo) da resposta com relação ao valor em regime.

Para o regime permanente, podemos utilizar o **erro de regulação** como o principal indicador de qualidade. Este erro é igual à diferença entre a referência e o valor final fornecido pela resposta da planta.

Os critérios apontados acima podem ser facilmente medidos e estimados a partir da resposta temporal do sistema em análise. Além disso, conhecida a sua função de transferência, estes indicadores também podem ser estimados a partir dos polos da função de transferência utilizando-se aproximações clássicas (FRANKLIN J. DAVID POWELL, 2010 (1986)). Finalmente, cabe ressaltar que outros critérios podem ser adotados para avaliar a qualidade de um sistema de controle. Por exemplo, critérios que envolvem a *integral do erro absoluto* (IAE) ou ainda a *integral do erro quadrático* (ISE) também são escolhas comuns que podem ser adotadas na validação de sistemas de controle em aplicações práticas (DORF, 1998).

2.3 Controladores e Implementação

A fim de projetar um controlador para atingir os objetivos estabelecidos na seção anterior, o primeiro passo a ser adotado é escolher uma estrutura particular para o controlador, que então deve ser projetado. Cada estrutura ou estratégia de controle tem suas particularidades, aplicabilidades, custos, vantagens e dificuldades de implementação.

2.3.1 Estratégias Clássicas de Controle

Uma das estratégias de controle em malha fechada mais simples é a estratégia liga e desliga, também conhecido como *on-off*. Nesta estratégia, o sinal de controle assume apenas dois valores: 0 e 100%, “ligando” e “desligando” o atuador dependendo do valor de referência a ser seguido. Esta estratégia é adequada para sistemas com pouca sensibilidade e com pouca variação no ponto de operação a ser seguido.

Outra lei de controle especialmente simples é a lei **proporcional** ao erro medido. Neste caso, o sinal de controle u é da forma

$$u(t) = k_p e(t),$$

sendo e o erro de regulação. Esta regra de realimentação ajusta o sinal de controle de forma proporcional ao erro medido em cada instante, proporcionando uma resposta rápida a variações na saída medida, mas sem eliminar, tipicamente, o erro de regulação.

Para melhorar a capacidade de eliminação do erro de regulação, controladores da família PID, que combinam ações proporcionais ao erro, à sua integral e à sua derivada, foram desenvolvidos e são adotados na grande maioria das aplicações industriais (ASTROM, 1995; FRANKLIN J. DAVID POWELL, 2010 (1986)). A lei de controle neste caso é dada por

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \dot{e}(t),$$

incluindo o termo derivativo, de caráter antecipatório a variações do erro, e o termo integral, de caráter cumulativo e que elimina erros em regime. O projeto de PIDs se resume, em linhas gerais, a projetar os três ganhos indicados na equação acima, o que é uma tarefa simples para projetistas nas indústrias, principalmente quando heurísticas usuais são adotadas. Esta versatilidade e facilidade de uso tornou o PID (VILANOVA, 2012) um dos controladores mais frequentes na indústria até hoje. Neste trabalho, implementaremos controladores do tipo PI, em que o ganho derivativo, k_d , é nulo.

2.3.2 Implementação Digital

Atualmente, sistemas de controle são tipicamente implementados por meio de sistemas digitais. As principais vantagens do controle digital com relação ao controle analógico são a flexibilidade de alteração e atualização do controlador e a precisão oferecida por implementações digitais. De fato, *softwares* e rotinas de computação são facilmente alteráveis e adaptáveis sem grande esforço e possibilitam a implementação de algoritmos complexos de controle com precisão e robustez. Além disso, sistemas digitais são tipicamente menos suscetíveis a ruídos e interferências do que os sistemas analógicos (FADALI, 2013; FRANKLIN J. DAVID POWELL, 2010 (1986)).

Um sistema de controle digital tipicamente envolve os seguintes elementos:

- **Amostragem:** sinais analógicos são convertidos em sinais digitais por meio da sua amostragem em intervalos regulares de tempo.
- **Conversão A/D:** após amostrados, os sinais analógicos são quantizados em valores digitais para que possam ser processados por um microcontrolador.
- **Processamento digital:** o controlador aplica algoritmos para processar dados digitais e gerar sinais de controle.
- **Conversão D/A:** os sinais de controle digitais determinados pelo controlador devem ser transformados novamente em sinais analógicos para controlar sistemas físicos.

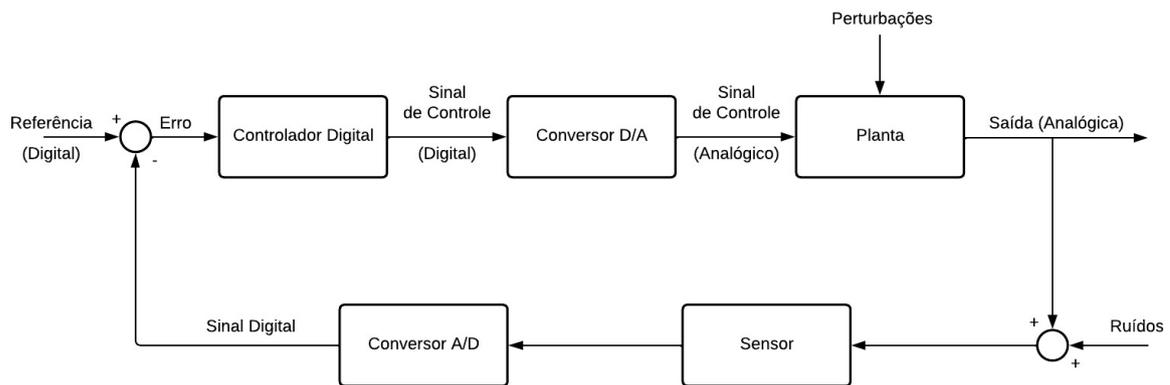


Figura 2.4 – Sistema de controle digital e seus principais componentes.

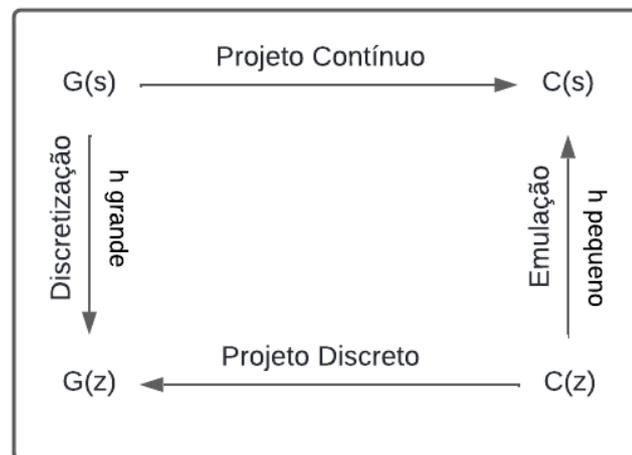


Figura 2.5 – Abordagem de projeto de controladores digitais.

- **Implementação do Controlador:** utilização de microcontroladores ou processadores de sinais digitais para executar os algoritmos projetados.

A estrutura discutida nos itens acima está ilustrada na Figura 2.4.

Controladores digitais podem ser projetados basicamente com duas abordagens. No **projeto discreto**, um modelo equivalente a tempo discreto é construído para modelar a dinâmica discretizada da planta e o controlador é projetado completamente no “domínio z ”. No **projeto por emulação**, o controlador é projetado no “domínio s ”, com técnicas de controle de sistemas a tempo contínuo e depois aproximado por uma função de transferência discreta (FRANKLIN J. DAVID POWELL, 2010 (1986)). O aumento da velocidade de processamento dos microcontroladores comerciais disponíveis incentivou a predominância da estratégia de emulação. A discussão das duas abordagens estão resumida no esquema da Figura 2.5

Para um controlador do tipo PI, a lei de controle é dada por

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad t \in \mathbb{R} +. \quad (2.3)$$

Tomando esta expressão para dois instantes de tempo distintos, $t, s \in \mathbb{R}_+$, temos

$$u(t) - u(s) = k_p (e(t) - e(s)) + k_i \int_s^t e(\tau) d\tau. \quad (2.4)$$

Podemos então tomar os valores $t = t_k$ e $s = t_{k-1}$, que representam dois instantes de amostragem seguidos e da forma $t_k = kh$, $k \in \mathbb{N}$, para algum $h > 0$ dado, e obter

$$u[k] = u[k-1] + k_p (e[k] - e[k-1]) + k_i h \cdot \frac{e[k] + e[k-1]}{2}, \quad (2.5)$$

em que denotamos $u[k] = u(t_k)$, $e[k] = e(t_k)$, $k \in \mathbb{N}$, e adotamos a aproximação para a integral

$$\int_{t_{k-1}}^{t_k} e(\tau) d\tau \approx h \cdot \frac{e[k] + e[k-1]}{2}, \quad \forall k \in \mathbb{N}. \quad (2.6)$$

A recorrência expressa em (2.5) não requer muitas operações aritméticas e pode ser implementada em microcontroladores de forma simples e eficiente (FADALI, 2013).

É certo que o campo que abrange controle continua a evoluir. Ao combinar estratégias de controle simples, como PID, com algumas mais sofisticadas como controle preditivo baseado em modelo, adaptativo ou aprendizado de máquina, haverá avanços cada vez mais significativos na eficiência e na capacidade de resposta dos sistemas de controle em um mundo em constante mudança (ASTROM, 1995).

3 Construção e Montagem da Planta

A metodologia adotada para desenvolver a abordagem proposta consiste no desenvolvimento de um protótipo para validação experimental das aplicações de controle. Portanto, nesta seção, aprofundar-nos-emos na planta base real construída, ou seja, a esteira industrial em escala reduzida, a fim de obter os parâmetros para o futuro controle de velocidade. O projeto foi dividido em partes, para um entendimento mais detalhado.

3.1 Projeto Mecânico

A ideia do projeto (ver Figura 3.1) é se assimilar a uma esteira transportadora industrial horizontal e retilínea, sem a necessidade de haver inclinação. Seu tamanho, quando comparado com as de nível industrial, que podem possuir dezenas de metros a depender da usabilidade e mapa fabril, é reduzido. Desconsiderou-se a altura ou movimentação da base da esteira, visto seu propósito principal de estudo.

