



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENG. DE CONTROLE, AUTOMAÇÃO E COMPUTAÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Camila Barbieri Schwab

**Estudo das Tecnologias de Veículos Elétricos e Análise de um Sistema de
Gerenciamento de Baterias em *Hardware in the Loop* Virtual**

Blumenau
2024

Camila Barbieri Schwab

Estudo das Tecnologias de Veículos Elétricos e Análise de um Sistema de Gerenciamento de Baterias em *Hardware in the Loop* Virtual

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação do Centro Tecnológico de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Engenheira de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Davi Curi Busarello

Blumenau

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela
BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Schwab, Camila Barbieri

Estudo das Tecnologias de Veículos Elétricos e Análise de um Sistema de Gerenciamento de Baterias em Hardware in the Loop Virtual / Camila Barbieri Schwab ; orientador, Tiago Davi Curi Busarello, 2024.

92 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Blumenau, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Veículos Elétricos. 3. Sistema de Gerenciamento de Baterias. 4. Mobilidade. 5. Hardware in the Loop. I. Busarello, Tiago Davi Curi . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

Camila Barbieri Schwab

Estudo das Tecnologias de Veículos Elétricos e Análise de um Sistema de Gerenciamento de Baterias em *Hardware in the Loop* Virtual

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheira de Controle e Automação e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Blumenau, dia de mês de 2024.

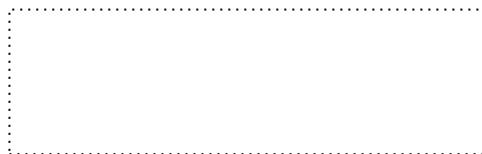
Banca examinadora



Prof. Dr. Tiago Davi Curi Busarello
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Ciro André Pitz
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Adriano Peres
Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau, 2024.

Dedico este trabalho a minha família, pelo
amor e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que fizeram parte da minha jornada, não apenas durante a graduação, mas também àqueles que, de alguma forma, contribuíram para que eu chegasse até aqui. Também estendo minha gratidão a todos os engenheiros que me inspiraram ao longo desse caminho.

Quero expressar minha sincera gratidão à minha família, que esteve ao meu lado em todos os momentos. Agradeço imensamente à minha mãe, Marne, ao meu pai e fonte de inspiração como engenheiro, Joni e à minha irmã, Marina, pelos conselhos e apoio incondicional ao longo dessa jornada. Sem vocês não seria possível.

Minha profunda gratidão à Universidade Federal de Santa Catarina, campus de Blumenau, e a todos os colegas e professores do curso de Engenharia de Controle e Automação por todo o conhecimento compartilhado e incentivos.

Por fim, agradeço especialmente ao meu melhor amigo e namorado, Wiliam, por ter sido um pilar de força durante esses anos.

“The flower that blooms in adversity is the most rare and beautiful of all.”

- Mulan

RESUMO

A ascensão dos veículos elétricos está gerando uma transformação significativa na indústria automotiva. Este trabalho tem como objetivo oferecer um estudo abrangente das tecnologias relacionadas aos veículos elétricos, incluindo baterias, carregadores e sistemas de gerenciamento de bateria. O escopo delimita-se aos aspectos elétricos e eletrônicos relevantes para análise e desenvolvimento desses sistemas, excluindo tecnologias mecânicas, estruturais e outros elementos físicos. A metodologia empregada envolveu a revisão do estado da arte e a realização de testes e análises sobre um sistema de gerenciamento de bateria em um ambiente de *Hardware in the Loop* virtual. Os resultados das análises demonstraram que o sistema de gerenciamento de bateria atendeu às principais funções esperadas, como otimização de desempenho e segurança das células em condições extremas, visando o aumento da vida útil das baterias. O sistema de gerenciamento de bateria mostrou ser essencial não apenas para estender a vida útil das baterias, mas também para melhorar a segurança e o desempenho geral dos veículos elétricos. Este estudo evidencia a importância do progresso contínuo nas tecnologias de gerenciamento de bateria para promover uma mobilidade elétrica sustentável e eficiente.

Palavras-chave: Mobilidade; Baterias; Gerenciamento; Veículos Elétricos; Hardware in the Loop.

ABSTRACT

The rise of electric vehicles is generating a significant transformation in the automotive industry. This work aims to provide a comprehensive study of technologies related to electric vehicles, including batteries, chargers, and battery management systems. The scope is limited to the electrical and electronic aspects relevant to the analysis and development of these systems, excluding mechanical, structural, and other physical elements. The methodology employed involved a review of the state of the art and the execution of tests and analyses on a battery management system in a virtual Hardware-in-the-Loop environment. The test results demonstrated that the battery management system met the primary expected functions, such as performance optimization and cell safety under extreme conditions, aiming to increase battery lifespan. The battery management system proved to be essential not only for extending battery life but also for improving the safety and overall performance of electric vehicles. This study highlights the importance of continuous progress in battery management technologies to promote sustainable and efficient electric mobility.

Keywords: Mobility; Batteries; Management; Electric Vehicles; Hardware in the Loop.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Célula e Módulo da Bateria de uma Plataforma da Stellantis | 25 |
| Figura 2 - Pacote de Bateria de uma Plataforma da Stellantis | 25 |
| Figura 3 - Carregador CC-CV..... | 32 |
| Figura 4 - Carregador MCC..... | 33 |
| Figura 5 – Diagrama de Possíveis Métodos de Estimar SOC | 39 |
| Figura 6 – Diagrama de Possíveis Métodos de Estimar SOH..... | 43 |
| Figura 7 - Resistores de Derivação Fixa para Balanceamento Passivo | 46 |
| Figura 8 - Resistor de Derivação Comutado para Balanceamento Passivo..... | 47 |
| Figura 9 - Área de Operação Segura de Corrente e Tensão | 49 |
| Figura 10 - Área de Operação Segura de Temperatura..... | 51 |
| Figura 11 - Pacote de Baterias Conectadas ao Carregador..... | 54 |
| Figura 12 - Controle da Fonte de Tensão | 56 |
| Figura 13 - Controle de Corrente em Malha Fechada | 56 |
| Figura 14 - BMS Implementado no HIL..... | 58 |
| Figura 15 - Fluxograma do Código em C | 59 |
| Figura 16 - Painel BMS no SCADA | 60 |
| Figura 17 - Painel SCADA..... | 60 |
| Figura 18 - Variação das Tensões das Células da Bateria em Resposta a Condições de Alta Temperatura..... | 62 |
| Figura 19 – Tensões das Células a Alta Temperatura | 63 |
| Figura 20 – Painel do BMS indicando Alta Temperatura, desconexão do contator, entre outras coisas | 63 |
| Figura 21 - Variação das Tensões das Células da Bateria em Resposta a Condições de Baixa Temperatura..... | 64 |
| Figura 22 - Tensões das Células a Baixa Temperatura | 65 |
| Figura 23 - Tensões das Células a Baixa Tensão durante Descarregamento | 66 |
| Figura 24 - Variação das Tensões das Células da Bateria em Resposta a Condições de Baixa Tensão durante Descarregamento | 67 |
| Figura 25 - SOC da Célula 7 Durante o Teste de Descarregamento | 68 |
| Figura 26 - Tensão da Célula 7 Durante o Teste de Descarregamento | 68 |
| Figura 27 - Tensões das Células a Alta Tensão durante Carregamento..... | 70 |

