

Universidade Estadual de Maringá



CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DANIEL KAZUMA KATO

Frenagem Regenerativa: Um estudo de componentes e aplicação



Maringá

2025

DANIEL KAZUMA KATO

Frenagem Regenerativa: Um estudo de componentes e aplicação

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Ciências Térmicas.

Orientador(a): Prof. Dr. Rubens Zenko Sakiyama.

Coorientador(a): Prof. Dr. Carlos Alexandre Ferri.

Maringá,

2025

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

K19f

Kato, Daniel Kazuma

Frenagem regenerativa : um estudo de componentes e aplicação / Daniel Kazuma Kato. --
Maringá, PR, 2025.

77 f. : il. color., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Zenko Sakiyama.

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Ferri.


Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia,
Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
2025.

1. Frenagem regenerativa. 2. Veículos elétricos. 3. Sistemas elétricos automotivos. 4. Drives de
motores. 5. Motores brushless de corrente contínua. I. Sakiyama, Rubens Zenko, orient. II. Ferri,
Carlos Alexandre, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Mecânica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV.
Titulo.

CDD 23.ed. 621.8

Este é o exemplar definitivo da Dissertação apresentado por Daniel Kazuma Kato, perante a Comissão Julgadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica em 24/07/2025.

COMISSÃO JULGADORA

Documento assinado digitalmente
 RUBENS ZENKO SAKIYAMA
Data: 04/08/2025 14:11:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Dr. Rubens Zenko Sakiyama

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica/UEM

Documento assinado digitalmente
 CÁSSIO RODOLFO AVEIRO DA SILVA
Data: 04/08/2025 12:41:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Cássio Rodolfo Aveiro da Silva

Departamento de Engenharia Mecânica/UEM

Documento assinado digitalmente
 FLÁVIO LUIZ ROSSINI
Data: 04/08/2025 10:59:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Flávio Luiz Rossini

Departamento Acadêmico de Engenharia Eletrônica/UTFPR

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho à minha família, amigos e a todos que fizeram parte da minha jornada no mestrado. Sou grato a Deus por cada pessoa que colocou em meu caminho, pois sem elas não teria alcançado este importante objetivo.

À minha família, Nilton, Olga, Aline e Renan que fizeram de tudo por mim, cuidado, ensinando e principalmente dando conselhos e amor a minha vida e são as pessoas que tenho como exemplo de superação, persistência e pessoas me inspiro para a vida.

À minha namorada Bruna Kaori por sempre ficar ao meu lado, pelo amor, apoio incondicional, confiança e por me trazer forças nos momentos em que não a encontrei.

Agradeço ao professor Gilmar, in memoriam, por seus ensinamentos e pelo exemplo de integridade e paixão pelo ensino. Sua dedicação no ensino médio transformou minha vida, foi sua persistência e confiança que me ensinaram a amar a matemática e a física, inspirando-me a seguir Engenharia Elétrica e o mestrado em Engenharia Mecânica. Seu legado vive em cada conquista dessa trajetória.

Ao meu orientador e ao meu coorientador, Professor Dr. Rubens Zenko Sakiyama e Professor Dr. Carlos Alexandre Ferri, pelos ensinamentos, parcerias, conselhos e pela amizade desde os tempos da graduação em Engenharia Elétrica e hoje no doutorado.

Ao nosso coordenador e professor, Dr. Wagner André dos Santos Conceição, pela constante dedicação e sempre ajudando na minha jornada. Ao secretário da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Renato, pelo apoio e disponibilidade. Agradeço também a todos os professores do programa de pós-graduação, pelo comprometimento e por estarem sempre dispostos a ajudar os alunos e contribuir com o crescimento da Engenharia Mecânica.

Aos meus grandes amigos Gustavo Palmieri Casaroto, Ketlyn Medeiros, Leonardo Soares Gaiola, Mateus Silva Cola pelo apoio e pela amizade. A minha amiga e colega de graduação e mestrado Isabella Akemi Okumoto Borges pelo apoio, parceria, matérias que fizemos juntos e por todos os projetos, artigos e sempre ajudar na elaboração da escrita e revisão dos meus textos, espero continuar nossa jornada no doutorado futuro.

Agradecemos sinceramente à CAPES pelo apoio fundamental ao desenvolvimento acadêmico e científico no Brasil. Seu compromisso com a excelência na pesquisa e na pós-graduação foi essencial para a realização desta pesquisa, deixando um impacto duradouro na comunidade acadêmica.

KATO, D. K. FRENAGEM REGENERATIVA: UM ESTUDO DE COMPONENTES E APLICAÇÃO. Dissertação, p. 78 (Pós Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2025.

RESUMO

Objetivo do trabalho é o estudo do sistema de um veículo elétrico, pesquisas de estudos, análises e desenvolvimento de drivers de controle de velocidade e regeneração de energia pela frenagem eletrônica de motores *brushless* (sem escovas), de forma a melhorar a autonomia de um veículo elétrico (VE). Com o aumento exponencial de veículos elétricos a motivação do estudo é o estudo do funcionamento autônomo do regime de aceleração do VE e frenagem regenerativa de energia para a bateria. Em sistemas elétricos automotivos, drivers de controle de velocidade e regeneração de energia operam com microcontroladores, que recebem sinais do motor, acelerador, freio e outros sensores. Para uma aplicação eficiente, é essencial compreender o funcionamento dos sistemas que integram o veículo elétrico. A análise dos circuitos dos drivers disponíveis no mercado permite a definição de uma plataforma de testes mais adequada. Utiliza-se um motor brushless e um conjunto de baterias, busca-se aprimorar a estrutura do driver por meio de ajustes em seus parâmetros e características, visando melhorar o tempo de resposta, reduzir o consumo energético e aumentar a eficiência da recuperação de energia. Alguns resultados preliminares durante o estudo definiram a utilização de um *driver* de controle de motores de corrente contínua sem escova (BLDC), chamado Controle eletrônico de velocidade de Vedder (VESC), que possui diversas tecnologias e funcionalidades que um Controle eletrônico de velocidade (ESC) normal não possui. Nos estudos e análises, realizou-se a comparação entre as versões 4 e 6 disponíveis para compra via sites de compras online. Com base nessas análises, ficou decidido seguir os estudos com a versão 6, para encontrar a partir de avaliações e problemas encontrados por usuários, realizar ajustes com foco na otimização do sistema de funcionamento e facilidade na implementação em projetos futuros.

Palavras-chave: Frenagem regenerativa, motor CC brushless, acionamento e drives de motores.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 3.1 – Construção de um motor BLDC..... | 18 |
| Figura 3.2 – Funcionamento do motor BLDC com as seis comutações | 19 |
| Figura 3.3 – Motor BLDC em modo normal e regeneração..... | 21 |
| Figura 3.4 – Circuito de acionamento de ponte inversora..... | 22 |
| Figura 3.5 – Esquemático de ligação do motor ao ESC..... | 23 |
| Figura 3.6 – VESC ver. 4.12..... | 24 |
| Figura 3.7 – GUI do VESC Tool..... | 25 |
| Figura 3.8 – VESC versão 4.0..... | 26 |
| Figura 3.9 – VESC versão 6 MKVI..... | 27 |
| Figura 3.10 – VESC 4.12..... | 28 |
| Figura 3.11 – VESC 75200 versão 6 feito pela MakerBase..... | 29 |
| Figura 3.12 – Estrutura básica de controle..... | 31 |
| Figura 3.13 – Esquemático para a utilização do VESC6..... | 33 |
| Figura 3.14 – Sistema de antifaiscante com um interruptor de acionamento do sistema.. | 34 |
| Figura 4.1 – Flysky Fsesc 6.9 plus com a arquitetura VESC 6.6..... | 41 |
| Figura 4.2 – Motor BLDC..... | 42 |
| Figura 4.3 – Sistema de alimentação da bancada..... | 43 |
| Figura 4.4 – Carregador de bateria..... | 44 |
| Figura 4.5 – Estrutura da bancada..... | 45 |
| Figura 4.6 – Suporte de fixação do motor..... | 46 |
| Figura 4.7 – Braço de força..... | 47 |
| Figura 4.8 – Componentes da bancada na versão 1..... | 48 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.9 – Bancada de testes versão 1..... | 49 |
| Figura 5.1 – VESC TOOLS firmware update..... | 50 |
| Figura 5.2 – Configuração de alimentação do sistema..... | 51 |
| Figura 5.3 – Gráfico de corrente de motor e bateria..... | 53 |
| Figura 5.4 – Tempo de resposta..... | 54 |
| Figura 5.5 – Corrente de recuperação de energia..... | 57 |
| Figura 5.6 – Corrente Máxima de descarga..... | 59 |
| Figura 5.7 – Performance do motor X PWM..... | 61 |
| Figura 5.8 – Danos no eixo do motor..... | 62 |
| Figura 5.9 – Novo suporte do motor..... | 63 |
| Figura 5.10 – Suporte do motor na versão 2..... | 64 |
| Figura 5.11 – Corrente de frenagem regenerativa..... | 65 |
| Figura 5.12 – Estufamento das baterias..... | 67 |
| Figura 5.13 – Bancada de testes versão 2..... | 68 |
| Figura 5.14 – Zonas de recuperação de energia x Rotação..... | 70 |
| Figura 5.15: Implementação do tacômetro indutivo..... | 74 |
| Figura 5.16: Comparação de medição de RPM..... | 75 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1 – Ciclo de comutação de giro completo do motor..... | 20 |
| Tabela 3.2 – Especificação do drive VESC 4.12..... | 28 |
| Tabela 3.3 – Especificações técnicas do VESC ver. 6..... | 30 |
| Tabela 4.1 – Comparativo entre versões VESC 4 e 6..... | 35 |
| Tabela 5.1 – Dados coletados no teste 1..... | 52 |
| Tabela 5.2 –Dados coletados no teste 3 frenagem regenerativa..... | 56 |
| Tabela 5.3 –Dados coletados no teste 4..... | 69 |
| Tabela 5.4 –Medição de RPM..... | 74 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|--|
| UEM | Universidade Estadual de Maringá |
| VE | Veículo Elétrico |
| VEB | Veículo Elétrico Movido a Bateria |
| CC | Corrente Contínua |
| CA | Corrente Alternada |
| FCEM | Força Contra Eletromotriz |
| ESC | <i>Electronic Speed controller</i> - Controle Eletrônico de velocidade |
| VESC | <i>Vedder Electronic Speed controller</i> - Controle Eletrônico de velocidade Vedder |
| GUI | <i>Graphical User Interface</i> ou Interface Gráfica do Usuário |
| ADC | <i>Analogic Digital Converter</i> - Conversor Analógico Digital |
| SPI | <i>Serial Peripheral Interface</i> - Interface periférica Serial |
| PWM | <i>Pulse Width Modulation</i> - Modulação por largura de pulso |
| BMS | <i>Battery Management system</i> - Sistema de gerenciamento de bateria |
| ERPM | <i>Electrical Revolutions Per Minute</i> - Revoluções Elétricas por Minuto |
| RPM | Rotação por minuto |

LISTA DE SÍMBOLOS

V Tensão [Volts]

A Corrente [A]

P Potência [W]

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 OBJETIVOS | 14 |
| 2.1 OBJETIVOS GERAIS | 14 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 14 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 3.1 BREVE HISTÓRICO DO VEÍCULO ELÉTRICO | 15 |
| 3.2 TECNOLOGIAS EMPREGADAS NO TREM DE FORÇA DE VEÍCULO ELÉTRICO | 16 |
| 3.2.1 FRENAGEM REGENERATIVA | 16 |
| 3.3 MOTORES BRUSHLESS DE CORRENTE CONTÍNUA | 17 |
| 3.3.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS | 17 |
| 3.4 FORMA DE FUNCIONAMENTO E CONTROLE DO MOTOR BLDC | 18 |
| 3.4.1 TIPOS DE ACIONAMENTOS DE MOTORES CC BRUSHLESS | 21 |
| 3.5 CONTROLE ELETRÔNICO DE VELOCIDADE | 22 |
| 3.5.1 VESC | 23 |
| 3.6 VESC | 25 |
| 3.6.1 VESC 4 | 27 |
| 3.6.2 VESC 6 | 29 |
| 3.7 CONTROLE DE VELOCIDADE PARA MOTORES BLDC COM PID | 31 |
| 3.8 CONDIÇÕES DE TESTES PROPOSTO PARA O ESTUDO | 32 |
| 4 METODOLOGIA | 35 |
| 4.1 COMPARATIVO ENTRE VERSÕES 4 E 6 | 35 |
| 4.2 DESENVOLVIMENTO DA BANCADA DE TESTES | 40 |
| 4.2.1 DRIVE DE CONTROLE DE VELOCIDADE | 40 |
| 4.2.2 MOTOR SEM ESCOVAS DE CORRENTE CONTÍNUA | 41 |
| 4.2.3 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DO MOTOR E DRIVE | 42 |
| 4.2.4 ESTRUTURA DA BANCADA | 44 |
| 4.3 MONTAGEM DA BANCADA DE TESTES | 47 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 50 |
| 5.1 ACELERAÇÃO DO MOTOR PELA RAZÃO CÍCLICA | 50 |
| 5.1.1 TEMPO DE RESPOSTA | 54 |
| 5.2 FRENAGEM REGENERATIVA | 56 |
| 5.3.1 CORRENTE MÁXIMA DE DESCARGA | 58 |
| 5.4 TESTE 1: ACELERAÇÃO DO MOTOR PELA RAZÃO CÍCLICA | 60 |
| 5.5 ATUALIZAÇÕES FEITAS NO SUPORTE DO MOTOR | 62 |
| 5.6 TESTE 2: FRENAGEM REGENERATIVA | 64 |
| 5.7 PROBLEMAS ENCONTRADOS NAS BATERIAS | 67 |
| 5.8 ESTUDO DESENVOLVIMENTO DE UM PACK DE BATERIAS LÍTIO | 71 |
| 5.9 TACÔMETRO DIGITAL | 73 |
| 6 CONCLUSÃO | 76 |
| 7 REFERÊNCIAS | 77 |

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a sociedade passou a buscar formas de reduzir a emissão de gases que contribuem para o efeito estufa no meio ambiente e enfrentar a crescente crise energética. Nesse cenário, diversas soluções foram discutidas e testadas, entre elas a substituição dos combustíveis fósseis por fontes de energia mais limpas e sustentáveis.

Um dos setores que mais avançou nesse sentido foi o da mobilidade, com montadoras de automóveis ao redor do mundo que investiram de forma significativa em tecnologias voltadas à eletrificação da frota.

Os veículos elétricos (*VEs*) surgiram como uma alternativa promissora e conquistaram espaço tanto em mercados desenvolvidos quanto em desenvolvimento, contribuindo de forma expressiva para a redução das emissões de gases poluentes.

Apesar desses avanços, persistem desafios técnicos e econômicos, como a autonomia energética limitada, o alto custo das baterias, a eficiência dos sistemas de regeneração e a complexidade dos controles embarcados.

Para enfrentar essas dificuldades, pesquisas e desenvolvimentos foram direcionados à melhoria dos sistemas embarcados. Esse processo priorizou o aumento da eficiência da motorização elétrica, o aprimoramento da recuperação de energia e a construção de componentes mais acessíveis e robustos. Nesse contexto, motores *brushless* de corrente contínua (CC) demonstraram ser uma solução eficaz para o trem de força dos *VEs*.

A indústria adotou amplamente esses motores devido às suas vantagens construtivas, à aplicação simplificada, ao tempo de resposta reduzido, ao baixo nível de ruído e à capacidade de controle preciso da posição e da velocidade, especialmente quando associados a sensores *Hall* instalados na tampa da carcaça do motor (Yang et al., 2009).

O sistema de frenagem regenerativa representou uma inovação essencial para o aumento da eficiência energética dos veículos. Esse sistema converteu a energia cinética gerada durante a frenagem em energia elétrica e armazenou-a nas baterias. Assim, passou a atuar como gerador e aproveitou ao máximo a energia disponível (Bhurse et al., 2018).

Este trabalho teve como objetivo estudar de forma aprofundada os componentes que integram um sistema de veículo elétrico, com foco em suas características técnicas e funcionais. Também se propôs a analisar *drivers* de controle de velocidade e regeneração

disponíveis no mercado, identificando oportunidades de melhorias e possíveis acréscimos de funcionalidades. A proposta incluiu a construção de uma maquete funcional de testes, composta por um motor *brushless*, um conjunto de baterias *Li-Ion* e um *drive* selecionado com base nas comparações realizadas ao longo da pesquisa.

A justificativa para este estudo fundamentou-se na crescente demanda por soluções mais eficazes e acessíveis para sistemas de propulsão elétrica, especialmente no contexto de pesquisa e desenvolvimento de protótipos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Desenvolvimento de uma bancada de testes para implementar o drive de controle de motor brushless com a arquitetura VESC 6 e uso educacional em universidades e escolas;

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Comparar modelos de VESC comercializados em diferentes versões;
- Montagem de uma bancada de testes com os componentes para o funcionamento do motor;
- Realizar testes de bancadas para analisar diversas situações reais de funcionamento;
- Monitoramento do sistema utilizando sensores e arduino;
- Estudo e aplicação de um sistema de baterias de Lítio com BMS;
- Estudos e testes da frenagem regenerativa do sistema;
- Uso educacional para o ensino nas universidades e escolas;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica abordará e contextualizar teoricamente o tema central deste trabalho, apresentando os principais conceitos, o histórico e os desenvolvimentos relacionados aos veículos elétricos. Em seguida, serão explorados aspectos históricos, desenvolvimento tecnológicos e ambientais que evidenciam a evolução e a relevância dessa tecnologia no cenário atual.

3.1 BREVE HISTÓRICO DO VEÍCULO ELÉTRICO

Nos dias atuais, a sociedade está cada vez mais empenhada em reduzir o efeito estufa causado por agentes poluentes, como os veículos movidos a combustão derivados de petróleo. Nesse contexto, a influência das montadoras automobilísticas no desenvolvimento de veículos elétricos e híbridos tem crescido significativamente, resultando em uma maior adesão da sociedade a essa tecnologia. Apesar de parecer "recente" a utilização de veículos elétricos, no século XX, a presença de carros elétricos era bastante significativa em comparação aos veículos movidos a combustão (Baran e Legey, 2011).

Durante os anos 1900, aproximadamente 20% dos cerca de 4000 veículos a motor na cidade de Nova York eram movidos a eletricidade, devido à sua fácil dirigibilidade, funcionamento silencioso e ao aumento do fornecimento de energia elétrica. No entanto, esse crescimento na utilização de veículos elétricos sofreu uma grande queda após a montadora Ford lançar em 1908 o modelo T movido a gasolina, além da descoberta de uma reserva de petróleo no estado do Texas e o aumento da extensão de estradas nos Estados Unidos, o que tornou os veículos elétricos menos atrativos para o público da época (Matulka, 2014).

