



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Pedro Henrique Freitas Silva

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE
INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA PARA UM
VEÍCULO TIPO TRICICLO COM
DIFERENCIAL ELETRÔNICO**

João Pessoa

2024

Pedro Henrique Freitas Silva

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE
INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA PARA UM
VEÍCULO TIPO TRICICLO COM DIFERENCIAL
ELETRÔNICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal da Paraíba

Orientador: Dr. Cícero da Rocha Souto

Coorientador: Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva

João Pessoa

2024

**Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação**

S586e Silva, Pedro Henrique Freitas.

Estudo e desenvolvimento de instrumentação eletrônica para um veículo tipo triciclo com diferencial eletrônico / Pedro Henrique Freitas Silva.
- João Pessoa, 2024.
89 f.

Orientação: Cícero da Rocha Souto.
Coorientação: Juan Moises Mauricio Villanueva.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Veículo elétrico. 2. Controle diferencial eletrônico. 3. Microcontrolador. 4. Instrumentação eletrônica. I. Souto, Cícero da Rocha. II. Villanueva, Juan Moises Mauricio. III. Título.

UFPB/BC

CDU 629.3(043)



ATA DE DEFESA PÚBLICA DE TRABALHO FINAL DE MESTRADO

Aos 16 dias do mês de dezembro de 2024, no horário de 14:00 às 16:40 horas, foi realizada, por videoconferência, a defesa pública de Trabalho Final de Mestrado do PPGEE/UFPB, do mestrando PEDRO HENRIQUE FREITAS SILVA, que se intitula: *Estudo e Desenvolvimento de Instrumentação Eletrônica para um Veículo tipo Triciclo com Diferencial Elétrico.*

A Banca Examinadora, constituída pelo Professor Orientador, Cícero da Rocha Souto (Presidente - PPGEE/UFPB), e pelos professores Juan Moises Mauricio Villanueva (Coorientador - PPGEE/UFPB), Euler Cássio Tavares de Macêdo (Examinador Interno – PPGEE/UFPB), Simplicio Arnaud da Silva (Examinador Externo/UFPB) e Eisenhawer de Moura Fernandes (Examinador Externo/UFCG), emitiu o seguinte parecer:

O aluno está aprovado devendo fazer as correções textuais que foram fortemente recomendadas pela banca especialmente as questões que ficaram pouco explicadas ou com falta de informação. Para a entrega das correções textuais a banca estipulou um prazo de 30 dias a partir da data da defesa.

Resultado final – Conceito:

(X) Aprovado.

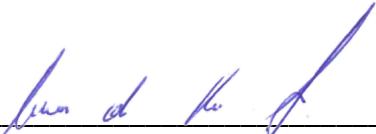
() Insuficiente

() Reprovado.

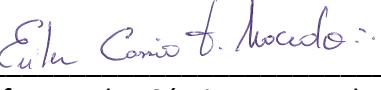


Eu, Cícero da Rocha Souto, Orientador do Trabalho, lavrei a presente Ata que segue por mim assinada e pelos demais membros da Banca Examinadora.

Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto

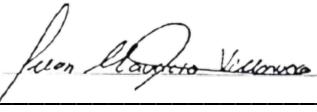


Prof. Dr. Euler Cássio Tavares de Macêdo



Prof. Dr. Euler Cássio Tavares de Macêdo

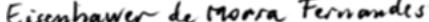
Prof. Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva



Prof. Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva



Prof. Dr. Simplício Arnaud da Silva



Prof. Dr. Eisenhower de Moura Fernandes

*Dedico este trabalho de conclusão de curso a Deus e toda minha família pelo apoio
durante o mestrado em engenharia elétrica.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por Sua infinita misericórdia, que me concedeu esta oportunidade e que, em todos os momentos, tem estado presente em minha vida.

À minha família — Maria Salete (mãe), José Aluísio (pai) e José Lucas (irmão) —, expresso minha profunda gratidão por tudo que fizeram por mim. Com amor e carinho, me criaram, e a eles devo tudo em minha vida. Aos demais familiares, que guardo em meu coração com todo o afeto, também dedico este agradecimento.

Aos professores Cícero da Rocha Souto e Juan Moises Villanueva, manifesto minha sincera gratidão pela orientação concedida ao longo deste trabalho. Agradeço por sua disponibilidade de tempo, pelos materiais disponibilizados, pelas sugestões valiosas na resolução de problemas e pela dedicação com que acompanharam o desenvolvimento e a construção coletiva deste projeto.

Aos colegas Bruno Vale, Pedro Garcia, Natan Gomes, Caio José, João Álvaro, João Félix, Thales Martins, Antônio, entre outros, agradeço pela significativa contribuição durante o desenvolvimento do projeto.

Ao técnico Sérgio, expresso minha gratidão pela valiosa contribuição na construção da estrutura mecânica do triciclo.

Ao técnico Gustavo e aos demais colegas do Laboratório LaSea, meu agradecimento pelo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Simplício Arnaud, Lucas Hartmann e Carlos Alberto, agradeço pelas sugestões e pelo esclarecimento de dúvidas ao longo do percurso.

À Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e ao Laboratório de Sistemas Embocados e Automação (LaSea), sou grato pela infraestrutura, pelos materiais e equipamentos disponibilizados, que foram essenciais para a realização deste projeto.

Aos amigos e colegas que fiz ao longo do mestrado, dedico meu imenso carinho e gratidão.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro que tornou possível a realização deste trabalho.

“Tudo o que fizerem, façam de todo o coração, como para o senhor e não para os homens.”
(Colossenses 3:23)

Resumo

A utilização de veículos elétricos tem apresentado um crescimento exponencial em escala global, impulsionada por diversos fatores que evidenciam os problemas associados ao uso de veículos com motores de combustão interna. Apesar desse avanço, ainda existem inúmeros desafios a serem superados para que essa tecnologia se consolide plenamente no mercado. Com o objetivo de contribuir científica e tecnologicamente para a evolução dessa linha de veículos elétricos, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um triciclo elétrico equipado com controle diferencial eletrônico aplicado às duas rodas traseiras. A estrutura do triciclo foi construída utilizando tubos de aço carbono galvanizado e chapas metálicas de alumínio. Design foi baseado na combinação da dianteira de uma motocicleta convencional com a traseira de um veículo quadriciclo. A suspensão traseira foi projetada de forma independente, sendo equipada com um motor de tração em cada roda traseira. O controle diferencial foi implementado por meio da plataforma Tiva C, responsável pelo acionamento dos motores de corrente contínua acoplados às rodas traseiras. A instrumentação eletrônica do veículo inclui diversos sensores, como sensores resistivos para a determinação do ângulo de giro do triciclo, sensores indutivos configurados como encoders para medição das velocidades das rodas e sensores liga/desliga para a indicação da frenagem do veículo. A aceleração foi controlada por meio de um variador de tensão elétrica baseado no princípio de efeito Hall. Além disso, foi incorporada uma chave elétrica para realizar a inversão do sentido de movimento, permitindo a movimentação do veículo em marcha à ré. Para garantir a precisão no controle de movimento, foi implementado um sistema de controle em malha fechada, destinado a assegurar a igualdade das velocidades das rodas traseiras durante o deslocamento em linha reta. Adicionalmente, um algoritmo foi desenvolvido para calcular a diferença de velocidades das rodas traseiras quando o veículo executa curvas.

Os resultados obtidos a partir do funcionamento do veículo são apresentados, destacando o desempenho do sistema em diferentes condições operacionais.

Palavras-chave: Veículo elétrico; Controle; Microcontrolador; Instrumentação Eletrônica.

Abstract

The use of electric vehicles has shown exponential growth on a global scale, driven by various factors that highlight the issues associated with the use of internal combustion engine vehicles. Despite this advancement, numerous challenges still need to be overcome for this technology to fully establish itself in the market. With the aim of contributing scientifically and technologically to the evolution of this line of electric vehicles, this work presents the development of an electric tricycle equipped with electronic differential control applied to the two rear wheels. The structure of the tricycle was constructed using galvanized carbon steel tubes and aluminum metal sheets. The design was based on a combination of the front end of a conventional motorcycle with the rear end of a quadricycle. The rear suspension was designed to be independent, equipped with a traction motor on each rear wheel. The differential control was implemented through the Tiva C platform, responsible for activating the direct current motors coupled to the rear wheels. The vehicle's electronic instrumentation includes various sensors, such as resistive sensors for determining the tricycle's steering angle, inductive sensors configured as encoders for measuring the wheel speeds, and on/off sensors for indicating the vehicle's braking. Acceleration was controlled using a voltage variator based on the Hall effect principle. Additionally, an electrical switch was incorporated to reverse the direction of movement, allowing the vehicle to move in reverse. To ensure precise motion control, a closed-loop control system was implemented to maintain equal speeds of the rear wheels during straight-line travel. Furthermore, an algorithm was developed to calculate the difference in speeds of the rear wheels when the vehicle makes turns.

Keywords: Electric vehicle; Control; Microcontroller; Electronic Instrumentation.

Listas de ilustrações

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 1. | Veículo elétrico experimental | 18 |
| Figura 2. | Protótipo do projeto veículo elétrico UFRJ para competições de eficiência | 19 |
| Figura 3. | Veículo elétrico controlado por lógica fuzzy | 21 |
| Figura 4. | Protótipo do veículo do Fórmula SAE da UFRGS | 22 |
| Figura 5. | Protótipo do veículo com o usuário | 23 |
| Figura 6. | Veículo elétrico do EV-IFSC II | 24 |
| Figura 7. | Tipos de veículos elétricos | 28 |
| Figura 8. | Exemplo da utilização do diferencial eletrônico | 29 |
| Figura 9. | Diagrama em blocos do sistema de controle dos motores | 30 |
| Figura 10. | Estrutura do triciclo e localização dos componentes | 31 |
| Figura 11. | Circuitos eletrônicos que compõe o triciclo | 32 |
| Figura 12. | Estrutura experimental | 33 |
| Figura 13. | Esquema elétrico circuito da ponte h | 35 |
| Figura 14. | Esquema elétrico de uma ponte h do fabricante | 35 |
| Figura 15. | Motor NPC T-74 | 36 |
| Figura 16. | Modelo da placa de desenvolvimento Tiva C Modelo EK-TM4C123GXL | 37 |
| Figura 17. | Gráfico representativo da função geral para o acionamento do guidão . | 42 |
| Figura 18. | Fluxograma do código-fonte do projeto | 44 |
| Figura 19. | Esquema elétrico do circuito para alimentação dos sensores | 47 |
| Figura 20. | Esquema elétrico do circuito LM2907 | 50 |
| Figura 21. | Módulo conversor DC-DC <i>buck</i> XL4005 | 52 |
| Figura 22. | Resposta da roda esquerda em malha aberta guidão reto | 54 |
| Figura 23. | Erro da roda esquerda em malha aberta guidão reto | 55 |
| Figura 24. | Resposta da roda direita em malha aberta guidão reto | 56 |
| Figura 25. | Erro da roda direita em malha aberta guidão reto | 57 |
| Figura 26. | Comparativo entre as rodas direitas e esquerda em malha aberta. | 58 |
| Figura 27. | Erro entre as rodas direitas e esquerda em malha aberta. | 59 |
| Figura 28. | Resposta da roda direita em malha fechada com o guidão reto. | 61 |
| Figura 29. | Erro da roda direita em malha fechada guidão reto | 62 |
| Figura 30. | Resposta da roda esquerda em malha fechada com o guidão reto. | 63 |
| Figura 31. | Erro da roda esquerda malha fechada. | 64 |
| Figura 32. | Comparativo entre as rodas direitas e esquerda em malha fechada. | 65 |
| Figura 33. | Erro entre as rodas direitas e esquerda em malha fechada. | 66 |
| Figura 34. | Resposta dos motores em relação às curvas para direita em malha fechada | 67 |

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 35. | Resposta dos motores em relação às curvas para esquerda em malha fechada | 68 |
| Figura 36. | Acionamento do freio nas duas rodas | 69 |
| Figura 37. | Teste de campo. | 70 |
| Figura 38. | Interface de desenvolvimento energia IDE | 86 |
| Figura 39. | Modelo do DAQ NI USB-6212 | 87 |
| Figura 40. | Painel frontal do LabVIEW | 88 |
| Figura 41. | Diagrama de blocos do LabVIEW | 88 |

Lista de tabelas

| | | |
|------------|--|----|
| Tabela 1. | Comparação de Especificações Técnicas entre Arduino Uno e Tiva C 123 | 26 |
| Tabela 2. | Comparação de Especificações Técnicas entre PIC 16F877A e Raspberry Pi | 26 |
| Tabela 3. | Especificações técnicas do motor NPC-T74 | 36 |
| Tabela 4. | Descrição dos pinos utilizados da Tiva C | 39 |
| Tabela 5. | Condição de variação de x da função sigmoide | 40 |
| Tabela 6. | Parâmetros das constantes para o cálculo de função sigmoide | 41 |
| Tabela 7. | Estado do triciclo | 42 |
| Tabela 8. | Valores da velocidade da roda esquerda em malha aberta em RPM | 54 |
| Tabela 9. | Erros calculados em malha aberta da roda esquerda | 55 |
| Tabela 10. | Valores da velocidade da roda direita em malha aberta em RPM | 56 |
| Tabela 11. | Erros calculados em malha aberta da roda direita | 57 |
| Tabela 12. | Erros calculados em malha aberta entre as duas rodas | 59 |
| Tabela 13. | Valores da velocidade da roda direita em malha fechada em RPM | 61 |
| Tabela 14. | Erros calculados em malha fechada da roda direita | 62 |
| Tabela 15. | Valores da velocidade da roda esquerda em malha fechada em RPM | 63 |
| Tabela 16. | Erros calculados em malha fechada da roda esquerda | 64 |
| Tabela 17. | Erros calculados em malha fechada entre as duas rodas | 66 |

Listas de abreviaturas e siglas

| | |
|----------|--|
| ABVE | Associação Brasileira de Veículos Elétricos |
| BEV | <i>Battery Electric Vehicle</i> |
| BSPD | <i>Brake System Plausible Device</i> |
| CO_2 | Dióxido de carbono |
| DAQ | <i>Data Acquisition</i> |
| IBAMA | Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis |
| IDE | <i>Integrated Development Environment</i> |
| IHME | <i>Institute for Health Metrics and Evaluations's</i> |
| FCEV | <i>Fuel Cell Electric Vehicle</i> |
| FSAE | <i>Formula Society of Automotive Engineers</i> |
| GEE | Gases do Efeito Estufa |
| HEV | <i>Hybrid Electric Vehicle</i> |
| MCI | Motor de Combustão Interna |
| MOSFET | <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> |
| PHEV | <i>Plug-in Hybrid Electric</i> |
| Proconve | Programa de Controle de Emissões Veiculares |
| PWM | <i>Pulse Width Modulation</i> |
| SAE | <i>Society of Automotive Engineers</i> |
| SEEG | Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções |
| SWAP | <i>Steering Wheel Angle Position</i> de Gases de Efeito Estufa |
| VE | Veículo Elétrico |

Sumário

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 | Objetivos | 16 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 16 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 16 |
| 1.2 | Contribuição | 16 |
| 1.3 | Organização do trabalho | 17 |
| 2 | ESTADO DA ARTE | 18 |
| 3 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 27 |
| 3.1 | Veículos elétricos | 27 |
| 3.2 | Diferencial eletrônico | 28 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 30 |
| 4.1 | O projeto de pesquisa | 30 |
| 4.2 | Bancada mecânica experimental | 33 |
| 4.3 | Módulo driver ponte h BTS7960 | 34 |
| 4.4 | Motor NPC-T74 | 36 |
| 4.5 | Tiva C TM4C123 | 37 |
| 4.6 | Estratégia de controle para as curvas | 39 |
| 4.6.1 | Fluxograma do código-fonte | 43 |
| 4.7 | Sistema em malha fechada | 45 |
| 4.8 | Placa de alimentação dos sensores | 47 |
| 4.9 | Circuito do acelerador | 48 |
| 4.10 | Circuito do guidão | 48 |
| 4.11 | Circuito do freio e ré | 49 |
| 4.12 | Circuito encoder | 49 |
| 4.13 | Circuito conversor de frequência em tensão | 50 |
| 4.14 | Módulo conversor DC-DC buck-boost XL6009 | 51 |
| 4.15 | Hardware para coleta dos resultados | 52 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 53 |
| 5.1 | Resultados em malha aberta | 53 |
| 5.2 | Resultados em malha fechada | 60 |
| 5.2.1 | Curvas para direita | 67 |
| 5.2.2 | Curvas para esquerda | 68 |

| | | |
|-----|--|----|
| 5.3 | Resultado do teste de freios | 69 |
| 5.4 | Teste de campo | 70 |
| 6 | CONCLUSÕES | 71 |
| 6.1 | Continuação do trabalho | 72 |
| | REFERÊNCIAS | 73 |
| | APÊNDICE A – CÓDIGO-FONTE DO ACIONAMENTO DO TRI-CICLO EM MALHA FECHADA | 76 |
| | APÊNDICE B – IDE ENERGIA E BIBLIOTECA PWM WRITE . . | 86 |
| | APÊNDICE C – DAQ USB-6212 | 87 |

1 Introdução

Baseado em dados do relatório do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), publicado em 22 de março de 2023. O setor de transporte foi responsável pela emissão de 203,8 milhões de toneladas de dióxido de carbono CO_2 no Brasil no ano de 2021. Sendo o subsetor com o maior percentual com cerca de 38% do total no setor relativo à energia e processos industriais, seguido pela indústria com 31%.

Ainda, segundo os dados do mesmo relatório, a atividade de transportes corresponde a quase o dobro do valor emitido pelo desmatamento no bioma Cerrado. Houve um aumento de cerca de 10% em relação ao estudo anterior, voltando ao patamar do ano de 2017, até então o ano recorde em emissão de CO_2 . Sendo o consumo de óleo diesel em veículos pesados e a gasolina os principais responsáveis por esse aumento (POTENZA et al., 2023).

Segundo dados do estudo do *State of Global Air* ou Estado Global do Ar do *Institute for Health Metrics and Evaluations's* IHME ou Instituto de Métricas e Avaliação em Saúde, publicado em 26 de outubro de 2020, cerca de 6,67 milhões de pessoas faleceram de causas relacionadas a poluição do ar no mundo em 2019, sendo uma das fontes de emissão de partículas que poluem o ar os veículos (IHME, 2020).

Diante desse cenário, nos últimos anos o interesse no desenvolvimento e aquisição de veículos elétricos vem crescendo consideravelmente, com incentivos vindo de políticas ambientais que tem o objetivo de substituir combustíveis fósseis por fontes de energias limpas e renováveis, como, por exemplo, a normativa de n.º 21 publicada pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) em 10 de dezembro de 2021. Definindo as novas fases do Programa de Controle de Emissões Veiculares (Proconve), com início previsto em 2025 (IBAMA, 2021).

Em consonância com essas políticas ambientais, segundo dados da Associação Brasileira de Veículos Elétricos (ABVE), houve um crescimento de 200% nas vendas de veículos elétricos plug-in nos últimos 12 meses. Onde apenas no mês de outubro de 2024 foram vendidos 16.033 veículos eletrificados, com um aumento de 68% em comparação ao mês de outubro de 2023. Ao todo foram vendidos 138.581 veículos no acumulado de janeiro a outubro representando um aumento de 107% comparado ao mesmo período de 2023, onde foram vendidos 67.047 veículos (ABVE, 2024).

Mediante um estudo comparativo de eficiência energética, foi verificado que os veículos elétricos são mais eficientes quando comparados aos carros à combustão. Com valores entre 70% a 90% de conversão de energia das baterias em movimento, ante 10% a 15% de conversão na forma de combustível (ONOHARA, 2022).

Nesse viés, (CACIATO; MENDES, 2024) realizaram um estudo sobre o impacto da transição energética para veículos elétricos em aspectos ambientais e econômicos nas cidades. Nessa pesquisa foi verificado que a emissão de gases do efeito estufa (GEE) no seu ciclo de vida na matriz elétrica é de 65% a 67% menor que os veículos de combustão interna.

A pesquisa também traz um estudo comparativo da emissão de CO_2 de quatro fontes de matrizes energéticas, com um trajeto de 240,49 km realizado por um veículo, onde a emissão de CO_2 de um veículo elétrico de matriz energética brasileira foi 21,45, contra 60,64 de emissão de gasolina, portanto quase o triplo do veículo elétrico.

Na perspectiva da utilização de veículos elétricos, (REIS; FERRETTI, 2024) realizou um estudo sobre os desafios e perspectivas associados à adoção desses veículos no Brasil. O estudo aponta uma perspectiva positiva, uma vez que o país possui uma grande capacidade de geração de energias renováveis e alternativas, como a solar e a eólica. De acordo com a pesquisa, a popularização dos veículos elétricos tem apresentado um aumento significativo na disponibilidade de modelos no mercado, com grandes montadoras investindo em tecnologias de propulsão elétrica, no aprimoramento da capacidade das baterias e no avanço dos sistemas de recarga.

Além disso, o autor destaca aspectos cruciais para a transição dos veículos movidos a combustão para os elétricos, como a questão da matriz energética, que exigirá a ampliação da capacidade de geração de energia no país. Outros fatores relevantes incluem o apoio governamental, por meio de subsídios e estratégias de apoio aos setores relacionados aos combustíveis fósseis. Por fim, a viabilidade econômica representa um dos maiores desafios, principalmente no que tange à estabilidade e competitividade em relação ao comércio de veículos a combustão.

Contudo, ainda existem adversidades a serem superadas, como, por exemplo, em relação à autonomia dos veículos, pontos de recarga escassos, além do alto custo na aquisição dos veículos, cabendo a realização de pesquisas e projetos na área de eficiência energética a fim de solucionar este desafio (SOUZA, 2018).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Conceber a estrutura de um triciclo, realizar a instrumentação eletrônica e implementar o controle diferencial eletrônico nas rodas traseiras

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um veículo elétrico tipo triciclo com tração na traseira independente, ou seja, um motor por roda;
- Desenvolver uma topologia de circuito em ponte h para alimentar os motores do triciclo com capacidade de corrente acima de 80 A;
- Definir a plataforma de microcontrolador mais adequada para fazer o gerenciamento e controle do veículo em funcionamento;
- Definir os sensores e atuadores periféricos incluindo seus condicionamentos de sinais;
- Definir a estratégia lógica que garanta as manobras do triciclo sem arrastar os pneus;
- Definir a estratégia lógica que garanta o movimento linear do veículo mantendo as rodas na mesma velocidade;
- Elaborar o controle em malha fechada para corrigir o erro de rotação das rodas quando o veículo estiver em linha reta.

1.2 Contribuição

Esta pesquisa mostra contribuições tecnológicas e científicas por se tratar de um trabalho experimental com resultados que respondem algumas problemáticas de estratégias de controle em veículos elétricos.

Como contribuição tecnológica, apresenta-se uma topologia de circuito eletrônico destinada à alimentação de motores de corrente contínua (CC) com correntes elétricas de até 86 A, baseada na configuração básica fornecida pelo fabricante do circuito integrado. Tal contribuição reveste-se de relevância, uma vez que não existem amplificadores comercialmente disponíveis capazes de fornecer níveis de corrente CC na magnitude exigida pelos motores utilizados nesta pesquisa.

Foi também indicada uma plataforma de microcontrolador capaz de gerenciar os sensores/atuadores do veículo e o sistema de controle em malha fechada, garantindo as velocidades de processamento necessárias. Essa definição foi crucial devido à

existência de vários modelos de plataformas no mercado, mas que, quando testadas, não atendiam às necessidades do veículo proposto.