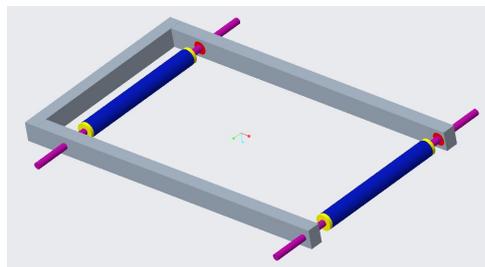


Figura 3.1 – Esboço inicial da esteira.

Em primeiro lugar, foram estabelecidas as dimensões da esteira, conforme Figura 3.2. Chegamos a um comprimento ideal de um metro, que seria suficiente para a realização de ensaios diversos e que permitiria um transporte facilitando até a sala de aula.



Figura 3.2 – Estrutura montada - apenas com perfil Bosch.

Ademais, começou-se a pesquisa por materiais presentes na construção de esteiras industriais e sua vasta variedade, a depender do tipo de material a ser transportado.

Como o interesse era haver um material uniforme por toda extensão da esteira, a busca foi direcionada para uma lona de borracha. Junto a isso, para a fixação dos dois eixos na estrutura, era necessário um mancal pedestal com rolamento em cada extremidade de cada eixo, somando-se quatro mancais. Ademais, em um primeiro momento, foi cotado roletes tanto simples, quanto com engrenagem - para acoplar o motor, a fim de usá-los nas extremidades da manta. Contudo, junto com os conhecimentos cedidos pelo Professor Doutor Gregory Daniel, do Departamento de Sistemas Integrados (DSI) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da UNICAMP, percebemos que, com o uso do rolete com engrenagem, o eixo não giraria junto. Apesar da vantagem de facilidade quanto a tração da lona, com apenas o rolo girando, o eixo parado dificultaria bastante a instalação do encoder.



Figura 3.3 – Eixo principal da esteira manufaturado com encaixe para acoplamento do encoder, do lado visível, e do motor no lado oposto.

Posto isso, foi definido que os dois eixos também seriam manufaturados na oficina mecânica do Departamento de Projeto Mecânico (DPM), com aço 1020 (ver Figura 3.3) . Dessa maneira, os tamanhos são garantidos, relacionados a ambos, largura da lona e diâmetro dos mancais, assim como os detalhes do perfil do eixo torneadas para encaixe do motor e encoder, em apenas um deles. Ainda na oficina, para estrutura da esteira em si foi utilizado um perfil estrutural tipo Bosch, de alumínio, nas medidas coerentes com o tamanho dado da lona utilizada. As fixações foram feitas majoritariamente com

parafusos sextavados M6 (6mm) ou Allen de mesmo tamanho com e sem cabeça, junto de arruelas, porcas e outros componentes auxiliares em formato de “L”, a fim de juntar os perfis. Para acoplar o motor, encoder e a caixa eletrônica, foram utilizados suportes adicionais, majoritariamente de alumínio, à estrutura (vide Figura 3.4).



Figura 3.4 – Estrutura montada - com adição dos eixos, mancais e estrutura para motor e encoder.

Após a fabricação dos eixos e corte das peças, houve a montagem da estrutura. No entanto, observou-se um problema, o qual consistia no desalinhamento dos eixos e, como os mancais são atrelados ao eixo através de uma borracha, com certa flexibilidade, consequentemente, dos mancais. Dessa maneira, apesar de haver um pequeno desnível de cerca de 2mm, no eixo, a lona ultrapassava o desnível até chegar na lateral do mancal, havendo um desgaste muito rápido, em que em menos de 10s era necessário desligar o motor, pois a lona já estaria consideravelmente desalinhada.

Analisando o problema, é possível perceber dois fatores que contribuem para o mal funcionamento. Em primeiro lugar, ao medir o tamanho da lona, temos um comprimento real de 115,5cm, ou seja, alguns centímetros a mais do que os 100cm esperados. Em segundo lugar, como o perfil Bosch utilizado foi o disponível na oficina, não havia como tracionar ainda mais a lona, pois havia um limite de comprimento para exercer esse tipo de esforço.

Como solução, analisamos as forças atuantes da base da esteira e, com os



Figura 3.5 – Solução aplicada na planta: anel no eixo e aparato a fim de aplicar uma força perpendicular, impedindo a movimentação da lona.

poucos centímetros presentes em cada extremidade da estrutura, tracionamos o lado da base, o qual a lona tendia seu movimento, de modo a ter um dos lados da esteira mais tracionado que o outro e, assim, impedir o movimento da lona (ver Figura 3.5). Apesar do movimento da lona tender para um lado ter diminuído, ela ainda subia o desnível após mais alguns segundos. Dado esse cenário, pensou-se na possibilidade de aumentar o desnível do eixo, responsável por manter a lona em seu lugar, mas logo foi descartada essa possibilidade, haja vista que diminuiria o raio do eixo e afrouxaria ainda mais a lona, perdendo a tração ganha anteriormente, mesmo que pequena. Para impedir então que a lona escale o degrau do eixo, foram manufacturados quatro anéis, um para cada extremidade do eixo, com uma altura de $11\text{mm} \pm 4\text{mm}$, significativamente maior do que a anterior existente. Constata-se, portanto, que a movimentação da lona, apesar de reduzida, ainda existe. A fim de não obter grandes complicações após um intervalo maior de tempo com a esteira em movimento, usou-se de um aparelho de alumínio montado no suporte da esteira, a partir de um um parafuso e com ajuda de duas porcas, para fazer uma força perpendicular a lona, de modo que impedisse seu deslocamento. Consequentemente, a solução serviu seu propósito e o funcionamento da esteira se dá da maneira desejada, conforme Figura 3.6.

3.2 Projeto Elétrico e Eletrônico

Com o suporte da esteira montado, faz-se necessário o levantamento de componentes elétricos e eletrônicos para o seu devido funcionamento. Sendo assim, relatamos a seguir as especificações técnicas e detalhes de funcionamento dos principais componentes



Figura 3.6 – Estrutura finalizada.

elétricos e eletrônicos deste sistema.

3.2.1 Motor

Motores elétricos são o tipo de máquina elétrica rotativa responsável por converter energia elétrica em energia mecânica, usando campos magnéticos que interagem entre si (ver Figura 3.7) (CHAPMAN, 2012).

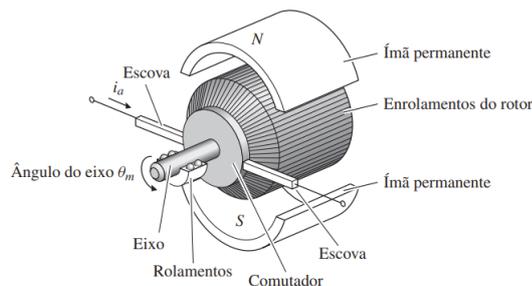


Figura 3.7 – Esquemático com os principais elementos de um motor CC (FRANKLIN J. DAVID POWELL, 2010 (1986)).

Dentre seus tipos, os motores de corrente contínua (CC) são destacáveis por sua versatilidade e ampla utilização em uma variedade de operações nas áreas residenciais, comerciais e industriais (FITZGERALD *et al.*, 2002). Cabe destacar a aplicação destes motores em acionamentos de velocidade ajustável ou controles de torque variável, pois seu torque é relativamente fácil de controlar e sua faixa de controle de velocidade é ampla. Apesar das desvantagens em relação à manutenção dos dispositivos mecânicos exigida e dos avanços da tecnologia referente à corrente alternada (CA), os motores CC ainda vão

assegurar seu uso continuado em uma ampla variedade de aplicações, principalmente em sistemas de potências nominais reduzidas (KIM, 2017).

É justamente por esses motivos que foi escolhido um motor DC para esse projeto. mais especificamente um motorreductor (MM09012/TEK8), de 12V, com caixa redutora de 90 rpm e elevado torque, típico para o acionamento de vidros de carro, e que, no caso em questão, convém para o movimento desejável da esteira (ver Figura 3.8).



Figura 3.8 – Motor CC utilizado nas aplicações deste trabalho. (TEK8, 2024).

3.2.2 Encoder

Encoders, também conhecidos como geradores de pulsos, são dispositivos muito úteis na área de automação industrial. São sensores eletromecânicos capazes de converter movimentos lineares, rotacionais e angulares em uma série de pulsos elétricos, os quais, uma vez identificados corretamente, indicam fisicamente a posição exata de um equipamento ou um certo ângulo de movimento. No nosso caso, o *encoder* é o dispositivo que permite identificar a velocidade de rotação do eixo sob a lona que envolve a esteira, ao qual o motor está acoplado.

O *encoder* óptico incremental escolhido (LPD3806) para o nosso projeto (ver Figura 3.9) é composto, sucintamente, por três elementos: uma fonte emissora de luz, um receptor óptico e um disco de resolução de 600 pulsos por volta. Além deste parâmetro, outras informações como a velocidade mecânica máxima, frequência e a amplitude do valor de alimentação adequado para o projeto, de 5-12V, também foram verificadas.

O sensor tipicamente possui três sinais de saída (A, B e O), com os quais adquire-se o ângulo de rotação, o sentido da rotação (visto a defasagem de + ou - 90° ao comparar os dois primeiros sinais) e o número de voltas completas (ver Figura 3.10). Contudo, para simplificar nossa análise, adotar-nos-emos apenas o sentido horário do



Figura 3.9 – *Encoder* utilizado na montagem experimental. (LIVRE, 2024).

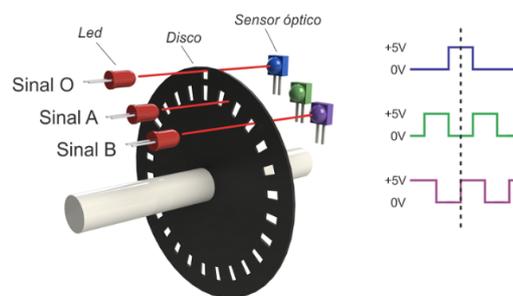


Figura 3.10 – *Encoder* óptico e sinais envolvidos. (ALMEIDA, 2017).

movimento e não contaremos cada início de revolução, pois não nos beneficiamos desse dado.

3.2.3 Fonte

Uma fonte de alimentação chaveada - “Switched Mode Power Supply”(SMPS) - é um equipamento utilizado para alimentar cargas elétricas, que agrupa um regulador comutador de alta frequência e garante a estabilidade da tensão de saída CC independente da variação AC na entrada. Isso é possível devido a um circuito interno e integrado que funciona abrindo e fechando um circuito comutador milhares de vezes por segundo, o que garante, conseqüentemente, maior proteção contra sobrecargas e variação na rede. O modelo utilizado em questão (KA1502) é de 12V e 10A, disponível no laboratório do departamento em que o projeto foi concretizado.