Os veículos elétricos só voltaram a ganhar destaque na indústria automobilística nas décadas de 1960 e 1970, após diversos conflitos mundiais que resultaram na crise do petróleo e no aumento das emissões de gases poluentes. Nos anos 1990 e 2000, a chegada de veículos híbridos, como o Toyota Prius, e o desenvolvimento de novos protótipos elétricos impulsionados pela Tesla na última década contribuíram para esse renascimento dos veículos elétricos (Matulka, 2014).

3.2 TECNOLOGIAS EMPREGADAS NO TREM DE FORÇA DE VEÍCULO ELÉTRICO

Em veículos elétricos movidos a bateria (VEB), a energia para seu funcionamento provém de conjuntos de baterias dispostas em série e paralelo, determinadas por critérios estabelecidos pela montadora, buscando sempre proporcionar a melhor autonomia e desempenho ao proprietário. Nesse tipo de automóvel, a recarga da bateria ocorre tanto pela rede elétrica quanto pela regeneração de energia durante a operação do veículo (Inee, 2010).

3.2.1 FRENAGEM REGENERATIVA

Em veículos elétricos atuais, a busca por formas de aumentar a autonomia e otimizar o gerenciamento de energia das baterias é uma prioridade para montadoras e pesquisadores. Nesse contexto, a frenagem regenerativa emerge como uma solução promissora. Seu objetivo principal é recuperar parcial ou integralmente a energia utilizada durante o funcionamento do veículo, aproveitando o próprio motor ou um motor complementar para operar tanto no modo normal quanto no modo regenerativo, sem intervenção do condutor (Varocky, 2011).

A substituição dos freios tradicionais baseados em discos de freio representa uma vantagem significativa, reduzindo a quantidade de energia cinética e potencial perdida na forma de calor durante a frenagem e proporcionando maior conforto e segurança (YANG *et al.* 2009).

Para o funcionamento eficaz do sistema de frenagem regenerativa, são necessários diversos componentes, incluindo sistema de baterias para armazenamento de energia, motores Brushless DC posicionados próximos ao eixo das rodas, drive de controle e regeneração dos motores, sistema de controle de temperatura dos motores e baterias, carregador de baterias conectado à rede elétrica, entre outros. (YANG *et al.* 2009).

3.3 MOTORES BRUSHLESS DE CORRENTE CONTÍNUA

Em diversas tecnologias empregadas em veículos elétricos pelas montadoras, o motor elétrico desempenha um papel central na constituição do sistema de trem de força do automóvel. Dentre os diversos modelos utilizados, destacam-se os motores CC de escovas e os motores de indução. No entanto, os motores brushless apresentam vantagens significativas, tais como construção simplificada, alta eficiência e rápido tempo de resposta, além da utilização de sensores para a aquisição de dados de estado de funcionamento (YANG *et al.* 2009).

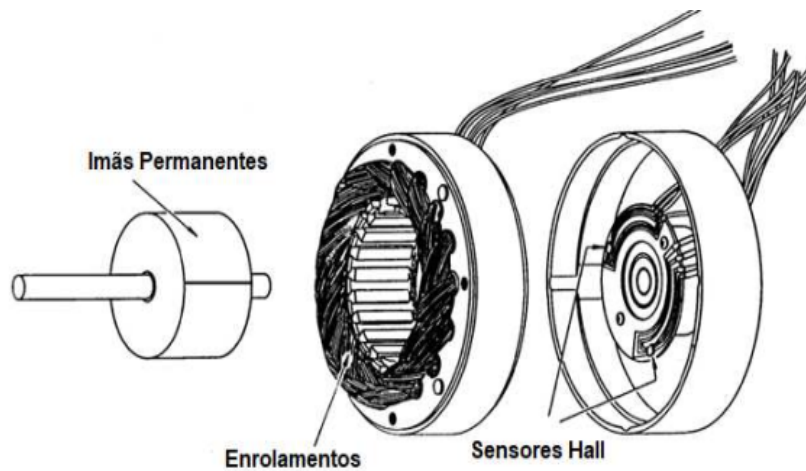
Os motores brushless possuem uma característica peculiar em comparação com outros motores: sua entrada de tensão de alimentação é de corrente contínua (CC) por meio de três terminais, enquanto os motores CC convencionais possuem apenas dois terminais de alimentação. Em um motor brushless, cada um dos terminais representa uma fase elétrica, assemelhando-se a motores trifásicos, e possui saída de corrente de regeneração alternada (Tristão, 2018).

3.3.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Os motores BLDC possuem como característica na sua construção a utilização de ímãs permanentes semelhantes aos motores síncronos trifásicos, mas com tensão de funcionamento vinda de um controlador CC (Tristão, 2018). A comutação deste motor é realizada eletronicamente sem a utilização de escovas, desta forma não possuindo desgaste mecânico comumente em motores CC escovados (Shabaniyan, 2015).

A construção dos motores BLDC é simples comparada aos outros motores CC escovados ou motores síncronos CA, conforme mostrado na Figura 3.1. Dessa forma, os componentes que constituem o motor são (TRISTÃO, 2018):

Figura 3.1: Construção de um motor BLDC.



Fonte: Tristão, 2018.

- O rotor é a parte móvel girante do sistema, constituída por ímãs permanentes e um eixo de fixação e rotação (Tristão, 2018).
- O estator, por sua vez, é a parte fixa do sistema, composta por bobinas enroladas entre os sulcos, com ligações em estrela ou triângulo, dependendo da característica do motor. Isso resulta na geração de uma força contra eletromotriz (FCEM), variando o formato da onda em senoidal ou trapezoidal (Tristão, 2018).
- Os sensores de efeito Hall são posicionados nos estatores, mostrado na figura 3.1 e têm a função de obter a posição das bobinas que estão gerando campos magnéticos. Esses dados são enviados a um driver com um microcontrolador para processamento e controle da velocidade do motor (Tristão, 2018).

3.4 FORMA DE FUNCIONAMENTO E CONTROLE DO MOTOR BLDC

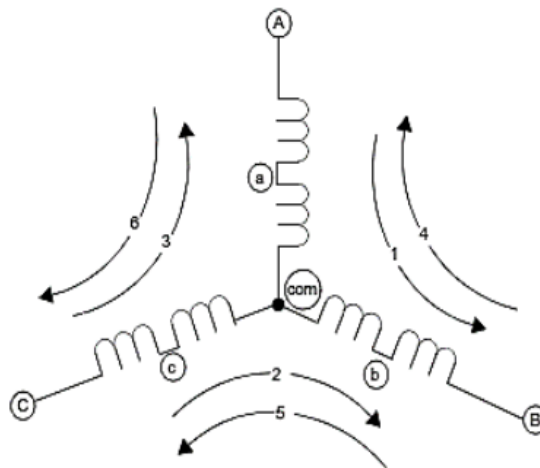
O motor brushless BLDC opera com base na energização de um conjunto de três bobinas de enrolamento, denominadas A, B e C, alimentadas por uma tensão positiva e outra negativa, além de um modo flutuante, ou modo não energizante. Esse processo forma um

campo magnético no estator, que interage simultaneamente com o campo magnético gerado pelos ímãs permanentes do rotor. Essa interação produz torque, resultando no movimento do rotor e, conseqüentemente, no movimento rotacional do motor (Tristão, 2018).

Para iniciar o funcionamento do motor, é necessário alimentar as bobinas AB com tensão positiva em A e negativa em B, seguindo esse padrão de energização seqüencialmente até completar o ciclo completo de rotação (Tristão, 2018).

A seguir a Figura 3.2, mostra o esquemático das seis comutações de funcionamento do motor BLDC:

Figura 3.2: Funcionamento do motor BLDC com as seis comutações.



Fonte: TRISTÃO, 2018.

Pode-se observar que o funcionamento e a estrutura de arranjo dos enrolamentos do estator apresentam características semelhantes às de um motor de indução CA do tipo estrela. Por essa razão, pode-se considerar o motor brushless como um motor síncrono CC. Para formar o campo magnético girante no sentido horário, é necessário seguir uma seqüência de comutação específica, começando entre as bobinas A e B, conforme mostrado na figura 3.2, onde A é alimentado com tensão positiva e B com tensão negativa, assim fluindo uma corrente entre as bobinas A e B para a primeira comutação, com o rotor girando até completar os sessenta graus elétricos no segmento AB, com características de funcionamento

semelhantes às do motor de indução. Esse processo é repetido para as bobinas CB e outros pares de bobinas, de acordo com a tabela 3.1, sucessivamente, até que o rotor completar um giro completo de trezentos e sessenta graus elétricos (Tristão, 2018).

Na tabela 3.1 abaixo está o ciclo completo de passos para a comutação dos pares de bobinas para o movimento do motor (Tristão, 2018).

Tabela 3.1: Ciclo de comutação de giro completo do motor.

| Passo | Comutação |
|-------|-----------|
| 1 | AB |
| 2 | CB |
| 3 | CA |
| 4 | BA |
| 5 | BC |
| 6 | AC |

Fonte: TRISTÃO, 2019.

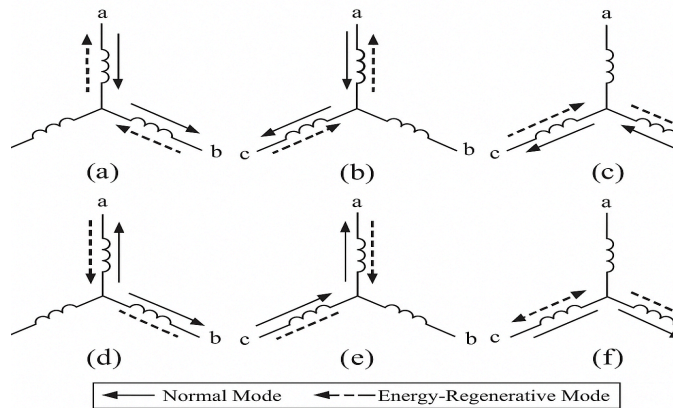
Para analisar o funcionamento do motor, podem-se utilizar drives de controle equipados com microcontroladores, como os da família ATMEL ou ARM core, para processar as informações provenientes dos sensores hall posicionados na estrutura do estator de bobinas e do back EMF (Tristão, 2019).

Essas informações de posicionamento do eixo do rotor são coletadas por sensores para que o motor funcione com a sincronização precisa. Um dos problemas que podem ocorrer em ESC é a implementação em locais com incidência de pequenos pedaços de metal que podem afetar o funcionamento e enviar sinais incorretos ao microcontrolador (Zikodrive, 2018). Outra característica desse motor é a possibilidade de regeneração de energia ao alterar o funcionamento da máquina elétrica para o modo gerador. Nesse modo, a rotação resultante da ação de frenagem do motor pode gerar corrente nas bobinas do estator, em conjunto com os ímãs permanentes do rotor. Essa corrente pode ser aproveitada para a regeneração de energia

do sistema de bateria, aumentando a autonomia do VE (YANG, JHOU, MA E SHYU, 2009).

Na Figura 3.3, é possível observar o esquemático das bobinas, mostrando a comutação no modo normal de funcionamento e no modo de regeneração de energia.

Figura 3.3: Motor BLDC em modo normal e regeneração.



Fonte: Adaptado de Yang *et al*, 2009.

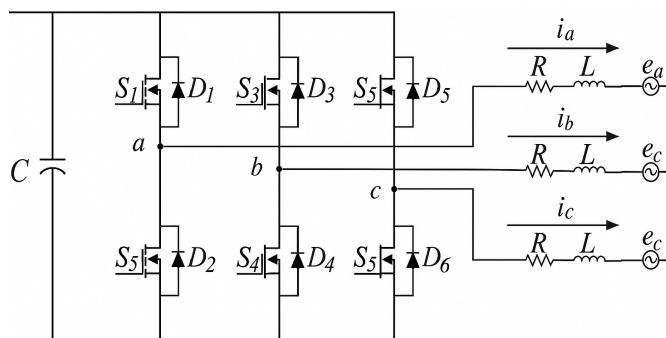
3.4.1 TIPOS DE ACIONAMENTOS DE MOTORES CC BRUSHLESS

Para realizar o acionamento do motor brushless não é necessário um sensor ou dispositivo para a detecção de posicionamento no eixo, diminuindo, assim, o custo de implementação. Para o controle de acionamentos dos pólos do motor em diferentes topologias de construção de drivers, são utilizados circuitos integrados, reguladores lineares, transistor de microcontroladores como o PIC18F4520, Arduino, STM32 ou ESP32 (TARNINI, 2015).

Para o controle de velocidade é necessário a utilização de sensores hall enviando informações de posição do rotor a um microcontrolador (Yang *et al*. 2009).

A forma mais utilizado para o funcionamento do motor BLDC por sua característica é o circuito de ponte inversora trifásica, onde o objetivo é transformar a corrente CC de entrada em uma corrente alternada (CA) para o funcionamento do motor BLDC, mostrada abaixo na Figura 3.4: (Yang *et al*. 2009).

Figura 3.4: Circuito de acionamento de ponte inversora.



Fonte: Adaptado de Yang *et al.* 2009.

Para o funcionamento do motor BLDC, é necessário realizar a conversão da corrente de alimentação CC em corrente alternada (CA), que é utilizada nos motores síncronos de rotação. A topologia mais comum para o acionamento desses motores é a utilização de uma ponte inversora trifásica, pois requer três fases nos terminais de alimentação do motor e permite a inversão da rotação através da frenagem (Yang *et al.* 2009).

A ponte inversora trifásica utilizada em inversores de frequência trifásicos terá funcionalidades semelhantes em circuitos integrados ao controlador CC, pois os motores BLDC possui características construtivas semelhantes à motores síncronos onde possui ímãs permanentes que necessitam ter as fases das correntes alternada, de modo para gerar o campo magnético e manter o sincronismo com o rotor para poder gerar a rotação (Brown, 2011).

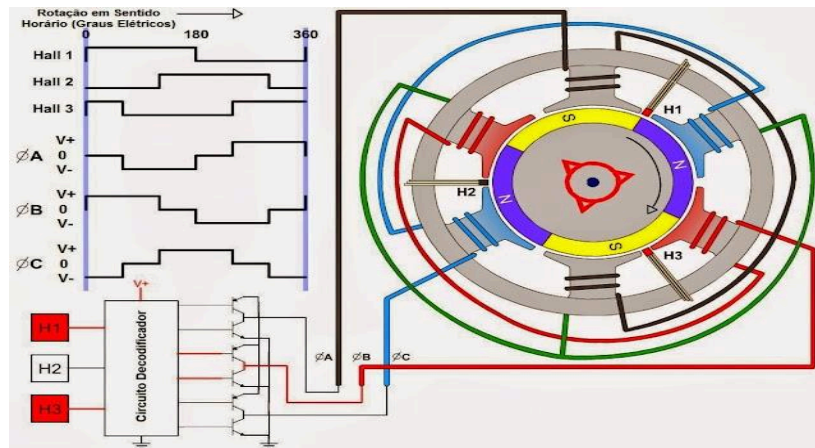
3.5 CONTROLE ELETRÔNICO DE VELOCIDADE

Para o acionamento e controle do motor BLDC, é necessário utilizar um circuito chamado ESC em inglês, *Electronic Speed Controller* ou Controle Eletrônico de velocidade, responsável por chavear e transformar a tensão contínua (CC) proveniente das baterias. O ESC converte essa tensão em um sinal semelhante à tensão alternada (CA) necessária para o funcionamento adequado do motor BLDC (Meyer, 2019).

Além disso, o ESC é responsável pelo controle da velocidade e direção do motor. Essa funcionalidade é viabilizada pelos sensores de efeito *Hall* presentes no estator do motor, que enviam dados sobre a posição do rotor para um microcontrolador integrado ao ESC. A

estrutura do motor BLDC com a conexão do ESC pode ser observada na Figura 3.5 abaixo (Brown, 2011).

Figura 3.5: Esquemático de ligação do motor polifásico ao ESC.



Fonte: Lenz, 2015.

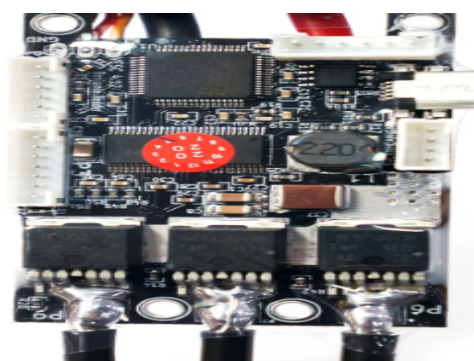
A segunda forma de controle do motor BLDC pelo ESC é a análise da tensão produzida pelo estator, conhecida como *Back-EMF*. Nesse método, a relação entre a frequência da tensão é proporcional à rotação do motor (Meyer, 2019). Além disso, o ESC também desempenha a função de realizar análises em tempo real, conhecida como telemetria, do sistema do trem de força do veículo. Isso permite o acompanhamento em tempo real do uso e da qualidade da bateria, além de oferecer alguns tipos de proteção contra surtos de corrente, temperatura ou tensão. No entanto, uma desvantagem do uso do ESC é sua inadequação para sistemas de baixas rotações, onde não consegue analisar múltiplos sinais provenientes dos sensores Hall e processados no microcontrolador interno do ESC (MEYER, 2019).

3.5.1 VESC

No desenvolvimento de novas funcionalidades e otimização de modelos comercializados de controladores ESC, foram conduzidos estudos visando ao aproveitamento

da energia regenerada por meio da frenagem dos motores BLDC, bem como à capacidade de controlar o motor em altas e baixas velocidades. Em 2014, Benjamin Vedder desenvolveu o VESC em inglês, *Vedder Electronic Speed Controller* ou Controle Eletrônico de Velocidade Vedder, como uma solução para atender às especificações de seu projeto de skate elétrico. A Figura 3.6 mostra a placa de circuito impresso com as respectivas entradas de conectores e componentes que compõem o VESC versão 4.12 (Dongil e Choi, 2019):

Figura 3.6: VESC ver. 4.12.