Por fim, como contribuição científica, foram estabelecidas as estratégias de medição e controle necessárias para a implementação do diferencial elétrico no veículo. Essa contribuição apresenta uma abordagem para o controle do veículo elétrico, tanto em movimentos retilíneos quanto em curvas abertas e fechadas, de forma a evitar o arraste das rodas.

1.3 Organização do trabalho

Em síntese o presente trabalho é organizado por capítulos, além deste capítulo introdutório, no Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura técnica acerca de trabalhos feitos sobre o tema de veículos elétricos.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão teórica do princípio de funcionamento dos componentes utilizados.

No Capítulo 4 apresenta os métodos e técnicas utilizadas durante a realização do projeto, baseadas na teoria descrita no Capítulo 3.

No Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos das montagens dos circuitos de ponte h para acionamento dos motores, do sistema encoder para leitura de velocidade dos motores, do circuito de aceleração do triciclo, do sistema de frenagem e manobrabilidade, com os resultados dos testes realizados em malha aberta e após a implantação do sistema em malha fechada.

Por sua vez, o Capítulo 6 é apresentado às considerações finais e propostas de realização de etapas posteriores.

2 ESTADO DA ARTE

Este capítulo realiza uma revisão da literatura técnica sobre estudos e pesquisas relacionadas ao diferencial eletrônico aplicado a veículos elétricos. Além disso, são analisados projetos de desenvolvimento de veículos elétricos, com ênfase nas abordagens tecnológicas, metodológicas e nos avanços recentes na área.

(RAVI; PALANI, 2013) realizaram um estudo de um controlador para realizar um diferencial eletrônico de um veículo elétrico. Seu projeto propõe realizar o controle de dois motores de corrente contínua, do tipo *Brushless* que controlam as rodas traseiras do veículo. Em seu experimento foi utilizado o microcontrolador PIC 16F877A. O método de controle utilizado foi baseado na detecção de cruzamento de zero da força contra-eletromotriz. É descrito no trabalho que o sistema diferencial eletrônico (DE) apresenta vantagens em relação ao diferencial mecânico, como a redução de uma estrutura mecânica que aumenta consideravelmente o peso da estrutura, além disso no DE não existe a ligação física entre as rodas motrizes, o controle de potência é realizado de forma independente.

No trabalho foi desenvolvido o projeto de um veículo do tipo quadriciclo, onde os motores foram acoplados aos eixos das rodas dianteiras para realizar o controle das rodas por meio do torque dos motores em cada roda, de maneira independente.

A Figura 1 ilustra o veículo elétrico experimental com sistema de controle diferencial eletrônico.

Figura 1. Veículo elétrico experimental



Fonte: (RAVI; PALANI, 2013)

O sistema do controle diferencial eletrônico desenvolvido realiza as seguintes funções, através de um potenciômetro é determinado o ângulo de direção, através da leitura de sua tensão, outro potenciômetro determina a velocidade desejada do veículo. Ele também determina se o veículo está se movendo linha reta, ou realizando curvas. O controle diferencial opera em dois regimes, trajetória reta e em regime de curva, na primeira os dois motores devem operar na mesma velocidade, já na curva os motores operam em velocidades diferentes. Por meio da leitura de um encoder óptico são determinadas as velocidades das rodas. No regime de curvas, o sistema ajusta a velocidade da roda interna a curva para 1000 RPM, enquanto a roda externa a rotação será de 1800 RPM. O sistema apresentou resultados satisfatórios com estabilidade do veículo em condições de curva.

(DIAS, 2014) realizou um trabalho que consistiu na elaboração de um sistema de diferencial eletrônico para o veículo elétrico utilitário da Cidade Universitária da UFRJ, com o propósito de otimizar o controle de tração e estabilidade do veículo. Esse sistema permite “uma distribuição independente e otimizada de torque entre as rodas motrizes, aumentando a eficiência e segurança em manobras.”

A Figura 2 ilustra o veículo elétrico da UFRJ usado para o estudo do diferencial eletrônico por Dias.

Figura 2. Protótipo do projeto veículo elétrico UFRJ para competições de eficiência



Fonte: (DIAS, 2014)

A metodologia empregada envolveu a modelagem do sistema, a implementação de algoritmos de controle, a simulação de cenários variados e a construção de um protótipo funcional para teste. Os resultados obtidos evidenciam “uma melhora significativa no comportamento do veículo.” Com o diferencial eletrônico, o veículo “apresentou maior estabilidade em curvas e superfícies de baixa aderência, com uma resposta mais precisa em situações de condução urbana”.

Esse sistema demonstrou “um controle com uma condução mais segura e ágil, especialmente em ambientes urbanos como o da Cidade Universitária.” O protótipo validou a eficácia do diferencial eletrônico, “destacando seu potencial para aplicações em veículos elétricos de uso institucional e urbano”.

(WANG et al., 2016) Realizaram um estudo voltado a investigação do controle guinada de veículos elétricos com direção diferencial, com foco em situações de falhas totais no sistema de direção dianteira ativa. Foi desenvolvido um controlador robusto $H\infty$ de feedback com objetivo de estabilizar a guinada, sendo considerado pontos como a incerteza nos parâmetros e distúrbios externos. Foram realizadas simulações com o CarSim-Simulink para comprovação do controlador proposto, confirmando sua eficácia em garantir a estabilidade e o manuseio adequado do veículo.

Na pesquisa é destacado que o desenvolvimento crescente de veículos com o acionamento elétrico independente que vem demonstrando serem eficazes na melhoria do manuseio e da estabilidade dos veículos. A estratégia dos motores nas rodas vem apresentando ser uma solução de “atuação flexível devido à rápida e precisa resposta de torque dos motores elétricos”. A estabilização de guinada no trabalho é obtida por meio do controle de rastreamento da taxa de guinada em relação aos valores desejados. Por incertezas no processo de definição exata da relação entre o a taxa de guinada e o ângulo de direção foi adotado uma estratégia de feedback dinâmico com base em desigualdades matriciais lineares. Inicialmente foi realizado a modelagem do sistema e a dinâmica do veículo com direção diferencial. Utilizou-se o modelo de bicicleta com intuito de simplificar o design do controlador.

Foram realizadas simulações para duas manobras de condução, a J-turn e a mudança dupla de faixa, para a simulação considerou-se que o motor de direção falha por completo. O objetivo do controle é então fazer com que a taxa de guinada do veículo siga seu valor desejado apenas com a direção diferencial. Na simulação J-turn, o veículo é controlado com velocidade longitudinal iniciando em 27 m/s e decaindo para 24 m/s, observou-se que o ângulo de diferencial foi mantido em uma região razoável com uma tendência de variação bastante semelhante em comparação com o comando de direção do motorista.

Para a simulação de mudança dupla de faixa. Os resultados mostraram que o ângulo de direção real da roda dianteira foi controlado com um nível razoável de eficácia do controlador proposto no controle do ângulo de direção do motorista. Já em relação ao controle de taxa de guinada, pode-se observar que ela segue bem o valor de referência, com um pequeno erro de rastreamento. Também se observou que as forças longitudinais das duas rodas mudaram de forma igual em magnitude, porém em direções opostas.

(ANJOS, 2017) desenvolveu um veículo elétrico de duas rodas com controle baseado na lógica fuzzy, o protótipo foi concebido com dois motores de corrente contínua acoplados as rodas, possibilitando assim, o controle independente das rodas.

A Figura 3 ilustra a estrutura do veículo elétrico controlado pela lógica fuzzy por Iuri.

Figura 3. Veículo elétrico controlado por lógica fuzzy



Fonte: (ANJOS, 2017)

Foi empregado um encoder incremental óptico para a obtenção das leituras da velocidade de rotação dos motores. Adotou-se o acelerômetro e giroscópio MPU 6050 para captar os ângulos de inclinação, rotação e vibração do veículo. Foi empregado um microcontrolador Arduino para efetuar o acionamento da ponte h, além da leitura e transmissão dos valores de rotação dos motores, bem como da aquisição e envio dos ângulos de inclinação e rotação do veículo.

Para o controle da velocidade dos motores, foi adotada a modulação por largura de pulso (PWM), a qual foi implementada por meio de um circuito astável baseado no temporizador 555, responsável pela geração do sinal PWM. Um transistor MOSFET foi utilizado como dispositivo de chaveamento para acionamento dos motores. Para realizar a inversão do sentido de rotação dos motores foi utilizada um circuito de ponte h com transistores MOSFET.

O Sistema de controle foi realizado por meio de um dispositivo de aquisição de dado DAQ, desenvolvida no ambiente do Labview. Esse sistema é o responsável do envio

das variáveis de controle para o Arduino. Sendo elas a velocidade angular dos motores e os ângulos de inclinação. Baseados nesses dados ser realizada a variação do PWM que é enviado aos motores.

(OLIVEIRA, 2020) realizou um trabalho com objetivo de projetar e realizar testes com parte eletrônica de baixa tensão do veículo, como também desenvolveu o firmware para o controle diferencial de um veículo elétrico da FSAE Brasil *Formula Society of Automotive Engineers*. Foi utilizado a plataforma ARM STM32 da STMicroelectronics. A IDE utilizada foi a STM32 Cube.

A Figura 4 ilustra o veículo do Fórmula SAE da UFRGS.

Figura 4. Protótipo do veículo do Fórmula SAE da UFRGS



Fonte: (UFRGS, 2011)

O sistema de aceleração utilizado foi do tipo sensor pedal de aceleração, com a sigla TPS, *Throttle position sensor*, ou sensor acelerador de posição. O sensor varia a tensão de saída proporcionalmente a pressão exercida no pedal, com faixa de trabalho entre 0,6 V até 4,6 V. Já o sistema de direção foi utilizado um sensor de ângulo de direção com sigla SWAP (*Steering Wheel Angle Position*). O modelo escolhido foi o C68049XF utilizado no veículo Trailblazer da General Motors (GM). O sensor capta ângulos entre -150 ° a 150 °, com precisão de 0,1 °.

O sistema também é composto por um modo pronto para dirigir (*Ready to Drive Mode*) esse sistema é responsável para evitar acionamento acidental, é um mecanismo de proteção. Esse sistema possui um botão, que quando acionado, o sistema de tração estiver ativo e o pedal de freio estiver ativado. O sistema ativa um alerta sonoro com no mínimo de 80 dB com duração de 1 a 3 segundos.

Também possui um dispositivo de plausibilidade do sistema de freio BSPD, ou

do inglês (*Brake System Plausible Device*) é um sistema para evitar que o piloto faça a frenagem de maneira brusca e eleve consequentemente a corrente na bateria fornecida aos motores. O sistema é feito por meio de um comparador por histerese. Onde o sinal de saída é o nível de tensão, quando ela é positiva, significa que o sinal ultrapassou o limiar.

Sistema de desligamento, é composto por um conjunto de relés responsáveis pelo acionamento das baterias. Em caso de emergências o sistema irá atuar em menos de 5 segundos no desligamento, assim protegendo o veículo de danos.

(CARNEIRO, 2021) realizou um trabalho desenvolvendo um veículo de duas rodas do modelo Segway, controlado pela lógica fuzzy embarcadamente. O veículo foi construído numa plataforma apoiada por duas rodas com um guidão. Foram utilizados dois motores de corrente contínua acoplados as rodas.

A Figura 5 ilustra o protótipo do Segway desenvolvido por Gênisson.

Figura 5. Protótipo do veículo com o usuário



Fonte: (CARNEIRO, 2021)

A instrumentação do projeto é composta por um giroscópio modelo MPU 6050, que contém um acelerômetro acoplado no encapsulamento, o equipamento foi colocado junto ao guidão para poder captar os ângulos de movimento. O sistema de encoder foi realizado de forma indireta com a utilização de um motor de corrente contínua modelo FC130SA, que possui fixado em sua estrutura um encoder óptico codificador de 334 pulsos, e por meio da relação de proporcionalidade entre a rotação e a tensão gerada.

Para a realização do controle da velocidade dos motores, foi utilizada a modulação PWM, porém diferente do trabalho de (ANJOS, 2017), foi adotada outra estratégia. A

modulação dos pulsos foi gerada por meio do Arduino, para o acionamento dos motores foram utilizadas módulo driver ponte h do modelo BTS7960, esses módulos apresentam diversas vantagens, reduzindo significativamente a quantidade de hardware necessário para o acionamento dos motores. Substituindo o circuito de chaveamento dos transistores MOSFET.

O Arduino é incumbido de realizar a aquisição das leituras provenientes tanto do sistema de giroscópio quanto do encoder, encaminhando essas informações para a Raspberry Pi. Adicionalmente, o Arduino é responsável pela geração do sinal de modulação por largura de pulso PWM a ser enviado aos motores, sendo os valores deste sinal calculados com base nas diretrizes fornecidas pela Raspberry Pi.

O Raspberry Pi é responsável pelo sistema de controle da lógica fuzzy com base nas leituras dos motores recebidas pelo Arduino via USB. Esses parâmetros de velocidade de rotação e ângulo de inclinação são recebidos e baseado nas regras pré-determinadas, as ações de controle são tomadas.

(VARGAS, 2022), realizou uma pesquisa descrevendo o processo de estudo e desenvolvimento do projeto EV-IFSC II, o projeto do veículo elétrico do Instituto Federal de Santa Catarina, descrevendo as novas etapas de instrumentação e controle desenvolvidas.

A Figura 6 ilustra o veículo elétrico do EV-IFSC II.

Figura 6. Veículo elétrico do EV-IFSC II



Fonte: (VARGAS, 2022)

Em sua pesquisa ele apresenta como etapas de construção do veículo foram realizadas, em destaque o desenvolvimento de um novo sistema de controle eletrônico, nova carenagem, sistema de monitoramento. Também foram descritos os tipos de veículos elétricos e suas principais características e diferenças. Apresenta os tipos de motorização

utilizadas em VE e suas vantagens e desvantagens e necessidades para serem utilizados nos projetos, como também os métodos de recarga.

O veículo possui quatro rodas com capacidade para dois passageiros, utiliza um motor de indução refrigerado a ar. Ele utiliza um inversor de frequência para converter a tensão contínua da bateria em tensão alternada para alimentar o motor. O veículo é dotado de um sistema de display LCD que é a interface homem máquina que propicie ao usuário verificar as informações. Como resultados, o autor descreve que foram implementados um novo sistema de controle do veículo, com painel de led eletrônico com um novo sistema de controle interativo.

(SEGANTINI, 2022) realizou o desenvolvimento de um diferencial eletrônico para o veículo elétrico T-06 da equipe do Fórmula Estudantil da EESC (Escola de Engenharia de São Carlos). Nesse estudo foram realizadas a modelagem dinâmica do veículo e a estratégia de controle utilizada do LQR, Regulador Linear Quadrático.

O veículo possui dois motores acoplados à transmissão do eixo traseiro. Para a realização do estudo foi desenvolvido um modelo dinâmico com duas rodas, para emular o eixo traseiro do veículo. Com base no modelo projetado foram modeladas as equações diferenciais que representem a dinâmica do modelo. Após isso, foram realizados testes com nove velocidades longitudinais.

A partir dos resultados obtidos, o autor considerou que o veículo em questão pode ser modelado para um sistema controlável. Em relação ao sistema de controle, infere-se que o sistema tornou-se estável ao realizar realimentação negativa. Por fim, o autor chegou à conclusão de que o LQR é uma estratégia eficaz para a estabilização do sistema.

Baseado na revisão bibliográfica apresentada, foi realizado o estudo de desenvolvimento e instrumentação de um triciclo elétrico com controle diferencial em malha fechada das rodas traseiras, que estão acopladas a motores de corrente contínua. O sistema é acionado mediante um acelerador que utiliza um sensor de efeito *hall*, a manobrabilidade é determinada através de um potenciômetro que está acoplado ao guidão, o sistema também contém uma chave liga/desliga para inversão do sentido dos motores e com isso habilitar a ré. Todo o sistema é gerenciado por uma Tiva C 123.

Através das tabelas 1 e 2 são realizados os comparativos das especificações técnicas entre as placas Tiva C 123, Arduino Uno, PIC 16F887A e Raspberry Pi.

Tabela 1. Comparaçao de Especificaçoes Técnicas entre Arduino Uno e Tiva C 123

| Especificação | Arduino Uno | Tiva C 123 |
|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Microcontrolador | ATmega328P | ARM Cortex-M4 |
| Arquitetura | 8-bit | 32-bit |
| Clock | 16 MHz | 80 MHz |
| Memória Flash | 32 KB | 256 KB |
| RAM | 2 KB | 32 KB |
| Entradas/Saídas Digitais | 14 (PWM em 6) | 40 (PWM em 6) |
| Entradas Analógicas | 6 | 12 |
| Comunicação Serial | 1 UART | 2 UARTs |
| Portas USB | 1 USB-B (Programação) | 1 USB micro-B |
| Interface de Rede | Nenhuma | Ethernet (via PHY externo) |
| Alimentação | 7-12V (via Jack), 5V (USB) | 5V (via micro-USB) |
| Sistema Operacional | Nenhum | Nenhum |

Fonte: Autor.

Tabela 2. Comparaçao de Especificaçoes Técnicas entre PIC 16F877A e Raspberry Pi

| Especificação | PIC 16F877A | Raspberry Pi |
|---------------------------------|-------------|-----------------------------------|
| Microcontrolador | PIC 16F877A | Broadcom BCM2837 (ARM Cortex-A53) |
| Arquitetura | 8-bit | 64-bit |
| Clock | 20 MHz | 1.2 GHz |
| Memória Flash | 368 KB | 8 GB (versão 4) |
| RAM | 368 Bytes | 1 GB LPDDR2 |
| Entradas/Saídas Digitais | 33 | 26 GPIO (PWM disponível) |
| Entradas Analógicas | 8 | Nenhuma |
| Comunicação Serial | 1 UART | 1 UART |
| Portas USB | Nenhuma | 4 USB (2.0) |
| Interface de Rede | Nenhuma | Ethernet (via adaptador) |
| Alimentação | 5V | 5V (via micro-USB ou GPIO) |
| Sistema Operacional | Nenhum | Linux (Raspberry Pi OS) |

Fonte: Autor.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse capítulo faz uma breve descrição sobre conceitos teóricos que serão utilizados durante o trabalho, onde abordará sobre veículos elétricos, suas principais características, diferenças e tipos. Também abordará sobre a teoria do diferencial eletrônico, sua definição, seu funcionamento prático, diferenças e vantagens sobre o diferencial eletrônico.

3.1 Veículos elétricos

Os veículos elétricos (VEs) compreendem uma categoria de veículos que operam com o uso de baterias como fonte primária de energia. Esta fonte energética pode ser exclusivamente composta por baterias ou, alternativamente, pode ser integrada a outras fontes de energia (DENTON, 2018).

Tipos de veículos elétricos

A seguir são descritas as características e diferenças entre os tipos de veículos elétricos e sua nomenclatura.

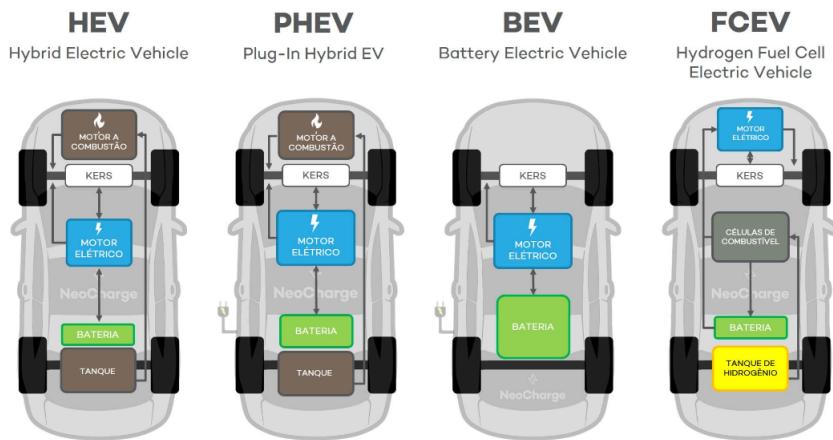
- BEV — *Battery Electric Vehicle*, veículo elétrico a bateria, caracterizam-se por operar unicamente com baterias como fonte de energia, sem a utilização de motores de combustão interna ou qualquer outra forma de propulsão. Esse é o tipo de veículo em estudo nesse trabalho.
- HEV — *Hybrid Electric Vehicle*, Veículo Elétrico Híbrido, são modelos que possuem mais de uma fonte de energia. Geralmente um motor de combustão interna (MCI) e a outra fonte de energia é a bateria.

Esses veículos não possuem a capacidade de recarga externa. Sua recarga é realizada por meio de um sistema de frenagem regenerativa, fornecida por meio de um gerador conectado ao MCI.

- PHEV — *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*, Veículo Elétrico Híbrido Recarregável, Trata-se da variante de veículos híbridos dotados de capacidade de recarga externa, por meio da rede elétrica. No contexto do sistema híbrido, após a drenagem da bateria, o sistema de tração é ajustado para integrar o motor de combustão interna (MCI), garantindo assim a manutenção da autonomia do veículo.
- FCEV — *Fuel Cell Electric Vehicle*, Veículo Elétrico com Célula de Combustível, refere-se aos veículos que utilizam fontes alternativas de energia, comumente por células de conversão de hidrogênio.

A Figura 7 ilustra a estrutura básica e as diferenças dos tipos de veículos elétricos.

Figura 7. Tipos de veículos elétricos



Fonte: (NEOCHARGE, 2024)

3.2 Diferencial eletrônico

Ao realizar uma curva, as rodas localizadas no lado externo à trajetória descrevem uma trajetória circular cujo raio é superior ao da trajetória seguida pelas rodas internas. Devido à exigência de que todas as rodas girem com a mesma velocidade angular em torno do centro da curva, a velocidade linear da roda externa deve ser maior do que a da roda interna, uma vez que a distância percorrida pela roda externa é maior, considerando o raio da curva.

Em veículos com MCI, são usados o sistema diferencial mecânico, composto por um conjunto de engrenagens que permitem as rodas possuam velocidades diferentes, porém existem desvantagens nesse sistema, um deles são as perdas por atrito, outro problema é a impossibilidade de controle independente das rodas.

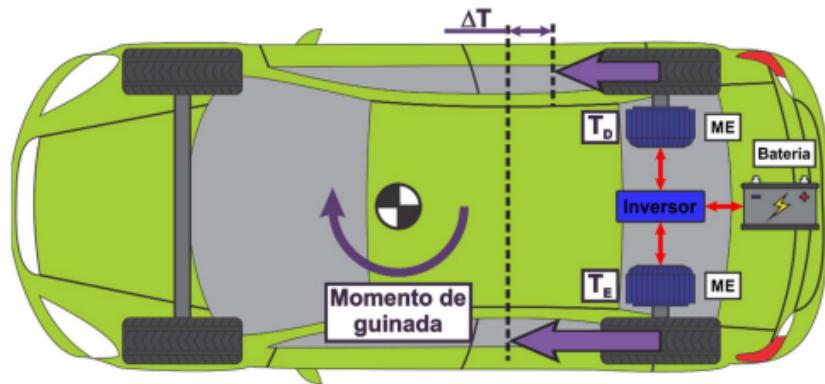
Em veículos elétricos existe uma estratégia onde se pode utilizar dois ou mais motores independentes, dessa maneira desacoplando o movimento rotacional de duas ou quatro rodas. Essa técnica permite controlar a rotação das rodas de maneira independente. Com isso, emulando o sistema diferencial mecânico (SILVA, 2020).

Portanto, o diferencial eletrônico, ou vetorização de torque, é um sistema de controle de estabilidade que melhora o manuseio do veículo sem comprometer seu desempenho longitudinal, sendo comumente utilizado para aumentar a segurança ao reduzir a taxa de guinada e evitar derrapagens.