3.2.4 Microcontrolador

O ATMEL ATmega328 é um microcontrolador CMOS de 8 bits de baixa potência baseado na arquitetura AVR® RISC aprimorado. Para maximizar o desempenho e o paralelismo, o AVR usa a arquitetura Harvard - com memórias e barramentos separados para programa e dados. As instruções na memória do programa são executadas com um único nível de pipeline. O relógio é controlado por um oscilador de cristal externo de 16 MHz. Ele conta com 32 KB de Flash, 2 KB de RAM e 1 KB de EEPROM, e foi o microcontrolador escolhido para o projeto, dado sua disponibilidade no almoxarifado da FEEC, presente no Arduino UNO.

Normalmente concebidos para aplicação embarcada, os microcontroladores são circuitos integrados, os quais contém um núcleo de processador, memória e periféricos programáveis de entrada e saída. Ademais, como ele está atrelado a uma placa de prototipagem eletrônica, com regulador de tensão, conectores e pinagem, terá como papel principal, para o estudo aqui apresentado, de executar tarefas especificadas em linguagem C++, através de uma interface IDE - ambiente de desenvolvimento integrado - própria do sistema.

3.3 Integração Eletromecânica e Funcionamento

No que se refere à integração eletrônica dos componentes, tem-se como circuito elétrico, as conexões apresentadas na Figura 3.11.

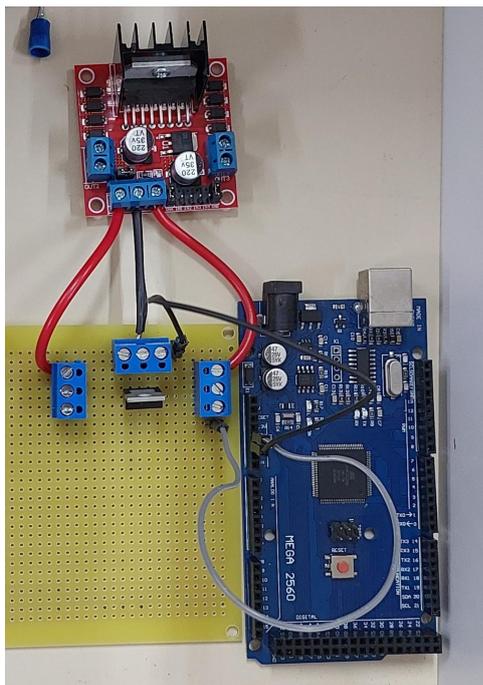


Figura 3.11 – Circuito projetado inicialmente.

Em um primeiro momento, a fim de obter uma primeira análise, não foi utilizado o regulador de tensão ou a ponte H no circuito. Ao invés disso, ligou-se uma fonte de tensão variável (DCPOWERSUPPLY MPC3003) para, dessa maneira, conseguirmos analisar o comportamento do circuito de forma gradual à tensão (vide Figura 3.12). Percebeu-se, contudo, com a ajuda do osciloscópio, um sinal significativamente baixo e extremamente ruidoso, portanto, difícil de ser analisado. Com o intuito de resolver essa questão, foram implementados dois amplificadores operacionais (amp op) ao circuito.

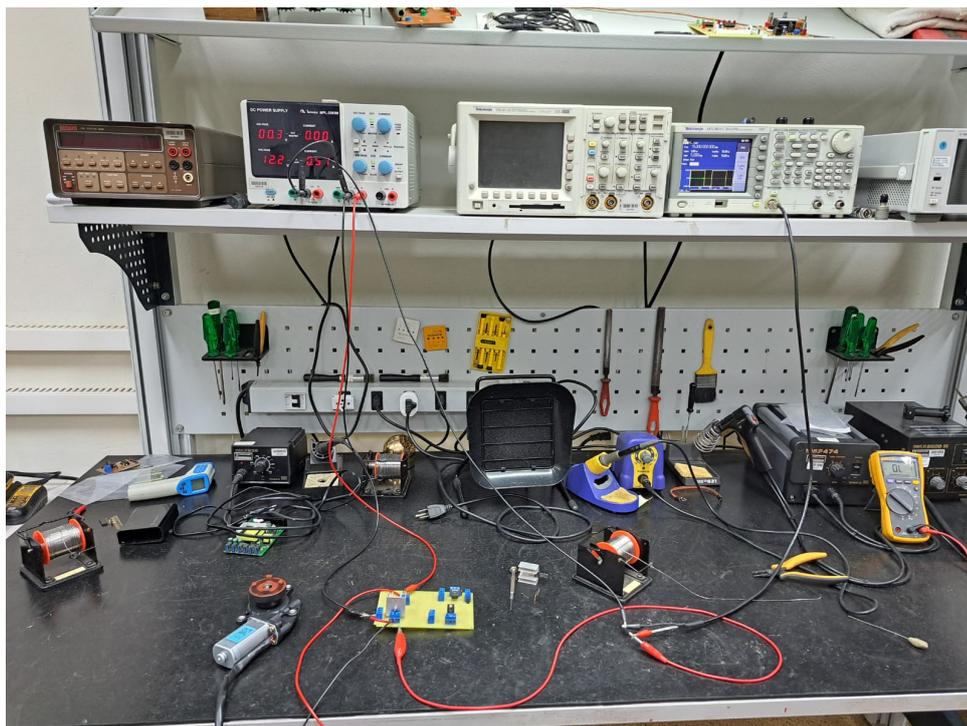


Figura 3.12 – Testes em bancada no SATE/FECC, de forma a aumentar a tensão aos poucos e analisar o comportamento do motor, isolado.

Um CI amp op é composto por um grande número de transistores, resistores e, normalmente, também um capacitor interno. É deveras popular, sobretudo por ter características muito próximas das previstas em teoria e por sua versatilidade de uso. Assim, é conveniente citar que seu uso mais básico se dá justamente em cenários com sinais na faixa de microvolt ou milivolt, os quais possuem baixa energia e sua amplificação se torna necessária para haver um processamento confiável. (SEDRA *et al.*, 2020)

Sendo assim, o primeiro, INA122 (SINGLE. . . ,), tem como objetivo principal amplificar o sinal de 10mV ruidoso para 1Vpp sem ruído. Já o segundo, OP07 (OP07X. . . ,), foi utilizado como comparador - haja vista que o amp op é projetado para operar como um sensor da diferença entre os sinais de tensão aplicados em seus dois terminais de entrada -, de modo que seja possível diferenciar as tensões de saída do circuito como nível lógico alto ou baixo, convenientes para o processamento, mais adiante, deste sinal no código (ver Figura 3.13).

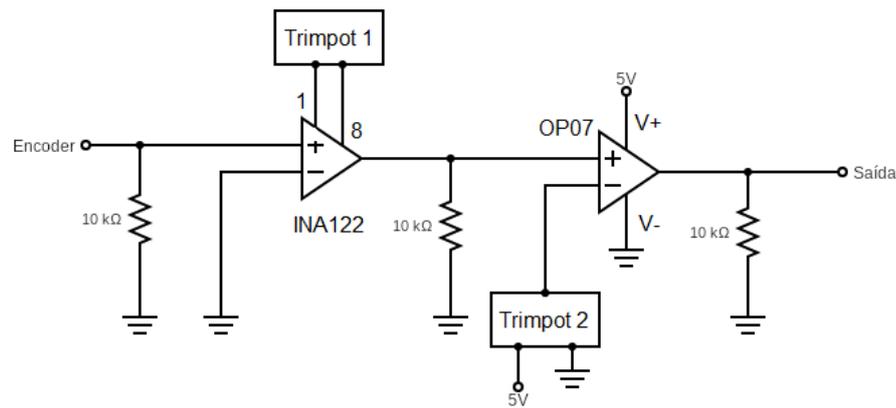


Figura 3.13 – Circuito complementar implementado para adicionar os Amplificadores Operacionais INA122 e OP07.

Resolvido isso, retirou-se a fonte de tensão variável e adicionou-se ao circuito tanto o regulador de tensão - LM7905CT (LM79XX...,) -, quanto a ponte H. Dessa maneira, o circuito eletrônico se torna mais eficiente e independente, de forma que a única fonte de tensão necessária é a de 12V. Não obstante, ambos não aguentaram o pico de corrente que ocorre assim que o circuito é ligado. Dado esse cenário, a fonte de tensão variável voltou para o circuito, substituindo o regulador de tensão, cuja responsabilidade era receber como entrada a tensão 12V e enviar como saída a de 5V. Junto a isso, o Módulo Driver Ponte H - L298N -, cuja principal função era o controle de velocidade e sentido de motores DC, foi substituído por um MOSFET - Transistores de efeito de campo tipo metal-óxido-semicondutor, muito difundidos na atualidade -, a fim de cumprir a mesma função, exceto ao que tange o sentido. Adotou-se, portanto, o sentido como padrão e único possível.

É importante aqui destacar a relação entre corrente de dreno e tensão entre dreno e fonte. Nas figuras 3.14 e 3.15, podemos comparar a curva $i_d \times v_{ds}$ de dois MOSFETs diferentes - IRF740 (POWER...,) e IRF530N (IRF530NPBF...,), respectivamente. É possível perceber que a do segundo tem uma corrente de dreno com uma ordem de grandeza maior, na faixa de 10^1 A, quando comparado com o primeiro, na faixa de 10^0 A, para um mesmo valor de tensão entre dreno e fonte, no caso, de 12V para $v_{gs} = 5V$, a 25°C .