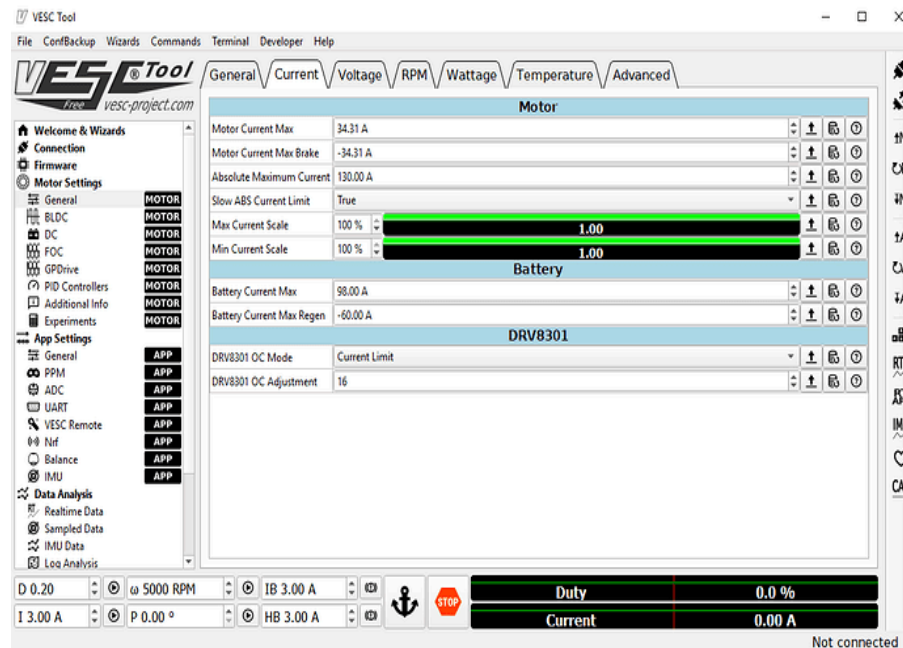


Fonte: Maytech, 2024.

Ao longo dos anos, o "ESC do VEDDER", comumente conhecido, tornou-se muito popular na comunidade de desenvolvedores de projetos de veículos que utilizam motores BLDC, devido à sua proposta de altas rotações de funcionamento, controles precisos, utilização de sensores para análise do sistema e principalmente a possibilidade de regeneração de energia da bateria proveniente da frenagem dos motores BLDC (Spintend, 2019).

O VESC possui algumas características de interface gráfica implementadas na versão da GUI em inglês, *Graphical User Interface* ou Interface Gráfica do Usuário, na versão 6.4, chamada VESC TOOL. Essa interface gráfica permite ajustar parâmetros do motor, como a escolha do motor a ser utilizado, tipo de bateria, tensão e corrente de funcionamento e regeneração, com suporte para Windows, Linux, Android e iOS, conforme mostrado na Figura 3.7 (Spintend, 2019).

Figura 3.7: GUI do VESC Tool.



Fonte: Spintend, 2019.

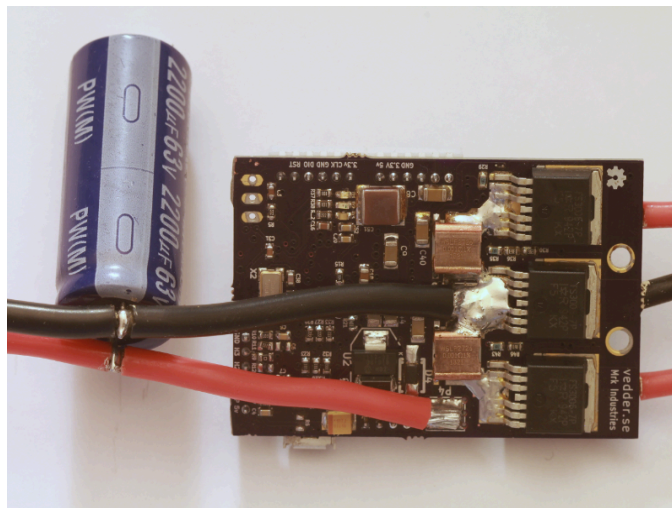
Esta interface é um painel de controle para configuração e monitoramento de sistemas eletrônicos, provavelmente relacionados a um controlador de motor (como o VESC - *Vedder Electronic Speed Controller*). A estrutura é organizada em abas laterais e uma área central com parâmetros ajustáveis e dados em tempo real. As funcionalidades a esquerda da interface são importantes para a configuração do motor, comandos, ferramentas avançadas, abas de ajuda ao usuário. Outra funcionalidade importante é a configuração de corrente, monitoramento em tempo real, *RPM* (rotações por minuto), *Wattage* (potência), *Temperature* (temperatura).

3.6 VESC

Para a realização do estudo sobre o funcionamento do sistema de frenagem regenerativa em sistemas de trem de força elétrica, foi conduzida uma análise de diversos tipos de VESC disponíveis no mercado. O drive VESC passou por várias alterações de

hardware ao longo dos anos, todas elas desenvolvidas por Benjamin Vedder. Em 2016, ele propôs a sua versão 4.0, conforme mostrado na Figura 3.8, com o hardware e software do VESC sendo de código aberto, disponibilizado para que outros usuários possam adquirir o drive para seus próprios projetos (Vedder, 2016).

Figura 3.8: VESC versão 4.0.



Fonte: Vedder, 2016.

Ao longo dos anos, Vedder desenvolveu outros hardwares baseados na sua versão 4.2, buscando melhorar a qualidade, suportar tensões maiores, implementação de componentes mais robustos para aumentar a confiabilidade do produto, disponibilizado ao público entusiasta interessado em construir seu próprio VESC ou adquirir o produto final. No ano de 2018, Vedder propôs uma nova versão do seu drive de controle de motor, o VESC6, que apresenta diversas novas funcionalidades e alterações no hardware e software, visando aprimorar o desempenho e a experiência do usuário em relação à versão anterior (Yang *et al.* 2019).

A Figura 3.9 mostra o modelo VESC 6 MKVI comercializado pela Trampboards, que oferece produtos oficiais da marca:

Figura 3.9: VESC versão 6.



Fonte: Trampaboards, 2024.

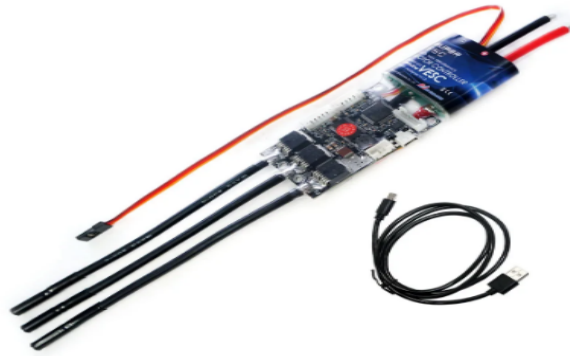
3.6.1 VESC 4

O Controle de motor VESC 4 é utilizado em diversos tipos de projetos que utilizam como sistema de trem de força um motor elétrico do tipo BLDC e possui uma interface gráfica para realizar alterações em tempo real de valores de tensão, corrente e potência máxima, o que tem extrema importância no aumento da vida útil dos motores e do sistema de bateria. Uma das vantagens em utilizar o VESC é a possibilidade de realizar regeneração de energia por meio da frenagem eletrônica dos motores (Spintend, 2020).

Durante o estudo e desenvolvimento de novas tecnologias para a versão 4, Vedder realizou algumas alterações no layout e em alguns componentes para otimizar o funcionamento durante a operação. A grande atualização da versão 4.5 foi a alteração na forma como o ADC (*Analogic Digital Converter*) se comunica com o SPI (*Serial Peripheral Interface*) do microcontrolador, recebendo dados do funcionamento do motor com maior velocidade (SPINTEND, 2020).

Nos dias atuais, o VESC é encontrado e comercializado na versão 4.12 na internet, já incorporando as novas tecnologias desenvolvidas em versões anteriores. No entanto, houve remodelação do modelo de capacitor e implementação de novos rastreadores. A seguir, podemos observar o VESC na sua versão 4.12 mostrado na Figura 3.10:

Figura 3.10: VESC 4.12.



Fonte: Maytech, 2024.

Na tabela 3.2 são colocados as especificações de funcionamento do VESC 4.12:

Tabela 3.2: Especificação do drive VESC 4.12.

| Item | VESC VER 4.12 |
|--|-----------------------------|
| Tensão operação | 8 - 60 V |
| Corrente de operação | 50 A |
| Corrente Máxima | 240 A |
| Tipo de capacitor | 3 x 680 uF 63V Eletrolítico |
| Bateria | Lipo 3-12S |
| Compatibilidade com Motor BLDC | SIM |
| Funcional com sensor ou sem sensor | SIM |
| Medição de corrente e tensão nas fases | SIM |
| PWM/ADC/UART/CANBUS/USB | SIM |
| Regeneração de bateria | SIM |
| Proteção de bateria | SIM |

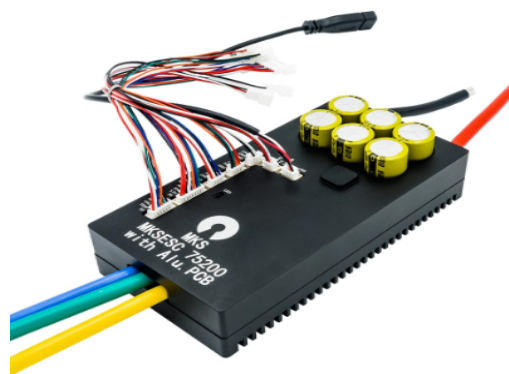
Fonte: VEDDER, 2016.

Em análise das opiniões de usuários do Vedder 4.12, eles relatam alguns problemas de funcionamento causados pelos capacitores, especialmente ao utilizar ajustes de corrente de funcionamento acima de 30 A. Além disso, também foram relatados problemas de configuração de parâmetros através do VESC-TOOL, entre outras questões mencionadas.

3.6.2 VESC 6

Nos anos seguintes, Benjamin Vedder, desenvolvedor dos controladores de motores VESC, promoveu diversas mudanças, incluindo a alteração de componentes da placa principal e a adição de novas funcionalidades entre as versões 4 e seus submodelos. Em 2016, Vedder lançou a versão 6, baseada na versão anterior, que incluía a implementação de novos capacitores e MOSFETs na seção de potência do drive, permitindo o uso de motores BLDC com maior potência. Além disso, foram realizadas otimizações e adicionadas funcionalidades ao sistema, como a incorporação de entradas para módulos Bluetooth, que permitem o envio de informações do VESC para dispositivos móveis com sistemas Android ou iOS, entre outras melhorias (Spintend, 2020). Na Figura 3.11, podemos observar um modelo comercializado do VESC 75200, baseado na versão 6:

Figura 3.11: VESC 75200 versão 6 feito pela MakerBase.



Fonte: Makerbase, 2024.

Na versão atual, foram introduzidas novas configurações de parâmetros e aplicações para diversas situações de projetos. A seguir, apresenta-se a tabela 3.3 com as especificações do manual:

Tabela 3.3: Especificações técnicas do VESC ver. 6

| Item | VESC versão 6 |
|---|-------------------------------|
| Tensão entrada (não pode exceder 75V) | 16.8 - 67.4 V |
| Corrente contínua | 60 - 80 A |
| Corrente máxima (depende da temperatura) | 120 A |
| Tensão para componentes externos | 3.3 - 5V |
| Corrente para componentes externos | 0.5 - 1A |
| Modelos de motores disponíveis | DC, BLDC e FOC |
| Suporte de sensores | ABI,HALL, AS5047, TS5700N8501 |
| Tipo de bateria recomendada | 4S - 16S Li-ion/Lipo |
| Medidores de corrente em todas as fases | SIM |
| Regeneração de energia por frenagem | SIM |
| Controle avançado FOC em motores | SIM |
| Utilização de sensores | SIM |
| Operação sem sensores e modo híbrido | SIM |
| Operação de motores de alto torque (HFI, sHFI) | SIM |
| Configuração de parâmetros de corrente, tensão, rotação e potência máxima | SIM |
| Fonte de entrada: PWM, Adc, NRF e CANBUS | SIM |
| Portas da comunicação | USB, CAN, 2 UART, I2C e SPI |
| RTC | SIM |
| Modo hibernação | SIM |
| Proteção de Tensão de entrada (alta e baixa) | SIM |
| Proteção de corrente alta do motor e entrada | SIM |
| Proteção da corrente de regen. de frenagem | SIM |
| Proteção de sobreaquecimento (MOSFET) | SIM |

Fonte: TRAMPABOARDS, 2024.

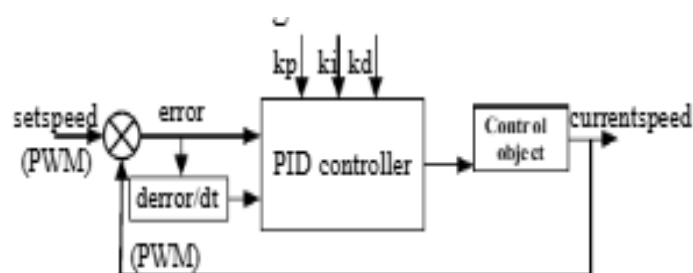
Essas atualizações de configurações e aplicações oferecem maior flexibilidade e adaptabilidade do VESC a uma variedade de cenários de projeto, permitindo um controle mais preciso e eficaz do sistema de trem de força elétrico.

3.7 CONTROLE DE VELOCIDADE PARA MOTORES BLDC COM PID

O controle de velocidade em motores BLDC (*Brushless DC*) é fundamental para garantir um funcionamento eficiente e estável em diferentes aplicações. Diversas abordagens de controle têm sido aplicadas na literatura e na prática industrial, incluindo o uso de controladores PID, lógica *fuzzy* e suas combinações, como redes neurais *fuzzy* e algoritmos genéticos (Wang, 2012).

No entanto, devido à sua simplicidade, confiabilidade e desempenho satisfatório em aplicações de tempo real, o controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é amplamente adotado como algoritmo principal em sistemas embarcados de controle de velocidade de motores BLDC (Wang, 2012). A estrutura básica desse controle pode ser observada na Figura 3.12 abaixo, onde se destacam os blocos de entrada de referência, o controlador PID, e a comparação entre a saída desejada e a real.

Figura 3.12: Estrutura básica de controle.



Fonte: Wang, 2012.

No projeto do VESC, Benjamin Vedder implementou um sistema de controle baseado em laços PID e PI aninhados, onde o controlador de velocidade (PID) gera uma referência de corrente para o controlador interno de corrente (PI), garantindo resposta rápida e estável mesmo em condições de carga variável. Segundo Vedder (2015), "o controlador PID externo

regula a velocidade do rotor, enquanto o laço interno de corrente PI garante a resposta dinâmica adequada das fases do motor, respeitando os limites de corrente definidos".

Controle de corrente (inner loop):

- Utiliza controladores PI (Proporcional-Integral) para os eixos d e q no referencial rotativo da FOC.
- Responsável por manter o fluxo magnético e o torque do motor.
- Muito rápido (laço interno mais crítico).

Controle de velocidade (outer loop):

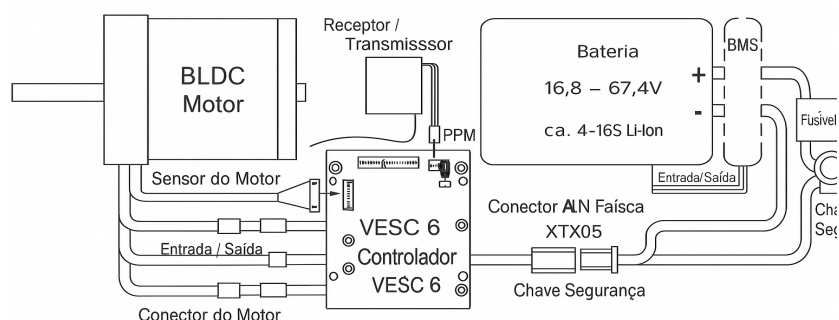
- Usa PID (geralmente só PI é suficiente).
- Calcula uma corrente de referência com base na diferença entre a velocidade desejada e a velocidade atual.
- Essa corrente é passada para o laço interno da corrente.

3.8 CONDIÇÕES DE TESTES PROPOSTO PARA O ESTUDO

Para o estudo do comportamento de funcionamento do VESC6, é necessário realizar a análise das características e funcionalidades de diversos produtos que apresentam a versão 6 do VESC, os quais são comercializados em sites de compra online. Deve-se escolher o drive que possa atender aos requisitos estabelecidos para o estudo, levando em consideração também relatos de utilização e avaliações de usuários disponíveis, observando tanto os pontos positivos quanto os negativos do produto. Para isso, é fundamental analisar diferentes drives equipados com a tecnologia VESC6 em uma variedade de sites de venda, tais como o Aliexpress, Mercado Livre, Amazon, entre outros.

Segundo o manual VESC6 é necessário seguir a montagem correta para o funcionamento do drive, assim mostrado na imagem abaixo:

Figura 3.13: Esquemático para a utilização do VESC6.



Fonte: Adaptado de Trampboards, 2024.

Para implementar o VESC6 no sistema de testes de bancada com um motor BLDC, é essencial compreender a funcionalidade e a importância de cada componente que compõe o esquema de utilização do VESC recomendado pelo fabricante. Além do VESC6, o fabricante recomenda a utilização de um BMS (*Battery Management System*), responsável pelo monitoramento em tempo real do comportamento da bateria (Trampboards, 2024).

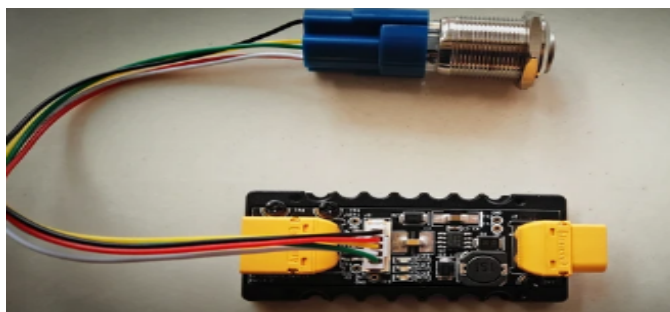
O BMS também desempenha funções importantes, como a proteção contra surtos elétricos e o gerenciamento da qualidade e saúde da bateria. No contexto desse sistema, o BMS é crucial para identificar a tensão e corrente de funcionamento do motor e do sistema, além de auxiliar na regeneração de energia da bateria (Trampboards, 2024).

Outro sistema recomendado pelo fabricante para integrar ao sistema é a proteção elétrica, conhecida como *Safety Power Cutoff* ou corte de energia de segurança. Esse componente é responsável por desligar automaticamente o drive em situações de emergência ou quando ocorre uma condição anormal de operação que possa representar um risco para o sistema ou para o usuário. Essa medida de segurança é essencial para garantir a integridade do sistema elétrico e a segurança dos usuários, prevenindo danos graves em casos de sobrecarga, curto-circuito, superaquecimento ou outras condições perigosas durante o funcionamento do VESC6 (Trampboards, 2024).

Para a proteção contra sobrecorrentes e curtos-circuitos, também é utilizado na entrada do BMS o fusível, que atua em situações em que há uma corrente excessiva, cortando o fluxo de corrente pelo circuito e protegendo o sistema contra surtos ou curtos-circuitos. Esse

sistema é, resumidamente, uma redundância para evitar que o sistema interno do drive precise atuar, evitando possíveis danos ao VESC. Outro sistema de proteção elétrica é o anti-sparking, ou antifaiscante em português. Ele possui grande importância na prevenção de faíscas ou arcos elétricos formados durante o processo de conexão do sistema de BMS e o banco de baterias, evitando danos aos componentes eletrônicos internos do VESC e contribuindo para a segurança durante a implementação e manuseio do sistema em operação, mostrado na Figura 3.14 abaixo (Trampaboards, 2024):

Figura 3.14: Sistema de antifaiscante com um interruptor de acionamento do sistema.