| | |
|---|----|
| Figura 28 - Variação das Tensões das Células da Bateria em Resposta a Condições de Alta Tensão durante Carregamento | 70 |
| Figura 29 - SOC da Célula 1 Durante o Teste de Carregamento..... | 71 |
| Figura 30 - Tensão da Célula 1 Durante o Teste de Carregamento..... | 71 |
| Figura 31 - Tensão da Célula 7 Durante o Teste de Carregamento..... | 72 |
| Figura 32 - SOC da Célula 7 Durante o Teste de Carregamento..... | 73 |
| Figura 33 - Variação das Tensões das Células da Bateria em Resposta a Condições de Alta Tensão durante Carregamento | 74 |
| Figura 34 - SOC da Célula 1 Durante o Teste de Carregamento..... | 74 |
| Figura 35 - Variação das Tensões das Células da Bateria Após o Limite de Tensão Estabelecido ser Excedido | 76 |
| Figura 36 - Resposta do Sistema ao Balanceamento Após o Limite de Tensão Estabelecido ser Excedido | 76 |
| Figura 37 – Resposta do ΔV ao Balanceamento Após o Limite de Tensão Estabelecido ser excedido..... | 77 |
| Figura 38 - Resposta do Sistema ao Balanceamento Após o Limite de Tensão Estabelecido ser excedido..... | 78 |
| Figura 39 - Variação das Tensões das Células da Bateria Após o Limite de Tensão Mínima Estabelecido ser excedido..... | 79 |
| Figura 40 - Resposta do Sistema ao Balanceamento Após o Limite de Tensão Mínima Estabelecido ser excedido..... | 80 |
| Figura 41 - Resposta do ΔV ao Balanceamento Após o Limite de Tensão Mínima Estabelecido ser excedido..... | 81 |
| Figura 42 – Tempo durante o Balanceamento | 81 |
| Figura 43 – Tensões das Células Antes e Após o Balanceamento Passivo | 82 |
| Figura 44 – Tensões das Células em Resposta a Resistência Interna da Célula 4 Elevada | 83 |
| Figura 45 – Tensão das Células em Resposta ao Balanceamento Passivo | 84 |
| Figura 46 – Estado de Carga da Célula 4 Após um Período de Carregamento | 85 |
| Figura 47 - Estado de Carga da Célula 8 Após um Período de Carregamento..... | 85 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Comparação entre as baterias | 28 |
| Tabela 2 - Comparação entre os Diferentes Tipos de Modo de Carregamento | 35 |
| Tabela 3 - Limites Definidos no Sistema | 61 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|--|
| AC | Alternating Current |
| AE | Active Acoustic Emission |
| ANN | Artificial Neural Network |
| BEV | Battery Electric Vehicle |
| BMS | Battery Management System |
| CC | Constant Current |
| CC | Coulomb Counting |
| CV | Constant Voltage |
| DC | Direct Current |
| DLA | Deep Learning Algorithms |
| EIS | Electrochemical Impedance Spectroscopy |
| EKF | Extended Kalman Filter |
| EV | Electric Vehicle |
| FL | Fuzzy Logic |
| GA | Genetic Algorithm |
| HEV | Hybrid Electric Vehicle |
| HIL | Hardware in the Loop |
| ICE | Internal Combustion Engine |
| IEC | International Electrotechnical Commission |
| KF | Kalman Filter |
| LSTM | Long Short-Term Memory |
| MCC | Multi-Step Constant Current |
| MCCCV | Multi-Step Constant Current Constant Voltage |
| NLO | Nonlinear Observers |
| NN | Neural Network |
| OBC | On-Board Charger |
| OCV | Open-Circuit Voltage |
| PHEV | Plug-in Hybrid Electric Vehicle |
| PTT | Pulse Test Technique |
| RC | Resistor-Capacitor |
| RMS | Root Mean Square |
| SAE | Society of Automotive Engineers |