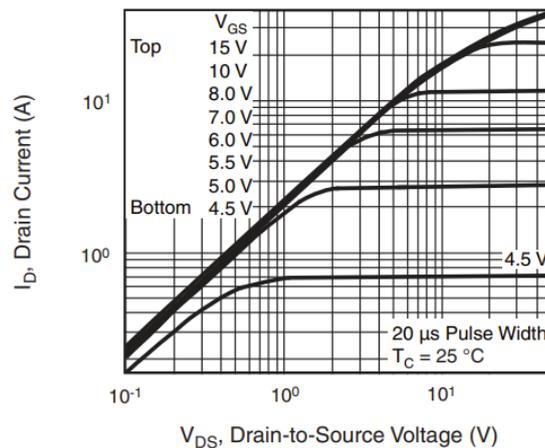


Figura 3.14 – Curva de $i_d \times v_{ds}$ do MOSFET IRF740 (POWER...),

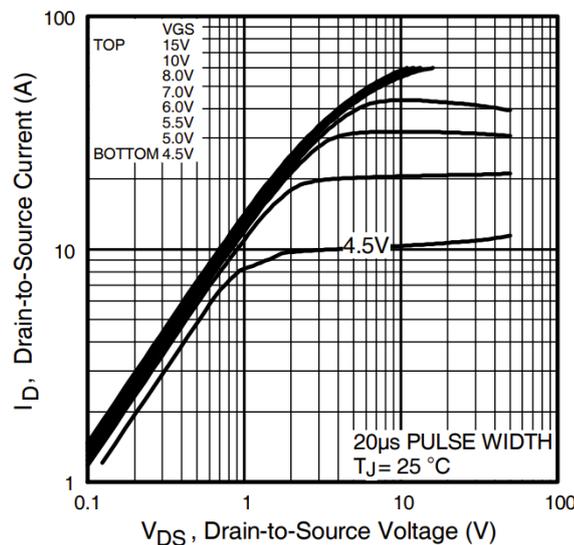


Figura 3.15 – Curva de $i_d \times v_{ds}$ do MOSFET IRF530N (IRF530NPBF...),

Ademais, junto com o IRF530N escolhido e um dissipador de calor, adicionou-se um resistor de 1k entre o gate e o pino PWM do Arduino e um diodo em paralelo com o motor, a fim de garantir que não haja corrente reversa (ver Figura 3.16).

Finalmente, temos na Figura 3.17 o circuito físico funcional montado, com todas as partes mencionadas, de modo a compor o sistema eletrônico embarcado do protótipo.

É notório que, durante a fase de projeto, foi planejada uma caixa tipo patola impressa em 3D para armazenar os componentes eletrônicos e isolá-los do restante da estrutura metálica (ver Figura 3.18), além de proteger contra eventuais acidentes. Foi projetada a fim de organizar os circuitos elétricos e suas ligações com o restante da planta. Contudo, com os circuitos adicionais citados, o dimensionamento da caixa não é mais

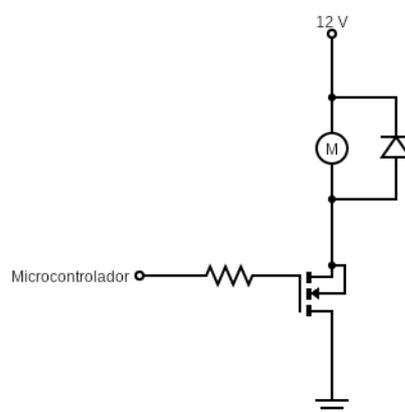


Figura 3.16 – Circuito complementar implementado para adicionar o MOSFET IRF530N.

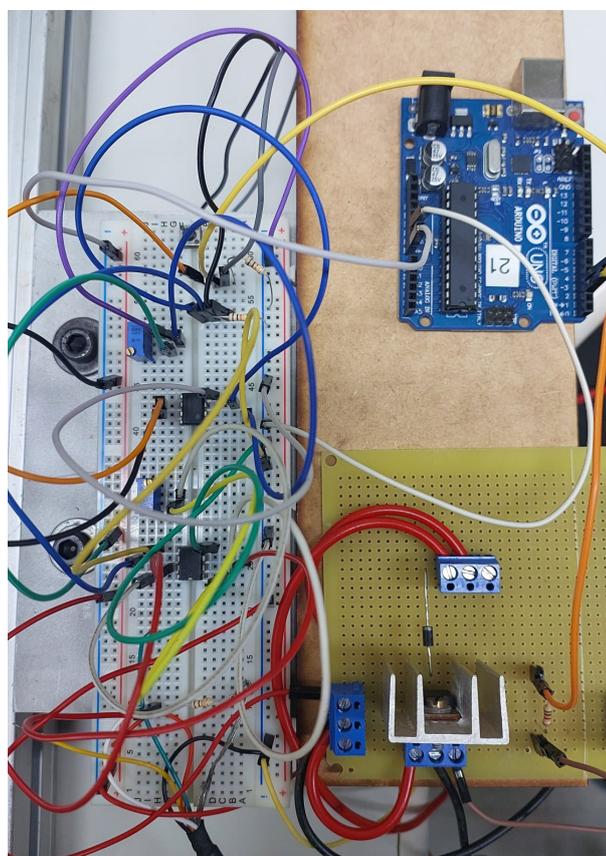


Figura 3.17 – Circuito eletrônico final implementado no projeto.

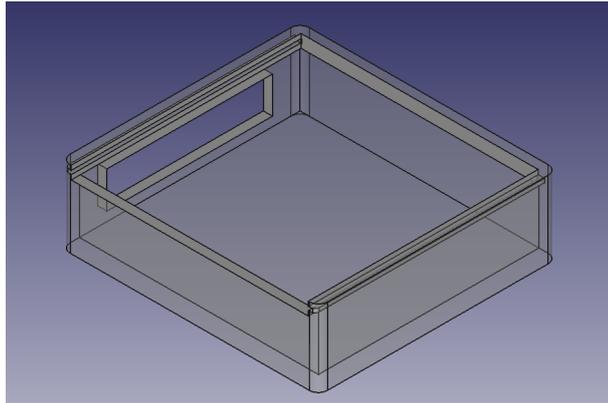


Figura 3.18 – Projeto da caixa patola 3D para o circuito inicial

suficiente para armazenar todos os componentes e, por esse motivo, não foi utilizada.

Ao que tange a lógica requerida para o funcionamento da esteira em malha aberta, temos o código do sistema de controle em malha aberta - que se encontra nos apêndices -, cuja tarefa primordial é acionar o motor por um certo tempo, no sentido horário e com um valor definido, em PWM.

Destaca-se um ponto de atenção no código, o qual é o uso de vetores de interrupção, através da manipulação de registradores e endereços pré-setados (8-BIT...), de modo que a base de tempo utilizada no código é 10^{-5} , em que “ti” é assíncrono e “ta” é síncrono, funcionando, respectivamente, como um relógio e um cronômetro. O último está atrelado a amostragem de valores em rpm que serão impressos no monitor Serial.

4 Projeto e Implementação do Controlador

Neste capítulo, apresentamos as principais escolhas adotadas para projetar e implementar o controlador PI para o sistema de esteira transportadora construído pelo grupo. Também comentamos brevemente aspectos sobre identificação da planta em análise.

4.1 Identificação da Planta

Existem diversas abordagens para o problema de *identificação* de um sistema dinâmico. Identificação é o processo de determinar modelos matemáticos precisos e adequados para descrever o comportamento dinâmico de um sistema. Entre as abordagens comuns para identificação, temos:

- **Métodos paramétricos:** estes métodos assumem uma estrutura específica para o modelo do sistema e ajustam os parâmetros do modelo aos dados experimentais. A estrutura proposta tipicamente é gerada por modelagem do processo com base em fundamentos teóricos do comportamento do problema (por exemplo, física).
- **Métodos não-paramétricos:** estes métodos não assumem uma estrutura específica para o modelo e buscam, diretamente, a função de transferência que modela os dados experimentais.

A primeira abordagem pode ser vista como uma abordagem do tipo caixa-cinza, pois a estrutura é imposta de antemão e apenas os parâmetros são, de fato, identificados. A segunda abordagem é uma linha de ação do tipo caixa-preta, em que o modelo desejado tem estrutura flexível (AGUIRRE, 2007).

A resposta esperada da planta, como consequência de modelos dinâmicos teóricos de motores DC alocados a cargas, é muito próxima à resposta de um sistema de primeira ordem. Assim, adotando a abordagem não-paramétrica, levantamos os parâmetros da função de transferência

$$G(s) = \frac{A}{\tau s + 1}, \quad (4.1)$$

obtendo $\tau = 0.1305$ e $A = 0.1886$, considerando que a entrada do motor é 0–255 (PWM) e que a saída é dada em velocidade em RPM. Estes dados foram obtidos por meio da curva ilustrada na Figura 4.1. Uma amostragem mais fina deve ser feita em trabalhos futuros para melhorar a estimativa da constante de tempo do sistema.

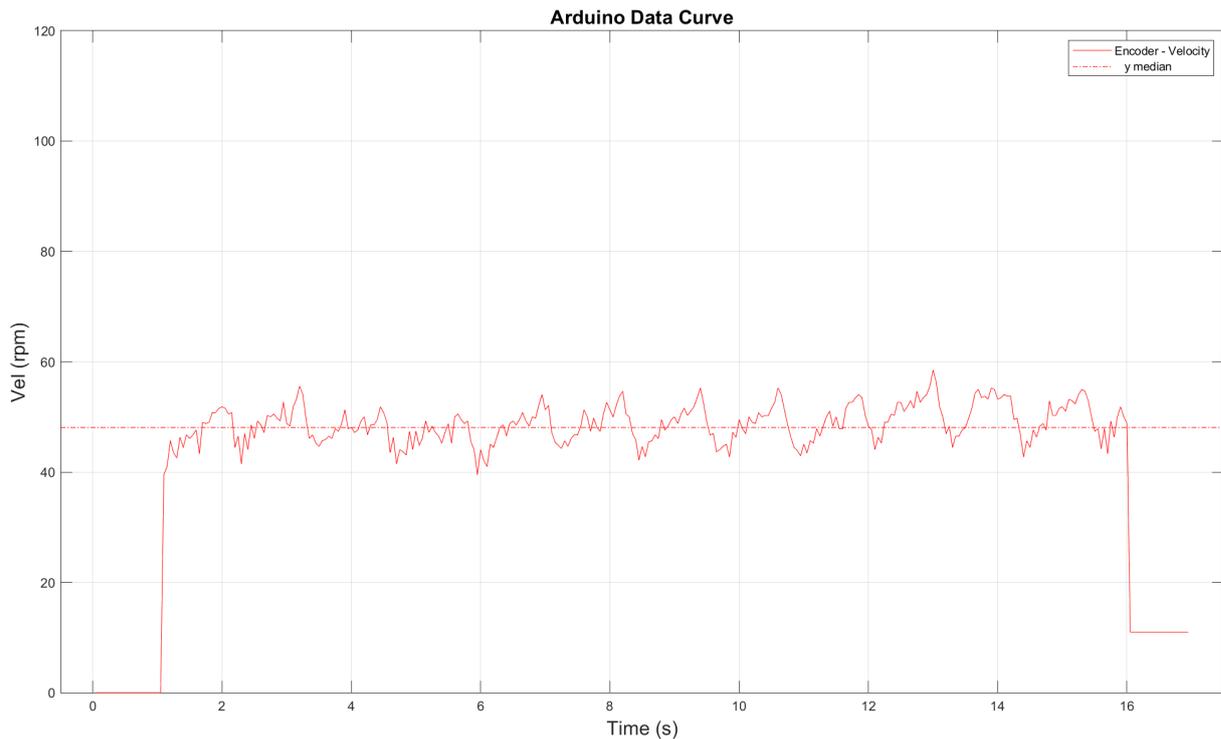


Figura 4.1 – Resposta do sistema a uma tensão constante de 6V no motor CC.