No entanto, ele também pode ser aplicado para aprimorar o desempenho, aumentando a aceleração de guinada e, consequentemente, a dinâmica lateral e o comportamento em curvas (STOOP, 2014).

A Figura 8 mostra um exemplo do funcionamento do diferencial eletrônico. Onde o torque aplicado a roda direita (T_D) possui uma magnitude menor comparada ao da roda esquerda (T_E). A diferença entre os torques (ΔT) gera um momento de guinada do veículo, facilitando a realização da curva do veículo.

Figura 8. Exemplo da utilização do diferencial eletrônico



Fonte: (SILVA, 2020).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

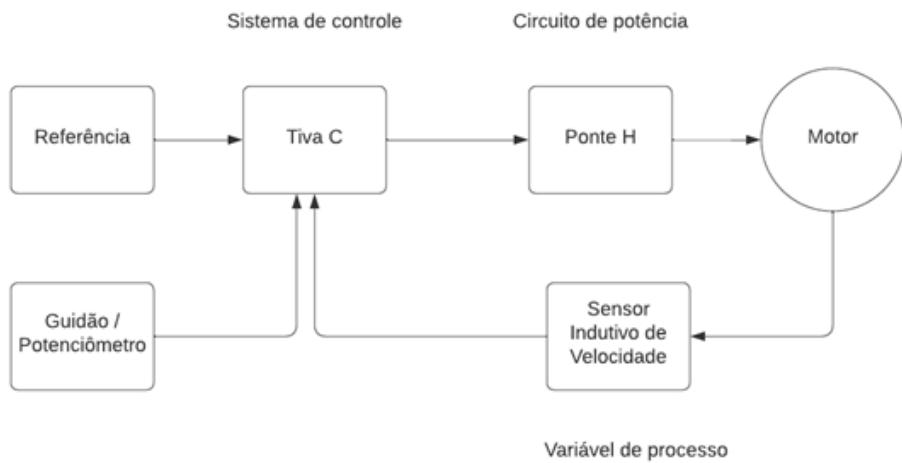
Neste capítulo é apresentado os materiais e as metodologias utilizados para o desenvolvimento do veículo elétrico tipo triciclo. Serão discutidas cada parte usada na estrutura do veículo e como foram definidas.

4.1 O projeto de pesquisa

Descrição do Sistema Representado pelo Diagrama em Blocos

O diagrama em blocos apresentado na Figura 9 descreve a arquitetura do projeto de controle do triciclo, utilizado para o acionamento de um dos motores através da modulação PWM. O sistema está organizado em três partes principais: a entrada de referência, o sistema de controle e o circuito de potência. Além disso, há uma retroalimentação proveniente da leitura da rotação dos motores.

Figura 9. Diagrama em blocos do sistema de controle dos motores



Fonte: O Autor.

Entrada de Referência A entrada de referência é responsável por fornecer o valor desejado para o sistema. Esse valor pode ser ajustado por meio de um acelerador. Essa entrada representa o valor desejado de velocidade para o veículo.

Guidão/ Potenciômetro O elemento em questão é responsável por determinar o ângulo de curvatura realizado pelo guidão do veículo. Este valor é transmitido ao microcontrolador Tiva C, configurando a entrada de referência do sistema. Tal entrada representa o ângulo de curvatura desejado para o veículo, podendo indicar uma manobra à esquerda ou à direita.

Sistema de Controle O núcleo do controle é realizado por um microcontrolador Tiva C 123, que processa o sinal de referência e a variável de processo medida pelo sensor indutivo de velocidade. O microcontrolador utiliza esses sinais para calcular o erro e ajustar o acionamento do motor por meio do circuito de potência. A Tiva tem outras funções, como a determinação dos parâmetros da função de curva, como também as leituras e acionamentos dos sensores de freio e a chave para inversão de sentido dos motores para realizar a ré, além de gerar o sinal modulado em PWM.

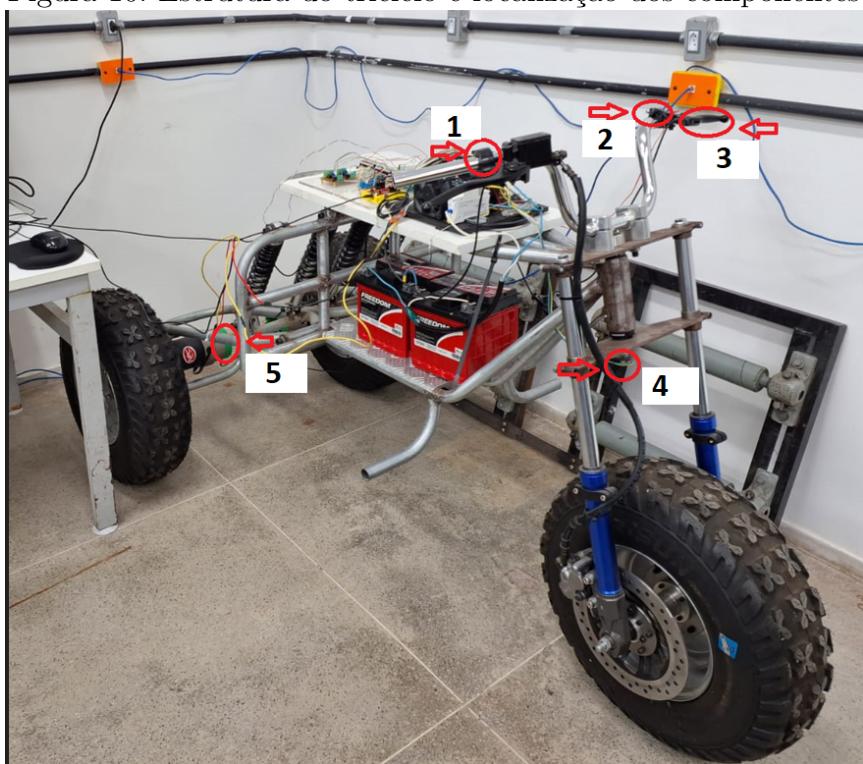
Circuito de Potência O circuito de potência é composto por um par de pontes h, para cada motor, que atua como intermediária entre o microcontrolador e o motor. A ponte h é responsável por fornecer a potência necessária para o motor, permitindo o controle de sua velocidade e direção.

Motor e Variável de Processo O motor que está acoplado as rodas, é o elemento final do sistema, responde ao comando do circuito de potência. Um sensor indutivo de velocidade mede a variável de processo (velocidade do motor), que é enviada de volta ao microcontrolador Tiva C para a formação do laço de controle em malha fechada.

A seguir, serão detalhadamente descritas as etapas desenvolvidas ao longo do projeto.

O projeto proposto para a pesquisa foi o desenvolvimento e fabricação de um veículo elétrico tipo triciclo completamente instrumentado e com controle diferencial nas rodas traseiras. Na Figura 10 está destacado os componentes usados no triciclo.

Figura 10. Estrutura do triciclo e localização dos componentes

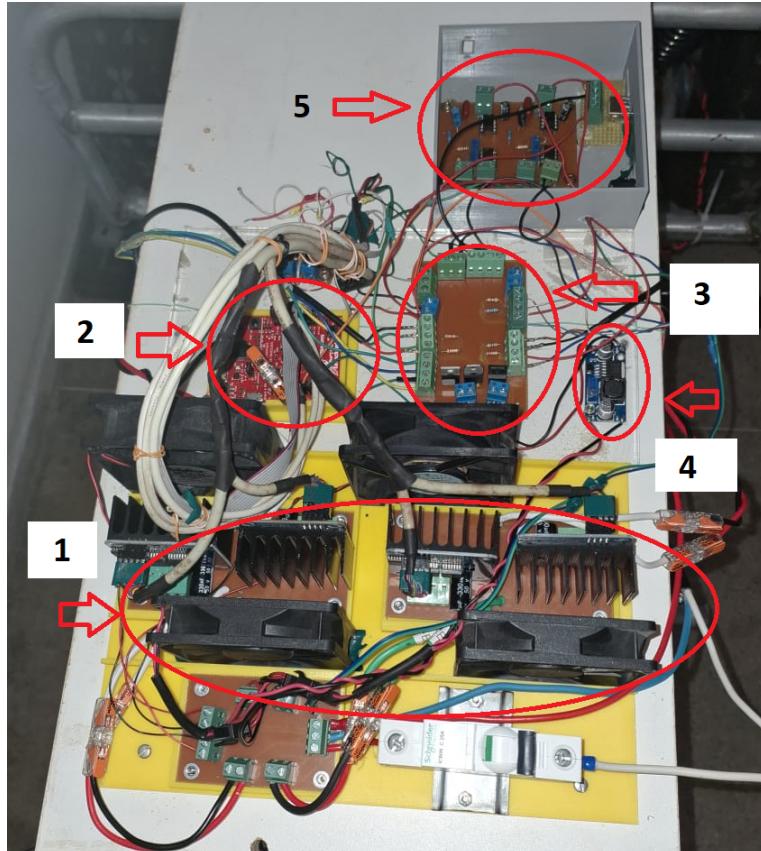


Fonte: O Autor.

O acionamento do triciclo é realizado por meio de um acelerador que permite a variação da velocidade desejada pelo usuário (indicador 1). O acionamento do movimento para trás (ré) é habilitado mediante uma chave liga/desliga (indicador 2). O sistema de frenagem dos motores é ativado por meio da manete de freios quando acionada pelo usuário (indicador 3). Para medição do ângulo da curva foi utilizado um sensor resistivo (potenciômetro) conectado na parte inferior do eixo do guidão (indicador 4).

Baseado na variação do ângulo, foi determinado a diferença de velocidades das rodas quando o veículo entra na curva. A estratégia de realização das curvas será descrita em detalhes posteriormente. Por meio dos sensores indutivos fixados ao eixo dos motores (indicador 5) foi possível capturar as velocidades de rotação das rodas. A partir dessas leituras foram realizadas as compensações necessárias para o movimento correto do veículo. Na Figura 11, está apresenta a disposição dos componentes eletrônicos utilizados.

Figura 11. Circuitos eletrônicos que compõe o triciclo



Fonte: O Autor.

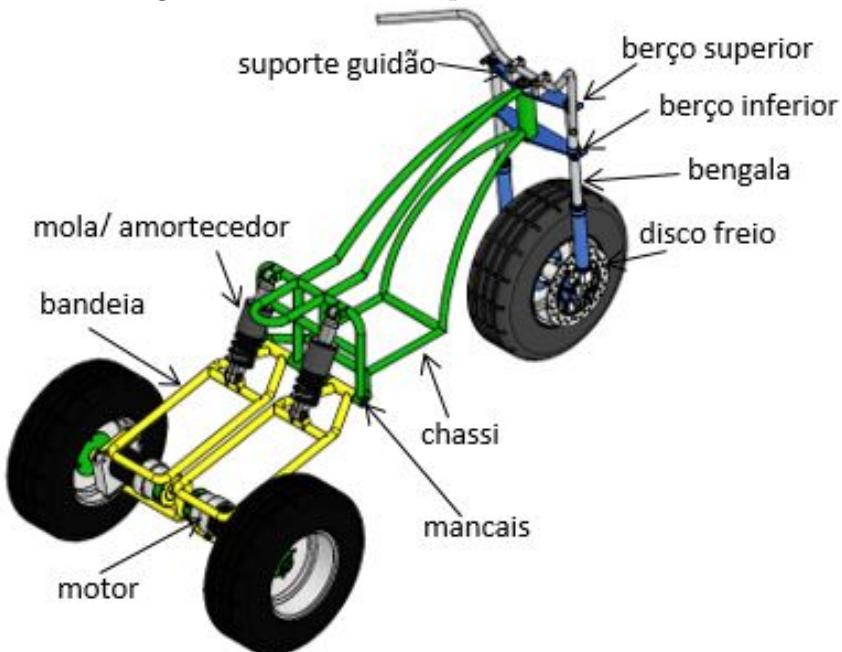
O circuito eletrônico do triciclo é composto pelos módulos drivers de ponte h modelo BTS7960. Eles são responsáveis pela alimentação de acionamento dos motores (indicador 1). O microcontrolador Tiva C (indicador 2), é responsável pela leitura dos sensores, cálculo da função das curvas, geração do sinal PWM e pelo sistema de controle em malha fechada baseado nas leituras dos motores. A placa, indicador 3, é responsável pela alimentação dos sensores e para realizar as interconexões entre os sensores e a Tiva.

O conversor DC-DC buck-boost, indicador 4, é o responsável por fornecer a tensão de alimentação adequada para os sensores. O circuito, indicador 5, é um conversor de frequência para tensão elétrica baseado no LM2907. Este circuito converte o sinal de frequência dos encoders das rodas em um valor de tensão proporcional. Foi utilizado essa estratégia de conversão de frequência para tensão elétrica para facilitar os cálculos de ajustes das velocidades das rodas e do controlador.

4.2 Bancada mecânica experimental

Vislumbrando a ideia inicial de instrumentar e fazer um controle diferencial de um veículo elétrico, foi construída uma estrutura, tipo triciclo, com dois motores CC e suspensão independentes acoplados na traseira, como esboçado na Figura 12. O projeto dimensional do triciclo foi baseado exclusivamente na experiência prática mecânica construtiva espelhada nas dimensões de uma moto comercial, ou seja, não foram aplicadas teorias de cálculos para o dimensionamento visto que a moto comercial é um veículo consolidado e, sendo assim, pode-se seguir o modelo com a segurança de funcionamento correto.

Figura 12. Estrutura experimental



Fonte: O Autor.

A suspensão traseira do triciclo foi composta por duas bandejas, molas, amortecedores e motores CC apoiados em mancais de deslizamentos ligados ao chassi. Para acoplamento dos motores as rodas foi construído um flange em alumínio com a furação compatível com as do eixo do motor e da roda. As bandejas e o chassi foram construídos com tubo de aço carbono galvanizado de $\frac{3}{4}$ " com parede de 1,2 mm. O mancal de rola-

mentos do guidão foi construído com tubo de aço carbono de 1" com parede de 4 mm. As outras peças foram construídas em chapas, barras ou tarugos em aço carbono e alumínio.

No processo de fabricação foi possível perceber que havia a necessidade de serem colocados dois amortecedores/molas em cada bandeja devido ao momento de força causado no mancal quando o veículo era inclinado para algum dos lados. A dianteira do triciclo foi reproduzida exatamente como são as das motos comerciais com amortecedores (bengalas), berço superior e inferior, suporte e guidão. Devido à largura do pneu ser superior à largura do pneu das motos convencionais, foi necessário aumentar a distância entre as bengalas com a fabricação de um flange que conectou a roda e o disco de freio ao sistema.

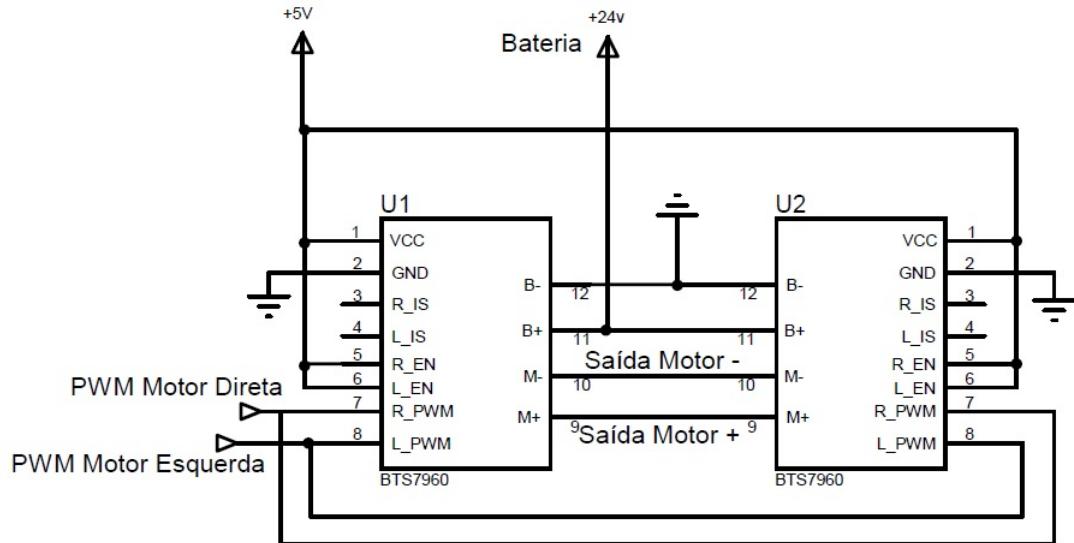
A maneta e pinça de freio foi o conjunto hidráulico usado em motos comerciais. A maneta de moto convencional já incorpora um sensor liga/desliga que fecha o contato quando é pressionada para ativar a lâmpada de freio. Neste projeto, além do propósito da lâmpada, esse sensor indica para o sistema de controle que deverá acionar o freio do triciclo. Para indicação do giro foi instalado um sensor de direção do triciclo usando um resistor variável (potenciômetro) instalado na parte inferior do mancal do guidão. Os pneus utilizados foram o AT 21 × 7 - 10 com rodas em aço carbono galvanizadas por questão de existência em estoque no laboratório.

4.3 Módulo driver ponte h BTS7960

Para realizar o acionamento dos motores foram utilizados módulos drivers do tipo ponte h modelo BTS7960, esse módulo tem capacidade de suportar correntes elétricas de até 43 A e tensão de alimentação de até 27 V, podendo ser acionados por meio de modulação PWM. A tensão da parte lógica é entre 3,3 V à 5 V, o que torna ideal para utilização em microcontroladores. Dada a necessidade de obter uma capacidade de corrente suficiente para suprir os motores, foi utilizada uma estratégia de construir uma placa para a utilização de duas pontes h em paralelo, aumentando assim a capacidade de corrente para 86 A. Essa estratégia foi adotada, pois não existem pontes h com capacidade de corrente maior disponíveis no mercado nacional. Na Figura 13 está mostrado o esquema das ligações em paralelo de duas pontes h.

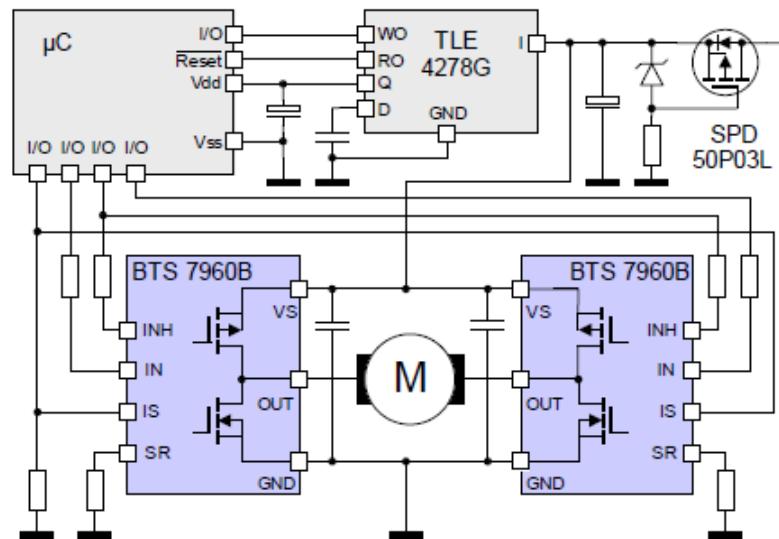
Para a construção de uma ponte h com o BTS7960 o fabricante sugere a utilização de dois CIs como mostrado na Figura 14. Baseado na proposta do fabricante, neste trabalho, pela necessidade de correntes da ordem de 60 A, foi testado colocar duas pontes h em paralelo, ou seja, foram usados 8 CIs BTS7960 nesta nova topologia. Além disso, foi necessário colocar collers para garantir refrigeração forçada dos dissipadores.

Figura 13. Esquema elétrico circuito da ponte h



Fonte: Autor.

Figura 14. Esquema elétrico de uma ponte h do fabricante



Fonte: Data Sheet , Rev. 1.1, December 2004.

4.4 Motor NPC-T74

Os motores utilizados no triciclo são o modelo NPC-T74 da empresa NPC Robotics, é um motor de corrente contínua de ímãs permanentes com tensão de alimentação de 24 V, também podendo ser alimentado com 36 V, tem uma potência de 1,7 hp, o que equivale a 1.267,69 W. O motor tem uma velocidade angular de 245 RPM, sua massa é de 6,53 kg. Em sua estrutura está conectada uma caixa de redução com relação de 20:1. Esse modelo é bastante utilizado em aplicações para acionamento de robôs. A tabela 3 resume as especificações do motor.

Tabela 3. Especificações técnicas do motor NPC-T74

| Especificação | Unidade |
|-----------------------|------------|
| Tensão de alimentação | 24 V |
| Potência elétrica | 1.267,69 W |
| Velocidade angular | 245 RPM |
| Fator de redução | 20:1 |
| Massa | 6,53 kg |

Fonte: Autor.

A Figura 15 ilustra o modelo do motor utilizado no projeto.

Figura 15. Motor NPC T-74



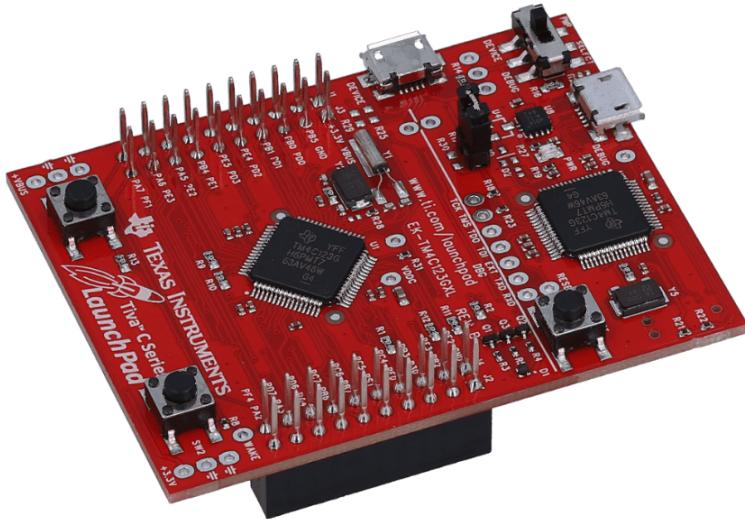
Fonte: NPC Robotics

4.5 Tiva C TM4C123

A Launchpad EK-TM4C123GXL é uma placa desenvolvida pela empresa Texas Instruments baseada no microcontrolador TM4C123GH6PM que possui um processador do modelo ARM Cortex-M4F com frequência de CPU de 80 MHz de 32 bits. Com 256 kB de memória flash e 32 kB de memória ROM estática. A interface possui dois conectores USB Micro-B, um total de quarenta pinos, sendo doze pinos de leitura analógica com conversor analógico-digital de 12 bits. Doze pinos de leitura e escrita digital, e vinte e oito pinos de leitura digital e escrita digital ou analógica. Um total de dezesseis pinos de saída em PWM.

O modelo da Tiva utilizado no projeto é apresentado na Figura 16

Figura 16. Modelo da placa de desenvolvimento Tiva C Modelo EK-TM4C123GXL



Fonte: (TEXASINSTRUMENTS, 2024).

A escolha da plataforma Tiva C foi fundamentada em critérios técnicos que atendem de forma mais eficiente às demandas do projeto.

Primeiramente, destacou-se a disponibilidade de pinos. Durante o desenvolvimento, identificou-se a necessidade de um número maior de pinos de entrada e saída do que o disponibilizado pelo Arduino. A plataforma Tiva C atende a essa demanda com uma oferta superior de pinos, permitindo maior flexibilidade no design do sistema pois ela possui 40 pinos de entrada/saída.