| | |
|------|------------------------------------|
| SMO | Sliding Mode Observer |
| SOA | Safe Operating Area |
| SOC | State of Charge |
| SOH | State of Health |
| SPKF | Sigma Point Kalman Filter |
| SVM | Support Vector Machine |
| wBMS | wireless Battery Management System |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 | OBJETIVO GERAL | 18 |
| 1.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 19 |
| 1.3 | ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS..... | 19 |
| 2 | TECNOLOGIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS | 20 |
| 2.1 | CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS | 20 |
| 2.1.1 | Veículos Elétricos a Bateria - BEV | 21 |
| 2.1.2 | Veículos Híbridos Elétricos - HEV | 21 |
| 2.1.3 | Veículos Híbridos Plug-in - PHEV | 22 |
| 2.1.4 | Veículos Elétricos de Autonomia Estendida - REEV | 22 |
| 2.1.5 | Veículos Elétricos de Célula de Combustível - FCEV | 23 |
| 2.2 | BATERIAS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS..... | 23 |
| 2.2.1 | Célula de Bateria, Módulo e Pacote | 24 |
| 2.2.2 | Baterias de Chumbo-Ácido | 25 |
| 2.2.3 | Bateria de Hidreto Metálico de Níquel | 26 |
| 2.2.4 | Bateria de Íon de Lítio | 27 |
| 2.2.5 | Comparativo entre as baterias | 28 |
| | Íon de Lítio | 28 |
| 2.2.6 | Futuro das baterias | 29 |
| 2.3 | CARREGADORES DE VEÍCULOS ELÉTRICOS | 30 |
| 2.3.1 | Abordagens Tradicionais de Carregamento de Bateria | 31 |
| 2.3.1.1 | <i>Carregador de Corrente Constante - CC</i> | 31 |
| 2.3.1.2 | <i>Carregador de Tensão Constante - CV</i> | 31 |
| 2.3.1.3 | <i>Carregador Corrente e Tensão Constante - CC-CV</i> | 32 |
| 2.3.1.4 | <i>Carregador de Corrente Constante em Várias Etapas - MCC</i> | 32 |
| 2.3.1.5 | <i>Carregador de Corrente Constante – Tensão Constante em Várias Etapas - MCCC</i> | 33 |
| 2.3.2 | Tecnologias de Carregamento de Veículos Elétricos | 34 |
| 2.3.2.1 | <i>Carregamento Condutivo</i> | 34 |
| 2.3.2.2 | <i>Troca de Baterias e Carregamento Sem Fio</i> | 36 |
| 2.3.2.3 | <i>Carregamento Rápido Consciente - Futuro dos Carregadores de Veículos Elétricos</i> | 36 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 2.4 | SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIA - BMS..... | 37 |
| 2.4.1 | Estado de carga – SOC | 38 |
| 2.4.1.1 | <i>Métodos Convencionais</i> | 39 |
| 2.4.1.2 | <i>Algoritmo de Filtro Adaptativo - AF.....</i> | 40 |
| 2.4.1.3 | <i>Algoritmo de Aprendizagem</i> | 40 |
| 2.4.1.4 | <i>Observador Não Linear - NLO.....</i> | 41 |
| 2.4.1.5 | <i>Técnicas Avançadas de Estimativa de SOC</i> | 41 |
| 2.4.2 | Estado de saúde – SOH | 42 |
| 2.4.2.1 | <i>Métodos de Estimar Experimentalmente.....</i> | 43 |
| 2.4.2.2 | <i>Métodos Baseados em Modelos</i> | 44 |
| 2.4.2.3 | <i>Métodos de Estimativa de SOH Baseados em Machine Learning ...</i> | 44 |
| 2.4.2.4 | <i>Métodos Rápidos de Estimativa de SOH</i> | 45 |
| 2.4.3 | Balanceamento de Células | 45 |
| 2.4.3.1 | <i>Balanceamento Passivo.....</i> | 46 |
| 2.4.3.2 | <i>Balanceamento Ativo</i> | 48 |
| 2.4.4 | Gerenciamento de Corrente e Tensão | 49 |
| 2.4.5 | Gerenciamento Térmico..... | 50 |
| 2.4.6 | Desligamento de Emergência e Thermal Runaway | 51 |
| 2.5 | HARDWARE IN THE LOOP..... | 52 |
| 2.5.1 | Typhoon HIL..... | 53 |
| 3 | VISÃO GERAL DO MODELO DE GERENCIAMENTO DE BATERIA NO HARDWARE IN THE LOOP | 54 |
| 3.1 | PACOTE DE BATERIA | 54 |
| 3.2 | FONTE DE TENSÃO | 55 |
| 3.3 | BMS E FUNÇÕES | 56 |
| 3.4 | CÓDIGO NA LINGUAGEM C DO BMS | 58 |
| 3.5 | AMBIENTE SCADA | 60 |
| 4 | ANÁLISES DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIA NO HARDWARE IN THE LOOP VIRTUAL..... | 61 |
| 4.1 | CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO | 61 |
| 4.1.1 | Cenário 1 - Condições Extremas de Temperaturas | 62 |
| 4.1.1.1 | <i>Proteção contra Alta Temperatura</i> | 62 |
| 4.1.1.2 | <i>Proteção contra Baixa Temperatura.....</i> | 63 |
| 4.1.1.3 | <i>Análise e Sugestões do Cenário 1</i> | 65 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 4.1.2 | Cenário 2 - Descarregamento com Tensão Abaixo do Limite Especificado | 66 |
| 4.1.2.1 | <i>Análise e Sugestões</i> | 69 |
| 4.1.3 | Cenário 3 - Carregamento com Tensão Acima do Limite Especificado | 69 |
| 4.1.3.1 | <i>Carregamento Tensão Acima do Limite Especificado – Teste 1</i> | 69 |
| 4.1.3.2 | <i>Carregamento Tensão Acima do Limite Especificado – Teste 2</i> | 73 |
| 4.1.3.3 | <i>Análise e Sugestões</i> | 75 |
| 4.1.4 | Cenário 4 – Balanceamento das Células Após o Limite de Tensão Estabelecido ser excedido por uma Célula | 75 |
| 4.1.4.1 | <i>Análise e Sugestões</i> | 78 |
| 4.1.5 | Cenário 5 - Balanceamento das Células Após o Limite de Tensão Mínima Estabelecido ser excedido | 79 |
| 4.1.5.1 | <i>Análise e Sugestões</i> | 82 |
| 4.1.6 | Cenário 6 - Resistência Interna da Célula Elevada | 82 |
| 4.1.6.1 | <i>Análise e Sugestões</i> | 85 |
| 4.2 | CONSIDERAÇÕES SOBRE A VERSATILIDADE DO MODELO | 86 |
| 5 | CONCLUSÃO | 88 |
| 5.1 | ESTUDOS FUTUROS | 89 |
| | REFERÊNCIAS | 90 |

1 INTRODUÇÃO

A indústria automotiva está passando por uma transformação significativa com a ascensão dos Veículos Elétricos (EV – do inglês *Electric Vehicle*). Nos últimos anos, a demanda crescente por soluções de mobilidade sustentável tem impulsionado o desenvolvimento e a adoção dessas tecnologias inovadoras. Este movimento não apenas visa reduzir a dependência de combustíveis fósseis, mas também mitigar os impactos ambientais e melhorar a qualidade do ar, contribuindo para a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e para a luta global contra as mudanças climáticas [1].

Os veículos elétricos representam não apenas uma alternativa viável aos veículos tradicionais com motores de combustão interna [2-3], mas também uma promessa de transformação nos padrões de mobilidade urbana e interurbana. Com tecnologias avançadas de baterias, esses veículos oferecem desempenho e eficiência comparáveis aos veículos tradicionais. Além disso, reduzem significativamente a pegada de carbono ao longo de seu ciclo de vida [4].

O desenvolvimento contínuo de infraestruturas de carregamentos, sistemas de armazenamento de energia confiáveis, junto com sistemas de gerenciamento de bateria (BMS – do inglês *Battery Management System*) eficazes, desempenha um papel crucial na ampliação da aceitação e adoção dos EVs. Essas tecnologias desempenham papéis específicos que são fundamentais para superar os desafios e incentivar a transição para uma mobilidade elétrica sustentável.

Este trabalho visa contribuir significativamente para a compreensão das tecnologias de veículos elétricos, oferecendo um estudo abrangente do estado da arte das tecnologias relacionadas, incluindo baterias, carregadores e sistemas de gerenciamento de bateria. Além disso, busca-se testar e analisar um BMS em um ambiente de *Hardware in the Loop* (HIL) para investigar suas funções como: otimização de desempenho, garantia da segurança das células em situações extremas, e buscar aumentar a vida útil das células de bateria, além das suas limitações e potenciais melhorias futuras.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho concentra-se no estudo abrangente das tecnologias dos veículos elétricos, tipos de baterias, carregadores e sistemas de

gerenciamento de baterias, com foco na análise de um BMS em um ambiente de *hardware in the loop* virtual.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para detalhar o alcance do objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Realizar um estudo abrangente sobre veículos elétricos, incluindo seus modelos, tipos de baterias e sistemas de carregamento;
- Investigar as principais funções dos sistemas de gerenciamento de baterias;
- Testar um BMS utilizando um ambiente de *hardware in the loop* virtual para simulação;
- Analisar os resultados obtidos dos cenários testados no BMS, avaliando seu desempenho e eficiência.

1.3 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

O presente Trabalho de Conclusão de Curso está organizado em cinco capítulos, conforme detalhado a seguir: o Capítulo 2 concentra-se na classificação e nas características dos veículos elétricos, abordando os diferentes tipos. Adicionalmente, discute detalhadamente os diversos tipos de baterias utilizadas em EV, bem como explora as tecnologias de carregamento. O Capítulo 3 apresenta a metodologia desenvolvida para testar um Sistema de Gerenciamento de Bateria utilizando a técnica de HIL, descrevendo os componentes e funções do modelo BMS no HIL. No Capítulo 4, são detalhados os testes e análises realizados com cenários de simulação desenvolvidos para avaliar o desempenho do BMS. Por fim, o Capítulo 5 oferece as conclusões do estudo, sintetizando as principais análises e recomendações para futuros trabalhos na área.