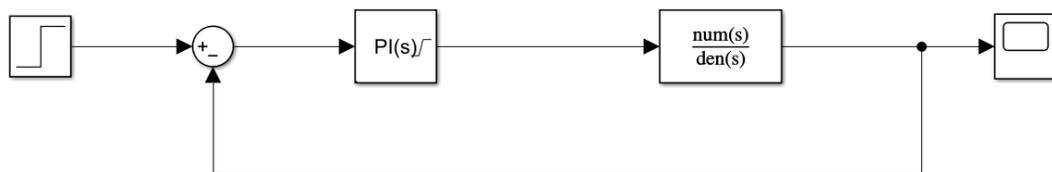


Figura 4.2 – Diagrama de blocos implementado no Simulink.

4.2 Projeto e Implementação do Controlador PI

Com base na função de transferência levantada para o processo, projetamos um controlador do tipo PI com o auxílio do pacote Simulink/Matlab. Esta estrutura do controlador foi escolhida devido à estrutura da planta, que se comporta como um sistema de primeira ordem (ASTROM, 1995). O ajuste dos ganhos do PI foi feito por meio da ferramenta de ajuste presente no Simulink, conforme ilustrado nas Figuras 4.2 e 4.3.

Para estes dados de entrada, o controlador obtido tem os ganhos

$$k_p = 10.9921, \quad k_i = 195.2928.$$

Este controlador foi emulado no microcontrolador escolhido neste trabalho. A estratégia de amostragem e de atualização do sinal de controle foi implementada por meio de interrupções periódicas com período de $h = 1$ ms. O código do sistema de controle em malha

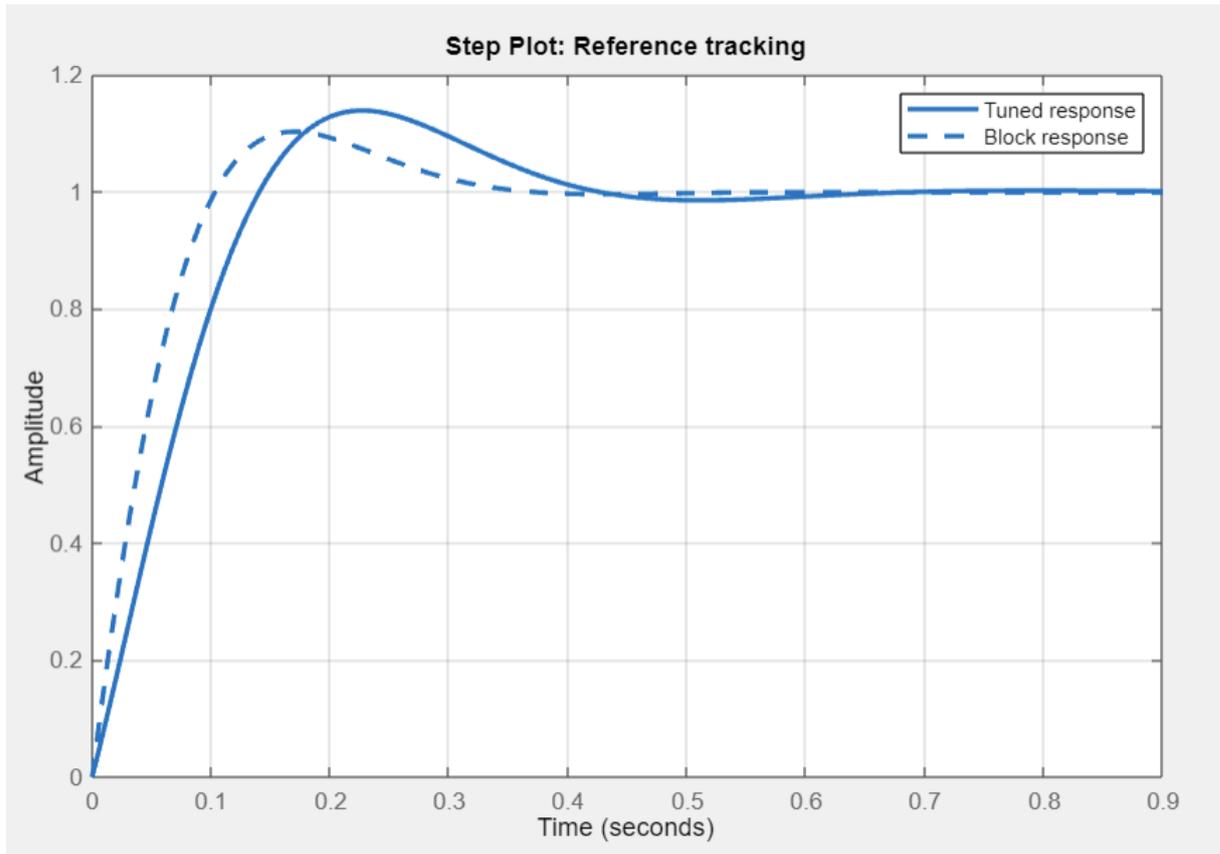


Figura 4.3 – Resposta ao degrau prevista pela ferramenta de *tune* do Simulink.

fechada está nos apêndices.

4.3 Aquisição e Tratamento dos Dados

A fim de armazenar e representar graficamente os dados obtidos nos experimentos físicos realizados, desenvolveu-se um *script* MATLAB que adquire os dados processados pelo Arduino por meio da sua porta serial (BLOG, 2013). Os dados são praticamente disponibilizados em tempo real para o MATLAB. O código de aquisição com um exemplo de criação de gráfico está disponibilizado no apêndice.

5 Ensaios

Para fins de validação do controlador projetado, realizamos algumas simulações. Basicamente, quatro cenários foram estabelecidos:

- **C1 (sem carga):** a esteira gira livremente, sem carga adicional.
- **C2 (adição de carga):** uma carga extra de aproximadamente 10kg é adicionada aos 6s de teste.
- **C3 (remoção de carga):** uma carga extra de aproximadamente 10kg é removida aos 6s de experimento.
- **C4 (adição e remoção de carga):** uma carga extra de aproximadamente 10kg é inserida aos 5s e removida aos 10s de ensaio.

Em todos os cenários explorados acima, o experimento dura um total de 15s. Em todos os cenários, os sistemas foram pensados para uma referência de 60 rpm.

5.1 Malha Aberta

O valor desejado para a velocidade de giro do eixo do motor, de 60 rpm, corresponde aproximadamente a 60% de *duty cycle* no PWM do motor. Os resultados obtidos para os cenários **C1-C4** estão representados nas Figuras 5.1 a 5.4. Podemos observar que, no cenário **C1**, a velocidade desejada é mantida, com alguns ruídos, mas que isso não acontece nos demais cenários, em que ocorrem oscilações causadas pelas cargas adicionadas na esteira. O experimento aponta falta de robustez no projeto de controle por malha aberta, como esperado pela teoria.

5.2 Malha Fechada

O controlador PI projetado na Seção 4 foi implementado para garantir o rastreamento de uma velocidade de 60 rpm no eixo do motor. Os resultados obtidos para os cenários **C1-C4** estão representados nas Figuras 5.5 a 5.8. Neste caso, todos os cenários apresentam sistemas relativamente robustos, que atenuam os efeitos das cargas adicionais com a realimentação implementada pelo controlador.

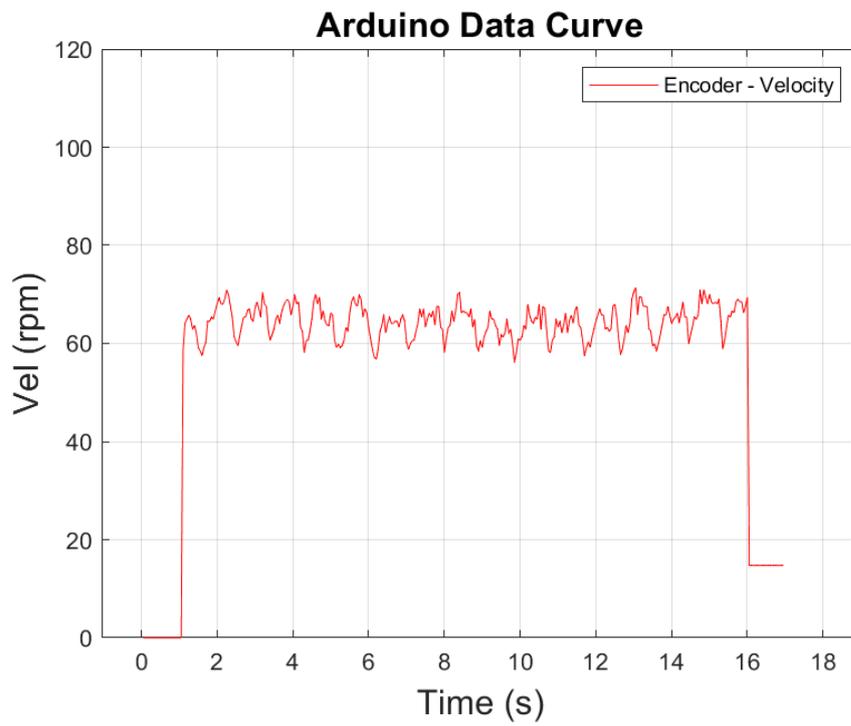


Figura 5.1 – Resultado do ensaio do cenário **C1** em malha aberta.