Além disso, a Tiva C apresenta uma biblioteca de controle PWM (Pulse Width Modulation) que opera a uma frequência de modulação de 1 kHz, em comparação à frequência de 490 Hz utilizada pelo Arduino. A frequência de chaveamento mais alta proporciona diversas vantagens, incluindo:

Maior precisão no ciclo de trabalho, possibilitando um controle mais refinado; Redução do ripple de corrente em aplicações envolvendo dispositivos indutivos, como motores e bobinas, resultando em uma operação mais estável e suave; Resposta mais dinâmica e eficiente, essencial em sistemas que requerem rápida adaptação às mudanças na referência de controle. Outro fator determinante foi a superioridade do conversor analógico-digital (ADC) da Tiva C. Com uma resolução de 12 bits, a plataforma é capaz de representar até 4096 níveis, superando os 1024 níveis representados pelo ADC de 10 bits do Arduino. Essa diferença proporciona uma precisão quatro vezes maior na captura e na análise das variações de sinais analógicos, fator crítico em aplicações que demandam alta exatidão.

O projeto em desenvolvimento exigia que o microcontrolador utilizado apresentasse capacidade suficiente para gerenciar de forma eficiente todos os componentes do sistema. Isso incluía a leitura e o acionamento de sensores, a geração de sinais de modulação PWM para o controle das pontes h e a execução do controlador em malha fechada do veículo de maneira embarcada, além de garantir a realização dessas tarefas de forma simultânea.

Nesse contexto, a plataforma Tiva C destacou-se por sua superioridade em termos de desempenho. Equipado com um processador ARM Cortex-M4 operando a 80 MHz, a Tiva C oferece uma capacidade de processamento significativamente superior à do Arduino Uno, cujo microcontrolador opera a 16 MHz. Essa diferença permite à Tiva C atender aos requisitos computacionais do projeto com maior eficiência, assegurando o desempenho adequado para as operações demandadas.

A plataforma Tiva C utiliza a Energia IDE, uma interface de desenvolvimento integrada que apresenta grande similaridade com a Arduino IDE. Essa semelhança proporciona uma transição mais fluida entre as duas plataformas, reduzindo o tempo necessário para adaptação e aprendizagem por parte do desenvolvedor. Essa característica é especialmente vantajosa quando comparada a outros microcontroladores que utilizam IDEs distintas, as quais demandariam mais tempo para aprendizagem.

Além disso, a Energia IDE é uma plataforma de código aberto, permitindo que sejam realizadas modificações e adaptações ao longo do desenvolvimento do projeto, conforme as demandas específicas. Outro ponto relevante é a possibilidade de compartilhamento de bibliotecas entre a Energia IDE e a Arduino IDE, o que amplia as funcionalidades disponíveis e facilita a implementação de soluções.

Assim, a plataforma Tiva C demonstrou ser a escolha mais adequada para o desenvolvimento do projeto, atendendo às exigências de desempenho, flexibilidade e precisão.

O procedimento para instalação dos programas IDE energia, Tivaware, como também a biblioteca PWM write estão disponíveis para consulta no Apêndice B.

A seguir, a tabela 4 descreve os pinos utilizados no projeto do triciclo.

Tabela 4. Descrição dos pinos utilizados da Tiva C

| Pino | Descrição |
|------|--|
| A0 | Pino central do potenciômetro do guidão |
| A3 | Pino de sinal do acelerador |
| PB0 | Pino de saída do sinal PWM para o motor direito para frente |
| PB1 | Pino de saída do sinal PWM para o motor direito para trás |
| PB7 | Pino de saída do sinal PWM para o motor esquerdo para frente |
| PB6 | Pino de saída do sinal PWM para o motor esquerdo para trás |
| PA4 | Pino de entrada da chave para acionamento da ré |
| PB4 | Pino de entrada do sinal do freio |
| PE2 | Pino de entrada do sinal de resposta do motor direito |
| PD2 | Pino de entrada do sinal de resposta do motor esquerdo |
| PC5 | Pino de saída do sinal PWM de referência do motor esquerdo |
| PC4 | Pino de saída do sinal PWM de referência do motor direito |

Fonte: Autor.

4.6 Estratégia de controle para as curvas

O diferencial veicular convencional, de natureza mecânica, constitui um dispositivo com três funções fundamentais, descritas a seguir: a primeira consiste em realizar a conversão do movimento rotacional do eixo principal para um eixo perpendicular, de modo a acionar as rodas tracionadas do veículo; a segunda corresponde à redução da velocidade de rotação transmitida às rodas, simultaneamente promovendo o aumento do torque; e a terceira função refere-se à compensação da diferença de velocidade entre as rodas do veículo durante a realização de curvas.

Neste trabalho, foi considerada a terceira função do diferencial mecânico, a qual se refere à compensação das velocidades das rodas do veículo durante a execução de uma trajetória curva. Como discutido anteriormente na fundamentação teórica. Para não ocorrer o arrasto de uma das rodas quando estiver numa curva é necessário que a roda de dentro do círculo tenha menor velocidade que a de fora do círculo, então, para o triciclo realizar as curvas de maneira que a roda externa à curva tenha velocidade linear maior que a roda interna foi adotada a função sigmoide como mostrada na equação 4.1.

A função sigmoide recebeu em número de bits o valor lido do potenciômetro de ângulo instalado no guidão do triciclo.

$$y = 1 - \frac{0.81}{1 + \exp(\pm k(x - x_0))} \quad (4.1)$$

A princípio a lógica de redução da velocidade da roda interna poderia se basear na variação de tensão elétrica linear do potenciômetro. Entretanto, a variação linear tem uma inclinação constante e, neste caso, para um raio de curvatura pequeno ou grande não existiria diferença de valores e a proporção de redução seria igual nos dois casos. Já na função sigmoide ocorre uma suavização na saída de valores de modo que a resposta diferirá para curvas mais ou menos acentuadas.

Diante disso, e considerando que a função sigmoide é bastante utilizada em sistema de controle, foi adotada para a estratégia de giro do triciclo. Para aplicação dos valores na função sigmoide foram estabelecidas três faixas de valores de leitura do potenciômetro definidos para indicar em qual situação o triciclo se encontra, ou seja, se: realizando a curva para a esquerda, para a direita, ou em posição reta. O potenciômetro utilizado foi do tipo linear com variação de ângulo de aproximadamente 300° do limite inferior ao limite superior.

Por compatibilidade de tensão com a Tiva C foi alimentado com 3,3 V e terra, sendo o terminal central o ponto de variação de tensão, neste caso, o 0° . Embora o potenciômetro tivesse uma variação relativamente grande, apenas 80° de ângulo pôde ser usado devido à limitação de curvatura do guidão. Neste caso, 40° para giro a direta e 40° para giro a esquerda aproximadamente considerando o centro 0° .

Baseado nesta variação de ângulo foram definidos os valores de entrada na função sigmoide conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5. Condição de variação de x da função sigmoide

| ÂNGULO | x (bits) | CONDIÇÃO |
|-------------|------------|----------|
| 40° | 1650-3000 | direita |
| 0 | 1650-1350 | reto |
| -40° | 1350-0 | esquerda |

Fonte: Autor.

Portanto, os valores da variável x da função sigmoide são os valores da tabela 5 da seguinte forma: quando o guidão estiver reto, os valores entregue a função sigmoide variam entre 1650 à 1350 bits para a Tiva. Essa faixa admitida foi devido ao ruído do sinal no terminal de saída do potenciômetro. Quando o guidão estiver sendo girado para a direita, o valor de x irá variar entre 1650 à 3000 bits indicando o aumento crescente para a direita.

Quando o guidão estiver girando para a esquerda, a variação de x será entre 1350 à 0 bits indicando uma diminuição decrescente para a esquerda. Esses valores foram determinados experimentalmente quando foram iniciados os testes de giro do guidão. O parâmetro k determina a taxa de variação da função sigmoidal associada as leituras. Assim como os valores de x o parâmetro k também foi determinado empiricamente, sendo definido

da seguinte forma: quando o triciclo realiza a curva para a esquerda, o valor de k é definido como 0,012.

Neste caso, à medida que a curva se acentua para a esquerda, a tensão lida no potenciômetro diminui, o que faz com que a resposta da função tenha um comportamento crescente conforme a tensão no potenciômetro diminui. Por outro lado, quando o triciclo realiza a curva para a direita, o valor de k é ajustado para -0,012.

Neste caso, à medida que a curva se acentua para a direita, a tensão no potenciômetro aumenta, levando a uma resposta da função com comportamento decrescente. O valor de x_0 é o valor de referência para o cálculo da função sigmoidal, a partir desse ponto a função começa a subir, ou cair rapidamente, para que essa variação não seja abrupta foi determinado um valor desvio para deslocar a posição da transição sigmoidal.

Essa estratégia foi utilizada para tornar a transição mais suave. Para a curva à esquerda, a transição foi deslocada mais à esquerda e, para a curva à direita, a transição foi deslocada mais à direita. O valor de x_0 foi também definido experimentalmente e, neste caso, o valor de desvio definido foi de 1151 para a esquerda e 1851 para a direita.

A Tabela 6 resume os parâmetros das constantes que devem ser utilizados para o cálculo da equação 4.1.

Tabela 6. Parâmetros das constantes para o cálculo de função sigmoide

| CONDIÇÃO | PARÂMETRO (k) | x_0 |
|----------|---------------|-------|
| Direita | -0,012 | 1850 |
| Esquerda | 0,012 | 1150 |

Fonte: Autor.

O gráfico representativo da função geral para a resposta do guidão do triciclo é ilustrado na Figura 17.

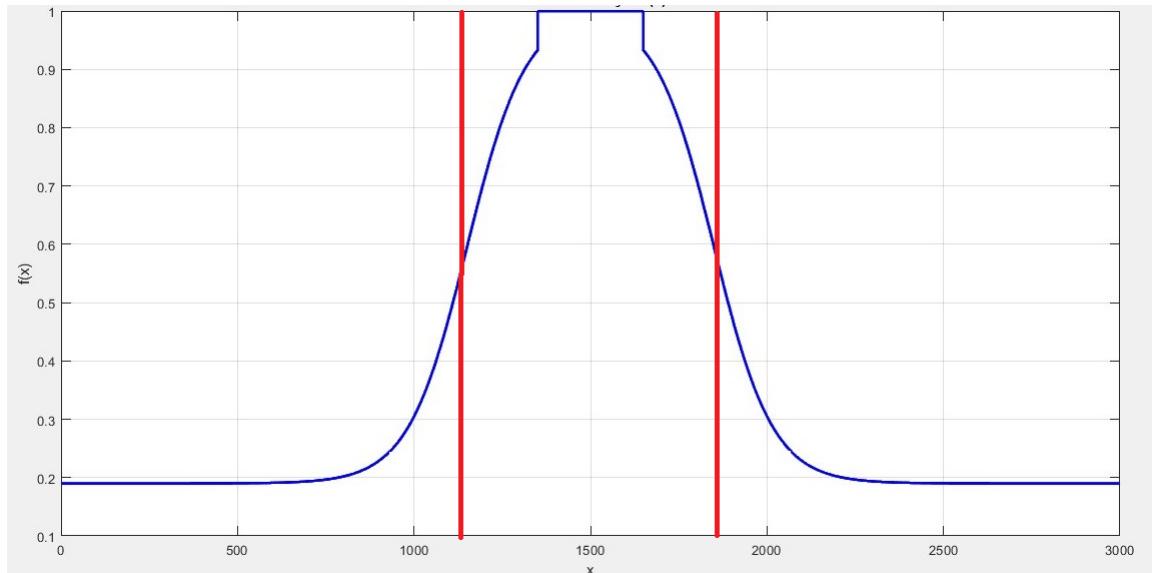
Análise do Gráfico e Regiões de Curvas

De acordo com a análise gráfica, podem ser identificadas três regiões distintas. A primeira, compreendida entre os valores de 0 a 1400, representa a curva de uma função sigmoide crescente. A segunda região é caracterizada por um sinal constante que se estende dos valores de 1401 a 1800. Por fim, a terceira região, situada entre 1801 e 3000, representa a curva de uma função sigmoide decrescente.

A primeira região corresponde à função sigmoide associada a curvas à esquerda, enquanto a faixa linear reflete a trajetória do triciclo em movimento linear. A terceira região, por sua vez, também está relacionada à função sigmoide para curvas à esquerda.

Observa-se, entre os valores de 1000 e 1500, a linha vermelha que indica o ponto de transição da curva à esquerda, especificamente no valor de 1150. Adicionalmente, a linha

Figura 17. Gráfico representativo da função geral para o acionamento do guidão



Fonte: Autor.

vermelha à esquerda, que se estende entre os valores de 1500 e 2000, indica o ponto de transição para a curva à direita, que ocorre no valor de 1850.

Os valores dispostos no eixo horizontal representam o intervalo de valores x em bits, os quais correspondem aos níveis de tensão do potenciômetro, que são lidos pela plataforma Tiva e convertidos em formato digital na interface de desenvolvimento (IDE).

O valor de referência enviado para os motores seguirá a lógica descrita pela tabela 7.

Tabela 7. Estado do triciclo

| Estado do triciclo | Motor esquerdo | Motor direito. |
|---------------------------|--|--|
| Guidão reto | Valor do acelerador | Valor do acelerador |
| Curva à direita | Valor do acelerador | (Valor do acelerador)*(função sigmoide relativa à curva) |
| Curva à esquerda | (Valor do acelerador)*(função sigmoide relativa à curva) | Valor do acelerador. |

Fonte: Autor.

4.6.1 Fluxograma do código-fonte

A seguir é apresentado o fluxograma descrevendo a sequência lógica do programa desenvolvido para o funcionamento do triciclo. A Figura 18 ilustra o fluxograma completo do código-fonte do projeto.

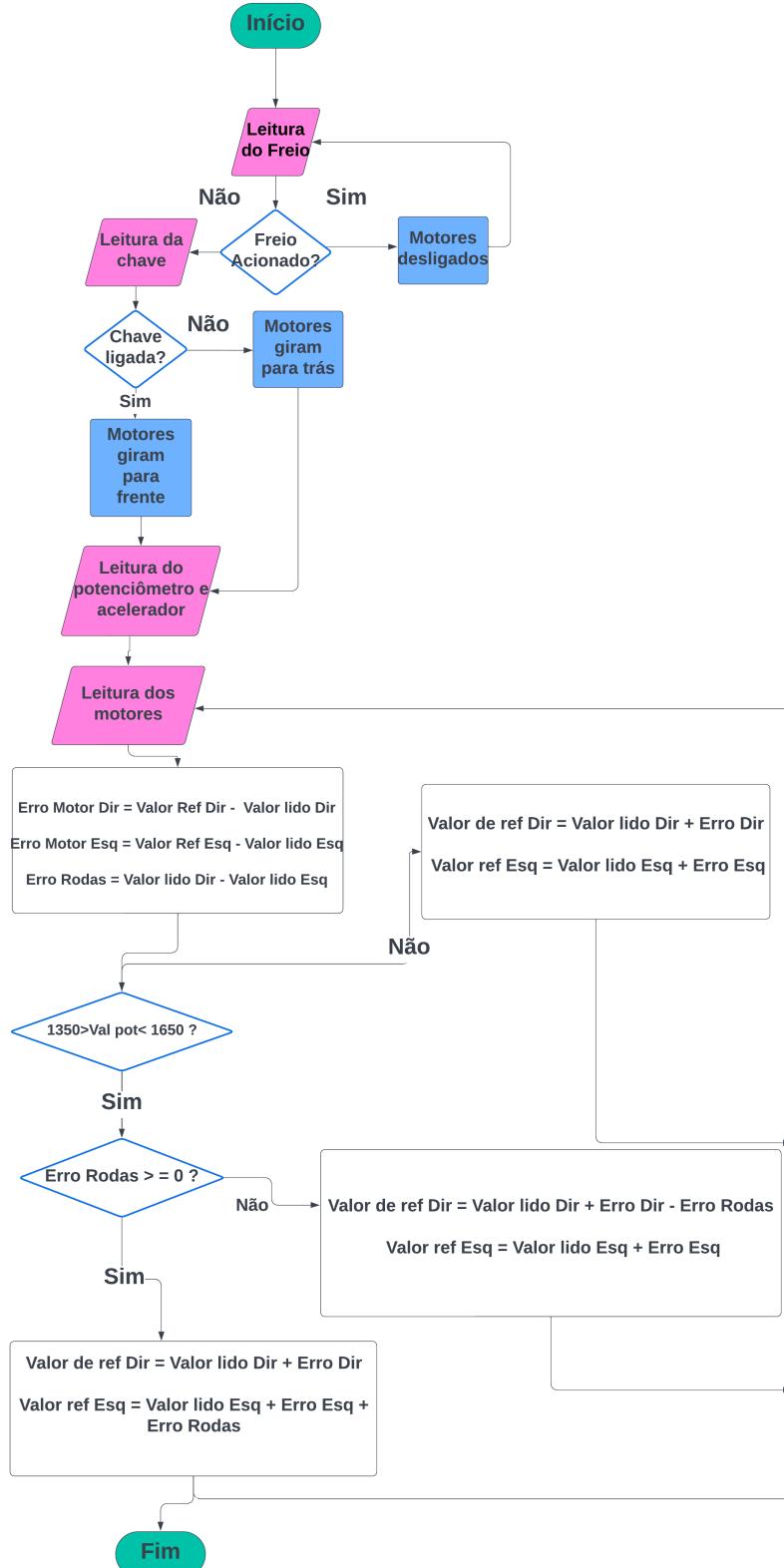
O programa inicia com a leitura do freio, quando acionado os motores devem parar independente das demais leituras do sistema. Na sequência de prioridades vem a chave, por ser quem determina o sentido de giro dos motores, consequentemente se o triciclo irá para frente ou para trás.

O acionamento do triciclo ocorre por meio do acelerador que determinará a velocidade com que o triciclo se deslocará. A partir da leitura do potenciômetro, que está acoplado ao guidão, é determinado a faixa em que o guidão se encontra, sendo ela a posição reta, ou realizando curvas para direita, ou esquerda. Quando o guidão está na posição reta, os dois motores devem receber o mesmo valor de referência. Ao realizar curvas, o sistema diferencial eletrônico deve agir da seguinte maneira: A roda interna à curva receberá a resultante do valor de referência do acelerador com o valor equivalente da função sigmoide relativo ao grau da curva, já a roda externa à curva receberá o valor de referência do acelerador.

Baseado nos valores de referência relativos para cada motor, o código realiza uma função de mapeamento, para que o intervalo de valores de referência lidos sejam adequados para a modulação PWM, os valores são então enviados para os módulos de ponte h para acionar os motores.

A partir da leitura da rotação dos motores o programa realiza cálculos de erro, onde são comparados o valor lido pelos motores com o valor de referência, também é calculado o erro relativo à diferença de rotação entre as duas rodas. Baseado nesses erros, são calculados os novos valores de referência para compensar o erro relativo à referência, e o erro entre os motores quando na situação do guidão reto.

Figura 18. Fluxograma do código-fonte do projeto



Fonte: Autor.

4.7 Sistema em malha fechada

Após a realização de testes de acionamento dos motores em malha aberta, observou-se que os motores apresentaram diferenças de velocidade entre eles, quando o guidão está na posição reta. Também pode-se observar uma diferença entre a resposta lida dos motores em comparação a referência. Visando minimizar esses erros foi desenvolvido uma estratégia de programação para realizar o controle em malha fechada.

Para mitigar essa diferença, foi desenvolvido um sistema de controle em malha fechada com ajuste baseada no erro. Sendo assim, foram calculados os erros entre o valor de referência e as leituras das rodas, e também foi calculado o erro relativo entre as duas rodas. Esses cálculos foram realizados apenas para a situação em que as rodas estão em linha reta, ou seja, o guidão reto. Pois na situação de curva isso não pode ser aplicado devido as rodas precisar girar com velocidades diferentes.

Foram realizados os cálculos, do erro da roda direita, roda esquerda e o erro entre as duas rodas descritos nas equações 4.2, 4.3, 4.4 respectivamente. Onde $ERRO_{RODADIREITA}$ representa o erro da roda direita com relação à referência, $ERRO_{RODAESQUERDA}$ representa o erro da roda esquerda com relação à referência, $ERRO_{DUASRODAS}$ é o erro entre rodas, V_{REFDIR} é a tensão de referência para roda direita, V_{REFESQ} é a tensão de referência para roda esquerda, $V_{RODAESQ}$ é a tensão elétrica da roda esquerda, $V_{RODADIR}$ é a tensão elétrica da roda direita.

$$Erro_{RODADIREITA} = V_{REFDIR} - V_{RODADIR} \quad (4.2)$$

$$Erro_{RODAESQUERDA} = V_{REFESQ} - V_{RODAESQ} \quad (4.3)$$

$$Erro_{DUASRODAS} = V_{RODAESQ} - V_{RODADIR} \quad (4.4)$$

Com base nos resultados obtidos das equações, são tomadas as decisões, para o cálculo da variável de controle enviada para o acionamento dos motores.

Como descrito a seguir:

Situação 1: Guidão reto

Para o caso do guidão, quando na posição reta, as três equações são consideradas para o cálculo do novo valor de referência.

Foram definidas duas tomadas de decisões, o caso 1 e o caso 2.

Caso 1: Erro entre as rodas maior ou igual a zero.

Esse caso indica que a velocidade relativa da roda esquerda está maior que o da roda direita.

O valor de referência para a roda esquerda e direita são descritos nas equações 4.5 e 4.6

$$V_{REFESQ} = V_{RODAESQ} + Erro_{RODAESQ} \quad (4.5)$$

$$V_{REFDIR} = V_{RODADIR} + Erro_{RODADIR} + Erro_{DUASRODAS} \quad (4.6)$$

Caso 2: Erro entre as duas rodas, menor que zero.

Esse caso indica que a velocidade relativa da roda direita está maior que o da roda esquerda.

O valor de referência para a roda esquerda e direita são descritos nas equações 4.7 e 4.8

$$V_{REFESQ} = V_{RODAESQ} + Erro_{RODAESQ} + Erro_{DUASRODAS} \quad (4.7)$$

$$V_{REFDIR} = V_{RODADIR} + Erro_{RODADIR} \quad (4.8)$$

Situação 2: Guidão realizando curvas

Quando o guidão está realizando curvas os valores de referência enviados para os motores serão diferentes, sendo assim, não é considerado o cálculo do erro entre as duas rodas. O valor de referência para a roda esquerda e direita são descritos nas equações 4.9 e 4.10.

$$V_{REFESQ} = V_{RODAESQ} + Erro_{RODAESQ} \quad (4.9)$$

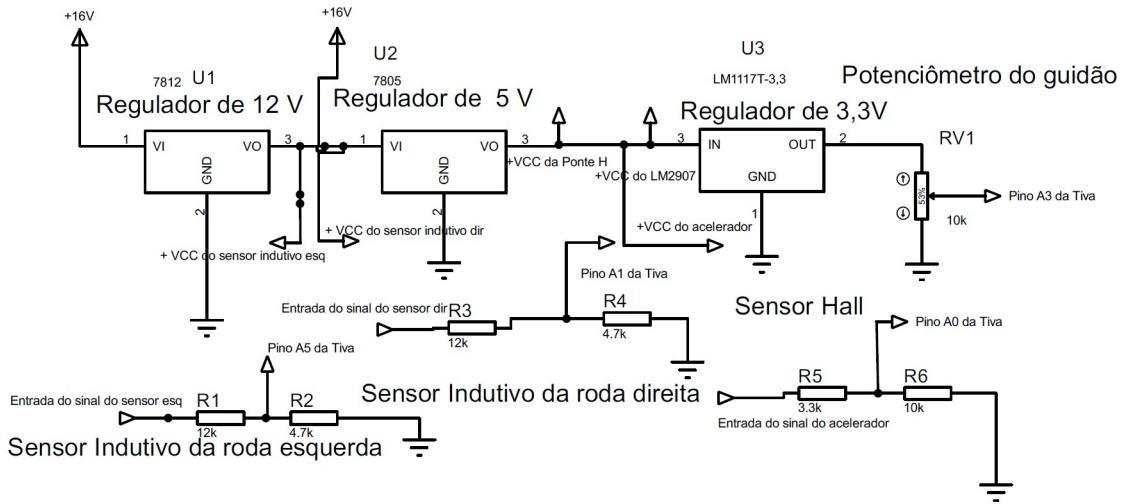
$$V_{REFDIR} = V_{RODADIR} + Erro_{RODADIR} \quad (4.10)$$

O sistema está em uma função de loop, dessa maneira os valores de leitura das rodas estarão sempre sendo atualizados, e os cálculos serão atualizados a cada laço de loop, fazendo a correção continuadamente.