2 TECNOLOGIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Neste capítulo, serão explorados os diferentes tipos de veículos elétricos, bem como as tecnologias associadas a baterias, sistemas de carregamento e gerenciamento de bateria. Este estudo abordará suas funcionalidades, métodos de medição e impactos relevantes. É importante destacar que este trabalho delimita seu escopo aos aspectos elétricos e eletrônicos pertinentes para a análise e desenvolvimento dos sistemas mencionados. Tecnologias mecânicas, estruturais e outros elementos físicos não são considerados.

Até o momento, o progresso alcançado no campo dos motores de combustão interna representa o auge da tecnologia automobilística. No mundo contemporâneo, o avanço nos veículos motorizados tem atendido às necessidades fundamentais de uma era social e étnica emergente, facilitando o transporte de bens e pessoas. No entanto, diversos fatores têm levado a sociedade a reconsiderar os recursos energéticos utilizados [3].

Atualmente, diante das crescentes preocupações com o aquecimento global e a busca por um mercado global mais sustentável, observa-se um aumento significativo no interesse por tecnologias energéticas alternativas e limpas. Este interesse é amplamente motivado pela necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, promovendo assim um impacto ambiental mais positivo e contribuindo para a sustentabilidade a longo prazo [1].

A crescente popularidade dos veículos elétricos representa uma resposta aos desafios ambientais atuais. Os avanços nas baterias, carregadores e no gerenciamento de energia são fundamentais nessa transformação, impulsionados por políticas governamentais que promovem a adoção de tecnologias de baixo carbono [2].

2.1 CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os veículos elétricos são compostos por um ou mais motores elétricos e uma bateria de alta tensão com sistema de carregamento. Eles podem ser auxiliados completamente por energia elétrica ou por um motor de combustão interna (ICE - *Internal Combustion Engine*), dependendo do tipo de veículo elétrico.

2.1.1 Veículos Elétricos a Bateria - BEV

Os veículos elétricos a bateria (BEVs – do inglês *Battery Electric Vehicle*) são movidos exclusivamente por eletricidade, utilizando uma bateria para armazenar a energia necessária para a propulsão [2]. Esses veículos dependem totalmente de motores elétricos alimentados pela bateria, o que elimina a necessidade de um motor de combustão interna. Os BEVs são carregados por meio de conexão à rede elétrica ou outras fontes elétricas e utilizam a frenagem regenerativa para recuperar energia durante a desaceleração, convertendo-a em eletricidade armazenada na bateria [1].

A principal vantagem dos BEVs é que produzem zero emissões de gases de escapamento, contribuindo significativamente para a redução da poluição do ar. Além disso, os BEVs tendem a ter menores custos de manutenção devido à ausência de componentes complexos associados aos motores de combustão [1].

No entanto, os BEVs enfrentam desafios como menor autonomia por carga, a limitação de estações de carregamento públicas e longos períodos de carregamento. Apesar disso, estão sendo desenvolvidas tecnologias de carregamento inteligente e funcionalidades como o *Vehicle-to-Grid* (V2G) [1]. O V2G permite que os BEVs não apenas recebam energia da rede elétrica, mas também devolvam energia armazenada na bateria de volta à rede quando necessário. Isso pode ajudar a equilibrar a demanda e a oferta de eletricidade, melhorar a eficiência energética geral e proporcionar uma fonte adicional de rendimento para os proprietários de BEVs.

2.1.2 Veículos Híbridos Elétricos - HEV

Os veículos híbridos elétricos (HEVs – do inglês *Hybrid Electric Vehicle*) combinam um motor de combustão interna convencional, um motor elétrico e uma bateria para alimentar o veículo usando tanto combustível quanto energia elétrica [2]. A capacidade da bateria é crucial, pois define a autonomia do veículo em modo elétrico, permitindo que o veículo se mova usando apenas a energia armazenada na bateria por curtas distâncias.

O funcionamento dos HEVs é semelhante aos veículos convencionais com ICE, mas com a vantagem de poder operar em modo elétrico em determinadas situações. A bateria dos HEVs, como também no caso dos BEVs, é carregada automaticamente através de frenagem regenerativa, um processo que converte a

energia cinética em energia elétrica durante a desaceleração ou frenagem do veículo [1]. Isso não só melhora a eficiência energética, mas também contribui para a redução do consumo de combustível fóssil e das emissões de poluentes, tornando os HEVs uma opção mais sustentável em comparação com os veículos tradicionais a combustão.

2.1.3 Veículos Híbridos Plug-in - PHEV

Os veículos híbridos *plug-in* (PHEVs – do inglês *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) combinam um motor de combustão interna convencional com um motor elétrico e uma bateria maior, que pode ser recarregada conectando o veículo a uma fonte de eletricidade externa [2]. Essa configuração permite que os PHEVs operem em modo totalmente elétrico por distâncias maiores, que podem variar de 25km a mais de 80km, dependendo do modelo. Os PHEVs possuem motores elétricos mais potentes que os HEVs, permitindo que o veículo funcione exclusivamente com energia elétrica, desligando o ICE quando necessário [1].

Os PHEVs oferecem uma flexibilidade significativa, permitindo que os motoristas aproveitem os benefícios da propulsão elétrica para trajetos curtos e utilizem o ICE para viagens mais longas, eliminando a preocupação com a autonomia limitada dos veículos totalmente elétricos. Além disso, a frenagem regenerativa e a possibilidade de recarregar a bateria via conexão elétrica ajudam a reduzir o consumo de combustível e as emissões de poluentes [1].

2.1.4 Veículos Elétricos de Autonomia Estendida - REEV

Os veículos elétricos de autonomia estendida (REEVs – do inglês *Range-Extended Electric Vehicle*) são essencialmente veículos elétricos equipados com um pequeno motor de combustão interna que atua como gerador [1]. Esse motor é acionado para produzir energia elétrica adicional quando a bateria se esgota, garantindo assim a manutenção da autonomia do veículo, especialmente em viagens longas.

Os REEVs combinam os benefícios dos veículos elétricos, como emissões reduzidas e operação silenciosa, com a segurança adicional de um ICE para evitar a preocupação de ficar sem energia antes de alcançar um ponto de recarga [1]. Isso permite que os motoristas desfrutem de uma experiência de condução

predominantemente elétrica, ao mesmo tempo em que têm a flexibilidade de reabastecer com combustível convencional para estender a autonomia quando necessário.

Embora os REEVs ainda dependam de combustíveis fósseis para o ICE, eles representam um compromisso eficaz entre a eficiência dos veículos elétricos e a praticidade dos veículos híbridos.

2.1.5 Veículos Elétricos de Célula de Combustível - FCEV

Os veículos elétricos de célula de combustível (FCEVs – do inglês *Fuel Cell Electric Vehicle*) utilizam gás hidrogênio como combustível para gerar eletricidade a bordo, que alimenta os motores elétricos [2]. O sistema de propulsão dos FCEVs é semelhante ao dos veículos BEVs, mas, em vez de armazenar eletricidade em uma bateria, eles utilizam uma célula de combustível para converter o hidrogênio em energia elétrica. O reabastecimento de um FCEV é rápido, comparável ao dos veículos a gasolina, e sua autonomia é semelhante à dos veículos ICE [1].