Fonte: Aliexpress, 2024.

O sistema de baterias de Li-Ion, responsável por alimentar o sistema de trem de força, é responsável por fornecer energia durante a operação e armazenar a energia regenerada. O fabricante recomenda o uso de baterias do tipo Li-ion de 4 a 16S sendo composta por 4 a 16 células em série, com tensões entre 16,8 à 67,4 V, conforme indicado no manual de utilização. Além disso, o fabricante orienta configurar a corrente máxima de regeneração para a bateria quando o motor estiver atuando como gerador (Trampaboards, 2024).

Por último, o módulo de comunicação Bluetooth, responsável por receber e transmitir informações do funcionamento do sistema para um dispositivo móvel, como smartphones com sistemas operacionais Android e iOS. Esse módulo permite aos usuários receberem informações em tempo real sobre os parâmetros de configuração e funcionamento para o monitoramento do sistema (Trampaboards, 2024).

4 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da bancada de testes, foram realizadas pesquisas com o objetivo de analisar as características dos drivers de controle de motores BLDC disponíveis no mercado, incluindo ESCs e VESCs, observando-se as vantagens e desvantagens de cada um. Para isso, no tópico seguinte, são analisados os principais problemas associados ao VESC, bem como as soluções propostas por usuários e discutidas em fóruns especializados, inclusive os da própria desenvolvedora.

Na sequência, são apresentadas comparações entre as versões 4 e 6 do VESC, juntamente com as condições necessárias para sua implementação e os sistemas que compõem a bancada de testes.

4.1 COMPARATIVO ENTRE VERSÕES 4 E 6

Para a definição do modelo a ser utilizado para estudos e análises de funcionamento, é necessário realizar uma comparação entre as versões do drive, considerando alguns critérios de avaliação. Estes incluem a configuração e facilidade de alteração de parâmetros de operação, as funcionalidades adicionadas para cada versão, e a facilidade de implementação do VESC no sistema de trem de força elétrico. Além disso, é importante considerar as avaliações e problemas relatados por usuários de ambas as versões do VESC 4 e VESC 6.

Para conduzir essa comparação entre as versões 4 e 6, é necessário analisar as configurações, funcionalidades e parâmetros demonstrados na tabela 4.1:

Tabela 4.1: Comparativo entre versões VESC 4 e 6.

| Item | VESC 4 | VESC 6 |
|-------------------|----------|---------------|
| Tensão entrada | 8 - 60 V | 16.8 - 67.4 V |
| Corrente contínua | 50 A | 60 - 80 A |
| Corrente máxima | 240 A | 120 A |

| | | |
|---|----------------------------------|-------------------------------|
| Tensão para componentes externos | 5 V | 3.3 - 5V |
| Corrente para componentes externos | 1.5 A | 0.5 - 1A |
| Modelos de motores disponíveis | DC, BLDC e FOC (Não recomendado) | DC, BLDC e FOC |
| Suporte de sensores | HALL | ABI,HALL, AS5047, TS5700N8501 |
| Tipo de bateria | 3-13S Lipo | 4S - 16S Li-ion/Lipo |
| Item | VESC 4 | VESC 6 |
| Medidores de corrente em todas as fases | SIM | SIM |
| Regeneração de energia por frenagem | SIM | SIM |
| Controle avançado FOC em motores | NÃO | SIM |
| Utilização de sensores | SIM | SIM |
| Operação sem sensores e modo híbrido | NÃO | SIM |
| Operação sem sensores de motores de alto torque (HFI, sHFI, VSS) | NÃO | SIM |
| Configuração de parâmetros de corrente, tensão, rotação e potência máxima | SIM | SIM |
| Fonte de entrada: PWM, ADC, NRF e CANBUS | Apenas PWM | SIM |
| Portas da comunicação | PPM, ADC, UART, I2C, USB E CAN | USB, CAN, 2 UART, I2C e SPI |
| RTC | NÃO | SIM |
| Modo hibernação | NÃO | SIM |
| Proteção de Tensão de entrada (alta e baixa) | SIM | SIM |
| Proteção de corrente alta do motor e entrada | SIM | SIM |

| | | |
|---|-----|-----|
| Proteção da corrente de regeneração de frenagem | NÃO | SIM |
| Proteção de alta rotações | NÃO | SIM |
| Proteção de sobreaquecimento (MOSFET) | NÃO | SIM |

Fonte: Trampboards, 2024.

Essa análise comparativa fornecerá informações valiosas para a seleção do modelo mais adequado às necessidades do estudo e permitirá uma compreensão mais abrangente das diferenças entre as versões, facilitando a tomada de decisão.

Na Tabela 4.1, observam-se algumas características de funcionamento entre as versões, como tensão e corrente de operação, bem como a capacidade máxima suportada pelo componente, recursos de comunicação e proteção de alta demanda, entre outros. O VESC 6 destaca-se como o drive que melhor apresenta essas características, superando a versão 4, caracterizada por sua simplicidade e funcionalidades básicas, com recomendação de uso em baixas rotações e motores menos potentes (Spintend, 2020).

Para aplicações mais complexas e potentes de motores BLDC ou com função FOC avançada, recomenda-se a versão 6 do VESC por sua robustez e novos recursos de comunicação Bluetooth. Esse aprimoramento possibilita o envio e monitoramento de dados de funcionamento, além da alteração de parâmetros em tempo real em smartphones com sistema operacional Android e iOS. Além disso, oferece diversas proteções, como contra sobretensão, sobrecorrente e sobretensão nos MOSFETs e no motor. Dessa forma, para o estudo em questão, optou-se por essa versão, onde serão conduzidos testes de bancada utilizando motores e componentes que compõem um trem de força elétrica.

Para a análise do VESC 6, consideram-se avaliações do modelo comercializado do drive de controle de rotação e regeneração de motores. Os usuários expressam boas avaliações sobre o uso, destacando-se:

- Desempenho: Vários usuários do VESC 6 destacam positivamente o desempenho, ressaltando sua capacidade de fornecer um controle suave e preciso sobre o motor

elétrico. Outro aspecto valorizado é a ampla possibilidade de personalização de parâmetros de funcionamento via firmware, adaptando-se ao projeto proposto.

- Confiabilidade: Relatos de usuários do VESC 6 são positivos quanto à confiabilidade do produto em diferentes implementações de projetos, desde que estejam em conformidade com as especificações e configurados corretamente.
- Implementação: Na maioria dos casos, a implementação do VESC 6 é relativamente simples com o auxílio do manual fornecido. No entanto, o drive apresenta diversas configurações de controle do motor, parametrização de valores de funcionamento, entre outras funcionalidades. Assim, recomenda-se que usuários menos familiarizados com a tecnologia busquem tutoriais disponíveis na internet.
- Suporte: Para o atendimento ao cliente, a *Vedder Electronic* fornece uma documentação detalhada do hardware e firmware dos produtos disponibilizados ao mercado, além de um fórum destinado à discussão de temas relacionados ao drive.
- Preço: Embora o valor de compra do produto seja mais elevado em comparação com outros modelos de ESC no mercado, os usuários relatam que ainda vale a pena devido aos benefícios oferecidos pelo VESC.

Para estudos visando aprimorar a utilização e desempenho do VESC 6, foram analisados problemas relatados por usuários durante a fase de funcionamento do drive, os quais são mencionados a seguir:

- Incompatibilidade de hardware: Alguns usuários enfrentaram problemas de implementação do drive de acordo com a aplicação em diferentes tipos características de motores, sendo necessário adaptar alguns componentes externos para o correto funcionamento.
- Problemas de superaquecimento: Durante o funcionamento em condições de alta potência ou ambientes com temperaturas adversas, o VESC 6 apresentou superaquecimento, podendo impactar o desempenho ou a vida útil do equipamento.
- Problemas com *firmware*: Alguns usuários relataram questões com determinadas versões do *firmware*, como instabilidade de funcionamento e falhas na comunicação entre o drive e o sistema de trem de força, além de comportamentos inesperados.

Podemos citar como exemplo: Problemas de controle de velocidade, aumento repentino da corrente máxima de alimentação do motor, entre outros.

-

A partir disso, observou-se que os usuários do VESC6 propuseram no fórum da *Vedder Electronics* algumas melhorias para o drive:

- Desenvolvimento de um novo dissipador de calor: Melhorar o design do circuito para garantir uma dissipação eficiente do calor gerado durante o funcionamento, aumentando a eficiência e a confiabilidade do sistema.
- Adição de um novo sensor de temperatura: Alguns usuários propuseram o estudo e adesão de um novo sensor de controle de temperatura para diminuir os problemas de sobretemperatura no drive.
- Otimização da gestão de potência: Ajustar a gestão de potência para garantir uma distribuição adequada de energia entre os componentes e evitar sobrecargas que possam levar a falhas.
- Melhoria da proteção contra sobretensão e sobrecorrente: Implementar mecanismos de proteção mais robustos para evitar danos aos componentes em caso de picos de tensão ou corrente.
- Aumento da durabilidade dos componentes: Escolher componentes de alta qualidade e resistência para garantir uma vida útil mais longa e confiável do VESC.
- Integração de tecnologias de sensoriamento avançadas: Incorporar sensores adicionais ou aprimorados para fornecer feedback mais preciso e permitir um controle mais refinado do motor.
- Atualização do *firmware e software*: Continuar com o desenvolvimento e melhorando o firmware e o software do VESC para adicionar novos recursos, corrigir bugs e melhorar o desempenho geral do controlador.
- Conversor *BOOST DC*: Incluir um conversor para aumentar a capacidade regenerativa do VESC6 incorporando ao circuito CC-CC do drive.
- Sistema de desligamento automático: Adesão de um sistema de desligamento automático para análise de funcionamento, desligando automaticamente quando o sistema está inativo, a fim de diminuir a utilização desnecessária da energia da bateria.

Com base na análise das opiniões dos usuários do VESC Versão 6, observando os pontos positivos e os problemas encontrados, pode-se trabalhar em melhorias na refrigeração, estudos de implementação de novos componentes eletrônicos, buscando otimizar o funcionamento e melhorar a usabilidade e robustez do VESC, além de buscar novas melhorias apontadas no fórum da desenvolvedora do produto.

4.2 DESENVOLVIMENTO DA BANCADA DE TESTES

Para a montagem do sistema, foram realizados estudos anteriores em componentes que irão compor a bancada, como por exemplo: Motor, drive de controle de velocidade, sistema de alimentação do motor, funcionamento do motor com a frenagem regenerativa, material e formato da bancada de testes, sistema de monitoramento do motor, entre outras funcionalidade que o motor possa ter futuramente. A seguir será mostrado os componentes que serão utilizados na bancada.

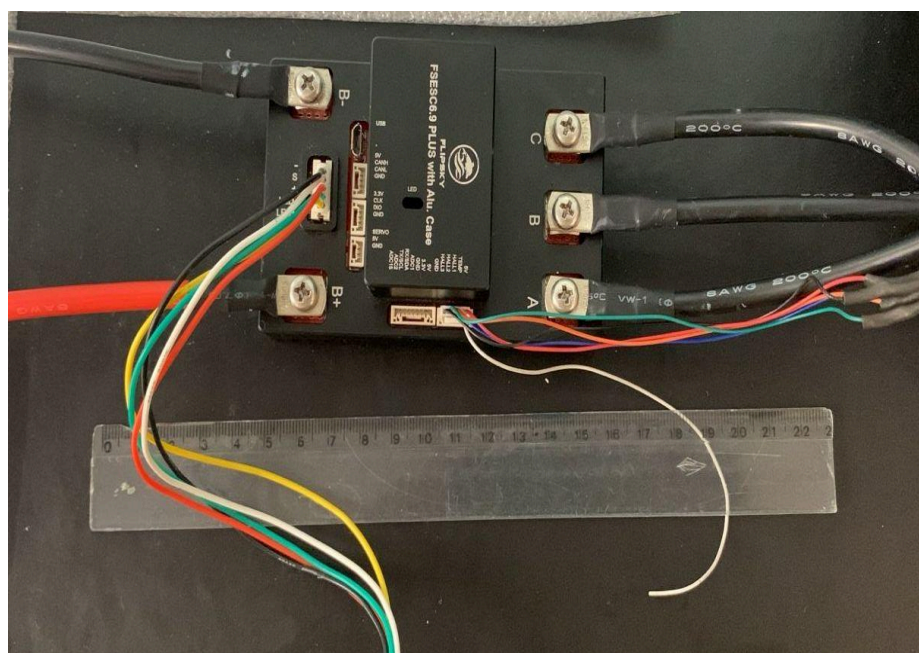
4.2.1 DRIVE DE CONTROLE DE VELOCIDADE

Para o desenvolvimento do aparato de testes, foi necessário realizar um estudo e pesquisas para a escolha de qual modelo de drive de controle de motor com a arquitetura VESC. Com base no levantamento realizado anteriormente, as características e as funcionalidades que o VESC pode trazer à bancada. Desta forma o VESC escolhido foi o modelo Flysky F5esc 6.9 plus com a arquitetura VESC 6.6, mostrado abaixo na Figura 4.1 abaixo.

O modelo foi adquirido no site de compra da internet, a decisão de utilizar este driver foi na sua arquitetura mais recente do VESC tendo novas funcionalidades e correções de problemas de versões anteriores como a VESC 4, um ponto importante foi a escolha de um drive que satisfizesse as condições propostas na implementação da bancada e a facilidade de implementação do drive ao sistema, sem a necessidade de componentes adicionais para a

proteção como, corte de energia de segurança, fusíveis de sobrecorrente devido a essa versão já possuir essas implementações inseridas no drive.

Figura 4.1: Flysky Fsesc 6.9 plus com a arquitetura VESC 6.6.



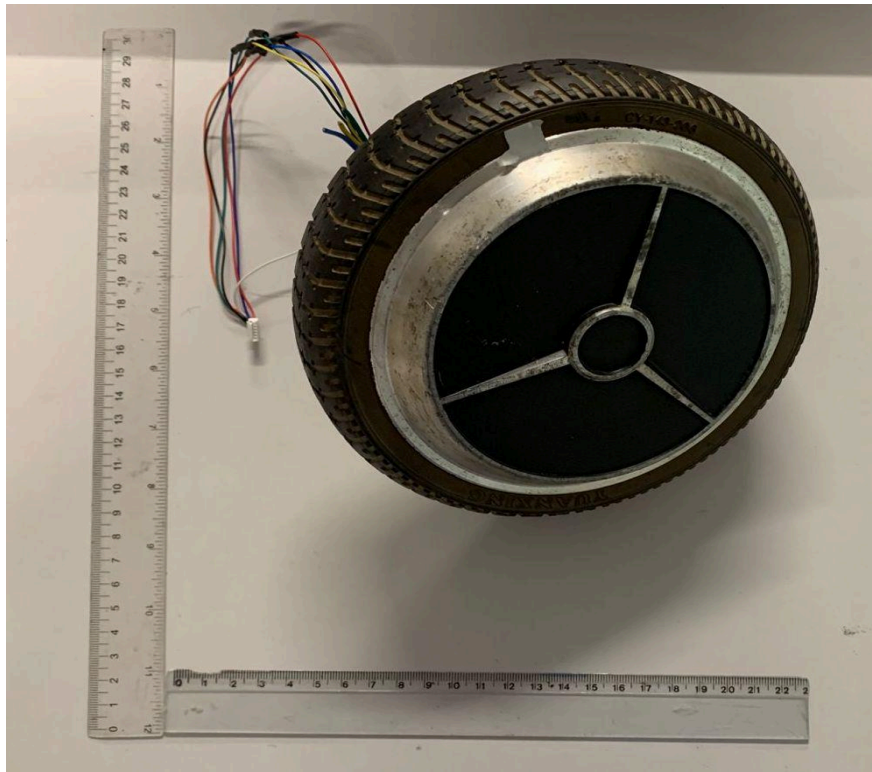
Fonte: Autoria própria.

4.2.2 MOTOR SEM ESCOVAS DE CORRENTE CONTÍNUA

Para a utilização do motor BLDC foi necessário realizar um estudo e a viabilidade de aplicação do sistema de frenagem regenerativa no conjunto motor-drive, analisando as características elétricas que o drive consiga suportar diversas situações de funcionamento do motor. Outro ponto levantado foi a utilização de motores com características comuns de estrutura, condições de aplicação do motor e facilidade de aquisição.

Desta forma foi adquirido um motor BLDC utilizado de um hoverboard danificado de 36 Volts, 14 pares de bobinas, sistema de sensores hall para o controle de posicionamento do rotor em relação ao campo magnético e uma potência de 360 Watts, mostrado na Figura 4.2 abaixo:

Figura 4.2: Motor BLDC.



Fonte: Autoria Própria.

Para a análise de funcionamento e qualidade do motor, foi realizado um pequeno teste de acionamento do motor com um conjunto de três baterias de chumbo-ácido ligadas em série para fornecer a tensão de 36 V para o condicionamento recomendado pelo fabricante. Este teste mostrou que mesmo com o hoverboard danificado, o motor continuou em perfeito estado de funcionamento.

4.2.3 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DO MOTOR E DRIVE

Para a alimentação do sistema motor-drive o fabricante do FSESC recomenda a utilização de um pack de baterias de lítio com um controlador de carga BMS para uma condição normal de funcionamento, porém este sistema possui um elevado custo e uma complexidade de implementação. Desta forma, foi realizado um estudo de implementação de baterias convencionais do tipo chumbo-ácido estacionárias mostrada na figura 4.3 abaixo,

tendo uma maior fornecimento de corrente ao sistema. Analisando o software VESC TOOLS disponibilizado gratuitamente no fórum do desenvolvedor da arquitetura VESC, foi possível encontrar informações sobre a possibilidade de implementação das baterias de chumbo-ácido e na configuração de arranjo que o software possa fazer. Abaixo uma figura representando o arranjo feito com as baterias:

Figura 4.3: Sistema de alimentação da bancada.



Fonte: Autoria própria.

Este sistema possui uma tensão de 36 V ligadas em série com capacidade de carga de 7,2 Ah, embora o ciclo de vida seja reduzido por se tratarem de baterias semi-novas. Para o teste e carga das baterias, foi usado um carregador de baterias da marca Chubby, mostrado abaixo na Figura 4.4 abaixo. Este aparelho pode carregar as baterias com uma corrente em até 30 A e a possibilidade de carregar 10 baterias em série.

Figura 4.4: Carregador de bateria.



Fonte: Autoria própria.

Pelo fato deste carregador ser para baterias de maior capacidade de carga foi feito um arranjo com cinco baterias ligadas em série, onde, duas baterias do tipo automotivo de 60 Ah posicionadas na extremidade do arranjo e outras três baterias eram as estacionárias de 7,2 Ah, foram colocadas no meio assim equilibrando a carga total do sistema.