4.8 Placa de alimentação dos sensores.

Um circuito foi projetado e a placa fabricada para a alimentação dos sensores acelerador, manete do freio, potenciômetro do guidão, sensores indutivos para leitura da velocidade dos motores e a chave para habilitação da ré. O Esquemático da placa é apresentado na Figura 19.

Figura 19. Esquema elétrico do circuito para alimentação dos sensores



Fonte: Autor.

Foram utilizados três reguladores de tensão, LM7812, LM7805 e LM1117, para obter as tensões de 12 V, 5 V e 3,3 V, respectivamente. Os sensores indutivos são alimentados com 12 V, o sinal gerado é enviado para a Tiva C por um circuito divisor de tensão, para o sinal ter tensão de no máximo 3,3 V. O acelerador é alimentado com tensão de 5 V, o sinal gerado é enviado para a Tiva C por um circuito divisor de tensão. O potenciômetro é alimentado com a tensão de 3,3 V e sua derivação central conectada a Tiva C.

4.9 Circuito do acelerador

O acionamento do triciclo ocorre por meio de um acelerador comercial utilizado em veículos elétricos como: *Scooters* e bicicletas elétricas e é do tipo de dedo polegar com um sensor Hall modelo 49E internamente. O acelerador é alimentado com uma tensão de 5 V com faixa de operação entre 0,8 V e 4,2 V.

Para que o nível de tensão do acelerador seja compatível com a tensão máxima dos pinos analógicos de entrada da Tiva C fez-se necessário um divisor de tensão resistivo na saída do sinal do acelerador. O divisor de tensão foi calculado de forma que o valor máximo do divisor resistivo não exceda 3,3 V. O divisor de tensão resistivo foi calculado baseado na equação 4.11.

$$V_X = V_{IN} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (4.11)$$

Adotou-se um resistor de 10 K Ω para o resistor R_2 e a partir do valor desse componente foi determinado o valor do resistor R_1 .

Adotando V_{IN} igual a 4,2 V, o valor de tensão máxima de saída do acelerador V_X igual a 3,3 V o valor encontrado para R_1 foi de 2,7 k Ω . Sendo o valor do resistor disponível mais próximo encontrado foi de 3,3K Ω .

4.10 Circuito do guidão

Um potenciômetro de 10 k Ω foi acoplado à caixa de direção do triciclo de forma que o cursor acompanhe o giro do guidão e altere consequentemente o valor de tensão elétrica quando o referido guidão é girado. Foram determinados na programação da Tiva C intervalos de valores correspondentes à posição do guidão e, baseado nessa leitura, o controle entende se o guidão está sendo girado para esquerda, direita ou está na posição reta. A leitura do valor do potenciômetro é proporcional ao ângulo de curva do guidão. Dependendo dos valores lidos pela Tiva C as rodas são alteradas acompanhando o giro do guidão, modificando os parâmetros da função sigmoide de forma que à medida que a curva vá se acentuando a roda mais interna tenha sua velocidade menor em relação à roda mais externa da curva.

4.11 Circuito do freio e ré

Para habilitar a inversão de sentido de rotação dos motores (ré) foi adotado uma chave liga/desliga do tipo gangorra, que determina se os motores giram para frente ou para trás. Usando a porta da Tiva C que possui um resistor de pull-up foi dispensado o resistor externo, permitindo que a chave mude entre nível alto e baixo com nível de tensão interna. O sistema de freio é composto por uma manete com o circuito hidráulico convencional de uma moto comercial para atuar em um disco preso da roda dianteira. Esse sistema é denominado de freio hidráulico a disco. Na maneta já é incorporado um sensor liga/desliga que, na moto, é usado no indicador de luz de freio. Neste projeto, além de servir para o mesmo propósito de ativação luminosa, funciona para indicar para a Tiva C que os motores devem ser desligados devido à frenagem.

4.12 Circuito encoder

Para obter a velocidade de rotação dos motores de maneira mais confiável, sem que vibrações do veículo interfiram nas medições, foi fabricado um encoder utilizando um sensor do tipo indutivo de proximidade, modelo NPN-LJ12A3-4-Z/BX. Esse sensor pode detectar objetos metálicos a uma distância de até 4 mm. Nesse sentido, construiu-se uma estrutura em ABS em forma de disco fixada ao eixo do rotor do motor. Nessa estrutura foram inseridas seis esferas metálicas de forma que ao acionar os motores as esferas entrem no campo de detecção do sensor gerando um trem de pulsos com frequência proporcional a velocidade de rotação dos motores. Os sensores foram alimentados com uma tensão de 12 V fornecendo uma saída em frequência entre 0 V e aproximadamente 12 V. Para compatibilizar a saída dos sensores com os níveis lógicos do circuito foi feito um divisor de tensão para a saída ficar limitada em 3,3 V. Então, os sinais dos sensores foram enviados para um circuito conversor de frequência para tensão elétrica entregando a Tiva C uma rampa de tensão proporcional a variação de frequência das rodas. A equação 4.12 foi utilizada para o cálculo do divisor de tensão elétrica.

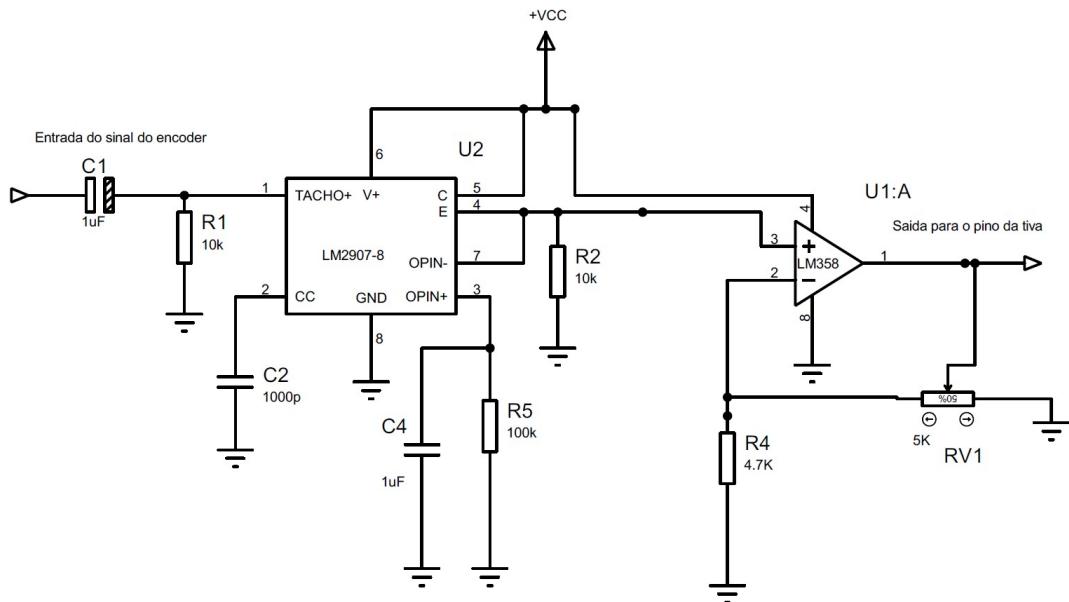
$$V_X = V_{IN} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (4.12)$$

Onde V_X é a tensão desejada no divisor sendo no máximo de 3,3V, V_{IN} é a tensão de operação do sensor sendo ela 12 V. Adotou-se um resistor de 4,7 k Ω R_2 , e, portanto, pela equação determinou o valor do resistor R_1 . O valor encontrado foi de 12,4 k Ω , sendo assim, foi escolhido um resistor no valor de 12 k Ω o valor mais próximo disponível.

4.13 Circuito conversor de frequência em tensão

Como dito anteriormente, um circuito conversor de frequência em tensão elétrica usando o LM2907 foi desenvolvido para converter a frequência dos encoders em níveis de tensão CC proporcionais. Essa metodologia facilitou os cálculos na Tiva C para as tomadas de decisões nos movimentos do triciclo. O esquema elétrico do circuito pode ser visualizado na Figura 20.

Figura 20. Esquema elétrico do circuito LM2907



Fonte: Autor.

A montagem do circuito e escolha dos componentes foi baseada na documentação do fabricante. O sinal do encoder é conectado ao pino 1 do LM2907, através do capacitor de desacoplamento C_1 . O resistor R_1 , garante a tensão de 0 V (terra) quando o encoder não está enviando sinal, ou seja, estabiliza a entrada quando não tiver sinal. Isso foi necessário porque foi observado experimentalmente que o ruído perturbava a entrada o LM2907 e consequentemente a Tiva C. O pino 4 é a saída do circuito que também deve ser estabilizada com um resistor R_2 de $10\text{ k}\Omega$.

Após a realização de medições, constatou-se que a tensão de saída do circuito LM2907 não era compatível com a faixa de valores da tensão de referência estabelecida. Para garantir a compatibilidade entre o nível de tensão de saída do LM2907 e a faixa especificada de tensão de referência, foi projetado um circuito amplificador não inversor.

O ganho desse amplificador foi calculado com base na razão entre os valores da tensão de referência e a tensão de saída do LM2907. Nas medições realizadas, a tensão de referência foi de 3,3 V, enquanto a saída do LM2907 apresentou um valor de 2,08 V. Assim, para que o valor de referência fosse de 3,3 V o ganho calculado para o amplificador deveria ser de aproximadamente 1,58. O esquemático do circuito do LM2907 e o amplificador não inversor é apresentado na Figura 20.

A equação 4.13 determina o ganho do amplificador.

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (4.13)$$

Foram selecionados um potenciômetro de $5\text{ k}\Omega$ para o valor de R_2 e um resistor fixo de $4,7\text{ k}\Omega$ para o valor de R_1 .

O potenciômetro foi escolhido para que permitisse realizar o ajuste do ganho sem a necessidade de mudança do valor do resistor.

A Equação 4.14 determina o ganho do amplificador.

$$A_v = 1 + \frac{5k}{4,7k} \quad (4.14)$$

Com esses valores o ganho máximo é limitado em 2,06.

4.14 Módulo conversor DC-DC buck-boost XL6009

O módulo conversor DC-DC buck-boost XL6009 foi empregado no presente projeto com a finalidade de converter a tensão da bateria de 24 V para níveis apropriados para a alimentação dos sensores. Especificamente, esse módulo foi utilizado para reduzir a tensão de 24 V para 16 V, a qual é suportada pelo regulador de tensão 7805, uma vez que a utilização da tensão de 24 V poderia danificá-lo.

O módulo conversor XL6009 é um regulador de tensão ajustável do tipo DC-DC, com uma faixa de operação entre 7 V e 35 V. Ademais, apresenta uma tensão de entrada que varia de 4 V a 32 V, complementada por uma corrente máxima de até 4 Ampères. Entre as suas características destacam-se a alta eficiência, a baixa ondulação de tensão e a excelente regulação tanto de linha quanto de carga. A Figura 21 ilustra o módulo XL6009, evidenciando seus componentes e características técnicas.

Figura 21. Módulo conversor DC-DC *buck* XL4005



(ELETRONICA, 2024)

4.15 Hardware para coleta dos resultados

No presente projeto, o gerenciamento e controle do triciclo foram integralmente implementados na plataforma de desenvolvimento Tiva C, conforme discutido anteriormente. Entretanto, para avaliar as operações do veículo durante modificações de hardware ou software, foi imprescindível utilizar uma placa de aquisição e controle de dados da National Instruments, o modelo DAQ USB-6212. Embora o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) da Tiva C permita a monitoração das execuções, essa abordagem não é tão intuitiva quanto a utilização de um sistema de aquisição de dados com interfaces gráficas em tempo real.

Com a adoção da placa de aquisição, juntamente com os softwares LabVIEW e MATLAB, foi possível capturar os sinais do sistema, visualizá-los em tempo real durante a aquisição, realizar ajustes e observar os resultados das modificações. Adicionalmente, a placa possibilitou o salvamento dos dados finais relacionados ao gerenciamento e controle do triciclo. Informações detalhadas sobre a placa de aquisição e os procedimentos de programação podem ser consultadas no Apêndice C.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão mostrados os resultados das respostas dos motores em malha aberta e em malha fechada, resposta ao degrau pelo acionamento do acelerador e frenagem.

5.1 Resultados em malha aberta

Com o objetivo de avaliar o comportamento dos motores, foram realizados ensaios de acionamento do triciclo em condições controladas. O teste foi conduzido com o triciclo suspenso sobre uma cadeira, de modo que as rodas pudessem girar livremente, sem a interferência do atrito com o solo ou do peso de um usuário. O primeiro ensaio simulou o deslocamento do veículo em uma trajetória linear. Para representar a variação de velocidade do veículo, foram utilizados valores de referência em degrau, crescente e decrescente com os valores de tensão elétrica de 0,5 V, 1 V, 1,5 V, 2 V, 2,5 V, 3 V e 3,3 V. Essas tensões correspondem aos sinais enviados pelo acelerador para a plataforma Tiva C, sendo posteriormente convertidas em valores de PWM para os motores.

Neste contexto, foram realizados estudos sobre o comportamento dos motores do lado direito e esquerdo, ambos alimentados com a mesma tensão elétrica. Além disso, investigou-se o movimento do triciclo ao efetuar curvas tanto para a esquerda quanto para a direita, utilizando valores de referência distintos para os motores de cada lado.

Para a leitura da rotação dos motores, utilizou-se um osciloscópio, com a ponta de prova conectada à saída do sensor indutivo. Por meio desse procedimento, através do qual possível determinar a frequência, em hertz (Hz), do trem de pulsos gerado pelos motores. Para calcular a velocidade de rotação dos motores em rotações por minuto (RPM), é necessária a conversão do valor obtido. Considerando que a estrutura é composta por seis esferas, o sinal correspondente a uma rotação completa do motor gera uma sequência de seis pulsos. Como a estrutura está acoplada ao eixo do motor, para determinar a velocidade de rotação das rodas, deve-se considerar o fator de redução de 20:1.

Através da equação 5.1 é calculada a velocidade de rotação das rodas.

$$V_{RPM} = \left(\frac{f}{6.20} \right) \cdot 60 \quad (5.1)$$

Onde f representa a frequência lida no osciloscópio em Hz, o valor 6 representa o número de esferas da estrutura, o valor de 20 representa o fator de redução da caixa de engrenagem, e o valor de 60 é o fator de conversão de Hz para RPM.

A tabela 8 apresenta os resultados da velocidade angular do eixo do motor esquerdo obtidos em Hz e a velocidade angular calculada das rodas em RPM, com os valores de referência em tensão equivalentes às velocidades.

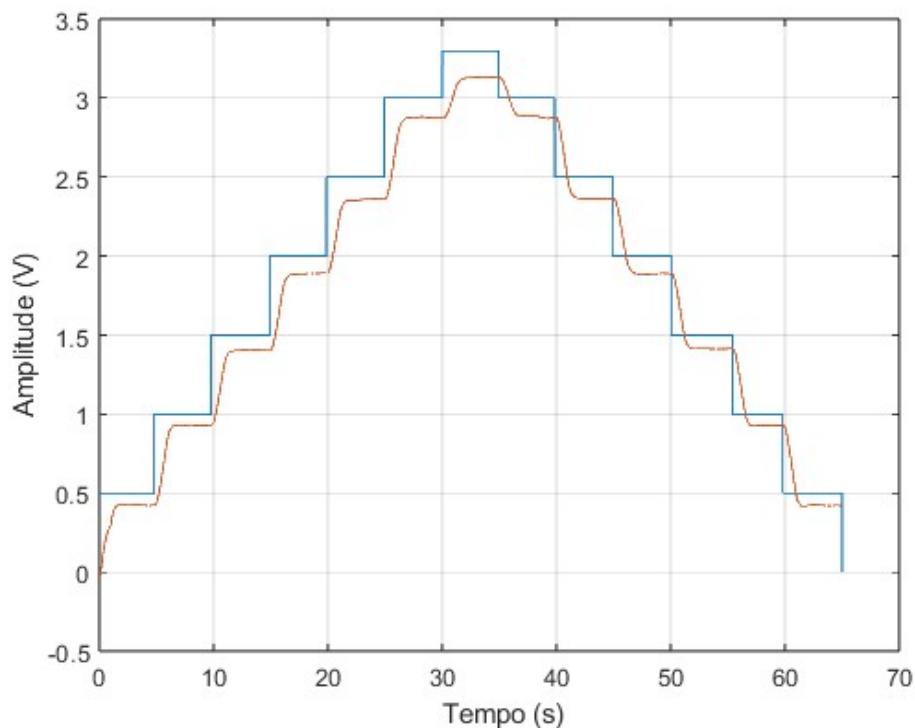
Tabela 8. Valores da velocidade da roda esquerda em malha aberta em RPM

| Valor de tensão de referência | Valor em Hz | Valor em RPM |
|-------------------------------|-------------|--------------|
| 0,5 V | 72,69 Hz | 36,345 RPM |
| 1 V | 148,37 Hz | 74,185 RPM |
| 1,5 V | 220,97 Hz | 110,485 RPM |
| 2 V | 286,14 Hz | 143,07 RPM |
| 2,5 V | 372,43 Hz | 186,215 RPM |
| 3 V | 422 Hz | 211 RPM |
| 3,3 V | 478,1 Hz | 239,05 RPM |

Fonte: Autor.

Na Figura 22 está ilustrada a resposta obtida do motor esquerdo em malha aberta.

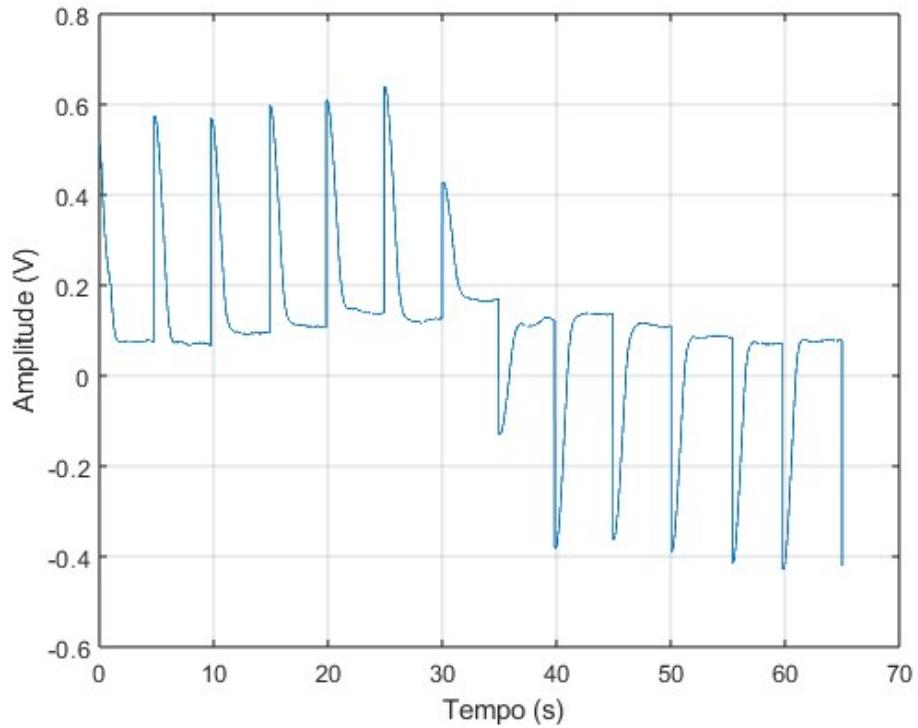
Figura 22. Resposta da roda esquerda em malha aberta guidão reto



Fonte: Autor.

Na Figura 23 está mostrado o resultado obtido do erro da roda esquerda em malha aberta.

Figura 23. Erro da roda esquerda em malha aberta guidão reto



Fonte: Autor.

Com base nos dados obtidos, foram calculados o erro percentual da roda esquerda em cada faixa de valor de referência; utilizou-se o método de cálculo do erro quando o sinal está em regime permanente. Os resultados obtidos dos cálculos estão dispostos na Tabela 9

Tabela 9. Erros calculados em malha aberta da roda esquerda

| Valor de tensão de referência | Erro % |
|-------------------------------|--------|
| 0,5 V | 15,232 |
| 1 V | 7,252 |
| 1,5 V | 6,433 |
| 2 V | 5,664 |
| 2,5 V | 5,798 |
| 3 V | 4,238 |
| 3,3 V | 5,255 |

Fonte: Autor.

A tabela 10 apresenta os resultados da velocidade angular do eixo do motor direito obtidos em Hz e a velocidade angular calculada das rodas em RPM, com os valores de referência em tensão equivalentes às velocidades.

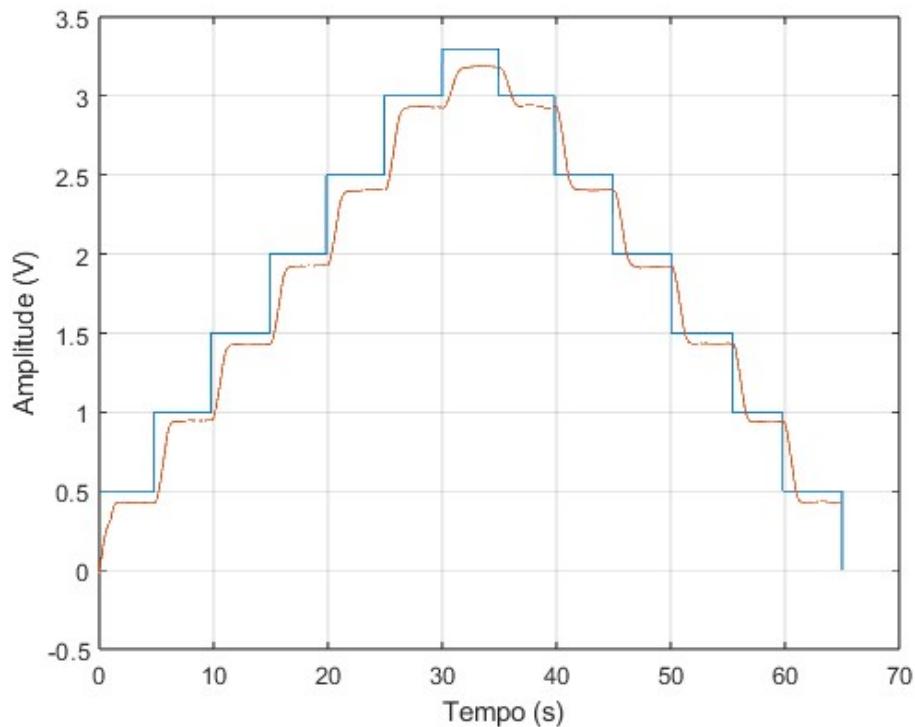
Tabela 10. Valores da velocidade da roda direita em malha aberta em RPM

| Valor de tensão de referência | Valor em Hz | Valor em RPM |
|-------------------------------|-------------|--------------|
| 0,5 V | 74,04 Hz | 37,02 RPM |
| 1 V | 150,88 Hz | 75,44 RPM |
| 1,5 V | 225,15 Hz | 112,57 RPM |
| 2 V | 291,64 Hz | 145,82 RPM |
| 2,5 V | 379,41 Hz | 189,70 RPM |
| 3 V | 429,64 Hz | 214,82 RPM |
| 3,3 V | 481,36 Hz | 240,68 RPM |

Fonte: Autor.