Os FCEVs oferecem várias vantagens, incluindo emissões zero de escapamento, já que a única emissão produzida é água pura. Eles são altamente eficientes em termos energéticos e produzem muito pouco ruído [1].

No entanto, a infraestrutura de reabastecimento de hidrogênio ainda é limitada e o custo de produção e armazenamento do hidrogênio é relativamente alto. Apesar desses desafios, os FCEVs representam uma alternativa promissora para o transporte sustentável, especialmente em aplicações onde a recarga rápida e a longa autonomia são essenciais.

2.2 BATERIAS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS

A demanda em ascensão por veículos elétricos tem desempenhado um papel crucial no impulso à pesquisa e ao desenvolvimento de diversas tecnologias de baterias [3-6]. Cada uma dessas tecnologias apresenta características específicas, projetadas para atender as diferentes necessidades do mercado. Além disso, há um esforço contínuo para aumentar a capacidade de armazenamento de energia, reduzir os tempos de carregamento e diminuir os custos.

Nesse contexto, busca-se que os veículos elétricos não apenas consumam energia, mas também atuem como sistemas de armazenamento de energia, interagindo de maneira ativa com a rede elétrica. Durante períodos de baixa

demanda ou alta geração de energia renovável, os EVs podem fornecer eletricidade armazenada de volta à rede, contribuindo para o equilíbrio entre oferta e demanda e promovendo a estabilidade do sistema elétrico. Essa capacidade não apenas maximiza a eficiência do uso de energia, mas também suporta a integração de fontes de energia renovável intermitentes, fortalecendo a sustentabilidade da infraestrutura energética global [7].

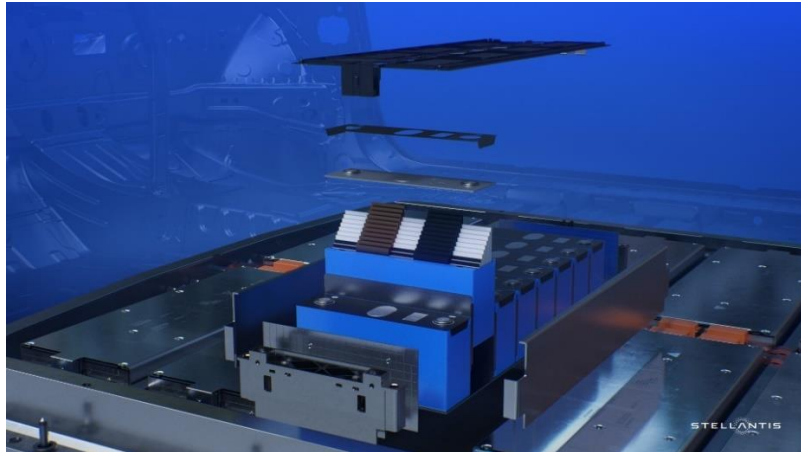
2.2.1 Célula de Bateria, Módulo e Pacote

Conforme estabelecido pela terminologia convencional adotada por desenvolvedores de baterias, a célula é a unidade fundamental de armazenamento de energia em uma bateria. Cada célula é composta por um cátodo, ânodo e eletrólito, que converte energia química em energia elétrica [6].

Por outro lado, um módulo de bateria, ilustrado na Figura 1, é formado pela combinação de células individuais conectadas eletricamente em série e/ou paralelo, podendo alcançar tensões e/ou correntes maiores. Estes módulos desempenham um papel crucial em aplicações como veículos elétricos, onde são utilizados para otimizar o gerenciamento térmico, elétrico e mecânico das células individuais, assegurando eficiência operacional e durabilidade.

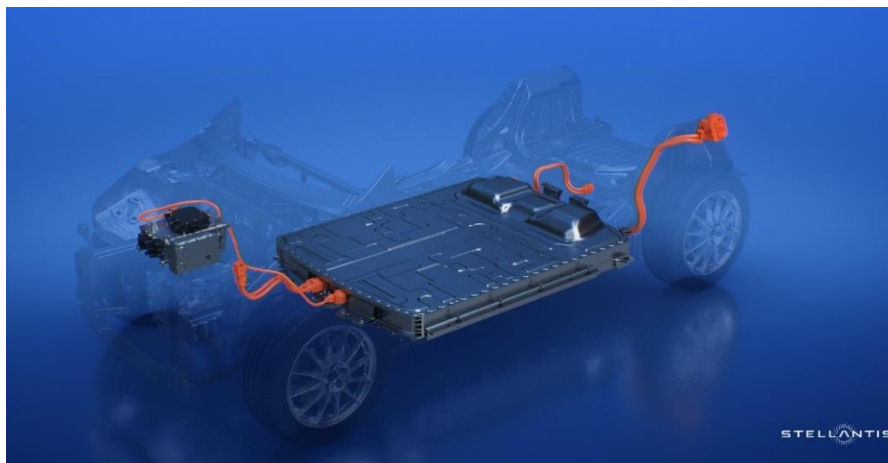
Por fim, um pacote de bateria, ilustrado na Figura 2, é composto por diversos módulos integrados em um sistema completo, dentro de uma estrutura equipada com controles eletrônicos, sistemas de resfriamento e dispositivos de proteção [6]. Esse conjunto representa uma unidade essencial que pode ser instalada e substituída de forma integrada em veículos elétricos e outros dispositivos, garantindo um funcionamento seguro e eficiente do sistema de armazenamento de energia.

Figura 1 - Célula e Módulo da Bateria de uma Plataforma da Stellantis



Fonte: Stellantis [5].

Figura 2 - Pacote de Bateria de uma Plataforma da Stellantis



Fonte: Stellantis [5].

2.2.2 Baterias de Chumbo-Ácido

Durante o ressurgimento do desenvolvimento de veículos elétricos, diversas tentativas foram realizadas para utilizar as primeiras baterias comerciais [2] que dominaram o mercado durante décadas, as baterias de chumbo-ácido. Estas baterias foram favorecidas devido à sua facilidade de fabricação e baixo custo por watt-hora [3], além de serem confiáveis e tolerantes a sobrecargas. Adicionalmente, seu bom desempenho em temperaturas extremas, tanto altas quanto baixas, e sua ampla disponibilidade em um mercado já consolidado, tornaram-nas, inicialmente, uma opção atrativa e viável para aplicação em veículos elétricos.

A bateria de chumbo-ácido é constituída de dois eletrodos, sendo placas alternadas de chumbo esponjoso e outras de dióxido de chumbo em pó e todas

imersas em uma solução de ácido sulfúrico dentro de uma malha de chumbo puro ou ligas de chumbo que são fundamentais para manter os eletrodos em sua posição e permitir a passagem de corrente elétrica durante o processo de carga e descarga da bateria [4].

Embora existam muitas vantagens no uso de baterias de chumbo-ácido, preocupações ambientais, vida útil curta [4], problemas de corrosão, densidade energética baixa, peso elevado, perda de energia armazenada mesmo não estando em uso e dificuldades logísticas são os deméritos significativos para a diminuição da utilização dessas baterias em veículos elétricos nos últimos anos [3]. Apesar disso, elas ainda são comumente encontradas em veículos de modelos mais econômicos e de menor porte, bem como em aplicações específicas para armazenamento secundário de energia como motor de partida, ignição e iluminação já que seu design varia de acordo com a aplicação [2-3].