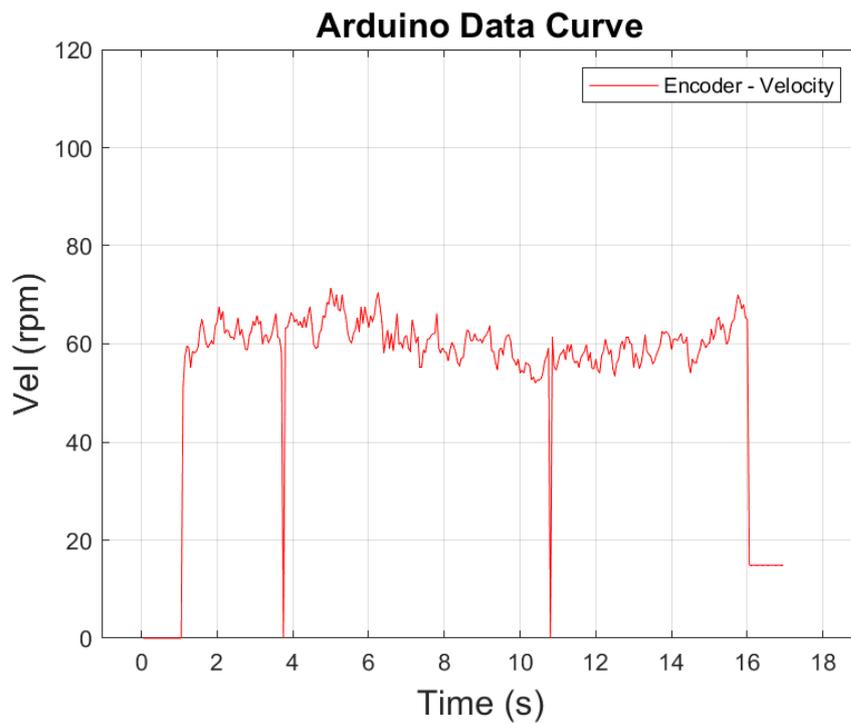


Figura 5.2 – Resultado do ensaio do cenário **C2** em malha aberta.

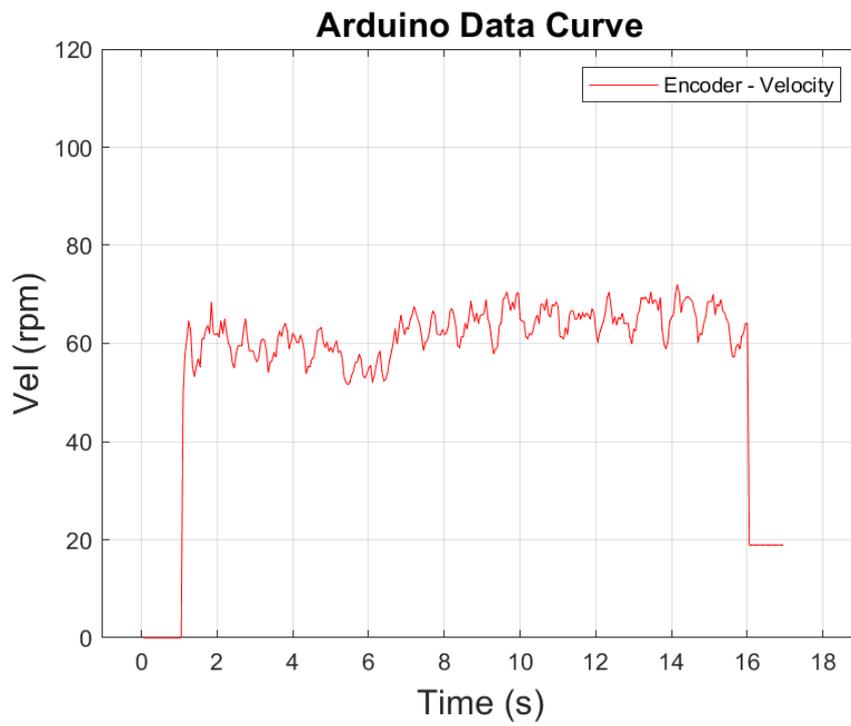


Figura 5.3 – Resultado do ensaio do cenário **C3** em malha aberta.

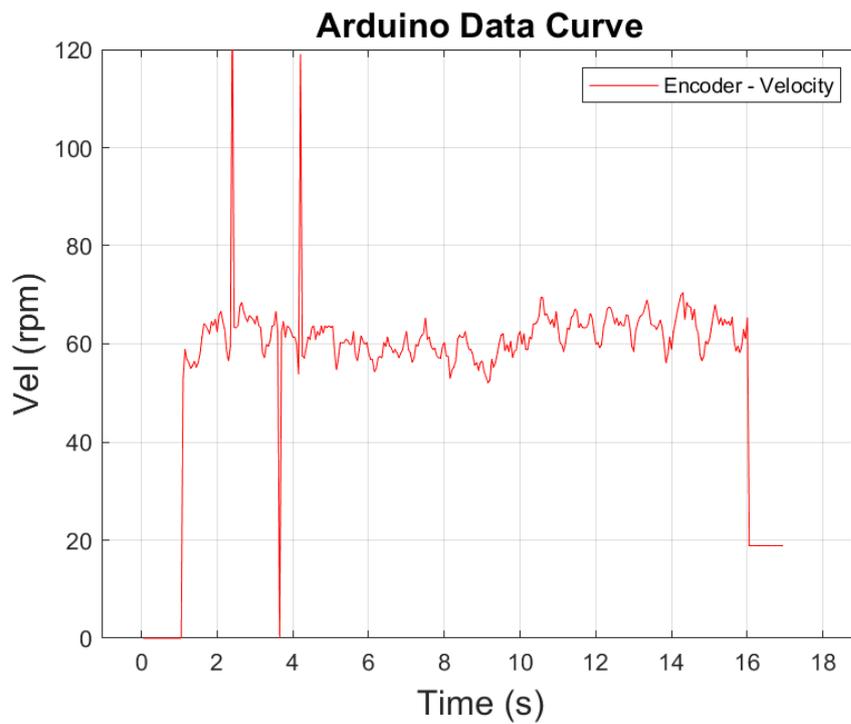


Figura 5.4 – Resultado do ensaio do cenário **C4** em malha aberta.

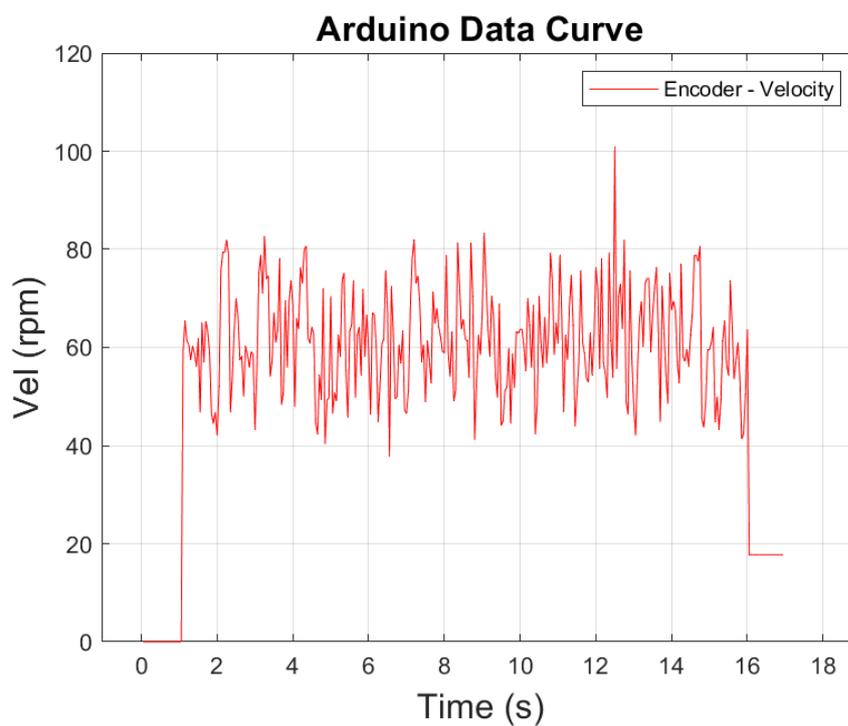


Figura 5.5 – Resultado do ensaio do cenário **C1** em malha fechada.

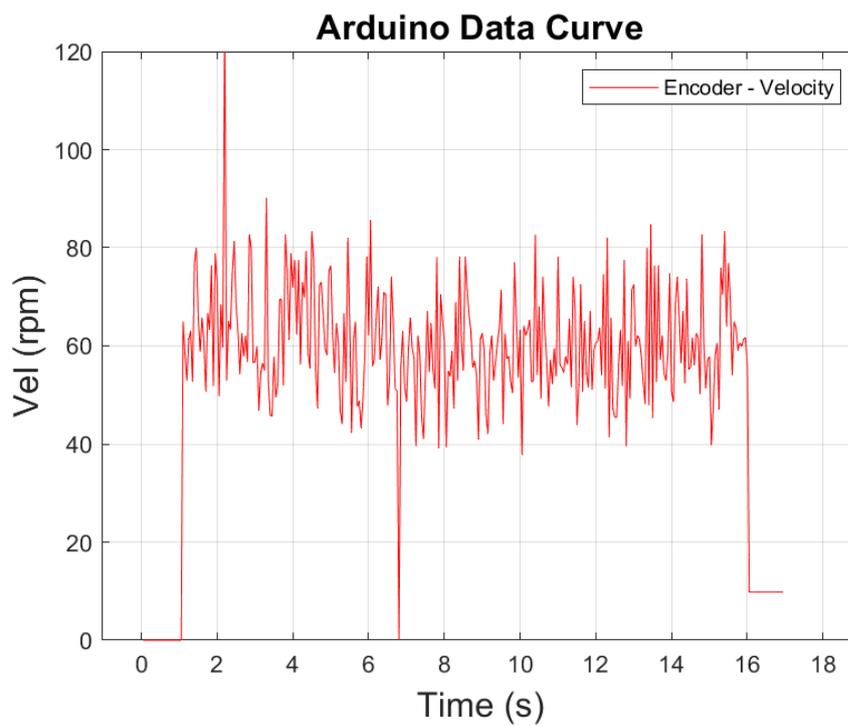


Figura 5.6 – Resultado do ensaio do cenário **C2** em malha fechada.