Na Figura 24 está ilustrada a resposta obtida do motor direito em malha aberta.

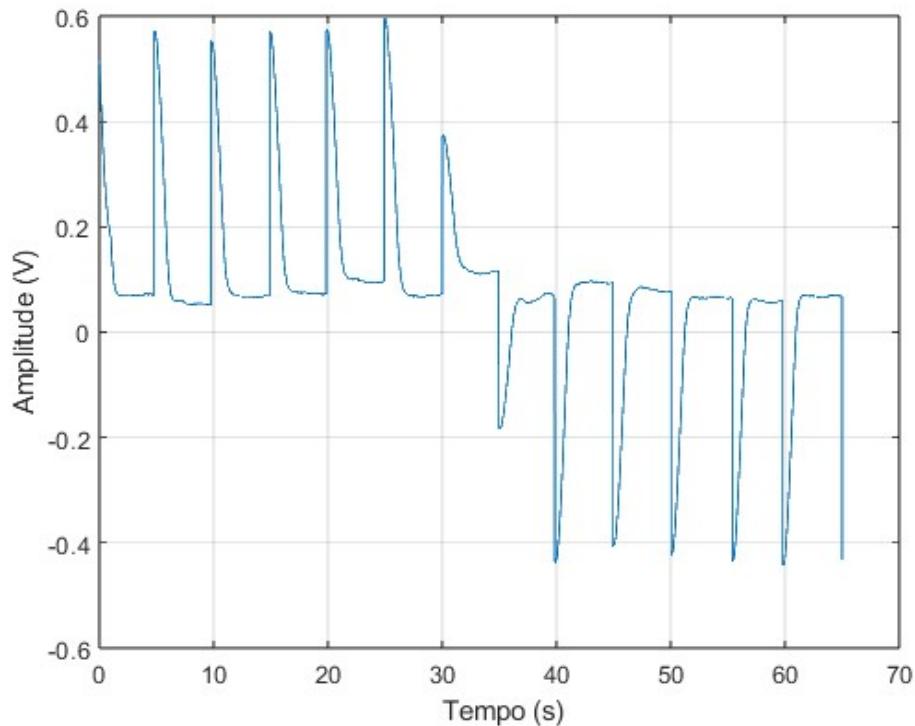
Figura 24. Resposta da roda direita em malha aberta guidão reto



Fonte: Autor.

Na Figura 25 está mostrado o resultado obtido do erro em malha aberta.

Figura 25. Erro da roda direita em malha aberta guidão reto



Fonte: Autor.

Com base nos dados obtidos, foram calculados o erro percentual de cada faixa de valor de referência; utilizou-se o método do cálculo do erro quando o sinal está em regime permanente. Os resultados obtidos dos cálculos estão dispostos na Tabela 11

Tabela 11. Erros calculados em malha aberta da roda direita

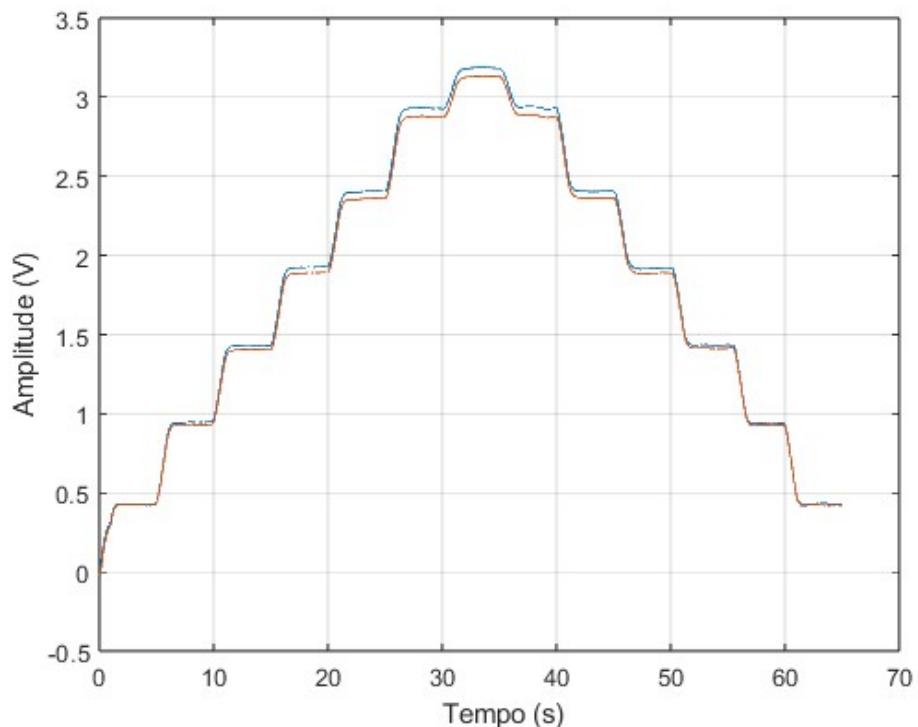
| Valor de tensão de referência | Erro % |
|-------------------------------|--------|
| 0,5 V | 13,942 |
| 1 V | 5,695 |
| 1,5 V | 4,648 |
| 2 V | 3,858 |
| 2,5 V | 3,996 |
| 3 V | 2,445 |
| 3,3 V | 3,637 |

Fonte: Autor.

Na Figura 26 está ilustrado o resultado comparativo entre as rodas direita e esquerda, sendo a resposta da roda direita o sinal em cor azul e a resposta da roda esquerda em laranja.

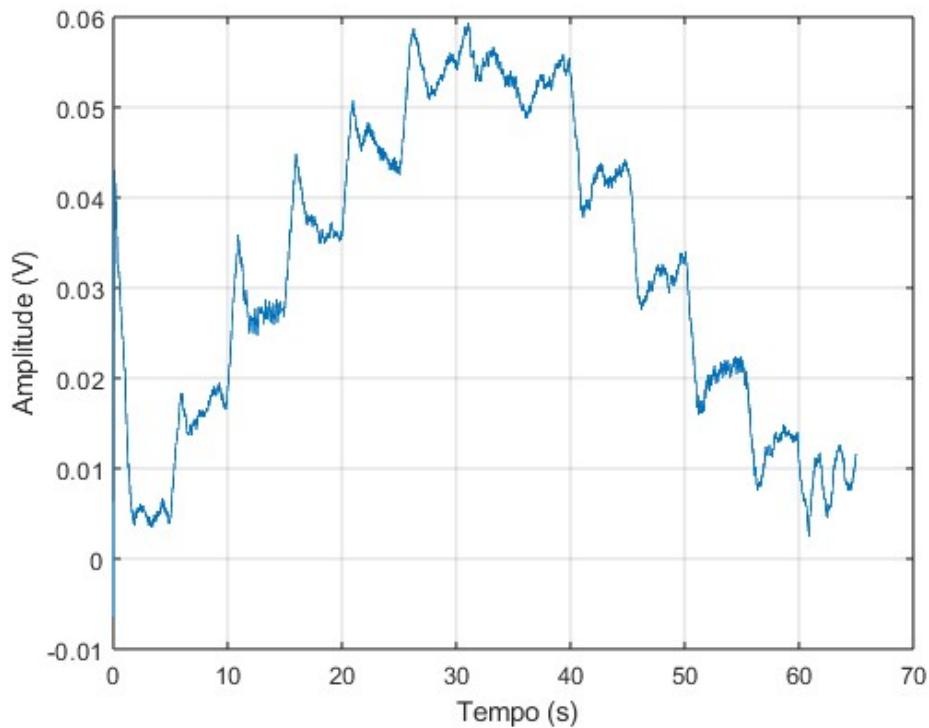
Essa comparação é importante para avaliar o comportamento das duas rodas no mesmo instante de tempo, pois para garantir que o veículo realize um percurso em linha reta, as duas rodas precisam estar em uma velocidade de rotação mais próxima possível. Pelos resultados é possível perceber que as rodas estão com o funcionamento muito próximo; entretanto, na Figura 27 é mostrado a existência do erro indicando que as rodas de fato têm velocidades diferentes. Isso é um problema quando o veículo estiver em linha reta porque certamente ocorrerá o arrasto de uma das rodas.

Figura 26. Comparativo entre as rodas direitas e esquerda em malha aberta.



Fonte: Autor.

Figura 27. Erro entre as rodas direitas e esquerda em malha aberta.



Fonte: Autor.

Foram calculados o erro percentual relativo à diferença entre as duas rodas, que estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Erros calculados em malha aberta entre as duas rodas

| REFERÊNCIA | RODA DIREITA | RODA ESQUERDA | ERRO (%) |
|-------------------|---------------------|----------------------|-----------------|
| 0,5 | 0,431 | 0,423 | 1,856 |
| 1 | 0,943 | 0,927 | 1,697 |
| 1,5 | 1,430 | 1,403 | 1,888 |
| 2 | 1,923 | 1,886 | 1,924 |
| 2,5 | 2,400 | 2,355 | 1,875 |
| 3 | 2,926 | 2,873 | 1,811 |
| 3,3 | 3,179 | 3,126 | 1,667 |

Fonte: Autor.

5.2 Resultados em malha fechada

Conforme descrito no item 4.6 da metodologia, foram identificadas duas situações que necessitam de correção na dirigibilidade do triciclo: o deslocamento em linha reta e o movimento em curva. Durante o deslocamento em linha reta, foram medidos os erros de velocidade e, posteriormente, realizada a compensação do lado da roda que apresentava desequilíbrio.

No contexto das curvas, empregaram-se as funções sigmoides positiva e negativa para ajustar a velocidade das rodas. Esse ajuste permite que a roda interna ao círculo de curvatura opere a uma velocidade menor do que a roda externa, contribuindo, assim, para uma manobra mais estável e controlada do triciclo.

Segue a apresentação dos resultados obtidos para o sistema em malha fechada. Para a realização das medições, foi adotado o mesmo procedimento empregado no sistema em malha aberta.

O primeiro ensaio simulou o deslocamento do veículo em uma trajetória linear. Para representar a variação de velocidade do veículo, foram utilizados valores de referência em degrau, crescente e decrescente com os valores de tensão elétrica de 0,5 V, 1 V, 1,5 V, 2 V, 2,5 V, 3 V e 3,3 V. Essas tensões correspondem aos sinais enviados pelo acelerador para a plataforma Tiva C, sendo posteriormente convertidas em valores de PWM para os motores.

As leituras da rotação dos motores foram realizadas por meio de um osciloscópio, sendo adotada a mesma metodologia previamente descrita para o sistema em malha aberta.

A tabela 13 apresenta os resultados da velocidade angular do eixo do motor direito obtidos em Hz e a velocidade angular calculada das rodas em RPM, com os valores de referência em tensão equivalentes às velocidades.

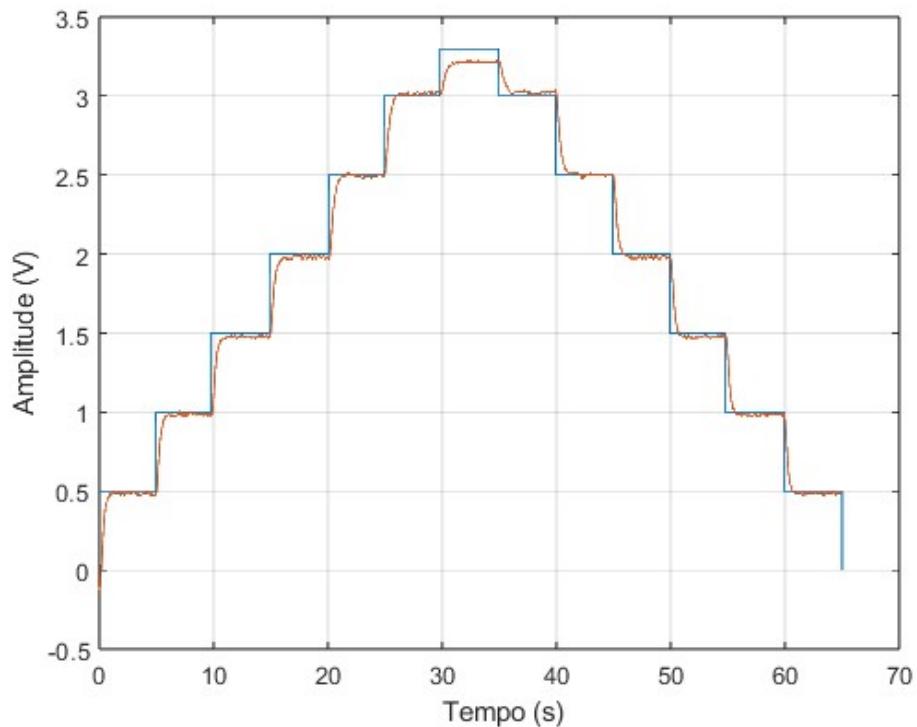
Tabela 13. Valores da velocidade da roda direita em malha fechada em RPM

| Valor de tensão de referência | Valor em Hz | Valor em RPM |
|-------------------------------|-------------|--------------|
| 0,5 V | 83,464 Hz | 41,732 RPM |
| 1 V | 151,91 Hz | 75,955 RPM |
| 1,5 V | 224,58 Hz | 112,29 RPM |
| 2 V | 300,81 Hz | 150,405 RPM |
| 2,5 V | 375,94 Hz | 187,97 RPM |
| 3 V | 467,5 Hz | 233,75 RPM |
| 3,3 V | 479,3 Hz | 239,65 RPM |

Fonte: Autor.

Na Figura 28 está ilustrada a resposta obtida do motor direito em malha fechada.

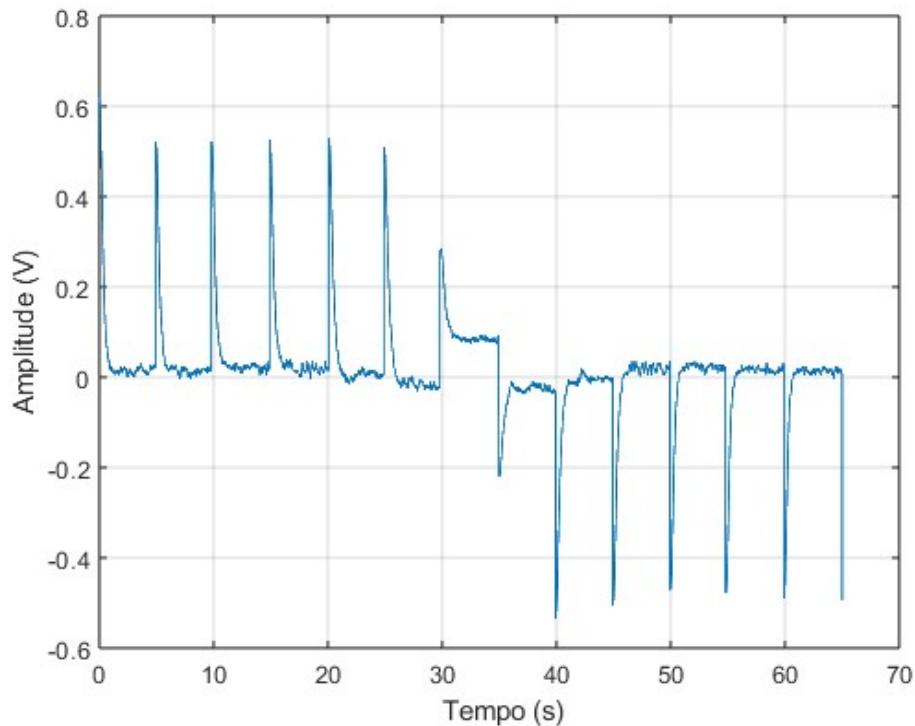
Figura 28. Resposta da roda direita em malha fechada com o guidão reto.



Fonte: Autor.

Na Figura 29 está mostrado o resultado obtido do erro em malha fechada.

Figura 29. Erro da roda direita em malha fechada guidão reto



Fonte: Autor.

Com base nos dados obtidos, foram calculados o erro percentual de cada faixa de valor de referência; utilizou-se o método do cálculo do erro quando o sinal está em regime permanente. Os resultados obtidos dos cálculos estão dispostos na Tabela 14

Tabela 14. Erros calculados em malha fechada da roda direita

| Valor de tensão de referência | Erro % |
|-------------------------------|--------|
| 0,5 V | 2,888 |
| 1 V | 1,505 |
| 1,5 V | 1,547 |
| 2 V | 1,070 |
| 2,5 V | 0,296 |
| 3 V | 0,432 |
| 3,3 V | 2,691 |

Fonte: Autor.

A tabela 15 apresenta os resultados da velocidade angular do eixo do motor esquerdo obtidos em Hz e a velocidade angular calculada das rodas em RPM, com os valores de referência em tensão equivalentes às velocidades.

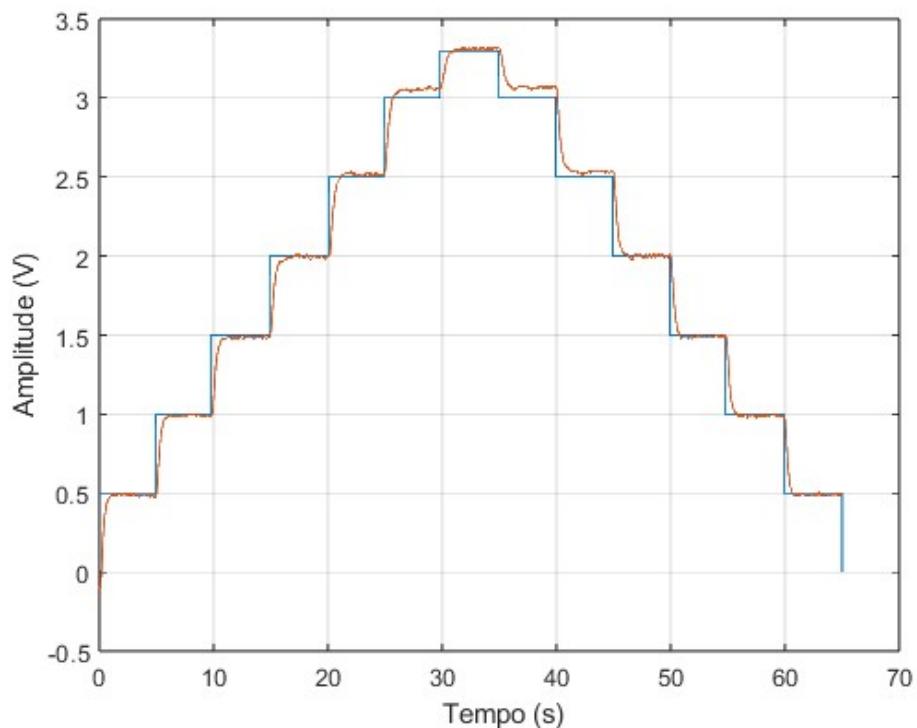
Tabela 15. Valores da velocidade da roda esquerda em malha fechada em RPM

| Valor de tensão de referência | Valor em Hz | Valor em RPM |
|-------------------------------|-------------|--------------|
| 0,5 V | 83,783 Hz | 41,891 RPM |
| 1 V | 152,63 Hz | 76,315 RPM |
| 1,5 V | 226,96 Hz | 113,48 RPM |
| 2 V | 308 Hz | 154 RPM |
| 2,5 V | 373,02 Hz | 186,51 RPM |
| 3 V | 451,2 Hz | 225,6 RPM |
| 3,3 V | 489,7 Hz | 244,85 RPM |

Fonte: Autor.

Na Figura 30 está ilustrada a resposta obtida do motor esquerdo em malha fechada.

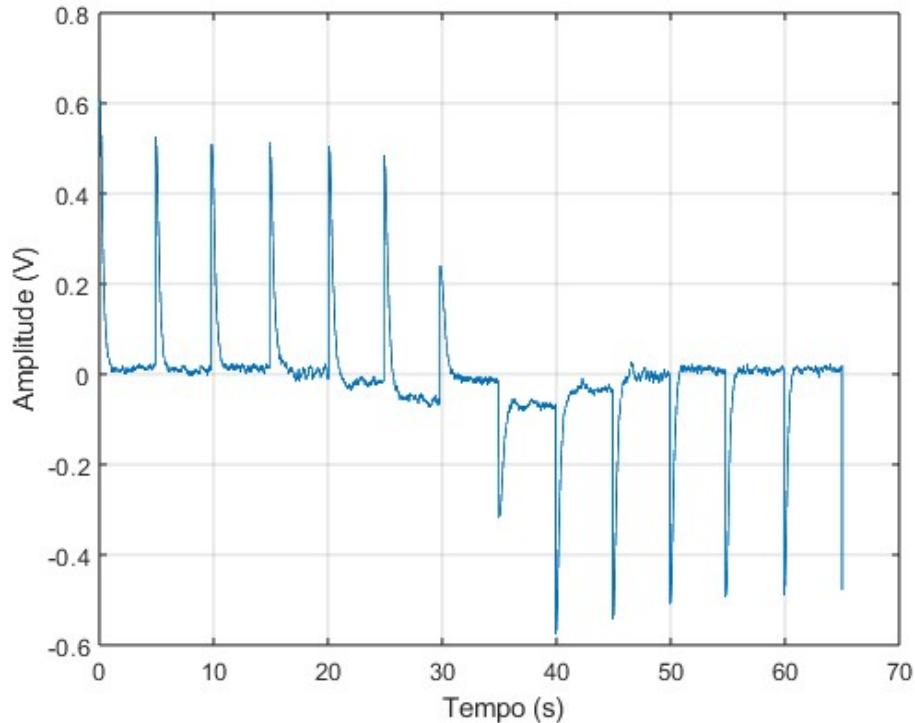
Figura 30. Resposta da roda esquerda em malha fechada com o guidão reto.



Fonte: Autor.

Na Figura 31 está mostrado o resultado obtido do erro em malha fechada.

Figura 31. Erro da roda esquerda malha fechada.



Fonte: Autor.