A configuração de carregamento do sistema foi feita com a regulagem dos ajustes grossos onde é imprecisos e amplos para colocar o sistema na faixa e a regulagem fina para um ajuste mais preciso e garantir a carga ideal. Para o carregamento lento, foi ajustado para uma corrente de 2 A para uma segurança de carregamento e evitar danificar a bateria neste ciclo.

4.2.4 ESTRUTURA DA BANCADA

Na organização e fixação dos componentes , é necessária uma base para a montagem da bancada. Para isso, foi fabricada uma superfície lisa feita de madeira do tipo MDF com dimensões de 0,92 m de comprimento, 0,51 m de largura e 0,08 m de altura com dois pequenos suportes no formato retangular para uma maior estabilidade e aumento do espaço entre a tábua e a mesa de apoio do aparato. Dessa forma, foi possível colocar parafusos,

passantes e porcas, garantindo uma fixação mais segura dos componentes.

Para o acabamento da bancada, foi utilizado um tecido na parte inferior com o objetivo de reduzir de atrito direto entre o suporte e a mesa de apoio, assim reduzindo o risco de danificar o conjunto e minimizar o ruído ocasionado entre o contato direto das duas superfícies. Na parte superior foi colocado um tecido emborrachado na superfície com a finalidade de minimizar o contato direto dos componentes e madeira e uma melhor aparência da bancada, mostrada na Figura 4.5.

Figura 4.5: Estrutura da bancada.



Fonte: Autoria própria.

4.2.5 SUPORTE DE FIXAÇÃO DO MOTOR

Na fixação do motor BLDC na bancada foi necessário um desenvolvimento de um novo suporte, pois no hoverboard a forma de fixação não é compatível com o exigido para a bancada. Desta forma foi feito estudos para um formato, material mínimo capaz de suportar o esforço gerado pelo motor na bancada.

Para a fabricação do mancal de acomodação do eixo do motor BLDC, foram

adquiridas barras de aço e um cilindro maciço. Utilizou-se ferramentas de solda do tipo MIG, torno para a fabricação do mancal e uma furadeira de bancada para realizar os furos na base do suporte e no mancal para a fixação do motor no seu eixo, conforme mostrado na Figura 4.6 abaixo:

Figura 4.6: Suporte de fixação do motor.



Fonte Autoria própria.

Na fixação do suporte do motor à bancada, foi utilizado um conjunto de quatro parafusos M10 com 1,5 mm passo de rosca, quatro arruelas de pressão, quatro arruelas normais, quatro porcas auto travante M10 de 1,5 mm de passo de rosca.

4.2.6 BRAÇO DE FORÇA

Na análise de performance e fornecimento de corrente de alimentação do sistema de baterias de chumbo-ácido, foi realizado um estudo de implementação de um braço de força, a fim de aumentar o torque e aumentar a corrente de descarga máxima das baterias, mostrado na

Figura 4.7 abaixo. A força aplicada entre o braço de alavanca e o motor é gradualmente aumentada durante o teste, até alcançar a carga máxima. Para realizar o monitoramento e a quantidade de força aplicada, é necessária a aplicação de uma célula de carga posicionada na haste de madeira.

Figura 4.7: Braço de força.



Fonte: Autoria própria.

Para a movimentação na vertical do braço de alavanca, foi utilizada uma dobradiça fixada com um conjunto de três parafusos M10 com 1,5 mm de passo de rosca, três arruelas de pressão, três arruelas normais, três porcas auto travante M10 de 1,5 mm de passo de rosca. Na barra de força, foi escolhido um cedro de madeira de pinho, devido a sua maior flexibilidade, arrasto e ser mais leve que uma barra de aço comum. A dimensão total do braço de alavanca é de 0,47 m de comprimento, 0,078 m de largura e 0,02 m de altura, o comprimento será muito importante para a medição do torque gerado pelo motor.

4.3 MONTAGEM DA BANCADA DE TESTES

Com todos os materiais e componentes definidos e adquiridos foi iniciada a montagem da primeira versão da bancada de teste do conjunto motor-drive. O primeiro passo foi a

definição de posicionamento dos componentes que irão compor o sistema, mostrada na Figura 4.8 abaixo:

Figura 4.8: Componentes da bancada na versão 1.



Fonte: Autoria Própria.

Os componentes numerados que compõem a bancada são:

1. Motor BLDC;
2. *Flysky F5esc 6.9 plus* com a arquitetura VESC 6.6;
3. Suporte do motor e conjuntos de parafusos, arruelas e porcas auto travante;
4. Interruptor de acionamento do *drive* e suporte;
5. Cabos de ligação de alimentação do motor e *drive*.
6. Cabos de ligação sistema de baterias;
7. Ferramentas utilizadas na montagem:
 - a. Chave combinadas de 10 e 13 mm;

- b. Chave de fenda e Phillips;
- c. Alicates de corte e bico;
- d. Chave catraca e soquete de 10 mm;
- e. Fita métrica;

A montagem da bancada foi iniciada com a medição, posicionamento dos componentes e a fixação dos suportes do motor, baterias e braço de força na tábua, mostrada na Figura 4.9 abaixo:

Figura 4.9: Bancada de testes versão 1.



Fonte: Autoria Própria.

Desta forma, pode-se iniciar os testes de funcionamento do conjunto motor-drive com diversas situações propostas, com diferentes mudanças de parâmetros como a tensão e corrente do sistema. A partir dos dados coletados, será possível analisar a performance do drive utilizado nos primeiros testes e funcionamento do sistema. Nos testes será utilizado os seguintes instrumentos: multímetro Minipa ET-1400, paquímetro digital Instrutherm TD-712, termômetro digital e osciloscópio digital tektronix TDS 1001- 30EDU. O teste foi realizado em um ambiente com temperatura de 23 °C medida com o auxílio de um termômetro e com ambiente com dois ar-condicionados com temperatura de 16 °C.

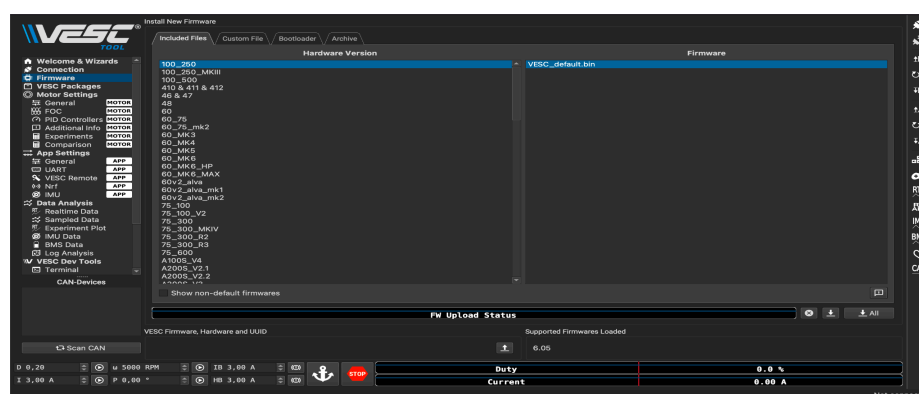
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta e analisa os resultados dos testes do sistema de frenagem regenerativa, avaliando sua eficiência energética, desempenho em diversas condições operacionais e impacto na otimização do consumo de energia. Discutem-se também fatores como temperatura, tempo de resposta e recuperação de energia, além de propor melhorias e aplicações práticas.

5.1 ACELERAÇÃO DO MOTOR PELA RAZÃO CÍCLICA

Para os testes iniciais da bancada, é necessário realizar a configuração do conjunto motor-drive utilizando o software VESC Tool, disponibilizado no site do desenvolvedor Benjamin Vedder, responsável pela criação da arquitetura VESC. Este software é de fácil instalação e conta com um manual de instruções para sua utilização. É importante destacar que o VESC Tool foi desenvolvido originalmente em língua inglesa que justifica o uso de mensagens, menus e instruções na interface do programa neste idioma, como pode ser observado na Figura 5.1. O desenvolvedor recomenda a instalação da versão 6.05, como mostrado na Figura 5.1 abaixo:

Figura 5.1: VESC TOOLS firmware update.



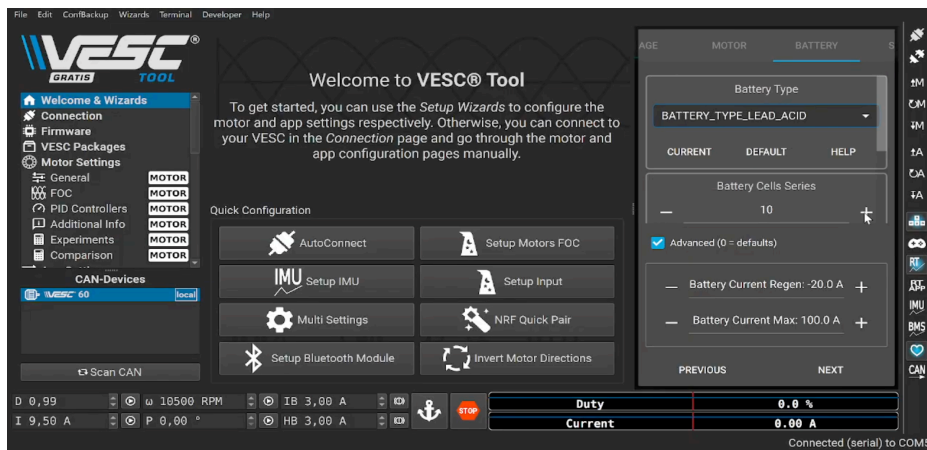
Fonte: Autoria Própria.

Após a instalação da versão recomendada pelo desenvolvedor, é necessário a configuração inicial do motor e sistema de alimentação. Nas opções disponíveis para a configuração do motor, podemos encontrar diversos tipos de modelos, aplicação e parametrização de corrente, potência do motor, quantidade de pares de pólos, tipo de engrenagem e definição do ERPM que representa a rotação relativa do motor, mostrada na equação abaixo:

$$ERPM = \frac{RPM \times \text{Número de pólos}}{2} \quad (1)$$

A correta configuração do ERPM (Rotações por Minuto no Eixo Elétrico) é essencial para evitar sobrecargas e garantir a segurança e a eficiência do sistema motor-drive, é fundamental para a segurança e eficiência do sistema. O *software VESC Tool*, com interface em inglês, permite ajustar parâmetros da bateria, como tipo, tensão, corrente e capacidade, conforme mostrado na Figura 5.2.

Figura 5.2: Configuração de alimentação do sistema:



Fonte: Autoria própria.

O teste teve como objetivo analisar o funcionamento do sistema VESC, alterando a razão cíclica e a corrente para observar o comportamento do motor BLDC e validar suas funções básicas. Com o sistema configurado, a razão cíclica foi aumentada gradativamente de 0 a 99%, variando a tensão aplicada ao motor entre 0 e 100%. Durante o teste, foram

utilizados instrumentos como multímetro, paquímetro, termômetro e osciloscópio digital. As medições foram realizadas em ambiente controlado, com temperatura ambiente de 23 °C e climatização a 16 °C. Os resultados foram organizados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Dados coletados no teste 1.

| Razão cíclica | RPM | ERPM | Tensão (V) | Cor. Bat (A) | Cor. Motor (A) | Temp. motor (°C) | Temp. DRIVE (°C) | Temp. MOSFET (°C) |
|----------------------|------------|-------------|-------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 0,1 | 62,5 | 950 | 38,3 | 0,025 | 0,45 | 21 | 23,9 | 24,5 |
| 0,2 | 127,6 | 1940 | 38,2 | 0,075 | 0,473 | 21,4 | 21,9 | 25,46 |
| 0,3 | 194,3 | 2935 | 38,2 | 0,11 | 0,56 | 21,8 | 23 | 26,56 |
| 0,4 | 259,7 | 3925 | 38,1 | 0,15 | 0,82 | 21,7 | 22,9 | 27,2 |
| 0,5 | 324,6 | 4905 | 38,1 | 0,25 | 1 | 22,1 | 23,5 | 27,66 |
| 0,6 | 390,6 | 5890 | 38 | 0,3 | 0,85 | 22,1 | 25,1 | 27,97 |
| 0,7 | 455 | 6880 | 38 | 0,275 | 0,6 | 22,8 | 25,4 | 28,25 |
| 0,8 | 520,9 | 7860 | 37,9 | 0,225 | 0,45 | 22,2 | 25,9 | 28,48 |
| 0,9 | 584,2 | 8855 | 37,8 | 0,175 | 0,36 | 23,7 | 25,5 | 28,68 |
| 0,91 | 592,5 | 8995 | 37,8 | 0,2 | 0,28 | 24,2 | 24,8 | 28,86 |
| 0,92 | 598,6 | 9055 | 37,8 | 0,18 | 0,3 | 25,1 | 27,1 | 28,96 |
| 0,93 | 606,8 | 9160 | 37,8 | 0,22 | 0,35 | 25,3 | 26 | 29,08 |
| 0,94 | 612,7 | 9260 | 37,8 | 0,22 | 0,31 | 26,2 | 25,6 | 29,28 |
| 0,95 | 619,2 | 9365 | 37,8 | 0,225 | 0,28 | 27,1 | 25,7 | 29,38 |
| 0,96 | 626,8 | 9465 | 37,8 | 0,25 | 0,25 | 27,2 | 25,6 | 29,47 |
| 0,97 | 633,8 | 9570 | 37,8 | 0,225 | 0,34 | 28,2 | 26 | 29,58 |
| 0,98 | 639,7 | 9660 | 37,7 | 0,275 | 0,45 | 29,4 | 25,7 | 29,65 |
| 0,99 | 643,7 | 9730 | 37,7 | 0,25 | 0,45 | 30,04 | 25,3 | 30,1 |

Fonte: Autoria Própria.

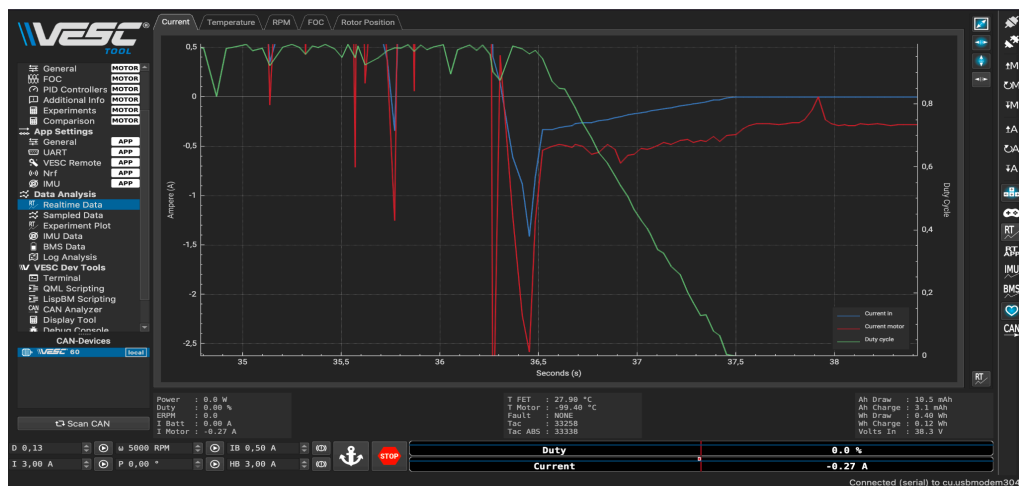
Pela Tabela 5.1 pode-se observar um funcionamento linear com o aumento gradual de acordo com a razão cíclica e até 90 % da energia fornecida ao motor. A corrente de motor entre 10 e 90 % gradualmente variando de 1 A e 0,36 A. Em 98 %, a corrente se estabiliza em

0,45 A. Já a corrente da bateria vai aumentando de 0,025 A para 0,25 A.

A temperatura do motor, drive e os MOSFETs vão aumentando gradualmente ao longo do tempo do teste. Um dos problemas encontrados durante a avaliação foi o tempo reduzido e um alto nível de descarga disponível para o teste, devido às baterias utilizadas na bancada.

Os valores de corrente foram coletados no VESC TOOLS na opção *Real Time*, onde são gerados e processados os gráficos pelo próprio software obtidos no PWM de 0,99 e o motor realizando a frenagem com o auxílio da corrente de freio (IB) mostrados na Figura 5.3 abaixo:

Figura 5.3: Gráfico de corrente de motor e bateria.



Fonte: Autoria própria.

Na figura 5.5 a curva em verde representa a razão cíclica do PWM (modulação por largura de pulso) é inicialmente alta nos começos dos testes próximo dos 100% com a potência do motor próximo do limite total. Ao longo do tempo o PWM decai acentuadamente que indicam a frenagem regenerativa ativa ou inversão de rotação. A curva em azul indica a corrente da bateria em Ampere [A] tendo a faixa de trabalho entre 0 a 5 A e se estabilizando durante o teste, mostrando um consumo estável.

A curva em vermelho indica a corrente do motor em Ampere [A] variando abruptamente com picos negativos e positivos entre +40A e -40A, mostra o comportamento com fortes transitórios e variações no torque do motor. Os picos negativos são indicativos de frenagem regenerativa ou reversão de torque, enquanto os positivos indicam aceleração.

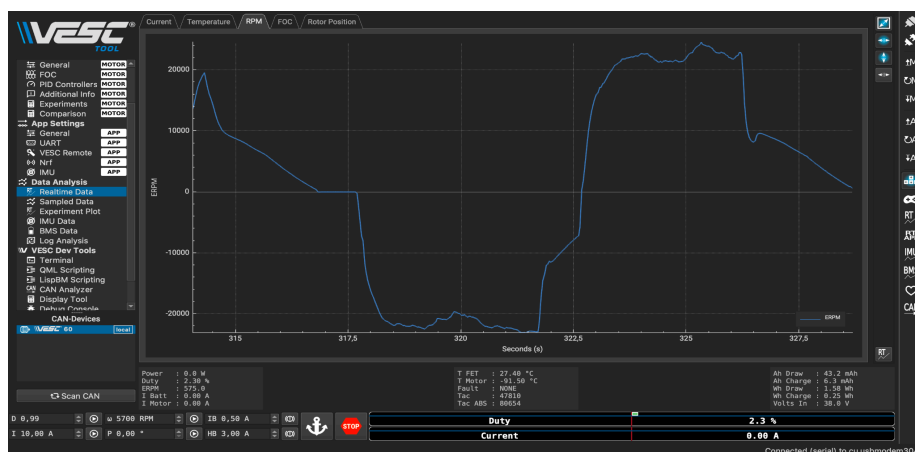
O motor inicia sua operação em potência máxima, com um *Duty Cycle* elevado (~100%). Por volta dos 35 segundos ocorre uma queda abrupta tanto no *Duty Cycle* quanto na corrente do motor, indicando um evento de frenagem brusca ou perda súbita de carga.