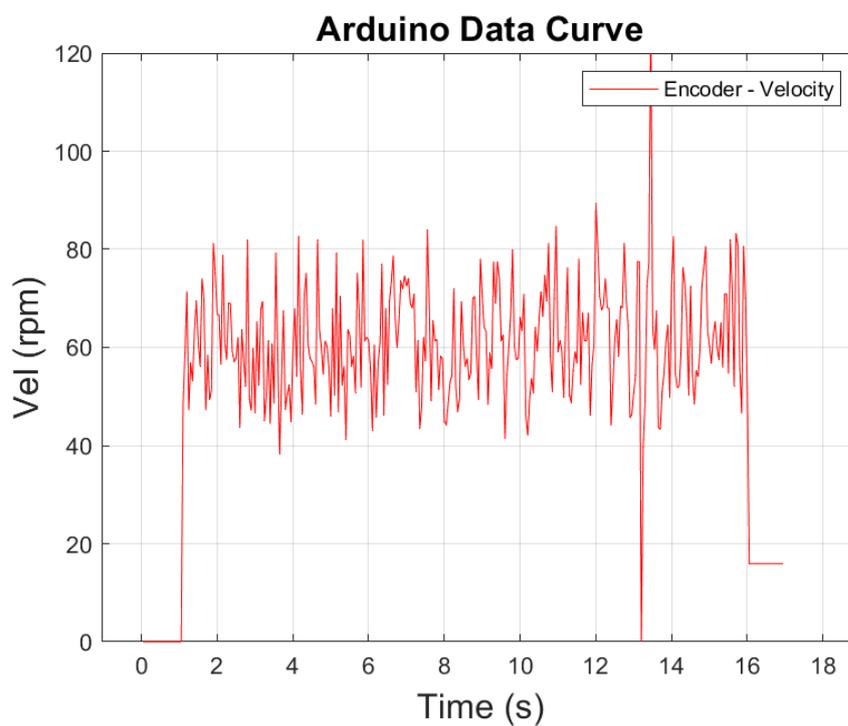


Figura 5.7 – Resultado do ensaio do cenário **C3** em malha fechada.

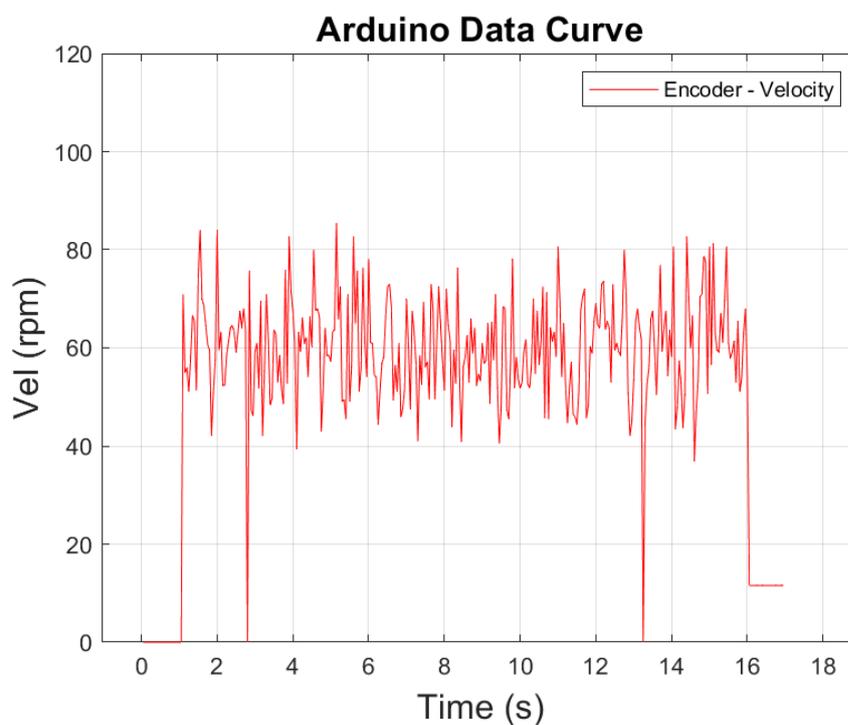


Figura 5.8 – Resultado do ensaio do cenário **C4** em malha fechada.

6 Conclusões e Comentários Finais

Neste trabalho, projetamos e implementamos uma planta educacional emuladora de esteira transportadora de carga. Durante este desenvolvimento, encontramos desafios tanto sob a ótica de projeto mecânico quanto sob a ótica de projeto eletroeletrônico, mas conseguimos entregar um protótipo funcional com espaço para melhorias. Com base nos resultados obtidos, trabalhos futuros devem ser desenvolvidos em cima da presente plataforma e as melhorias propostas, incrementadas ao dispositivo. Na sequência, estabelecemos uma série de comentários sobre os próximos passos e sobre os resultados obtidos.

6.1 Limitações e Melhorias Futuras

Ao final deste projeto, detectamos um conjunto de limitações e uma série de propostas para melhorias futuras ao equipamento. Listamos, a seguir, ponto a ponto, questões que podem ser endereçadas em trabalhos futuros:

1. **Rotação em ambos os sentidos:** na configuração atual, o sistema gira em apenas um sentido; uma ponte H que suporte a corrente de pico do sistema deve ser buscada.
2. **Regulador de tensão:** para simplificar a ligação elétrica da planta, devemos buscar um regulador de tensão que suporte a potência do equipamento.
3. **Caixa patola:** organizar a eletrônica do sistema em uma caixa a fim de evitar danos decorrentes de manipulação.
4. **Revisão mecânica:** o alinhamento das peças e a tração da lona devem ser revistos para minimizar perturbações e não-linearidades decorrentes da montagem.
5. **Outras estratégias de controle:** estratégias mais avançadas podem ser testadas e validadas na esteira.
6. **Qualidade da aquisição:** sinais adquiridos a partir das medidas da planta podem ser aprimorados, minimizando os efeitos de ruídos.
7. **Acoplamento de esteiras:** no futuro, espera-se trabalhar com o acoplamento entre uma esteira e outra em série, como ocorre na indústria. O objetivo neste caso é garantir uma velocidade constante para a carga ao longo das duas esteiras.

6.2 Viabilidade para Uso Didático

Como já destacado ao longo do texto, o projeto de uma planta com as características do sistema explorado neste trabalho é um desafio do ponto de vista prático e envolve diversas áreas do conhecimento da Engenharia. A natureza integradora deste projeto é, por si só, enriquecedora para o aprendizado dos estudantes como uma forma de aplicação dos conceitos explorados em sala. Assim, uma demonstração detalhada da esteira em funcionamento já seria suficiente para gerar comentários, dúvidas e questionamentos por parte dos estudantes. Mais ainda, experimentos simples envolvendo apenas a parte elétrica, supondo que a parte mecânica está montada, também podem ser suficientemente instigadores e desafiadores, uma vez que já demandariam conhecimento de eletrônica, de sistemas embarcados e da teoria de controle para sua realização. Alguns experimentos previstos com a planta nesta configuração:

- **Malha aberta vs malha fechada:** implementar e testar estratégias de controle em malha aberta contra uma lei de controle do tipo PI em malha fechada.
- ***On-off* vs proporcional:** implementar e comparar o desempenho das leis de controle proporcional e liga/desliga.
- **Estimação paramétrica:** levantamento dos parâmetros do modelo eletromecânico da esteira.

A Códigos Desenvolvidos

A.1 Controle em Malha Aberta

```

volatile long ti;    //assincrono
volatile long ta;    //sincronos
float periodo;
float rpm[340];
int enable = 3;
int velocidade = 0;
int i=0;

#define HORARIO true
//#define ANTIHORARIO false
#define encoder 2
bool ensaio=true;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  ti=0;
  ta=0;
  pinMode(encoder, INPUT);
  cli(); //desliga
  interrupcoes globais
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(encoder), contagem, RISING); //pino2
  PORT(D3)
  TCCR1A=0X00; //timer 1
  config register A
  TCCR1B=0X02; //timer 1
  config register B
  //A~ 4bits iniciais: desliga pinos de pwm desse timer (9 e 10, respectivamente),
  2 bits reservado, 2 últimos bits: WGM desligado
  //B~ 2bits iniciais: input capture desligados (não usados), 1bit reservado,
  2 bits: continuacao do WGM desligado, últimos 3 bits: preescale, vel do timer
  de 8 (0x02) --> diminui o clock base (16MHz) por 8, portanto clock de 2MHz e

```

```
    incremento do timer a cada  $5 \cdot 10^{-7}$ s
    TCNT1=0; //timer
    counter
OCR1A=20; //output
compare do timer (flag):  $20 \cdot 5 \cdot 10^{-7} = 10^{-5}$ 
TIMSK1=0X02; //output-
compare iguala timer (manual ATmega328P, pag. 49) match interrupt A inicia
(TIMER1_COMPA_vect)
sei(); //re-liga
interrupcoes globais

    pinMode(enable,OUTPUT);
    acionaMotor(HORARIO, 0);
    ensaio=true;
}

void loop() {

//malha aberta
    if (ta>=5000 && ensaio){
        if (periodo!=0) {
            rpm[i]=60*((1/periodo)/600);
        }
        else{
            rpm[i]=0;
        }
        Serial.println(rpm[i]);
        ta=0;
        i++;
    }

    if(i>20 && i<320){
        acionaMotor(HORARIO, 255/2); //valor em pwm
    }
    if(i>=320){
        acionaMotor(HORARIO, 0);
    }
    if(i==339 && ensaio){
```

```
    for (int j=0; j<340; j++){
        //Serial.println(rpm[j]);
    }
    ensaio=false;
}
}

ISR(TIMER1_COMPA_vect){ //0x0016
(endereço da memória que armazena qual é a rotina de interrupção a ser
inicializada)
    TCNT1=0;
    ti++;
    ta++;
    tc++;
}

void contagem(){
    periodo=ti*0.00001;
    ti=0;
}

void acionaMotor(boolean sentido, int vel){
    analogWrite(3,vel);
}
```