Com base nos dados obtidos, foram calculados o erro percentual de cada faixa de valor de referência; utilizou-se o método do cálculo do erro quando o sinal está em regime permanente. Os resultados obtidos dos cálculos estão dispostos na Tabela 16

Tabela 16. Erros calculados em malha fechada da roda esquerda

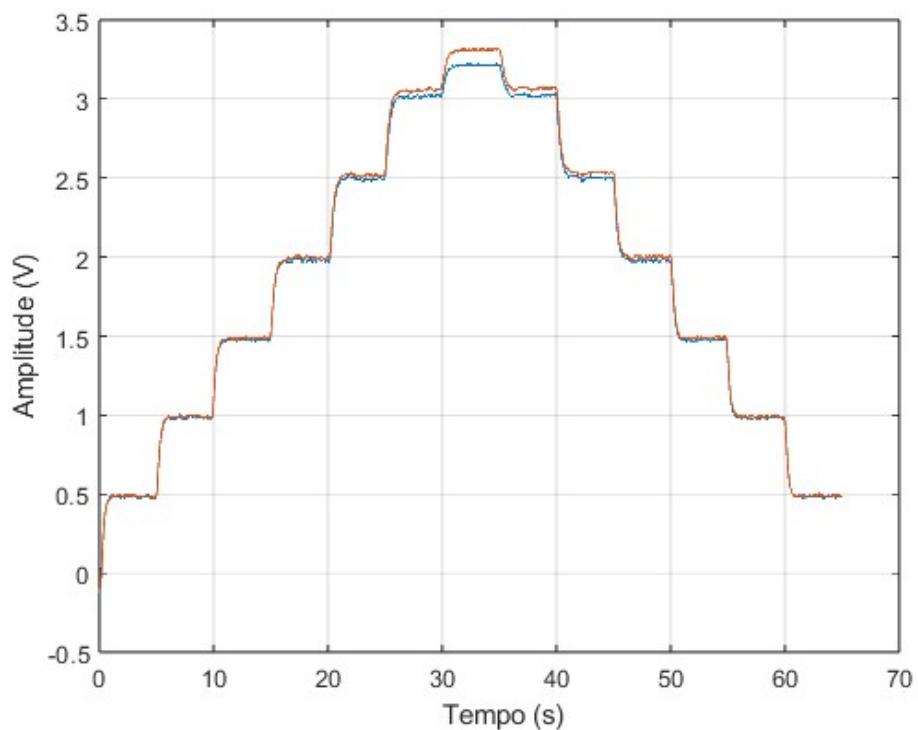
| Valor de tensão de referência | Erro % |
|-------------------------------|--------|
| 0,5 V | 2,464 |
| 1 V | 0,982 |
| 1,5 V | 1,006 |
| 2 V | 0,418 |
| 2,5 V | 0,593 |
| 3 V | 1,703 |
| 3,3 V | 0,201 |

Fonte: Autor.

Na Figura 32 está ilustrado o resultado comparativo entre as rodas esquerda e direita, sendo a resposta da roda esquerda o sinal em cor azul e a resposta da roda direita em laranja.

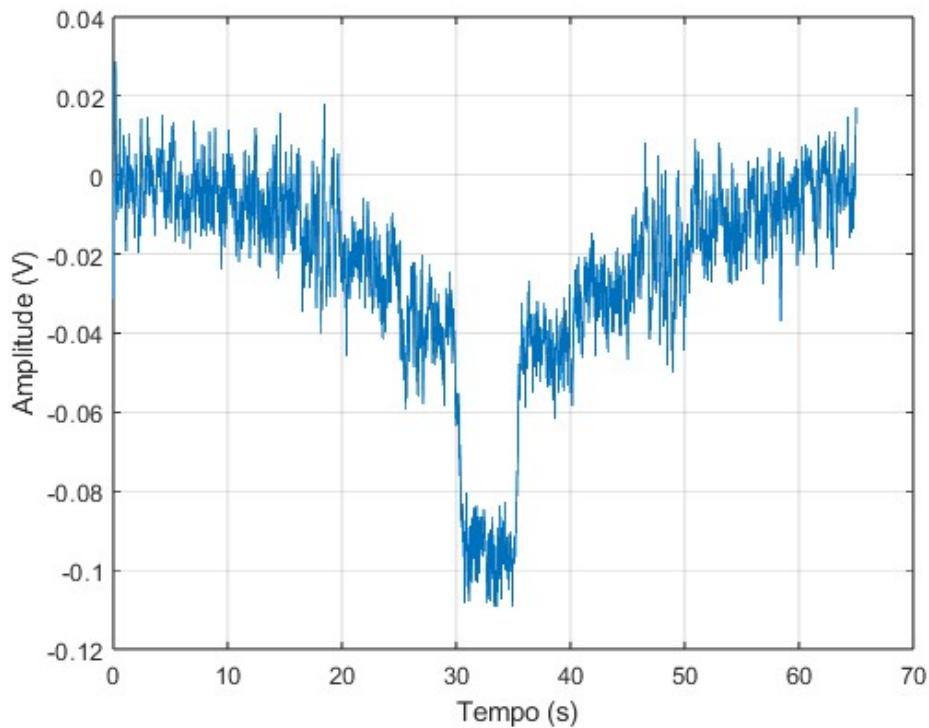
Observa-se uma redução considerável na diferença entre as rodas. A Figura 33 ilustra os valores dos erros relativos entre as rodas.

Figura 32. Comparativo entre as rodas direitas e esquerda em malha fechada.



Fonte: Autor.

Figura 33. Erro entre as rodas direitas e esquerda em malha fechada.



Fonte: Autor.

Foram calculados o erro percentual relativo à diferença entre as duas rodas, que estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Erros calculados em malha fechada entre as duas rodas

| REFERÊNCIA | RODA ESQUERDA | RODA DIREITA | ERRO (%) |
|-------------------|----------------------|---------------------|-----------------|
| 0,5 | 0,487 | 0,485 | 0,411 |
| 1 | 0,991 | 0,985 | 0,605 |
| 1,5 | 1,485 | 1,477 | 0,538 |
| 2 | 1,991 | 1,978 | 0,652 |
| 2,5 | 2,485 | 2,492 | 0,281 |
| 3 | 2,948 | 2,987 | 1,305 |
| 3,3 | 3,293 | 3,211 | 2,490 |

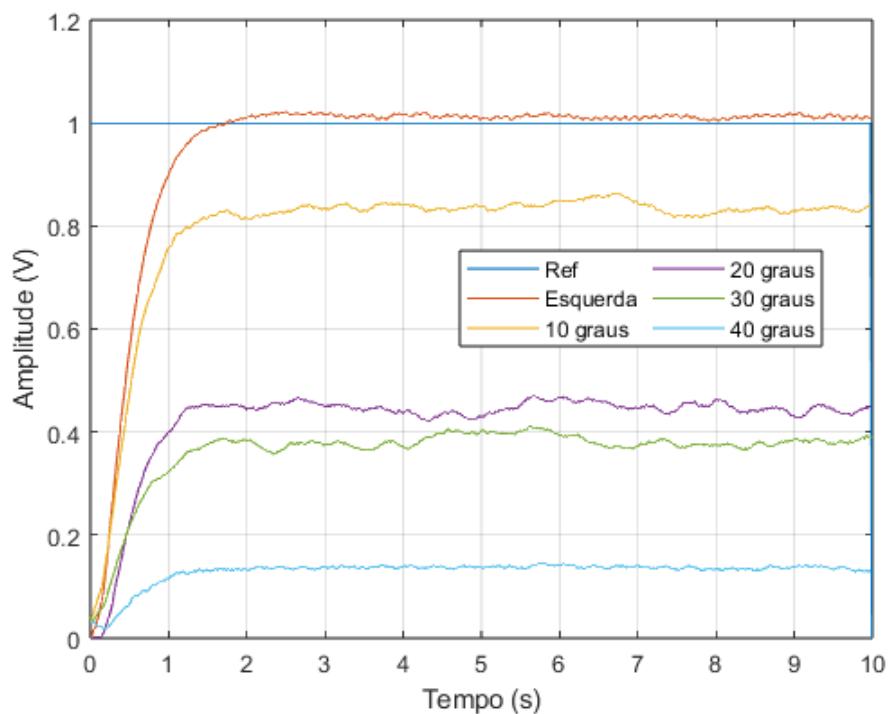
Fonte: Autor.

Por meio dos resultados calculados para os erros das rodas direita e esquerda e do erro comparativo entre elas, pode-se inferir que o erro foi reduzido consideravelmente, tanto em relação às duas rodas quanto em comparação ao valor de referência. O erro máximo encontrado em malha aberta para a roda esquerda caiu de 15,232 % para 2,464%, enquanto o erro máximo para a roda direita reduziu de 13,942 % para 2,888 %.

5.2.1 Curvas para direita

O segundo ensaio consistiu na simulação do deslocamento do veículo em situações de curva. Para tal, o veículo foi posicionado sobre uma estrutura fixa, de modo que as rodas pudessem girar livremente. Durante o experimento, foram realizadas manobras de curva para o lado direito utilizando o triciclo, e os sinais de velocidade das rodas foram capturados. Verificou-se que a velocidade da roda esquerda permaneceu constante em relação ao valor de referência, enquanto a velocidade da roda direita apresentou uma redução progressiva à medida que o ângulo do guidão aumentava. A Figura 34 ilustra o comportamento das velocidades das rodas durante as manobras realizadas.

Figura 34. Resposta dos motores em relação às curvas para direita em malha fechada



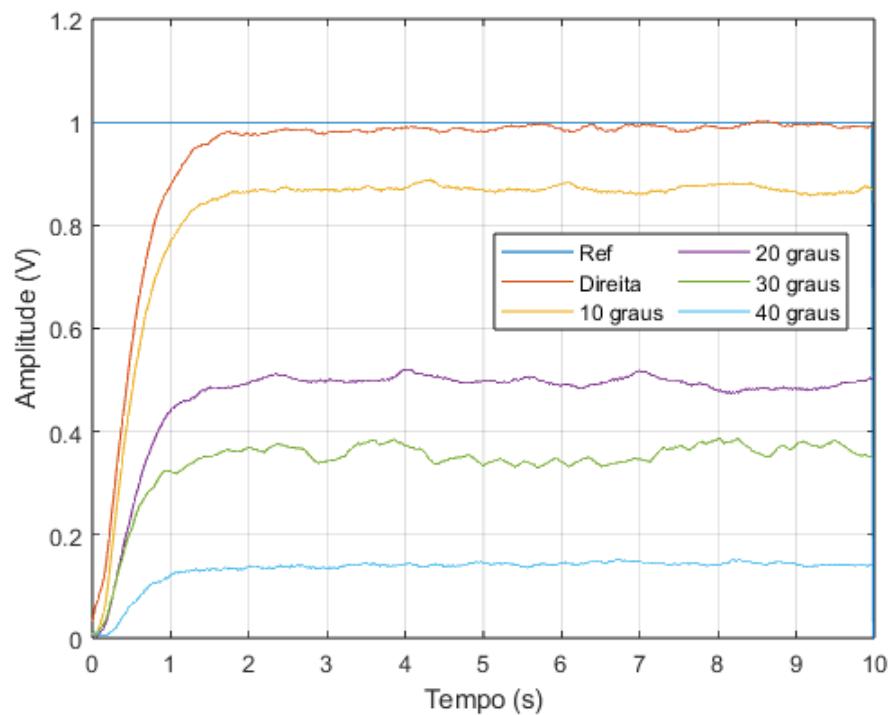
Fonte: Autor.

Foram coletadas velocidades nos ângulos de 10° , 20° , 30° e 40° do guidão, tendo como valor de referência 1 V. Observa-se que a roda esquerda, que está fora do círculo, acompanhou a referência, enquanto a roda direita, que está no círculo, apresentou variações em sua velocidade à medida que o ângulo aumentava. Nota-se, ainda, que, embora o movimento do guidão siga um incremento de 10° , a velocidade da roda direita não decresceu em passos iguais. Esse fenômeno ocorre devido à natureza não linear da função sigmoidal que ajusta as velocidades em função do ângulo. Os demais valores de aceleração não são apresentados, pois apresentam o mesmo comportamento da aceleração em 1 V.

5.2.2 Curvas para esquerda

Semelhante à roda direita, foram feitas as leituras das velocidades do triciclo nos ângulos de 10° , 20° , 30° e 40° do guidão, tendo como valor de referência de 1 V. O comportamento também foi semelhante ou anterior, com a diferença que, neste caso, a roda direita acompanha a referência por estar fora do círculo de curvatura e a roda esquerda acompanha a variação do ângulo baseada na função sigmoidal. Na Figura 35 está mostrado o resultado das curvas realizadas para a esquerda.

Figura 35. Resposta dos motores em relação às curvas para esquerda em malha fechada



Fonte: Autor.

5.3 Resultado do teste de freios.

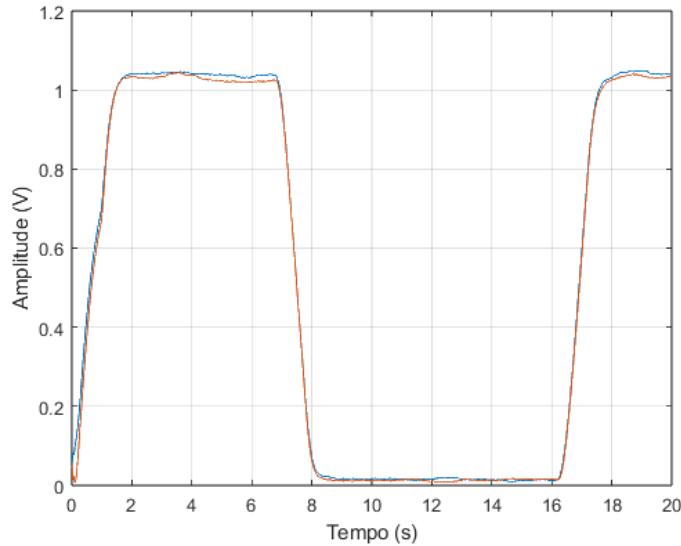
O terceiro ensaio teve como objetivo avaliar o funcionamento do sistema de frenagem das rodas traseiras. Para isso, realizou-se um teste específico com o propósito de analisar o desempenho do sistema de frenagem, no qual os freios foram ativados para interromper o funcionamento dos motores enquanto o sistema do acelerador envia a tensão de operação. Durante o experimento, o veículo foi acionado com uma tensão de referência de 1 V, simulando uma trajetória em linha reta.

Nesse teste, o veículo foi posicionado com as rodas traseiras apoiadas em uma estrutura fixa, permitindo que girassem livremente, sem a presença de atrito. Após um intervalo inicial de 8 segundos, os freios foram ativados por um período de 8 segundos. Posteriormente, os freios foram desativados, possibilitando a continuidade do experimento.

Os resultados obtidos para o acionamento dos freios nas rodas direita e esquerda estão apresentados na Figura 36. Nessa figura, o sinal laranja representa a resposta da roda esquerda, enquanto o sinal azul corresponde à resposta da roda direita, indicando que o acionamento ocorreu no intervalo de tempo compreendido entre 8 e 16 segundos.

A Figura 36 ilustra o resultado do acionamento do freio nas duas rodas.

Figura 36. Acionamento do freio nas duas rodas



Fonte: Autor.

Conforme observado na Figura 36, após o acionamento dos freios no instante de 8 segundos, os motores foram desligados, retornando ao funcionamento apenas após o tempo de 16 segundos. Esses resultados comprovam o funcionamento correto do sistema de frenagem.

5.4 Teste de campo

Como ensaio final, o triciclo foi submetido a um teste prático em uma área de convivência localizada no Centro de Tecnologia (CT). Com a instrumentação eletrônica ainda instalada na região destinada ao banco do veículo, um condutor com massa aproximada de 83 kg realizou a condução do triciclo, percorrendo o local em questão.

Durante o teste, a condução demonstrou-se bastante suave, sem apresentar desconfortos ou solavancos, mesmo nas condições de subida e descida, ou durante variações de aceleração. Diversas manobras foram realizadas, incluindo movimentos de giro à direita e à esquerda, curvas fechadas e abertas, sendo que o triciclo respondeu de forma imediata, sem evidenciar arrasto dos pneus.

Adicionalmente, foram efetuados testes de frenagem, nos quais o sistema apresentou resposta rápida e eficiente, desligando os motores de forma imediata.

Na Figura 37, são apresentadas algumas imagens obtidas durante o teste prático do triciclo.

Figura 37. Teste de campo.



Fonte: Autor.

6 Conclusões

Com base nos objetivos estabelecidos para esta pesquisa, concebeu-se um veículo elétrico do tipo triciclo, com tração traseira e independente nas duas rodas. Essa etapa garantiu a criação de uma bancada de teste prático real para o desenvolvimento do trabalho, a qual foi realizada de forma satisfatória. A instrumentação eletrônica foi desenvolvida, incluindo sensores, atuadores e circuitos condicionadores de sinais, e se mostrou eficiente nas atuações e na captura dos sinais.

Uma topologia de ponte h foi proposta para a alimentação dos motores, baseada na topologia principal sugerida pelo fabricante, com capacidade de suportar correntes de até 86 A, enquanto o fabricante sugere um limite de 43 A. Esta topologia foi exaustivamente testada para garantir que o veículo se locomoveria sem problemas.

Dentre as plataformas de desenvolvimento disponíveis para gerenciamento e controle, adotou-se uma que atendesse às necessidades exigidas para o veículo, considerando a velocidade de aquisição de sinais, gerenciamento e controle de dados. Definiu-se uma estratégia de controle que permitisse ao veículo andar em linha reta, evitando que uma roda apresentasse maior velocidade do que a outra, bem como outra estratégia que possibilitasse curvas, tanto abertas quanto fechadas, sem que houvesse arrasto dos pneus. As técnicas empregadas mostraram erros relativamente pequenos e aceitáveis para o propósito do veículo.

Diante disso, pode-se afirmar que a metodologia aplicada neste trabalho foi adequada, conseguindo fazer o diferencial elétrico funcionar de forma eficiente com dois motores de corrente contínua, um em cada roda do veículo.

6.1 Continuação do trabalho

Este trabalho de pesquisa demandou muito esforço para ser concebido por ter que desenvolver do início ao fim um veículo elétrico funcional. Teve que desenvolver e fabricar toda a estrutura mecânica, elétrica de potência, eletrônica e estratégia de gerenciamento e controle. Então, ao final dessa jornada, Pode-se perceber que alguns trabalhos podem aprimorar o que foi elaborado neste contexto da seguinte forma:

1 - Como a plataforma e a instrumentação está construída, pode-se realizar estudos com outros métodos de controle em malha fechada como, por exemplo, lógica fuzzy comparando com o aplicado neste trabalho;

2 - Aprimorar a estrutura do hardware criando uma configuração própria para tornar o veículo confiável para transitar e propiciar mais pesquisas;

3 - Desenvolver um hardware de telemétrica para que as informações dos sensores e atuadores possam ser transmitidas e monitoradas;

4 - Desenvolver um hardware próprio para o sistema de baterias tanto do ponto de vista de construção do banco quanto do carregamento.

Referências

- ABVE, A. B. de V. E. *Mercado de veículos elétricos plug-in cresce 200% nos últimos 12 meses.* 2024. <<https://abve.org.br/mercado-de-veiculos-eletricos-plug-in-cresce-200-nos-ultimos-12-meses/>>. Acessado em 10 de novembro de 2024. Citado na página 14.
- ANJOS, I. M. dos. *Sistema de controle Fuzzy para veículo elétrico de duas rodas.* Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, 2017. Acesso em: 12 novembro. 2024. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/12700>>. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 23.
- CACIATO, L. E.; MENDES, L. de S. Cidades inteligentes: A transição energética para veículos elétricos na construção de cidades verdes. *Future Computing Systems*, v. 12, n. 35, p. 124,134, 2024. Citado na página 15.
- CARNEIRO, G. B. *Desenvolvimento de um controlador inteligente em sistema embarcado para controle dinâmico de veículo elétrico de duas rodas.* Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, 2021. Acesso em: 12 novembro. 2024. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/22021>>. Citado na página 23.
- DENTON, T. *Veículos elétricos e híbridos.* Blucher, 2018. ISBN 9788521213024. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=ELqxDwAAQBAJ>>. Citado na página 27.
- DIAS, L. F. V. *Diferencial eletrônico para o veículo elétrico utilitário da cidade universitaria da UFRJ.* 2014. Acesso em: 12 novembro 2024. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11422/18170>>. Citado na página 19.
- ELETRONICA, M. *Módulo Regulador De Tensão Ajustável XL6009 DC/DC Step Up.* 2024. <<https://www.mamutelectronica.com.br/modulo-regulador-de-tensao-ajustavel-xl6009-dc-dc-step-up-18798>>. Acessado em 22 de novembro de 2023. Citado na página 52.
- IBAMA. *Ibama apresenta avanços no controle de poluentes por veículos.* 2021. <<https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/noticias/2021/ibama-apresenta-avancos-no-controle-de-poluentes-por-veiculos>>. Acessado em 02 de outubro de 2023. Citado na página 14.
- IHME. *State of Global Air 2020.* 2020. <<https://www.healthdata.org/research-analysis/library/state-global-air-2020>>. Acessado em 02 de Outubro de 2023. Citado na página 14.
- NEOCHARGE. *CONHEÇA OS TIPOS DE CARROS ELÉTRICOS.* 2024. Disponível em: <<https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/tipos-veiculos-eletricos>>. Acesso em: 11 nov 2024. Citado na página 28.
- OLIVEIRA, G. L. de. *Desenvolvimento do sistema eletrônico de um veículo do tipo Formula Student elétrico baseado nas regras da Fórmula SAE.* 2020. Acesso em: 12

novembro 2024. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/217420?show=full>>. Citado na página 22.

ONOHARA, M. M. O. E. Y. Comparações entre a eficiência energética de carro elétrico e de carro à combustão: uma análise dos impactos socioambientais e financeiros. *Revista de Empreendedorismo e Gestão e de Micro e Pequenas Empresas*, Editora Enterprising, v. 7, n. 1, p. 73–92, 2022. Citado na página 14.

POTENZA, R. F. et al. Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do brasil 1970-2021,. 2023. Acessado em 02 de outubro de 2023. Citado na página 14.

RAVI, A.; PALANI, S. Robust electronic differential controller for an electric vehicle. *American Journal of Applied Sciences*, v. 10, p. 1356–1362, 09 2013. Citado na página 18.

REIS, G. I.; FERRETTI, A. S. Veículos elétricos no brasil: benefícios, desafios e perspectivas de impacto socioambiental. *Revista Competitividade e Sustentabilidade - ComSus*, v. 11, n. 1, p. 21–36, 2024. Citado na página 15.

SEGANTINI, G. R. de O. Projeto e implementação de um diferencial eletrônico para um veículo elétrico de competição formula estudantil. *Simpósio Internacional de Iniciação Científica e Tecnológica - SIICUP*, 2022. Citado na página 25.

SILVA, F. L. *MODELAGEM E ANÁLISE DE SISTEMAS DE CONTROLE EM DIFERENCIAIS ELETRÔNICOS PARA VEÍCULOS HÍBRIDOS E ELÉTRICOS*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.

SOUZA, T. F. C. d. *Instrumentação e análise do consumo energético baseado na pose de um veículo elétrico de competição*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018. Acesso em: 21 nov. 2024. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/197800>>. Citado na página 15.

STOOP, A. *Design and Implementation of Torque Vectoring for the Forze Racing Car*. Dissertação (Mestrado) — Delft University of Technology, Brasília, jul. 2014. Citado na página 29.

TEXASINSTRUMENTS. *EK-TM4C123GXL ARM® Cortex®-M4F Based MCU TM4C123G LaunchPad™ Evaluation Kit*. 2024. <<https://www.ti.com/tool/EK-TM4C123GXL>>. Acessado em 16 de novembro de 2024. Citado na página 37.

UFRGS. *Equipe da UFRGS participa da Fórmula SAE em Piracicaba-SP*. 2011. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/ufrgs/noticias/equipe-da-ufrgs-participa-da-formula-sae-em-piracicaba-sp>>. Acesso em: 11 nov 2024. Citado na página 22.

VARGAS, E. C. *ESTUDO, DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DO VEÍCULO ELÉTRICO EV-IFSC II*. 2022. Disponível em: <<https://repositorio.ifsc.edu.br/handle/123456789/2920>>. Acesso em: 12 nov 2024. Citado na página 24.

WANG, R.; JING, H.; HU, C.; CHADLI, M.; YAN, F. Robust h output-feedback yaw control for in-wheel motor driven electric vehicles with differential steering. *Neurocomputing*, v. 173, p. 676–684, 2016. ISSN 0925-2312. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231215011625>>. Citado na página 20.