A corrente da bateria (curva azul) revela que, mesmo durante a tentativa de frenagem regenerativa, o sistema continua consumindo energia. Isso sugere que a corrente regenerativa gerada não é totalmente devolvida à bateria, sendo parcialmente dissipada ou aproveitada internamente pelo sistema. Já os picos negativos na corrente do motor (curva vermelha) evidenciam uma desaceleração forçada e abrupta característica típica de um processo de frenagem regenerativa intensa.

5.1.1 TEMPO DE RESPOSTA

Os motores BLDC possuem como características o seu tempo de resposta quase instantâneo e um alto controle preciso de rotações no sentido horário e anti horário. Desta forma o objetivo deste teste é demonstrar o funcionamento da inversão de rotação e avaliação do tempo de resposta. A função de inversão de rotação de horário e anti horário é feita via software VESC TOOLS e pode ser configurado para as teclas direcionais. O gráfico mostra o funcionamento da rotação mostrado na Figura 5.4 abaixo:

Figura 5.4: Tempo de resposta.



Fonte: Autoria própria.

O gráfico em análise apresenta a resposta temporal completa do sistema motor-drive, permitindo uma avaliação detalhada de seu comportamento dinâmico em diferentes regimes operacionais. No eixo horizontal temos a escala de tempo em segundos, enquanto no eixo vertical é representada a velocidade elétrica em ERPM (*Electrical Revolutions Per Minute*), parâmetro fundamental para entender a dinâmica do sistema. A curva azul principal mostra a variação de velocidade do motor ao longo do tempo, revelando seis fases operacionais distintas:

O comportamento do sistema pode ser dividido em cinco fases distintas:

- Na Fase Inicial (316 a ~ 317 milissegundos), observamos uma velocidade inicial elevada em torno de 20.000 ERPM, seguida por uma desaceleração suave e progressiva. Este comportamento pode indicar tanto uma redução gradual da carga mecânica quanto o início de uma frenagem ativa controlada, ou ainda uma diminuição programada do sinal PWM.
- Fase de Queda Rápida (317–318,9 ms): queda abrupta da velocidade até zero em 0,3 s, típica de frenagem regenerativa intensa ou corte súbito de controle.
- A Fase de Aceleração (~323 a ~324 milissegundos) demonstra a capacidade dinâmica do sistema com a velocidade subindo rapidamente para valores acima de 18.000 ERPM em apenas 0.6 segundos. Este excelente tempo de resposta indica um eficiente acionamento por parte do drive e uma boa recuperação da inércia do sistema.
- Fase de Estabilização (324–326 ms): regime quase estável em torno de 20.000 ERPM com overshoot de 5%, sugerindo controle PID eficiente com filtros digitais.
- Fase de Desaceleração Final (após 326 ms): Finalmente, na Fase de Desaceleração Final (a partir de 326 milissegundos), observamos uma queda progressiva da velocidade até cerca de 12.000 ERPM, padrão característico de uma frenagem regenerativa controlada ou da redução programada do duty cycle PWM.

O tempo de resposta dos motores BLDC é de extrema importância para aplicações de sistemas autônomos, hidráulicos e em aplicação em veículos elétricos para a sistemas de trem de força principal e frenagem regenerativa.

5.2 FRENAGEM REGENERATIVA

Um dos objetivos do trabalho é o funcionamento e análise do conjunto motor-drive com a funcionalidade da frenagem regenerativa, o VESC possui em sua funcionalidade a corrente de freio, onde é aplicada nas bobinas do motor com o objetivo de diminuir a velocidade de rotação do motor, gerando uma corrente de sentido inverso em relação ao do funcionamento normal. Essa corrente de entrada na bateria aumenta gradativamente com a velocidade final do motor e a corrente de freio.

Para visar o aumento da rotação do motor, o VESC TOOLS disponibiliza na função FOC (*Field Oriented Control*) em português, controle de orientação do campo que faz o motor funcionar com uma maior estabilidade e menor ruído. Essa função de corrente de enfraquecimento de campo aumenta a rotação do motor, mas traz diversas desvantagens, como o aumento de temperatura do motor e a instabilidade em rotações acima do funcionamento nominal do motor.

Para o teste 3 foi realizado um aumento gradual do ERPM entre 10000 e 30000 e a corrente de freio fixada em 0,5 A e utilizando o multímetro Minipa ET-1400, paquímetro digital Instrutherm TD-712, termômetro digital e osciloscópio digital *Tektronix* TDS 1001-30EDU. O teste foi realizado em um ambiente com temperatura de 23 °C medida com o auxílio de um termômetro e com ambiente com dois ar-condicionados com temperatura de 16 °C. , abaixo os dados coletados e apresentado na tabela 5.2 abaixo:

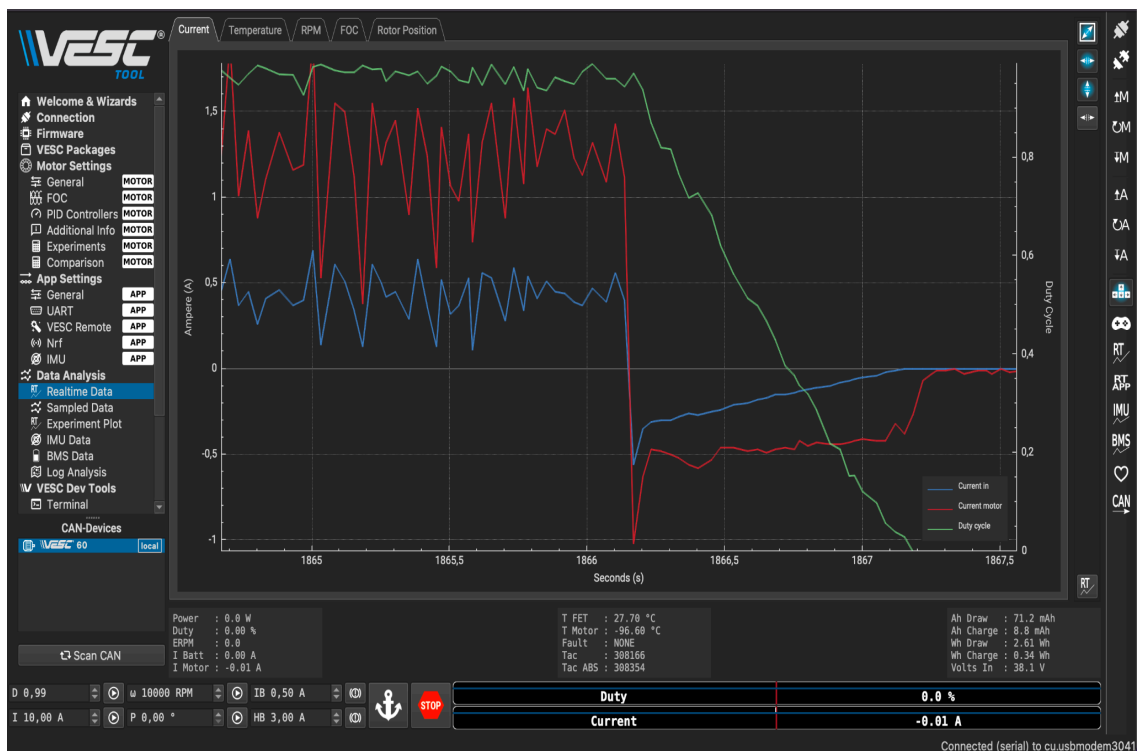
Tabela 5.2: Dados coletados no teste 3 frenagem regenerativa.

| RPM | ERPM | Tensão (V) | Corrente Bat (A) | Corrente Motor (A) | Corrente bat. FR (A) | Corrente mot. FR (A) | Temperatura motor (°C) |
|------------|-------------|-------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 661,7 | 10000 | 37,7 | 1,2 | 0,5 | -0,55 | -1,02 | 27,8 |
| 994,4 | 15000 | 36,7 | 3,5 | 8 | -5,2 | -8 | 30,4 |
| 1320 | 20000 | 34,5 | 22 | 11 | -7,25 | -7,2 | 31,4 |
| 1678 | 25000 | 30 | 22,5 | 12 | -13,75 | -7,5 | 32 |

Fonte: Autoria Própria.

Neste teste 3, devido a baixa capacidade de carga do sistema de baterias estacionárias, a avaliação de funcionamento de rotações acima de 25000 ERPM não foi possível, pois ocorreu a descarga total das baterias. As correntes de motor e bateria vão aumentando de acordo com o aumento do ERPM, assim comprovando a validade do teste 3 mostrado na Figura 5.5 abaixo:

Figura 5.5: Corrente de recuperação de energia.



Fonte: Autoria própria.

O gráfico foi obtido no momento que o motor está realizando uma frenagem pela corrente de freio (IB), esse estudo apresenta uma análise detalhada da dinâmica das correntes durante o processo de frenagem regenerativa que permite avaliar o comportamento do sistema em suas diferentes fases operacionais. A representação temporal no eixo horizontal (em

segundos) contrasta com as três variáveis críticas plotadas no eixo vertical: corrente da bateria (em azul), corrente do motor (em vermelho) e *duty cycle* do sinal PWM (em verde).

A curva verde representa o ciclo de trabalho do sinal PWM apresentando dois regimes operacionais claramente distintos. Na fase de acionamento o sinal mantém-se estável em valores próximos a 100%, caracterizando a operação normal do motor.

A curva vermelha, que representa a corrente do motor, demonstra características distintas em cada fase operacional. Na fase de frenagem regenerativa, ocorre uma inversão imediata para valores negativos indicando o estabelecimento de corrente reversa e a conversão ativa de energia cinética em energia elétrica.

A curva azul representa a corrente da bateria demonstrando claramente a eficácia do processo de recuperação energética. No modo de consumo os valores positivos indicam a demanda normal de energia, com pequenas variações correspondentes à operação convencional. Já no modo regeneração, a transição para valores negativos comprova a injeção de energia no banco de baterias, verificando na prática o funcionamento do sistema regenerativo.

Para quantificar precisamente esse fluxo reverso de energia, recomenda-se a instalação de um wattímetro nos cabos de alimentação do conjunto motor-drive. A análise conjunta das curvas de corrente com as medições do wattímetro oferecerá uma visão completa da dinâmica energética do sistema.

5.3.1 CORRENTE MÁXIMA DE DESCARGA

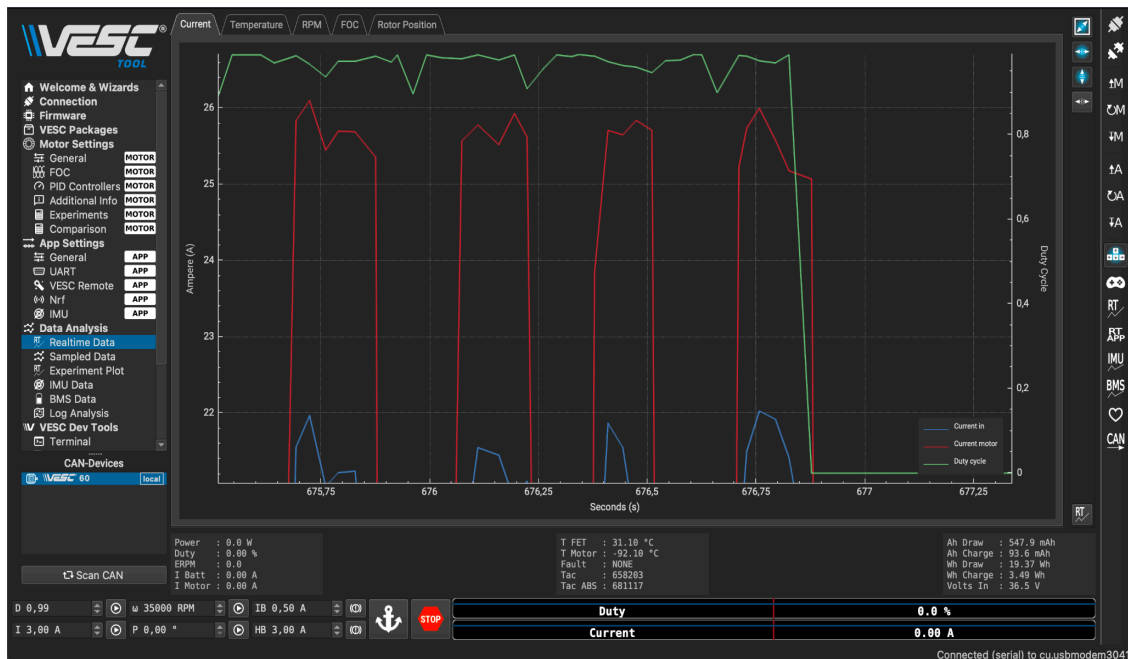
Após o teste 3 foi-se observada uma rápida descarga do sistema de baterias, o que limitou o tempo disponível para a realização do ensaio completo. Diante disso, realizou-se um estudo específico para avaliar a corrente máxima de descarga das baterias estacionárias sob carga mecânica controlada.

Para isso, utilizou-se um braço de força, conforme ilustrado na seção 4.2.6, que permitiu aplicar uma carga mecânica direta ao motor em funcionamento. O procedimento consistiu em exercer uma força progressiva sobre o braço de força para simular diferentes

níveis de carga no motor, enquanto se monitorava a corrente elétrica de descarga das baterias.

Com a aplicação da força máxima suportada pelo braço de força, foi possível registrar uma corrente de descarga de até 26 A, indicando a capacidade máxima de fornecimento do sistema sob as condições de teste estabelecidas.

Figura 5.6: Corrente Máxima de descarga.



Fonte: Autoria Própria.

O gráfico revela que o sinal PWM mantém-se consistentemente elevado, operando próximo a 100% de duty cycle durante a maior parte do teste. As quedas pontuais observadas no final de cada pulso demonstram os momentos de desativação controlada do sistema. Esta característica indica que o controle PWM está sendo aplicado de forma contínua e estável durante os intervalos de teste, com transições bem definidas entre os estados ativo e inativo.

A Dinâmica da Corrente do Motor (Curva Vermelha) representa a corrente do motor apresenta um padrão pulsante característico, com picos consistentes na faixa de 6-8 A durante os ciclos ativos. A estabilidade destes picos ao longo de todo o teste evidencia um comportamento repetitivo e controlado. A queda imediata para zero ao término de cada ciclo

de duty cycle confirma a eficácia do sistema de controle, que consegue interromper rapidamente o fluxo de corrente quando necessário. Este padrão é típico de sistemas com descarga controlada e operação cíclica.

A resposta da Corrente da Bateria (Curva Azul), representa a corrente da bateria que acompanha o comportamento geral da corrente do motor, porém com amplitude significativamente reduzida. Esta diferença reflete vários aspectos importantes do sistema:

- As perdas inerentes ao processo de conversão de energia.
- O consumo próprio da eletrônica de controle.
- O efeito dos filtros internos do VESC.
- A diferença entre a potência elétrica consumida e a potência mecânica entregue.

Os picos de corrente na faixa de 6-8 A demonstram a capacidade de resposta do sistema de potência, mantendo-se consistentemente dentro dos limites operacionais seguros do VESC. É importante destacar que:

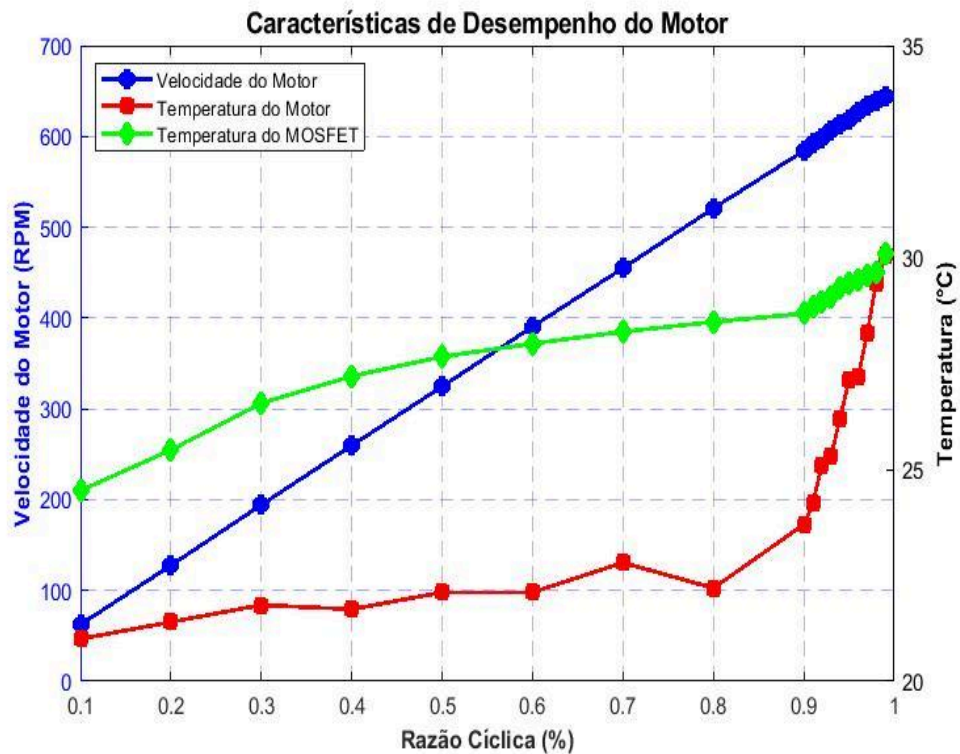
- Não houve ativação dos mecanismos de proteção.
- O sistema manteve estabilidade mesmo nos picos de demanda.
- A corrente máxima está compatível com as especificações do conjunto.

5.4 TESTE 1: ACELERAÇÃO DO MOTOR PELA RAZÃO CÍCLICA

As condições de teste apresentaram algumas limitações operacionais que devem ser consideradas. A janela de tempo disponível para os ensaios mostrou-se restrita, e a capacidade de descarga do banco de baterias limitou o alcance das avaliações realizadas. Esses fatores impactam principalmente a possibilidade de conduzir uma análise térmica prolongada do sistema.

Para melhor compreender as características térmicas durante o funcionamento, foi elaborado um gráfico de perfil de temperatura, baseado nos dados da Tabela 5.1. Este gráfico, apresentado na Figura 5.7, permite visualizar a variação térmica do sistema ao longo do tempo, auxiliando na identificação de possíveis pontos críticos de aquecimento.

Figura 5.7: Performance do motor x PWM.



Fonte: Autoria Própria.

O motor apresenta uma resposta linear característica entre 10% e 90% do duty cycle, onde a velocidade aumenta proporcionalmente ao sinal PWM aplicado. Quando o duty cycle ultrapassa 90%, o motor claramente entra em regime de saturação. Nesta condição, o ganho de velocidade reduz drasticamente, com apenas 59 RPM de aumento entre 90% e 99% de duty cycle. Simultaneamente, ocorre um aumento desproporcional da temperatura, com elevação de 6,3°C nesta faixa final, comparado a apenas 2,7°C nos 80% anteriores. Este comportamento indica claramente a influência de fenômenos limitantes como a força contraeletromotriz e possivelmente a saturação magnética do motor.