A.2 Controle em Malha Fechada

```
volatile long ti; //assincrono
volatile long ta,tc; //sincronos
float h;
float periodo;
float rpm[340];
int enable = 3;
int velocidade = 0;
int i=0;
```

```

#define HORARIO true
//#define ANTIHORARIO false
#define encoder 2
bool ensaio=true;

float pwm_pc;
float erro;
float erro_1;
float kp = 10.9920620787807;
float ki = 195.292760585221;
float controle;
float controle_1;
int ref = 60;
float input;
uint8_t control;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  ti=0;
  ta=0;
  tc=0;
  pinMode(encoder, INPUT);
  cli(); //desliga
  interrupcoes globais
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(encoder), contagem, RISING); //pino2
  PORT(D3)
  TCCR1A=0X00; //timer 1
  config register A
  TCCR1B=0X02; //timer 1
  config register B
  //A~ 4bits iniciais: desliga pinos de pwm desse timer (9 e 10, respectivamente),
  2 bits reservado, 2 últimos bits: WGM desligado
  //B~ 2bits iniciais: input capture desligados (não usados), 1bit reservado,
  2 bits: continuacao do WGM desligado, últimos 3 bits: preescale, vel do timer
  de 8 (0x02) --> diminui o clock base (16MHz) por 8, portanto clock de 2MHz e
  incremento do timer a cada 5*10^-7s
  TCNT1=0; //timer

```

```
    counter
OCR1A=20; //output
compare do timer (flag):  $20*5*10^{-7}=10^{-5}$ 
TIMSK1=0X02; //output-
compare iguala timer (manual ATmega328P, pag. 49) match interrupt A inicia
(TIMER1_COMPA_vect)
sei(); //re-liga
interrupcoes globais

    pinMode(enable,OUTPUT);
    acionaMotor(HORARIO, 0);
    ensaio=true;

    h = tc*0.00001;

    erro = 0;
    erro_1 = 0;
    controle = 0;
    controle_1 = 0;
}

void loop() {

//malha fechada
    if (tc>=100 && ensaio){
        if (periodo!=0) {
            input = 60*((1/periodo)/600);
        }
        else{
            input=0;
        }
        control = calcula_PI_control(input);
        //pwm_pc = float(control)/255;
        tc=0;
    }
    if (ta>=5000 && ensaio){
        rpm[i]=input;
        Serial.println(input); //rpm
    }
}
```

```
//Serial.print(" ");
//Serial.println(control);      //pwm
//Serial.print(" ");
//Serial.println(pwm_pc);      //% de pwm
ta=0;
i++;
}

if(i>20 && i<320){
  acionaMotor(HORARIO, control);      //aplica lei de controle
}
if(i>=320){
  acionaMotor(HORARIO, 0);
}
if(i==339 && ensaio){
  for (int j=0; j<340; j++){
    //Serial.println(rpm[j]);
  }
  ensaio=false;
}
}

ISR(TIMER1_COMPA_vect){          //0x0016
//endereço da memória que armazena qual é a rotina de interrupção a ser
//inicializada)
  TCNT1=0;
  ti++;
  ta++;
  tc++;
}

void contagem(){
  periodo=ti*0.00001;
  ti=0;
}

void acionaMotor(boolean sentido, int vel){
  analogWrite(3,vel);
```

```
}

float calcula_PI_control(float inp){
    erro = ref - inp;
    controle = controle_1 + kp*(erro - erro_1) + ki*(h/2)*(erro + erro_1);
    erro_1 = erro;
    controle_1 = controle;
    //Serial.println(controle);
    if (controle>255){
        controle=255;
    }
    return controle;
}
```

A.3 Aquisição e Tratamento de Dados

```
close all, clear all, clc
delete(instrfind({'Port'},{'COM9'}));

%User Defined Properties
%portaCOM = 'COM9';           % define the Arduino Communication port
plotTitle = 'Arduino Data Curve'; % plot title
xlabel = 'Time (s)';          % x-axis label
ylabel = 'Vel (rpm)';        % y-axis label
legend1 = 'Encoder - Velocity'
%yMax = 20                    %y Maximum Value
%yMin = 0                     %y minimum Value
plotGrid = 'on';             % 'off' to turn off grid
min = 0;                      % set y-min
max = 120;                    % set y-max
delay = .01;                  % make sure sample faster than resolution
scrollWidth = 20;

%Define Function Variables
time = 0;
```

```

data = 0;
count = 0;

%Set up Plot
plotGraph = plot(time,data,'-r' ) % every AnalogRead needs to be on its own
Plotgraph
hold on %hold on makes sure all of the channels are
plotted
title(plotTitle,'FontSize',15);
xlabel(xLabel,'FontSize',15);
ylabel(yLabel,'FontSize',15);
legend(legend1)
axis([0 20 min max]);
grid(plotGrid);

%Open Serial COM Port
s = serial('COM9');
disp('Close Plot to End Session');
fopen(s);

while ishandle(plotGraph) %Loop when Plot is Active will run until
plot is closed

    dat = fscanf(s,'%f'); %Read Data from Serial as Float

    if(~isempty(dat) && isfloat(dat)) %Make sure Data Type is Correct
        count = count + 1;
        time(count) = count *(5000*0.00001); %Extract Elapsed Time
        data(count) = dat(1); %Extract 1st Data Element

    %Set Axis according to Scroll Width
    if(scrollWidth > 0)
        set(plotGraph,'XData',time(time > time(count)-scrollWidth),'YData',data(tim
        axis([time(count)-scrollWidth+2 time(count)+2 min max]));
    else
        set(plotGraph,'XData',time,'YData',data);
        axis([0 time(count) min max]);

```

```
        end

        %Allow MATLAB to Update Plot
        pause(delay);
    end
end

%Close Serial COM Port and Delete useless Variables
fclose(s);
clear count dat delay max min plotGraph plotGrid plotTitle s ...
        scrollWidth serialPort xlabel ylabel;

disp('Session Terminated...');
```

Referências

- 8-BIT AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash - Atmel. [S.l.]. Citado na página 37.
- AGUIRRE, L. A. Introdução à identificação de sistemas. *Editora UFMG, Belo Horizonte*, v. 3, 2007. Citado na página 38.
- ALMEIDA, F. *HI-tecnologia*. 2017. <<https://materiais.hitecnologia.com.br/blog/o-que-Ãl-encoder-para-que-serve-como-escolher-como-interfacear/>>. [Online; accessed 18-Sep-2024]. Citado na página 31.
- ASTROM, T. H. K. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, 2th Edition*. [S.l.]: Instrument Society of America Inc., 1995. Citado 3 vezes nas páginas 22, 24 e 39.
- BIGGS, J. Enhancing teaching through constructive alignment. *High Educ* 32, p. 347–364, 1992. Citado na página 15.
- BLOG, B. *[MATLAB] Real Time Serial Data Logger*. 2013. <<https://billwaa.wordpress.com/2013/07/10/matlab-real-time-serial-data-logger/>>. [Online; accessed 20-Jun-2024]. Citado na página 40.
- CHAPMAN, S. J. *Electric Machinery Fundamentals*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2012. Citado na página 29.
- (CNE), C. N. de E. Diretrizes curriculares nacionais do curso de graduação em engenharia. *RESOLUÇÃO CNE/CES N^o 2*, 2019. Citado na página 15.
- DORF, R. H. B. R. C. *Modern Control Systems*. [S.l.]: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1998. Citado 4 vezes nas páginas 14, 18, 19 e 21.
- EVOLUTION, E. *Esteira Industrial*. 2024. <<https://www.esteirasevolution.com.br/esteira-industrial>>. [Online; accessed 18-Sep-2024]. Citado na página 15.
- FADALI, A. V. M. S. *Digital Control Engineering: Analysis and Design, 2th Edition*. [S.l.]: Elsevier Inc., 2013. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 24.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. *Electric Machinery*. [S.l.]: McGraw-Hill Education Pvt Limited, 2002. Citado na página 29.
- FRANKLIN J. DAVID POWELL, A. E.-N. G. F. *Feedback Control of Dynamic Systems, 6th Edition*. [S.l.]: Pearson Education, Inc., Prentice Hall, 2010 (1986). Citado 8 vezes nas páginas 14, 18, 19, 20, 21, 22, 23 e 29.
- IRF530NPBF HEXFET Power MOSFET - International IOR Rectifier. [S.l.]. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- KIM, S.-H. *Electric motor control: DC, AC, and BLDC motors*. [S.l.]: Elsevier, 2017. Citado na página 30.
- LIVRE, M. *Encoder*. 2024. <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1610239466-encoder-incremental-rotativo-600-pulsos-eixo-6mm-dc5-24v-_JM>. [Online; accessed 20-Jun-2024]. Citado na página 31.

- LM79XX Series 3-Terminal Negative Regulators - Texas Instruments. [S.l.]. Citado na página 34.
- MAYR, O. *The Origins of Feedback Control*. [S.l.]: MIT Press Inc, 1970. Citado na página 14.
- OGATA, K. *Modern Control Engineering, 3th Edition*. [S.l.]: Prentice-Hall Inc., 1997. Citado na página 18.
- OP07X Precision Operational Amplifiers - Texas Instruments. [S.l.]. Citado na página 33.
- OPPENHEIM, A. V.; BUCK, J.; DANIEL, M.; WILLSKY, A. S.; NAWAB, S. H.; SINGER, A. *Signals & systems*. [S.l.]: Pearson Educación, 1997. Citado na página 18.
- POWER MOSFET - Vishay Siliconix. [S.l.]. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- SANTOS, E. P. Controlador de esteira transportadora de cargas. TFC (FEEC/UNICMAP). 2022. Citado na página 16.
- SEDRA, A.; SMITH, K.; CARUSONE, T. C.; GAUDET, V. *Microelectronic circuits 8th edition. Chapter, v. 14, p. 1235–1236*, 2020. Citado na página 33.
- SINGLE Supply, MicroPower INSTRUMENTATION AMPLIFIER - Burr Brown. [S.l.]. Citado na página 33.
- TEK8. *Motor*. 2024. <https://www.tek8.com.br/MLB-1897622852-motor-motoreductor-12v-dc-90-rpm-mm09012-ss-_JM>. [Online; accessed 18-Sep-2024]. Citado na página 30.
- VILANOVA, A. V. R. *PID Control in the Third Millennium, Lessons Learned and New Approaches*. [S.l.]: Springer-Verlag London Limited, 2012. Citado na página 22.
- ZRNIĆ, N.; ĐORĐEVIĆ, M.; GAŠIĆ, V. Historical background and evolution of belt conveyors. *Foundations of Science*, Springer, v. 29, n. 1, p. 225–255, 2024. Citado na página 15.