2.2.3 Bateria de Hidreto Metálico de Níquel

Uma bateria de hidreto metálico de níquel é composta por duas partes fundamentais: o cátodo, composto principalmente de hidróxido de níquel, e o ânodo, que consiste em uma liga capaz de absorver hidrogênio. Durante o processo de descarga, os íons de hidrogênio migram do ânodo para o cátodo, e esse movimento é responsável pela liberação de energia elétrica [4].

Muito utilizada atualmente em HEV e PHEV, possuem alta capacidade de energia, boa tolerância a sobrecarga e descarga excessiva, ampla temperatura operacional e segurança. Ademais, são amigáveis ao meio ambiente por não possuir metais pesados, facilitando inclusive o descarte [2-3].

No entanto, sofrem degradação de desempenho quando armazenadas em temperaturas elevadas, necessitando de um local fresco e de um estado de carga (SOC – do inglês *State of Charge*) de aproximadamente 40%. Além disso, possuem alta taxa de autodescarga, custo elevado, requerem sistemas de controle adicionais para controlar o ambiente e as perdas e exigem alta manutenção, incluindo a necessidade de descarga completa para evitar a formação interna de cristais [4].

2.2.4 Bateria de Íon de Lítio

As baterias de íons de lítio são predominantemente utilizadas em veículos elétricos das arquiteturas BEVs e PHEVs devido às suas notáveis características técnicas. Estas baterias oferecem alta eficiência energética, baixa taxa de autodescarga e excelente desempenho tanto em altas quanto em baixas temperaturas. Além disso, elas proporcionam alto armazenamento de energia e métodos de carregamento simples, o que as torna altamente desejáveis para diversas aplicações comerciais, além do uso em veículos elétricos [6]. Tais características fazem com que as baterias de íons de lítio sejam amplamente preferidas no mercado, reforçando sua importância e destaque crescente na transição para tecnologias mais sustentáveis e eficientes.

As baterias de íons de lítio constituem uma tecnologia avançada e amplamente utilizada no campo das baterias recarregáveis. A sua operação baseia-se na migração de íons de lítio entre os eletrodos durante os ciclos de carga e descarga [3]. Especificamente, durante a descarga, os íons de lítio movem-se do eletrodo negativo para o eletrodo positivo, enquanto no processo de carga o fluxo é inverso. Em contraste com as baterias de lítio metálico, as baterias de íons de lítio utilizam material de carbono no eletrodo negativo e um óxido de metal no eletrodo positivo [6].

Existem diferentes composições de baterias de íons de lítio, cada uma com características específicas. As baterias à base de cobalto, por exemplo, possuem maior energia específica e densidade de energia, embora apresentem custos elevados e altas taxas de descarga. Em contraste, as baterias à base de manganês são mais econômicas, embora ofereçam menor energia específica [3].

A popularização dos veículos elétricos resultará em uma demanda crescente de melhores desempenhos das baterias, com ênfase particular na densidade de energia, rapidez de carregamento e segurança. Esse cenário impulsionará significativamente a busca por novos materiais para baterias de íons de lítio e fomentará o desenvolvimento de tecnologias avançadas além do lítio. Essa evolução é crucial para atender às exigências cada vez maiores do mercado e garantir a sustentabilidade e eficiência das futuras soluções de armazenamento de energia [2].

2.2.5 Comparativo entre as baterias

Escolher o tipo adequado de bateria é crucial no projeto de EVs. Como abordado anteriormente, existem três tipos predominantes de bateria utilizadas: baterias de Chumbo-Ácido, Níquel-Hidreto Metálico e íons de Lítio. A Tabela 1 apresenta um comparativo detalhado entre esses tipos de bateria, enfatizando suas características principais, desempenho e aplicações específicas em veículos elétricos.

Tabela 1 - Comparação entre as baterias

| Especificações | Chumbo-ácido | Hidreto Metálico de Níquel | Íon de Lítio |
|--|--|--|---|
| Ciclo de vida | 200 - 300 | 300 – 600 | 600 - 3000 |
| Densidade de Energia ($W \cdot h \cdot kg^{-1}$) | 30-50 | 60-120 | 100-270 |
| Eficiência de carregamento (%) | 50-95 | 65 | 80-90 |
| Tempo de carregamento rápido | 8-16 horas | 2-4 horas | 3-4 horas |
| Temperatura de carregamento (°C) | -20 a 50 | 0 a 45 | 0 a 45 |
| Temperatura de descarregamento (°C) | -20 a 60 | -20 a 65 | -20 a 60 |
| Prós | - Baixo custo; - Bom desempenho em baixas e altas temperaturas; - Tolerantes a sobrecarga; | - Alta capacidade de energia; - Boa tolerância a sobrecarga e descarga excessiva; - Ampla temperatura operacional; | - Alta densidade energética; - Baixa taxa de autodescarga; - Maior ciclo de vida; - Ampla temperatura operacional; |
| Contras | - Baixa eficiência energética; - Efeito memória; - Vida útil curta; | - Baixa eficiência energética; - Custo elevado; - Alta Manutenção; | - Baixa eficiência energética; - Reciclagem complexa; |
| Manutenção | 3-6 meses | 60-90 dias | Não é necessário |
| Resistência Interna ($m\Omega$) | <100 12V pacote | 200-300 6V pacote | 150-300 7.2V pacote |
| Exemplos em EVs | Chrysler Voyager, Ford Ranger | Toyota Rav4, Honda EV Plus | BMW i3, Tesla Model 3 |

Fonte: a autora, baseado em [2] [3] [4] [6].

Devido à sua densidade de energia e potência superiores em comparação com as baterias de chumbo-ácido e Ni-Cd, as baterias de íons de lítio tornaram-se a escolha principal para uma ampla gama de aplicações. A predominância dessas baterias em veículos elétricos é atribuída a várias características positivas, elas oferecem um ciclo de vida mais longo, utilizam componentes ambientalmente

aceitáveis, não emitem gases perigosos, apresentam alto nível de segurança e são relativamente leves. Além disso, são livres do efeito memória [7].

2.2.6 Futuro das baterias

O desenvolvimento contínuo das baterias de íons de lítio tem como objetivo aprimorar ainda mais seu ciclo de vida, aumentar a segurança tanto em condições normais quanto adversas, e melhorar seu desempenho geral. No entanto, à medida que a demanda por densidade de energia superior para veículos elétricos cresce, os pesquisadores têm explorado sistemas alternativos de armazenamento de energia eletroquímica.

Essas pesquisas buscam identificar novas tecnologias de baterias que possam superar as limitações atuais das baterias de íons de lítio, oferecendo maior capacidade de armazenamento, tempos de carregamento reduzidos e custos menores, enquanto mantêm altos padrões de segurança e sustentabilidade ambiental. Uma opção promissora é a bateria de metal-ar, na qual os ânodos são feitos de metais e os cátodos utilizam oxigênio do ar [7-10]. A capacidade de energia dessas baterias é determinada principalmente pela capacidade do ânodo, que pode ser composto por metais como zinco, alumínio, ferro, magnésio, cálcio e lítio, bem como pelo processo de manuseio e eficiência do cátodo [10].