APÊNDICE A . CÓDIGO-FONTE DO ACIONAMENTO DO TRICICLO EM MALHA FECHADA

```

1 /* Codigo fonte para o controle do triciclo eletrico
2 realiza o controle diferencial dos dois motores de corrente continua
3 */
4
5 // Inclusao das bibliotecas
6
7
8 #include <C:\Users\Eu\AppData\Local\Energia15\packages\energia\
    hardware\tivac\1.0.4\cores\tivac\wiring_analog.c>
9
10 // Constantes
11 int valorSensorHall = 0;
12 int valorSensorHallDir = 0;
13 int valorSensorHallEsq = 0;
14
15 const float EXPO = 2.718;
16 const int LOW_THRESHOLD = 850;
17 const int DIR_THRESHOLD = 200;
18 const int DIRECTION_LEFT = 1350;
19 const int DIRECTION_RIGHT = 1650;
20 const int NUM_READINGS_RODA_DIR = 20;
21 const int NUM_READINGS_RODA_ESQ = 20;
22 const int NUM_READINGS = 30;
23 int contPulsoD = 0, contPulsoE = 0;
24 const int NUM_READINGS_POT = 20;
25 int readingsRodaDir [NUM_READINGS_RODA_DIR];
26 int indexRodaDir = 0;
27 int totalValorRodaDir = 0;
28 int mediaRodaDir = 0;
29 int readingsRodaEsq [NUM_READINGS_RODA_ESQ];
30 int indexRodaEsq = 0;
31 int totalValorRodaEsq = 0;
32 int mediaRodaEsq = 0;
33 int readingsPot [NUM_READINGS_POT];
34 int indexPot = 0;
35 int totalPot = 0;
36 int mediaPot = 0;
37 int readingsSensorHall [NUM_READINGS];

```

```

38 int indexSensorHall = 0;
39 int totalSensorHall = 0;
40 int mediaSensorHall = 0;
41 int valorMapeado = 0;
42 int pwmDireito = 0, pwmEsquerdo = 0;
43 int pidDireito = 0, pidEsquerdo = 0;
44
45 long freqD = 0, count = 0, rpmD = 0, rpmE = 0, ta=0, th=500;
46 float freqE = 0;
47 bool pulsoD = 1, pulsoE = 0;
48 int val, val2, valMax = 0;
49
50 // Pinos PWM para motores
51
52 #define PWM_MOTOR_DIR_FRENT PB_1
53 #define PWM_MOTOR_DIR_TRAS PB_0
54 #define PWM_MOTOR_ESQ_FRENT PB_6
55 #define PWM_MOTOR_ESQ_TRAS PB_7
56
57
58 #define SENSOR_DIR PD_2
59 #define SENSOR_ESQ A1
60 #define GUIDAO A0
61
62 // Pinos do sensor Hall e botao para inverter o sentido
63 #define HALL_SENSOR A3
64 #define BUTTON_PIN PA_4
65
66 // Pino do freio
67 #define FREIO PB_4
68
69 // Pinos dos valores de referencia para o DAQ
70
71 #define VALOR_REF_DIR PC_4
72 #define VALOR_REF_ESQ PC_5
73
74
75
76 // Funcao para controlar os motores usando PWM
77 void controlarMotores(int pwm_motor_dir_tras, int pwm_motor_dir_frente,
    , int pwm_motor_esq_tras, int pwm_motor_esq_frente ){
78
79     PWMWrite(PWM_MOTOR_ESQ_FRENT, 4095, pwm_motor_esq_frente, 1000);
80     PWMWrite(PWM_MOTOR_ESQ_TRAS, 4095, pwm_motor_esq_tras, 1000);
81     PWMWrite(PWM_MOTOR_DIR_FRENT, 4095, pwm_motor_dir_frente, 1000);
82     PWMWrite(PWM_MOTOR_DIR_TRAS, 4095, pwm_motor_dir_tras, 1000);
83 */

```

```

84     Serial.print("PWM Motor Esq Tras: ");
85     Serial.println(pwm_motor_esq_tras);
86     Serial.print("PWM Motor Esq Frente: ");
87     Serial.println(pwm_motor_esq_frente);
88     Serial.print("PWM Motor Dir Tras: ");
89     Serial.println(pwm_motor_dir_tras);
90     Serial.print("PWM Motor Dir Frente: ");
91     Serial.println(pwm_motor_dir_frente);
92     */
93
94 }
95
96 float velocidadeCurva(int x, float x0, float k){
97     // k = +-0.015
98     return 1 - (0.81)/(1 + pow(EXPO, k*(x - x0)));
99 }
100
101 void intSensorD(void);
102 void intSensorE(void);
103
104 void setup(){
105
106     // Configuracao inicial
107     pinMode(PWM_MOTOR_DIR_TRAS, OUTPUT);
108     pinMode(PWM_MOTOR_DIR_FRETE, OUTPUT);
109     pinMode(PWM_MOTOR_ESQ_TRAS, OUTPUT);
110     pinMode(PWM_MOTOR_ESQ_FRETE, OUTPUT);
111     pinMode(BUTTON_PIN, INPUT_PULLUP);
112     pinMode(FREIO, INPUT_PULLUP);
113     pinMode(SENSOR_DIR, INPUT);
114     pinMode(SENSOR_ESQ, INPUT);
115     pinMode(VALOR_REF_DIR, OUTPUT);
116     pinMode(VALOR_REF_ESQ, OUTPUT);
117
118
119
120     Serial.begin(115200);
121
122     pulsoD = 0x01;           //Seta variavel de controle
123     pulsoE = 0x01;           //Seta variavel de controle
124
125     for(int thisReadingSensorHall = 0; thisReadingSensorHall <
126         NUM_READINGS; thisReadingSensorHall++) {
127         readingsSensorHall[thisReadingSensorHall] = 0;
128     }
129
130     for(int thisReadingPot = 0; thisReadingPot <

```

```

131     NUM_READINGS_POT; thisReadingPot++) {
132     readingsPot[thisReadingPot] = 0;
133 }
134
135     for (int thisReadingRodaDireita = 0; thisReadingRodaDireita <
136         NUM_READINGS_RODA_DIR; thisReadingRodaDireita++) {
137     readingsRodaDir[thisReadingRodaDireita] = 0;
138 }
139
140     for (int thisReadingRodaEsquerda = 0; thisReadingRodaEsquerda <
141         NUM_READINGS_RODA_ESQ; thisReadingRodaEsquerda++) {
142     readingsRodaEsq[thisReadingRodaEsquerda] = 0;
143 }
144
145 }
146
147 void loop() {
148
149     // Leitura dos valores do sensor e direcao
150     int erroRodaEsq = 0;
151     int erroRodaDir = 0;
152     int erroRodas = 0;
153     int valorRodaEsq = 0;
154     int valorRodaDir = 0;
155     int vRefDir = 0;
156     int vRefEsq = 0;
157
158
159     int direcao = analogRead(GUDAO);
160     bool estadoBotao = digitalRead(BUTTON_PIN) == LOW;
161     bool estadoFreio = digitalRead(FREIO) == LOW;
162     float fatorVelocidadeE = (mediaPot < DIRECTION_LEFT) ?
163         velocidadeCurva(mediaPot, DIRECTION_LEFT - DIR_THRESHOLD, 0.012) :
164         1.0;
165     float fatorVelocidadeD = (mediaPot >= DIRECTION_RIGHT) ?
166         velocidadeCurva(mediaPot, DIRECTION_RIGHT + DIR_THRESHOLD, -0.012) :
167         1.0;
168
169
170     valorRodaDir = analogRead(SENSOR_DIR);
171     valorRodaEsq = analogRead(SENSOR_ESQ);
172
173 // Serial.println(valorRodaDir);
174
175

```

```
176 //      Serial.print(" Referencia: ") ;
177 //      Serial.println(valorMapeado) ;
178
179 //      Serial.print(" Valor medio da referencia: ") ;
180 //      Serial.println(mediaSensorHall) ;
181
182 //      Serial.print(" fator de Velocidade Direito: ") ;
183 //      Serial.println(fatorVelocidadeD) ;
184
185 //      Serial.print(" fator de Velocidade Esquerdo: ") ;
186 //      Serial.println(fatorVelocidadeE) ;
187
188
189 //      Serial.print(" Valor do guidao: ") ;
190 //      Serial.println(mediaPot) ;
191
192
193
194 //      Serial.print(" Resposta Motor Direito: ") ;
195 //      Serial.println(valorRodaDir) ;
196
197 //      Serial.print(" Media motor Direito ") ;
198 //      Serial.println(mediaRodaDir) ;
199
200
201 //      Serial.print(" Resposta Motor Esquerdo: ") ;
202 //      Serial.println(valorRodaEsq) ;
203
204 //      Serial.print(" Media motor Esquerdo ") ;
205 //      Serial.println(mediaRodaEsq) ;
206
207 //      Serial.print(" chave do sentido: ") ;
208 //      Serial.println(estadоБтao) ;
209
210 //      Serial.print(" Freio: ") ;
211 //      Serial.println(estadоВr) ;
212
213
214 //      Serial.println("—————") ;
215
216
217
218 totalSensorHall = totalSensorHall -
219     readingsSensorHall[indexSensorHall] + valorSensorHall;
220 readingsSensorHall[indexSensorHall] = valorSensorHall;
221 indexSensorHall = (indexSensorHall + 1) % NUM_READINGS;
222 mediaSensorHall = totalSensorHall/NUM_READINGS;
```

```

223
224     totalPot = totalPot -
225         readingsPot [indexPot] + direcao;
226     readingsPot [indexPot] = direcao;
227     indexPot = (indexPot + 1) % NUM_READINGS_POT;
228     mediaPot = totalPot/NUM_READINGS_POT;
229
230
231
232     totalValorRodaDir = totalValorRodaDir -
233         readingsRodaDir [indexRodaDir] + valorRodaDir;
234     readingsRodaDir [indexRodaDir] = valorRodaDir;
235     indexRodaDir = (indexRodaDir + 1) % NUM_READINGS_RODA_DIR;
236     mediaRodaDir = totalValorRodaDir/NUM_READINGS_RODA_DIR;
237
238
239     totalValorRodaEsq = totalValorRodaEsq -
240         readingsRodaEsq [indexRodaEsq] + valorRodaEsq;
241     readingsRodaEsq [indexRodaEsq] = valorRodaEsq;
242     indexRodaEsq = (indexRodaEsq + 1) % NUM_READINGS_RODA_ESQ;
243     mediaRodaEsq = totalValorRodaEsq/NUM_READINGS_RODA_ESQ;
244
245 /*
246     Serial.print("Resposta Motor Direito: ");
247     Serial.println(valorRodaDir);
248
249     Serial.print("Media motor Esquerdo ");
250     Serial.println(mediaRodaEsq);
251
252
253     Serial.print("Resposta Motor Esquerdo: ");
254     Serial.println(valorRodaEsq);
255
256     Serial.print("Media motor Esquerdo ");
257     Serial.println(mediaRodaEsq);
258 */
259
260     vRefDir = fatorVelocidadeD*valorMapeado;
261     vRefEsq = fatorVelocidadeE*valorMapeado;
262
263 // Serial.print("Valor de referencia direita: ");
264 // Serial.println(vRefDir);
265
266 // Serial.print("Valor de referencia esquerda: ");
267 // Serial.println(vRefEsq);
268
269     Serial.println("-----");

```

```
270
271 // Serial.print("Valor do guidao: ");
272 // Serial.println(mediaPot);
273 /*
274
275 */
276 if (valorMapeado <= 0){
277
278 // Serial.println("valor zero: ");
279
280 valorRodaEsq = 0;
281 valorRodaDir = 0;
282 }
283
284
285 Serial.print("Resposta do motor Esquerdo ");
286 Serial.println(valorRodaEsq);
287
288 Serial.print("Resposta do motor Direito ");
289 Serial.println(valorRodaDir);
290
291
292
293 erroRodaEsq = vRefEsq-valorRodaEsq;
294 erroRodaDir = vRefDir-valorRodaDir;
295
296 erroRodas = valorRodaEsq-valorRodaDir;
297 /*
298 Serial.print("erro entre as rodas: ");
299 Serial.println(erroRodas);
300
301 Serial.print("erro roda esquerda: ");
302 Serial.println(erroRodaEsq);
303
304 Serial.print("erro roda direita: ");
305 Serial.println(erroRodaDir);
306
307 */
308
309
310 if ((mediaPot >=1350) && (mediaPot <= 1650)){
311 // Serial.println("Reta");
312 if (erroRodas >= 0){
313
314 vRefEsq = valorRodaEsq + erroRodaEsq;
315 vRefDir = valorRodaDir + erroRodaDir+erroRodas;
316 }
```

```

317
318     else if (erroRodas < 0){
319
320         vRefEsq = valorRodaEsq + erroRodaEsq-erroRodas;
321         vRefDir = valorRodaDir + erroRodaDir;
322     }
323
324 }
325 else {
326 //   Serial.println("Curva");
327     vRefEsq = valorRodaEsq + erroRodaEsq;
328     vRefDir = valorRodaDir + erroRodaDir;
329 }
330
331
332 //   Serial.println("valor sensor hall ");
333 //   Serial.println(valorSensorHall);
334
335 //   Serial.println("valor sensor hall direito ");
336 //   Serial.println(valorSensorHallDir);
337
338 //   Serial.println("valor sensor hall esquerdo ");
339 //   Serial.println(valorSensorHallEsq);
340
341 //   Serial.println(" final: ");
342
343
344
345     valorMapeado = map(mediaSensorHall , 830 , 3800 , 0 , 4095);
346
347 // Limitadores do acelerador
348
349     if (valorMapeado <= 0){
350
351         valorMapeado = 0;
352     }
353     if (valorMapeado > 4095){
354
355         valorMapeado = 4095;
356     }
357
358     count = millis();
359
360     valorReferenciaPWM(fatorVelocidadeD , fatorVelocidadeE);
361     if ((count-ta)>=th){
362         freqE=(float)(contPulsoE)*1000/th;
363         freqD = (float)(contPulsoD)*1000/th;

```

```

364     rpmD = 60*freqD ;
365     rpmE = 60*freqE ;
366     contPulsoD = 0 ;
367     contPulsoE = 0 ;
368     ta=count ;
369 }
370
371 //Serial.println(freqE) ;
372
373 if (estadoFreio){
374 // Serial.println(" motores freiados ") ;
375 controlarMotores(0, 0, 0, 0) ;
376 }
377 else{
378
379     delay(1) ;
380     if (estadoBotao){
381
382 // Serial.println(" valor Enviado ao motor direito ") ;
383 // Serial.println(vRefDir) ;
384
385 // Serial.println(" valor Enviado ao motor esquerdo ") ;
386 // Serial.println(vRefEsq) ;
387
388     controlarMotores(0, vRefDir, 0, vRefEsq ) ;
389 }
390     else{
391
392 // Serial.println(" valor Enviado ao motor direito ") ;
393 // Serial.println(vRefDir) ;
394
395 // Serial.println(" valor Enviado ao motor esquerdo ") ;
396 // Serial.println(vRefEsq) ;
397
398     controlarMotores(vRefDir, 0, vRefEsq, 0) ;
399 }
400
401 }
402
403 }
404
405 void valorReferenciaPWM( float fv1, float fv2){
406     int vMax = 4095 ;
407     float vAg1 = (mediaSensorHall*fv1) ;
408     float vAg2 = (mediaSensorHall*fv2) ;
409 // Serial.print(" valor Medio 1 ") ;
410 // Serial.println(vAg1) ;

```

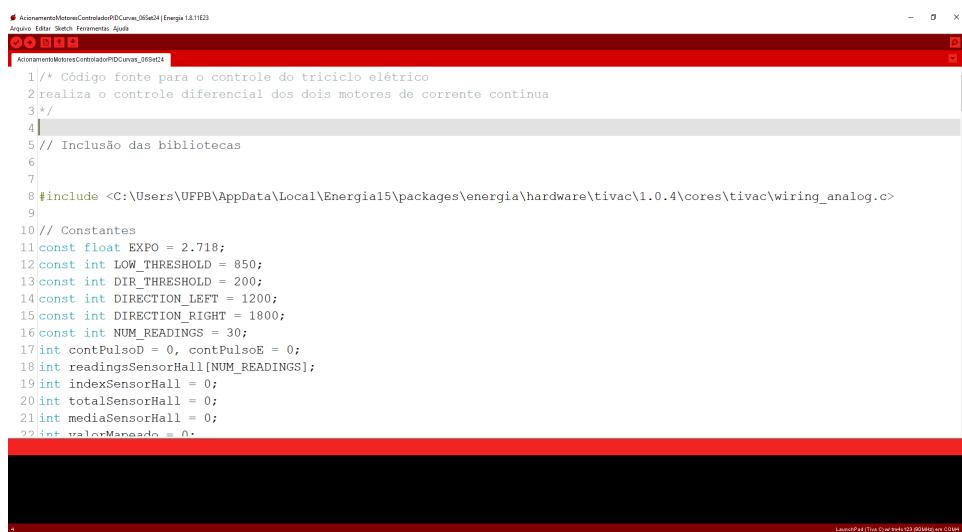
```
411 // Serial.print(" valor Medio 2 ");
412 // Serial.println(vAg2);
413 int dc1 = map(100*vAg1/vMax, 0, 100, 0, 4095);
414 int dc2 = map(100*vAg2/vMax, 0, 100, 0, 4095);
415 // Serial.println("");
416 // Serial.print("dcEsq:"); Serial.println(dc1);
417 // Serial.print("dcDir:"); Serial.println(dc2);
418 PWMWrite(VALOR_REF_DIR, 4095, dc1, 1000);
419 PWMWrite(VALOR_REF_ESQ, 4095, dc2, 1000);
420 pwmDireito = dc1;
421 pwmEsquerdo = dc2;
422 }
423
424
425
426 void intSensorD(void){
427     contPulsoD++;
428 }
429
430 void intSensorE(void){
431     contPulsoE++;
432 }
```

Listing A.1. MF12Nov

APÊNDICE B . IDE ENERGIA E BIBLIOTECA PWM WRITE

O Energia IDE é uma interface de desenvolvimento integrada projetada pela *Texas Instruments* para realizar a programação das placas desenvolvidas pela *Texas*. O ambiente possui bibliotecas e exemplos de códigos fonte para auxiliar no desenvolvimento de projetos. O software é livre e disponível para instalação pelo site energia.nu. A empresa também disponibiliza tutoriais para auxiliar os usuários. O ambiente de desenvolvimento energia IDE é apresentado na figura 38.

Figura 38. Interface de desenvolvimento energia IDE



Fonte: Autor.

Ao instalar o Energia é necessário realizar a instalação do pacote de placas referente ao modelo da Tiva C. Esse processo é realizado dentro da IDE do Energia, seguindo os seguintes passos, ao abrir o Energia.

Biblioteca PWM write

Para utilizar a Tiva c 123 como gerador de PWM com a frequência de 1 kHz é necessário a inclusão da biblioteca *wiring analog*. Para isso é necessário localizar a biblioteca pelo diretório. Dessa forma deve-se seguir a sequência. <C: Users\ "SeuUsuario"\AppData\Local\Energia15\packages \energia\hardware

\tivac\1.0.4\cores\tivac\wiring_analog.c>

APÊNDICE C . DAQ USB-6212

O DAQ USB-6212 é uma placa de aquisição de dados da empresa *National Instruments* que possui 16 canais de entradas analógicas com resolução de 16 bits e 2 canais de saídas analógicas, onde a tensão de trabalho é ajustável com faixa máxima de operação de até ± 10 V. Também possui 24 canais de entrada e saída digitais com saída máxima de 5,25 V. Por meio dessa placa é possível realizar aplicações de teste, controle e design, aquisição, registro e monitoramento de dados.

O modelo do DAQ utilizado no projeto é apresentado na Figura 39.

Figura 39. Modelo do DAQ NI USB-6212



Fonte: Autor.

LabVIEW

O LabVIEW é um programa desenvolvido pela empresa *National Instruments* que possibilita realizar de simulações de sistemas de automação e controle, nele é possível realizar simulações, sua interface gráfica torna o uso intuitivo e facilitado. O ambiente possui uma ampla biblioteca e funções que auxiliam na criação de projetos. O software é integrado com os dispositivos de aquisição de dados, como o USB-6212.

O programa possui duas telas principais, o painel frontal e o diagrama de blocos. O painel frontal é onde são inseridos os ícones de controle e visualização, como botões, chaves, gráficos, displays. Já o diagrama de blocos é o local onde a lógica da programação é realizada. As interligações dos blocos, funções matemáticas, estruturas de controle. O programa está disponível para instalação por meio de cadastro no site da *National*

Instruments com e-mail acadêmico.

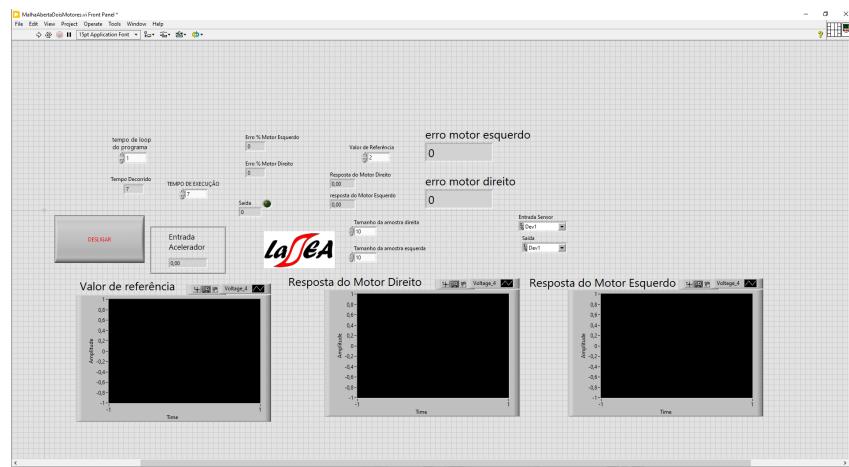
Programa de leitura dos motores

No programa do LabVIEW foi desenvolvido um programa para obter a leitura da resposta dos motores, esse programa obtém os gráficos de cada roda e gera um gráfico com o roteiro do MATLAB.

A seguir é ilustrado a interface do programa desenvolvido no Labview nas duas telas, o painel frontal e o diagrama de blocos.

A figura 40 ilustra o painel frontal do Labview.

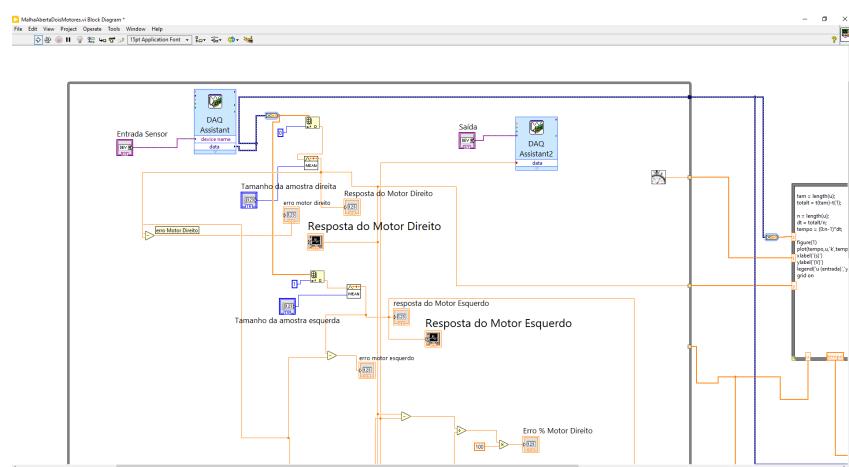
Figura 40. Painel frontal do LabVIEW



Fonte: Autor.

A figura 41 ilustra o diagrama de blocos do Labview.

Figura 41. Diagrama de blocos do LabVIEW



Fonte: Autor.