A análise térmica revela dois regimes distintos de comportamento. Na faixa até 90% de duty cycle, o motor apresenta aquecimento gradual, com elevação de aproximadamente 0,3°C para cada 10% de aumento no duty. Os MOSFETs do acionamento exibem curva térmica igualmente suave, subindo cerca de 0,5°C por década de duty cycle. Entretanto, acima de 90%, o cenário muda significativamente: a taxa de aquecimento do motor triplica, atingindo +0,7°C por 1% de aumento no duty cycle, enquanto os MOSFETs também

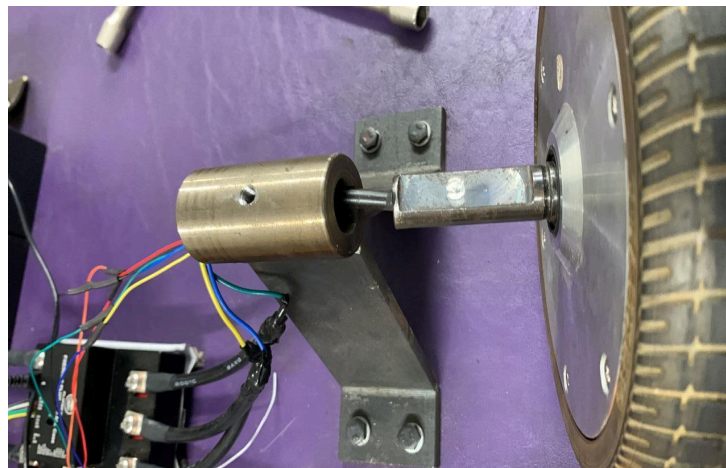
experimentam uma aceleração no aumento de temperatura.

Um dos objetivos deste estudo é analisar a operação do sistema motor-acionamento com funcionalidade de frenagem regenerativa. O VESC inclui um recurso de controle de corrente de frenagem, que é aplicado aos enrolamentos do motor com o propósito de reduzir a velocidade rotacional, gerando uma corrente em sentido oposto ao da operação normal. Esta corrente de retorno para a bateria aumenta gradualmente com a velocidade final do motor e o valor da corrente de frenagem.

5.5 ATUALIZAÇÕES FEITAS NO SUPORTE DO MOTOR

Durante os testes iniciais, foi observado um comportamento anormal em altas rotações do motor, ocasionando problemas de vibrações e danos no eixo do motor feitos pela fixação entre o eixo do motor e o mancal, como mostrado na Figura 5.8.

Figura 5.8: Danos no eixo do motor.

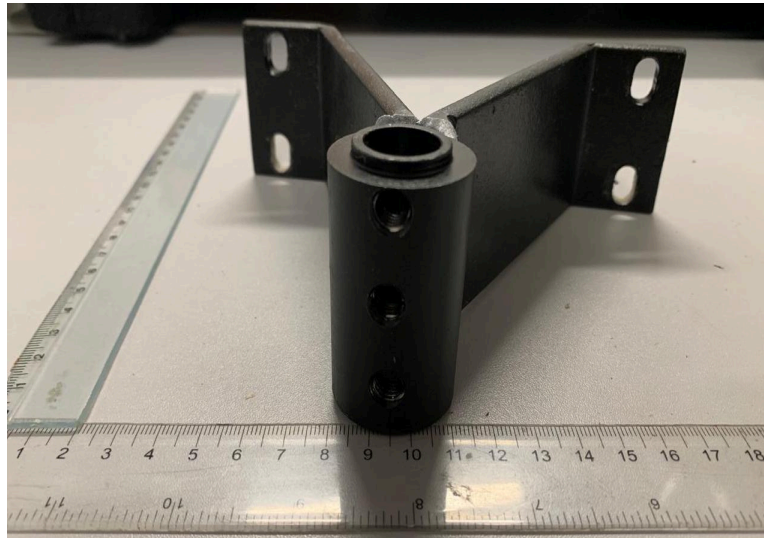


Fonte: Autoria própria.

Este dano foi em consequência da deficiência da fixação simples na primeira versão do suporte. A solução proposta é o aumento de três parafusos de cabeça allen para garantir

alinhamento perfeito do eixo e fixação e um outro parafuso cônico lateral, mostrado na figura 5.9:

Figura 5.9: Novo suporte do motor.

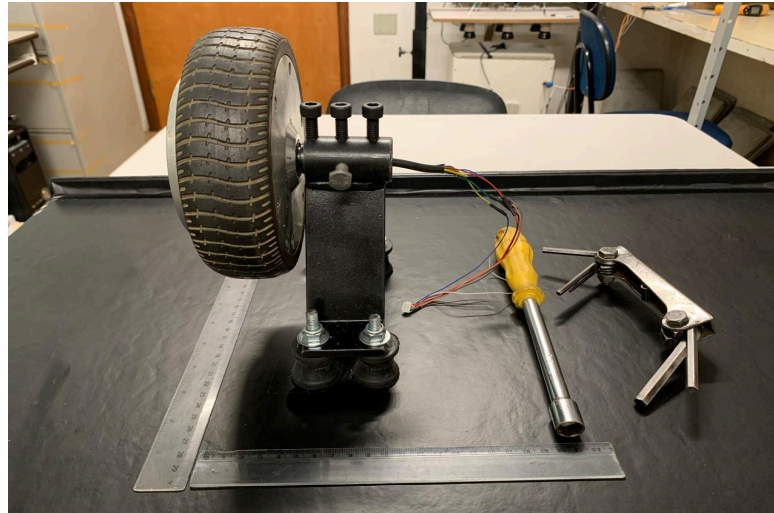


Fonte: Autoria Própria.

Em altas rotações, o motor gera uma alta vibração, transferida para a bancada podendo causar acidentes ao usuário e impedindo a realização de alguns testes em situações extremas de funcionamento. Para solucionar o problema, foi feito um estudo para a aplicação de componentes com o objetivo de diminuir a vibração e a estabilidade da bancada. Desta forma, será implementado quatro coxins feitos de borracha na base de fixação do suporte do motor, mostrado na figura 5.10 abaixo.

Essas atualizações feitas no suporte mostraram um grande avanço na diminuição da vibração e, principalmente, na garantia de alinhamento e fixação do eixo do motor com o mancal em altas rotações. Outra implementação proposta é a utilização de coxins na base de fixação ou a fixação da bancada com a mesa utilizando sargentos.

Figura 5.10: Suporte do motor na versão 2.



Fonte: Autoria Própria.

5.6 TESTE 2: FRENAGEM REGENERATIVA

Para aumentar a velocidade de rotação do motor, o VESC TOOLS oferece a função FOC (*Field Oriented Control* - Controle por Orientação de Campo), que proporciona maior estabilidade e menor ruído durante a operação. Para esta funcionalidade utiliza o que chamamos de "corrente de enfraquecimento de campo" (*field weakening current*), que embora permita alcançar velocidades mais elevadas, apresenta diversas desvantagens - incluindo aumento da temperatura do motor e instabilidade em velocidades superiores à faixa nominal de operação.

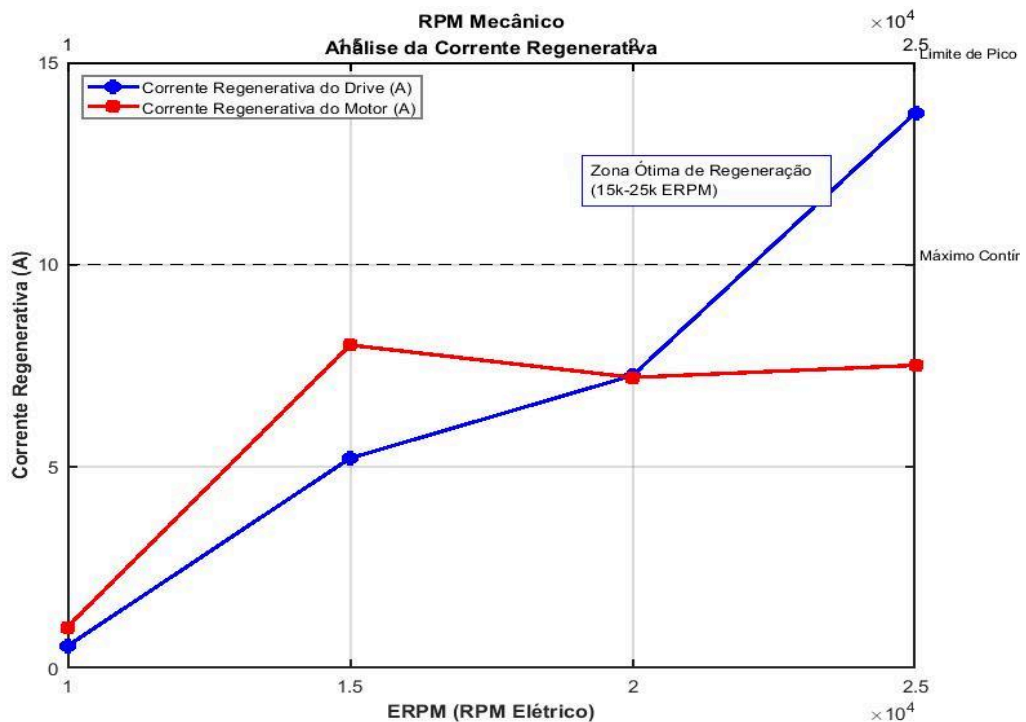
No controle vetorial de motores síncronos de ímãs permanentes (PMSM/BLDC), aplica-se uma corrente i_d negativa (eixo d) para reduzir o fluxo de magnetização, baixar a tensão de força contraeletromotriz (back-EMF) e permitir que o motor gire acima da velocidade nominal sem extrapolar a tensão do inversor. Essa técnica é descrita com detalhes em *Permanent Magnet Synchronous Machines and Drives: Flux Weakening Advanced Control Techniques* (Xu *et al*, 2023), onde é explicada a capacidade de manter estabilidade, resposta dinâmica e eficiência na região de enfraquecimento de fluxo

No Teste 3, realizou-se um aumento gradual do ERPM (Electrical Revolutions Per Minute – Revoluções Elétricas por Minuto), variando de 10.000 a 30.000, enquanto a corrente

de frenagem foi mantida constante em 0,5 A. Durante o ensaio, foram coletados dados que permitiram analisar o desempenho da frenagem regenerativa em diferentes velocidades elétricas do motor.

A variação controlada do ERPM possibilitou avaliar como a regeneração de energia se comporta conforme o motor gira em velocidades crescentes, mantendo-se a mesma intensidade de corrente regenerativa. A Figura 5.11 apresenta o gráfico da performance da frenagem regenerativa, com base nos dados obtidos e organizados na Tabela 5.2, evidenciando a eficiência do sistema nas diferentes condições testadas.

Figura 5.11: Corrente de frenagem regenerativa.



Fonte: Autoria Própria.

- **Curvas:**
 - Azul: Corrente de Regeneração no Drive (controlador).
 - Vermelha: Corrente de Regeneração no Motor.
- **Faixas e limites:**

- Zona ótima de regeneração: 15.000 a 25.000 ERPM.
- Linha pontilhada horizontal: Corrente máxima contínua.
- Valor de pico: ~25.000 ERPM.

Na região de baixa rotação entre 10k a 15k ERPM, observa-se um crescimento rápido da corrente de regeneração do motor, indicando que o sistema começa a converter energia cinética em elétrica. No entanto, o drive ainda opera em regime de absorção limitada, o que pode levar a uma perda parcial de eficiência, já que nem toda a energia gerada é totalmente aproveitada. Essa limitação sugere que, em baixas velocidades, o sistema ainda não atinge sua capacidade máxima de recuperação energética.

A zona otimizada representa a melhor eficiência de regeneração do sistema. A corrente do drive aumenta linearmente até ~15 A, demonstrando uma maior capacidade de absorção de energia. A corrente do motor estabiliza em 8 A após 15k ERPM, indicando um equilíbrio entre geração e recuperação. Neste intervalo, o sistema opera próximo ao seu ponto de máxima eficiência, onde a energia regenerada é efetivamente convertida e armazenada. Acima de 15k ERPM, o motor atinge seus limites operacionais, evidenciados por:

- Saturação magnética, que reduz a capacidade de geração de corrente.
- Limitação da força contraeletromotriz (back-EMF), impedindo maior aumento na regeneração.
- Restrições térmicas nos enrolamentos, que podem comprometer a durabilidade.

Apesar disso o drive continua aumentando sua capacidade de absorção de corrente regenerativa, indicando que a limitação está no motor, não no sistema de controle. A eficiência máxima de regeneração ocorre entre 15k e 20k ERPM, quando as curvas de corrente do motor e do drive estão mais próximas, representando o melhor compromisso entre geração e armazenamento de energia.

Para a verificação do fenômeno de regeneração de energia podemos implementar um banco de baterias de lítio com um controlador BMS (sistema de gerenciamento de bateria), desta forma podemos medir e analisar com precisão o fluxo do de corrente.

5.7 PROBLEMAS ENCONTRADOS NAS BATERIAS

Entre os testes realizados com o sistema de baterias estacionárias de 7,2 Ah, foi necessário a realização de recarregamento das baterias utilizando um carregador. O problema encontrado foi a rapidez com que as baterias eram descarregadas, prejudicando os testes de longa duração. Outra consequência do alto ciclo de carga e descarga foi o estufamento das baterias, mostrado na Figura 5.12 abaixo:

Figura 5.12: Estufamento das baterias.



Fonte: Autoria Própria.

Neste período de desmontagem da bancada foi realizada uma remodelação da bancada de testes, aplicando um adesivo preto na superfície e uma pintura no suporte do motor e no braço de força. Para a solução do problema do curto tempo dos testes e fornecimento de corrente ao conjunto motor-drive, foi estudado um desenvolvimento de um novo sistema de baterias de chumbo-ácido. O modelo escolhido foi três baterias de uso convencional em veículos de capacidade de 50 Ah e corrente de descarga máxima de 400 A, mostrado abaixo:

Figura 5.13: Bancada de testes versão 2.



Fonte: Autoria própria.

Nesta nova configuração de baterias, observou-se uma maior estabilidade na tensão de alimentação, possibilitando o funcionamento do sistema em altas velocidades e um aumento significativo na duração dos testes realizados.

No Teste 4, a rotação do motor foi mantida fixa com uma razão cíclica de 96%, valor recomendado pelo desenvolvedor para operação segura e eficiente. O sistema operou de forma estável a uma rotação relativa de 18.000 ERPM, correspondente a 1.211 RPM mecânicos. Essa faixa de operação não seria possível de ser mantida por longos períodos com outras configurações de baterias. Durante o teste, a corrente de frenagem foi variada entre 0,5 A e 5 A, conforme os dados apresentados na Tabela 5.3, permitindo avaliar o desempenho do sistema sob diferentes níveis de carga regenerativa.

Os resultados indicam que mesmo com o aumento da corrente de frenagem, o sistema manteve estabilidade na tensão e na rotação, evidenciando a capacidade das baterias em suportar cargas elevadas sem comprometer o funcionamento. Além disso, a maior duração dos testes sugere uma melhor eficiência energética e menor degradação térmica, aspectos

importantes para aplicações de longa duração. A análise dos dados na Tabela 5.3 e seus gráficos correlacionados reforçam a viabilidade do sistema para operações exigentes em termos de corrente regenerativa.

Tabela 5.3: Dados coletados no teste 4.

| Cor. de freio (A) | ERPM | RPM | Tensão (V) | Cor. Bat. FR (A) | Cor. Mot. FR (A) | Temp. DRIVE (°C) | Temp. MOSFET (°C) | Temp. motor (°C) |
|--------------------------|-------------|------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 0,5 | 18000 | 1211 | 36,2 | -2,75 | -11,17 | 26,7 | 28,7 | 27 |
| 1 | 18000 | 1211 | 36,2 | -5,7 | -13,1 | 26,6 | 28,7 | 28,5 |
| 1,5 | 18000 | 1211 | 36,2 | -5 | -13,9 | 28,9 | 31,3 | 34,9 |
| 2 | 18000 | 1211 | 36,2 | -3,25 | -12,5 | 28,5 | 30,9 | 36,2 |
| 2,5 | 18000 | 1211 | 36,2 | -6,1 | -13,5 | 28,2 | 30,3 | 37,7 |
| 3 | 18000 | 1211 | 36,2 | -4,6 | -12,5 | 27,2 | 30 | 35,4 |
| 3,5 | 18000 | 1211 | 36,2 | -5,65 | -15,15 | 27,3 | 29,1 | 36 |
| 4 | 18000 | 1211 | 36,2 | -5,75 | -14,95 | 27,5 | 29,5 | 36,2 |
| 4,5 | 18000 | 1211 | 36,2 | -7,9 | -13,6 | 26,9 | 29,2 | 36,2 |
| 5 | 18000 | 1211 | 36,2 | -6,8 | -15,2 | 27,3 | 30,1 | 36,1 |

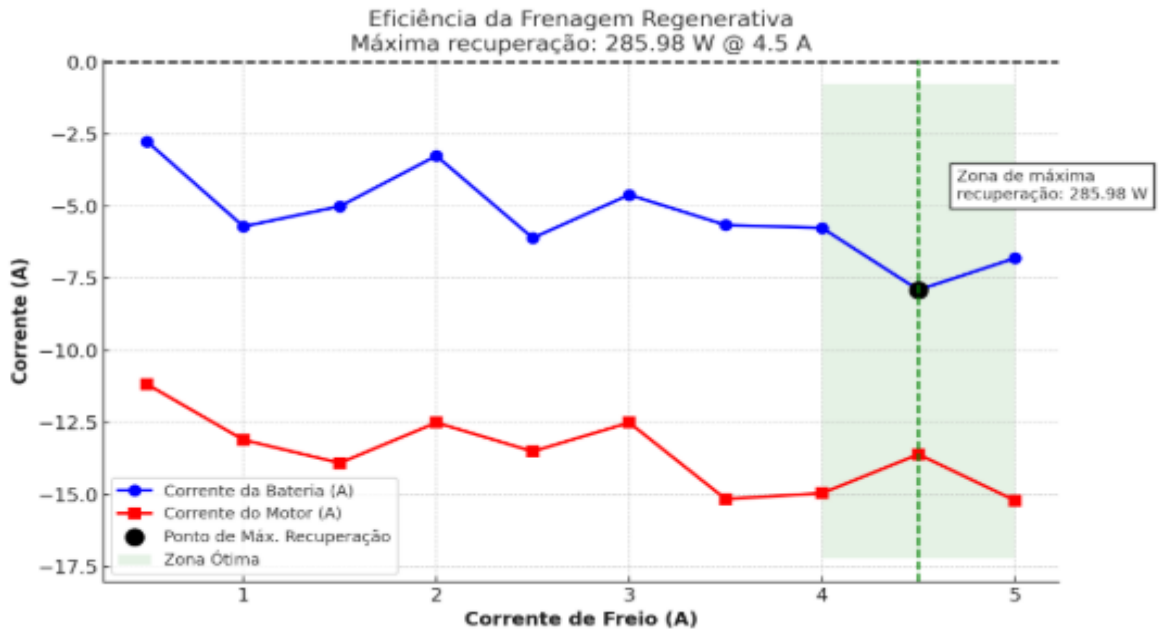
Fonte: Autoria própria.