As baterias de metal-ar têm o potencial de oferecer densidades de energia significativamente maiores em comparação com as tecnologias de baterias atuais. No entanto, elas ainda enfrentam desafios técnicos, especialmente em termos de recarga e durabilidade, que estão sendo abordados por meio de pesquisa contínua, visando tornar viável o uso dessas baterias na mobilidade e em outras aplicações [10].

As baterias de sódio-beta oferecem alta densidade de energia e emergem como uma alternativa viável às tecnologias de bateria convencionais. Até o momento, o desenvolvimento bem-sucedido concentrou-se em dois tipos específicos: sódio-enxofre e sódio-cloreto metálico [7-11].

Essas baterias apresentam potencial significativo devido à abundância e ao baixo custo do sódio, além de suas características favoráveis de desempenho em alta temperatura [11-12]. No entanto, um ponto negativo que ainda está em desenvolvimento é a necessidade de operar a altas temperaturas, o que pode implicar em desafios adicionais em termos de segurança e eficiência energética.

A produção e comercialização de baterias alternativas às de íons de lítio podem aumentar significativamente em breve, com o avanço de tecnologias promissoras. Entre essas, destacam-se as baterias de sódio-íon, que possuem recursos abundantes e uma química semelhante às de íons de lítio, podendo alcançar uma densidade de energia ligeiramente inferior à de lítio [2]. Outra tecnologia emergente é a das baterias de íon de zinco, que ressurgiram nas pesquisas recentes devido à sua densidade de energia aceitável e vantagens intrínsecas em termos de segurança, benefícios ambientais e economia [13]. O principal desafio para essas baterias é a busca por materiais de cátodo adequados para a intercalação de íons de zinco.

Adicionalmente, as baterias de íon de magnésio destacam-se pelo baixo custo, maior segurança e menor impacto ambiental. Consideradas por muitos pesquisadores como a alternativa mais viável às baterias de íons de lítio, oferecem alta energia específica e potência específica [2]. No entanto, apesar de seu potencial, ainda necessitam de mais tempo de pesquisa para superar desafios técnicos e aprimorar a confiabilidade e viabilidade comercial.

2.3 CARREGADORES DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Com o avanço contínuo da tecnologia de baterias, os veículos elétricos estão se popularizando cada vez mais, demandando uma variedade de opções de carregadores para atender às diversas necessidades dos usuários, como tempo de carregamento e potência. Avanços tecnológicos significativos têm melhorado drasticamente a densidade de energia das células usadas em baterias automotivas, embora o aumento dessa densidade possa comprometer a capacidade de armazenamento de energia devido a princípios contraditórios de design.

A recarga de veículos elétricos visa alcançar tempos de recarga comparáveis aos de veículos convencionais à combustão. Embora haja ampla aceitação do conceito de alta capacidade de carga rápida e grande autonomia para veículos totalmente elétricos, enfrentam-se desafios significativos. O carregamento rápido é um dos desafios mais complexos para os veículos elétricos, com pesquisas concentradas em alcançá-lo tanto no nível do mecanismo da bateria quanto no sistema de gerenciamento.

Por outro lado, tempo de carregamento excessivo reduz a praticidade dos veículos elétricos, impactando negativamente a experiência do usuário e diminuindo

a confiança dos consumidores. Além disso, correntes de carregamento elevadas podem aumentar rapidamente a temperatura das baterias, resultando na degradação da capacidade e em uma redução significativa da vida útil.

Esses fatores estão inter-relacionados e podem competir entre si, o que tem motivado estudos para desenvolver estratégias de carregamento adequadas, buscando equilibrar o tempo de carregamento com a durabilidade da bateria.

2.3.1 Abordagens Tradicionais de Carregamento de Bateria

2.3.1.1 Carregador de Corrente Constante - CC

O carregador de corrente constante (CC – do inglês *Constant Current Charging*) é uma solução adotada para acelerar o processo de recarga, mantendo a corrente de carga constante durante todo o processo. Este método é especialmente eficaz em carregadores de alta potência, pois permite que a bateria seja carregada rapidamente. No entanto, essa abordagem requer a implementação de circuitos de controle adicionais para monitorar com precisão o estado de carga da bateria e interromper a recarga assim que a bateria estiver totalmente carregada [7].

A utilização de correntes elevadas pode ocasionar a diminuição da capacidade total da bateria e encurtar sua vida útil, devido ao impacto na distribuição uniforme de íons entre os eletrodos [7]. Além disso, a carga rápida pode causar aquecimento excessivo, aumentando o risco de danos estruturais à bateria e comprometendo a segurança.

2.3.1.2 Carregador de Tensão Constante - CV

O método de carregamento por tensão constante (CV – do inglês *Constant Voltage Charging*) consiste em duas fases principais, inicialmente, a bateria recebe corrente até atingir sua tensão nominal e em seguida, é fornecida a corrente necessária para manter essa tensão constante. Manter essa tensão com precisão é essencial, tensões excessivas podem reduzir a vida útil da bateria, enquanto tensões insuficientes podem levar a um carregamento incompleto [7].

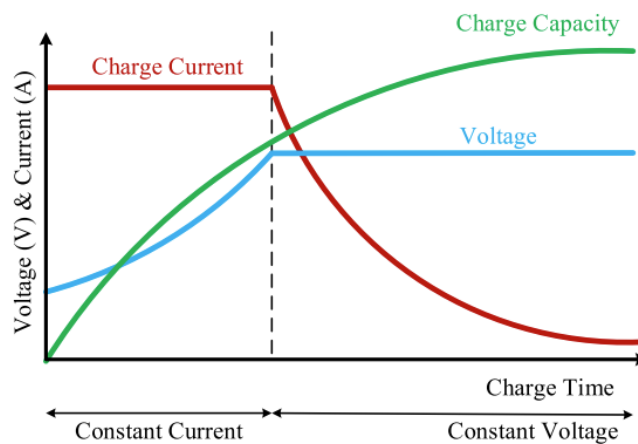
Além disso, rápidas variações na corrente durante o carregamento por CV podem causar aumento na temperatura da bateria, o que também pode impactar negativamente sua performance e longevidade.

2.3.1.3 Carregador Corrente e Tensão Constante - CC-CV

O método CC-CV – do inglês *Constant Current Constant Voltage Charging*, combina aspectos de carga CC e CV, tem se estabelecido como a técnica preferida e amplamente adotada para o carregamento rápido de baterias de íons de lítio. Conforme ilustrado na Figura 3, inicialmente, o carregamento é realizado com uma corrente constante até que a tensão da bateria atinja seu valor nominal. A partir desse ponto, o método muda para o modo de tensão constante, mantendo essa tensão estável enquanto a corrente diminui gradualmente até alcançar o nível mínimo [7].