Podemos observar que a corrente de frenagem regenerativa de entrada da bateria, aumenta gradativamente mesmo fixando a rotação, variando apenas a corrente de freio aplicada aos pares da bobina do motor. Para a comprovação do efeito da frenagem regenerativa será necessário a implementação de um wattímetro entre o cabo de alimentação do sistema para a análise do fluxo de corrente.

Uma outra forma de análise da eficiência do sistema de recuperação de energia é o estudo de desenvolvimento de um pack de baterias de lítio com base nas configurações e condições de testes propostas à bancada de testes.

A partir dos dados obtidos da tabela 5.3, foi desenvolvido um gráfico abaixo na figura 5.14, mostrando as zonas de regeneração de energia:

Figura 5.14: Zonas de recuperação de energia x corrente.



Fonte Autoria própria.

A análise da frenagem regenerativa mostrou que o ponto de maior eficiência ocorre em 4,5 A de corrente de freio, com pico de regeneração de -7,9 A na bateria. Acima desse valor, a eficiência diminui, possivelmente devido à saturação do sistema, perdas térmicas ou limitações do controlador. A corrente do motor manteve-se estável (entre -12,5 A e -15,2 A), indicando consistência no torque, mas com menor regeneração em correntes mais altas. A temperatura do motor aumentou moderadamente, enquanto os MOSFETs mantiveram-se bem resfriados. Também foram observadas oscilações na corrente da bateria entre 1,5 A e 3,0 A, sugerindo possíveis falhas nos sensores ou no algoritmo de controle.

As temperaturas registradas mostram variação moderada durante os testes:

- Motor: entre 27°C e 37,7°C
- MOSFET: entre 28,7°C e 31,3°C
- Drive: entre 26,6°C e 28,9°C

Essas variações térmicas estão dentro da zona de utilização segura e podem contribuir para as não-linearidades observadas no comportamento do sistema

5.8 ESTUDO DESENVOLVIMENTO DE UM PACK DE BATERIAS LÍTIO

A versão atual da bancada de testes enfrenta limitações significativas devido ao uso de baterias de chumbo-ácido. O sistema composto por três unidades de 12V/7,2Ah conectadas em série apresenta problemas críticos durante operações em alta rotação, particularmente quando acionada a função de enfraquecimento de campo magnético.

Os principais desafios observados incluem descarga extremamente rápida, elevação de temperatura até 52,4°C, e o aparecimento de inchaço nas células. A autonomia se mostra insuficiente, com apenas 20 minutos de operação a 20.000 ERPM (14,6A) e meros 5 minutos a 40.000 ERPM (32,6A) tornando inviáveis testes mais prolongados.

Para a resolução do problema foi levantado o desenvolvimento de um pack de baterias de lítio-íon utilizando células Samsung 18650. A configuração planejada segue o arranjo 10S2P (10 séries, 2 paralelos), proporcionando tensão nominal de 36V e capacidade total de 4,4Ah.

$$\Delta t = \frac{P_{nominal}}{P_{Motor}} = \frac{158,4 Wh}{350 W} = 0,452 \text{ hora} \quad (2)$$

Essa solução apresenta vantagens significativas em relação ao sistema atual, incluindo maior densidade energética (158,4Wh), capacidade de corrente contínua de até 40A, e peso aproximadamente seis vezes menor. As células selecionadas possuem tensão nominal de 3,6V, capacidade de 2,5Ah cada e suportam corrente máxima de descarga de 20A por célula.

A implementação do novo sistema requer cuidados especiais na seleção e preparação das células. No início será realizado teste individual de capacidade e resistência interna (ESR) para cada célula, seguido de processo de formação e equalização.

A montagem do pack incluirá estrutura mecânica robusta com proteção contra impactos e sistema avançado de gerenciamento (BMS) com monitoramento individual de células, proteção contra sobrecarga e descarga profunda, além de balanceamento ativo durante

a carga. O sistema de carga opera com tensão máxima de 42V (4,2V/célula) corrente recomendada de 1,25A e critério de término baseado em corrente residual de 125mA.

Para obter maior capacidade nominal do pack podemos reprojeter, aumentando a quantidade de baterias em paralelo:

- Configuração planejada 10S20P (10 séries, 20 paralelos):
 - Tensão: 36 V;
 - Capacidade de carga: 50 Ah;
 - Maior densidade energética (20 A);
 - Peso menor;
- Proposta: 10s - 60p (CORRENTE MÁXIMA DE OPERAÇÃO VESC)
- Tensão: 36 V
- Corrente descarga máxima para 60p:
 - $1 A \times 60 p = 60 A$ **não recomendado**
 - $Cap = 2500 mAh \times 60 A = 150 Ah$
 - Autonomia:
 - $150 Ah \times 36 V = 5400 Wh \Rightarrow \frac{5400 Wh}{350 W} = 15,42 h$
- Proposta: 10s - 30p (CORRENTE IDEAL DE FUNCIONAMENTO)
 - Corrente a 1 A e 30 p :
 - $1 A \times 30p = 30 A$
- Capacidade: 2500 mAh
 - $Cap = 2500 mAh \times 30 = 75000 mAh$
 - Autonomia:
 - $75 Ah \times 36 V = 2700 Wh \Rightarrow \frac{2700 Wh}{350 W} = 7,71 h$

Os benefícios esperados com a nova configuração são numerosos. Além do aumento significativo na autonomia (estimados 27 minutos em operação contínua a 350W) a solução em lítio proporcionará maior estabilidade de tensão durante descarga, tempo de recarga reduzido para cerca de 2h30min, e vida útil prolongada (500+ ciclos completos). A

eliminação do efeito memória e a redução drástica no aquecimento durante a operação representam melhorias adicionais importantes. Para garantir operação segura será implementado monitoramento contínuo de temperatura e verificação periódica do balanceamento das células.

5.9 TACÔMETRO DIGITAL

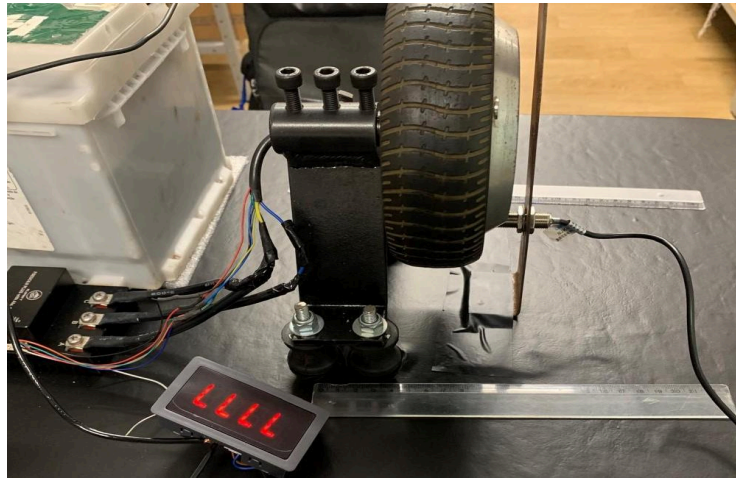
Para validar os valores obtidos pelo tacômetro infravermelho Instrutherm TD-712, foi desenvolvido um sistema alternativo para medição de rotação. O princípio de funcionamento desse novo tacômetro baseia-se em um sensor indutivo que detecta a variação do campo magnético provocada pela passagem de um ímã permanente fixado à parte giratória do motor BLDC, conforme ilustrado na Figura 6.7. Quando o sensor identifica a presença do campo magnético, ele gera um pulso elétrico que é enviado a um microcontrolador.

Este microcontrolador é responsável por receber e processar os sinais do sensor indutivo, calcular a frequência dos pulsos, converter esses dados para RPM (rotações por minuto) e exibir o resultado em um display LCD. Essa solução visa permitir medições diretas da rotação do motor, eliminando a necessidade do tacômetro infravermelho, e oferece as seguintes vantagens:

- Baixo custo de implementação
- Boa precisão nas medições
- Facilidade de integração na bancada de testes

A Figura 5.15 apresenta o esquema do equipamento comprado no site de compras da internet para a medição de rotação, mostrando sua configuração e componentes principais. Esta solução alternativa foi projetada para fornecer medições confiáveis e consistentes, servindo como referência para a validação cruzada com os dados obtidos pelo tacômetro infravermelho mostrada na tabela 5.4. Essas características tornam o sistema uma ferramenta valiosa para garantir a confiabilidade das medições de rotação durante os testes do motor BLDC, contribuindo para a precisão e segurança dos ensaios realizados.

Figura 5.15: Implementação do tacômetro indutivo.



Fonte: Autoria própria.

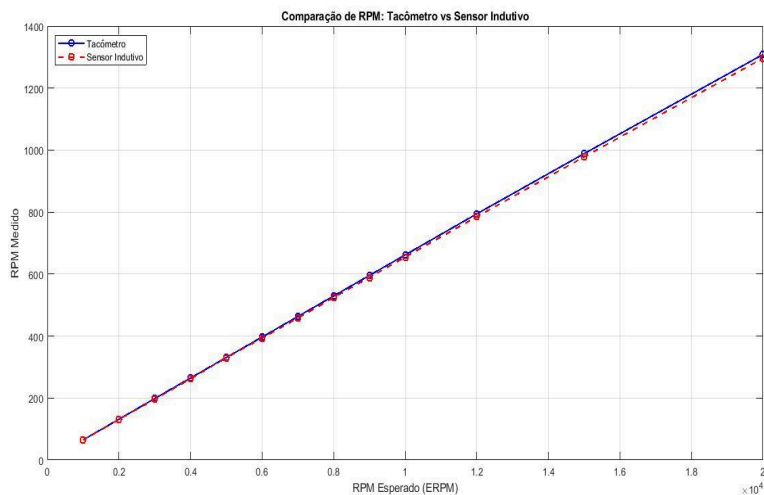
Tabela 5.4: Medição de RPM.

| ERPM | MEDIÇÃO TACO | MEDIDO INDU |
|-------|--------------|-------------|
| 1000 | 65,1 | 65 |
| 2000 | 131,7 | 131 |
| 3000 | 198,5 | 196 |
| 4000 | 264,7 | 262 |
| 5000 | 330,9 | 330 |
| 6000 | 396,7 | 393 |
| 7000 | 463,2 | 458 |
| 8000 | 529,5 | 524 |
| 9000 | 595,7 | 589 |
| 10000 | 661,9 | 655 |
| 12000 | 794,4 | 785 |
| 15000 | 988,6 | 978 |
| 19990 | 1308 | 1296 |

Fonte: Autoria Própria.

Com os resultados obtidos pela tabela 5.16 de medições feitas pelo instrumento tacômetro infravermelho Instrutherm TD-712 e tacômetro indutivo, foi desenvolvido um gráfico para a comparação de medições mostrado na figura 5.18:

Figura 5.16: Comparação de medição de RPM.



Fonte: Autoria Própria.

Para calcular o erro percentual entre as medições do sensor indutivo (INDU) e do tacômetro (TACO), usamos a seguinte equação:

$$Erro\ percentual\ (\%) = \left| \frac{Indu - Taco}{Taco} \right| * 100 \quad (3)$$

O erro percentual médio é de aproximadamente 0,9 %, mostrando a precisão do tacômetro infravermelho em relação ao tacômetro indutivo.

6 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou a eficácia do controlador VESC 6 na otimização da frenagem regenerativa para veículos elétricos, destacando seu desempenho superior em resposta dinâmica, controle de corrente e recuperação de energia. Testes realizados no banco experimental com um motor BLDC confirmaram uma relação linear entre o ciclo de trabalho PWM (10%-90%) e a velocidade do motor, com um ganho médio de 62 RPM a cada incremento de 10%, enquanto operações acima de 90% revelaram saturação magnética acompanhada por um aumento significativo de temperatura (6,3°C).

A tecnologia de *Field-Oriented Control* (FOC) garantiu estabilidade operacional, e os protocolos de frenagem regenerativa comprovaram a conversão eficiente de energia cinética em energia elétrica, embora dependente de variáveis como velocidade inicial e estado da bateria. A solução alternativa com baterias de chumbo-ácido (36 V) mostrou-se uma opção viável para testes iniciais, reduzindo custos sem comprometer análises fundamentais.

As limitações identificadas restrições na capacidade da bateria e tempo insuficiente para testes prolongados de degradação térmica indicam direções para pesquisas futuras: implementação de bancos de baterias de lítio com BMS (*Battery Management System*) para ciclos contínuos de regeneração

A construção da bancada de testes permitiu uma análise detalhada do comportamento térmico, elétrico e mecânico do sistema. Foram identificados pontos de melhoria, como o dimensionamento adequado do sistema de alimentação e a necessidade de um banco de baterias mais robusto, sugerindo-se o uso de baterias de lítio com BMS para maior autonomia e segurança. Além dos aspectos técnicos, o sistema demonstrou grande potencial como ferramenta didática sendo possível ser utilizado em ambientes acadêmicos para ensino prático de conceitos relacionados à eletrônica de potência, controle de motores e mobilidade elétrica.

Conclui-se que a arquitetura VESC 6 representa uma solução promissora para projetos de tração elétrica, e que a plataforma experimental desenvolvida neste trabalho fornece uma base sólida para futuras pesquisas de controle PID avançados, estudos e análise de eficiência energética e térmica e aprimoramentos, contribuindo para a evolução de tecnologias limpas e sustentáveis no setor automotivo.

7 REFERÊNCIAS

ALIEXPRESS. VESC anti-faísca – Interruptor eletrônico. Disponível em: <<https://pt.aliexpress.com/item/1005001895375955.html>>. Acesso em: 06 abr. 2024.

BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. BNDES Setorial, n. 33, p. 197–236, mar. 2011. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bds/bdspt/publicacao/bs_33.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2024.

BHURSE, S. S.; BHOLE, A. A. A review of regenerative braking in electric vehicles. International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), Chennai, Índia, 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8377549>>. Acesso em: 30 mar. 2024.

BROWN. Brushless DC Motor Control Made Easy. Microchip, 2011. Disponível em: <<https://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00857B.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2024.

CHOU, D.; SHYU, M. A. A cost-effective method of electric brake with energy regeneration for electric vehicles. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 56, n. 6, 2009. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4787065>>. Acesso em: 29 fev. 2023.

CHOI, D. Development of open-source motor controller framework for robotic applications. IEEE, 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8957033>>. Acesso em: 02 abr. 2024.

INEE – INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. Sobre veículos elétricos. 2010. Disponível em: <http://www.inee.org.br/veh_sobre.asp?Cat=veh>. Acesso em: 30 mar. 2024.

LENZ. Como se constituem e operam os motores CC sem escovas (Motores BLDC). Blog Automóveis Elétricos, 2015. Disponível em: <<https://automoveiseletricos.blogspot.com/2015/05/como-se-constituem-e-operam-os-motores.html>>. Acesso em: 12 abr. 2024.

MAKERBASE. Alta corrente para robô de luta E-Foil, prancha de surf, robô AGV, PCB Alu, VESC 75200, V2, 84V, 200A. Disponível em: <<https://makerbase3d.com/product/makerbase-vesc-75200-v2/?srsltid=AfmBOoqwLYk73Q0zmN7FPJY1tc3Kb3phdGLZgj3UDH8Oc4TVIbDRFkA>>. Acesso em: 04 abr. 2024.

MATULKA, R. The history of the electric car. U.S. Department of Energy, 2014. Disponível em: <<https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>>. Acesso em: 30 mar. 2024.

MEYER, L. Z. I. Caracterização de motores brushless de pequeno porte para veículos aéreos não tripulados. 2019. 28 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Acesso em: 01 abr. 2024.

MAYTECH. Maytech 50A V4.12 VESC Tool. Disponível em: <https://maytech.cn/products/maytech-superesc-50a-compatible-with-vesc-software?srsltid=AfmBOoqNKdzV_4erJ9J5s89tDzSZmGhhzCD2WSeTmJi5APTZaa67rui3>. Acesso em: 01 abr. 2024.

SHABANIAN, A. et al. Optimization of brushless direct current motor design using an intelligent technique. ISA Transactions, v. 57, p. 311–321, jul. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019057815000644>>. Acesso em: 17 abr. 2024.

SPINTEND. What's VESC? How to use it? What's the difference between VESC and ESC? Disponível em: <<https://spintend.com/blogs/news/whats-vesc-how-to-use-it-whats-difference-between-vesc-and-normal-esc>>. Acesso em: 01 abr. 2024.

TARNINI, M. Y. Fast and cheap stepper motor drive. IEEE, 2015. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7418499>>. Acesso em: 30 mar. 2024.

TRAMPABOARDS. VESC 6/75 Trampa. Disponível em: <<https://trampaboards.com/1x-vesc-675--275-each-p-35378.html>>. Acesso em: 03 abr. 2024.

TRISTÃO, L. B. R. Motor Brushless DC: análise teórica e projeto de controlador eletrônico sem a utilização de sensores. 95 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) Faculdade Doctum, Juiz de Fora, 2018. Acesso em: 01 abr. 2024.

VAROCKY, B. J. Benchmarking of regenerative braking for a fully electric car. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2011. 44 p.

VEDDER, B. Benjamin's robots. 2015. Disponível em: <<https://vedder.se/2015/01/vesc-open-source-esc/>>. Acesso em: 03 abr. 2023.

VEDDER, B. Design and implementation of a brushless DC motor controller. Master's Thesis Chalmers University of Technology, 2015. Disponível em: <<https://vesc-project.com>>. Acesso em: 29 jul. 2025.

WANG, H Design and Implementation of Brushless DC Motor Drive and Control System <https://www.researchgate.net/publication/271397975_Design_and_Implementation_of_Brushless_DC_Motor_Drive_and_Control_System> Acesso 29/07/2025

XU, W.; ISMAIL, M. M.; ISLAM, R. Permanent magnet synchronous machines and drives: flux weakening advanced control techniques. 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/371424380_Permanent_Magnet_Synchronous_Machines_and_Drives_Flux_Weakening_Advanced_Control_Techniques>. Acesso em: 02 jun. 2025.

ZIKODRIVE. Sensored versus sensorless brushless DC (BLDC) motors and controllers. Disponível em: <<https://www.zikodrive.com/support/zikouniversity-motor-control-theory-application/sensored-versus-sensorless-brushless-motors-controllers/>>. Acesso em: 17 abr. 2024.