Este processo é essencial para assegurar um carregamento eficaz e evitar potenciais problemas, embora o modo de CV prolongue significativamente o tempo total de carregamento, chegando a ser aproximadamente três vezes mais longo que o modo CC [14-15]. Isso se deve à necessidade de garantir que a bateria seja carregada de forma completa e segura, minimizando riscos de sobrecarga e degradação prematura.

Figura 3 - Carregador CC-CV



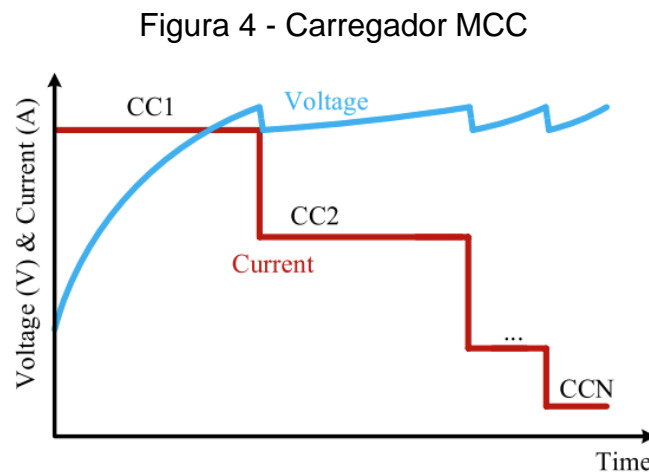
Fonte: R. R. Kumar et al. [7].

2.3.1.4 Carregador de Corrente Constante em Várias Etapas - MCC

O método de Carregamento Constante em Várias Etapas (MCC – do inglês *Multi-Step Constant Current Charging*), foi desenvolvido para reduzir o tempo de carregamento e gerenciar o aumento da temperatura da bateria. Este método consiste em dividir o processo de carregamento em várias etapas, cada uma com uma corrente constante diferente. Entretanto, determinar o valor adequado de

corrente constante para cada etapa é um desafio [14-15]. Para resolver este problema, diversos algoritmos de otimização, como o algoritmo de colônia de formigas, método Taguchi, algoritmo genético, otimização de enxame de partículas, programação dinâmica e otimização baseada em biogeografia multiobjetivo, têm sido empregados para definir os valores de corrente para cada fase do carregamento [7].

Esses algoritmos ajudam a otimizar o processo de carga e minimizar a degradação do eletrólito durante a troca de correntes, melhorando assim a eficiência e prolongando a vida útil da bateria. O método utilizado pelo MCC pode ser visualizado na Figura 4.



Fonte: R. R. Kumar et al. [7].

2.3.1.5 Carregador de Corrente Constante – Tensão Constante em Várias Etapas - MCCCVC

O método de Carregador de Corrente Constante (MCCCVC - do inglês *Multi-Step Constant Current Constant Voltage Charging*), aprimora o carregamento MCC ao adicionar breves intervalos de carga de tensão constante após cada estágio de corrente constante. Parecido com o método tradicional CCCV, inicialmente, a bateria é carregada com uma corrente constante até que a tensão atinja um valor pré-determinado. Quando a tensão alcança o limite, a carga muda para um modo de tensão constante, mantendo a tensão estável até que a corrente diminua para um nível mínimo [15].

Esse método reduz a decomposição do eletrólito e prolonga o ciclo de vida da bateria, controlando melhor a temperatura e distribuindo o estresse químico. O

MCCCV é particularmente vantajoso porque permite ajustes dinâmicos na corrente de carga, adaptando-se às condições da bateria e otimizando o processo de carregamento para diferentes combinações de correntes [14-15]. Isso resulta em uma estratégia de carregamento mais eficiente e segura, que pode prolongar a vida útil da bateria e melhorar seu desempenho geral.

2.3.2 Tecnologias de Carregamento de Veículos Elétricos

Os carregadores de veículos elétricos podem ser classificados em duas categorias principais: carregadores de bordo (OBC) e carregadores externos, além de carregadores unidirecionais e bidirecionais. Os métodos de carregamento variam amplamente e incluem carregamento condutivo, troca de bateria e carregamento sem fio ou indutivo [1-17].

2.3.2.1 Carregamento Condutivo

O carregamento condutivo é o método mais comum para carregar veículos elétricos, onde a bateria do veículo é conectada à rede elétrica por meio de um cabo. Para converter a corrente alternada da rede elétrica em corrente contínua adequada para o carregamento da bateria, é necessário primeiro usar um retificador ou um conversor AC/DC. Uma vez que a corrente AC tenha sido convertida para DC, os conversores *buck* e *boost* são utilizados para ajustar a tensão.

O conversor *buck* reduz a tensão da corrente contínua enquanto aumenta a corrente. Este tipo de conversor é ideal quando a tensão DC da fonte é maior do que a necessária para o carregamento da bateria [16]. Por outro lado, o conversor *boost* aumenta a tensão da corrente contínua enquanto reduz a corrente. Esse tipo de conversor é adequado quando a tensão DC da fonte é menor que a necessária para o carregamento da bateria.

Esse método de carregamento é classificado em três níveis de potência, conforme a norma da Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE) J1772:

- Nível 1: Baixa potência, adequado para uso doméstico, utiliza uma fonte de alimentação AC (corrente alternada) monofásica de 120V e tem a velocidade de carregamento mais lenta (até 1,92kW). Requer cerca de 11-36 horas para carregar uma bateria de 16-50kWh, sendo apropriado para carregamento de longa duração ou noturno [1-17].

- Nível 2: Potência média, comum em estações de carregamento públicas e residenciais, pode fornecer até 19,2Kw, operar com alimentação AC monofásica ou bifásica com tensões de 208V ou 240V. O tempo de carregamento é de 2 a 3 horas para baterias de 30 a 50kWh, sendo 3 a 5 vezes mais rápido que o Nível 1 [1-17].
- Nível 3: Alta potência, utilizado principalmente em estações de carregamento rápido, converte a alimentação trifásica AC da rede elétrica em corrente contínua (DC) para fornecer uma faixa de potência entre 20 kW e 350 kW. Este tipo de carregador fornece tensões DC de aproximadamente 300V a 800V. O tempo de carregamento é aproximadamente 30 minutos para potências de 90kW ou mais [1-17].

É importante destacar que os carregadores de Nível 1 e Nível 2 exercem um impacto menor na rede elétrica durante os horários de pico, enquanto os carregadores de Nível 3 podem sobrecarregar a rede devido ao seu elevado consumo de energia.

Adicionalmente, conforme os padrões da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) 61851-1, os carregadores condutivos são organizados em quatro modos de operação, de Modo 1 a Modo 4, onde cada modo representa diferentes capacidades de segurança e comunicação entre o veículo e a estação de carregamento [1-17]. A Tabela 2 compara os diferentes modos de carregamento mencionados anteriormente.

Tabela 2 - Comparação entre os Diferentes Tipos de Modo de Carregamento

| Modo de Carregamento | Fase | Corrente | Tensão | Potência (Max) | Configuração de Carregamento |
|----------------------|--------------------------------|------------|--------------------|-----------------|------------------------------|
| Modo 1 | AC – 1 ϕ AC – 3 ϕ | 16A | 230 – 250V 480V | 3.8Kw 7.6Kw | |
| Modo 2 | AC – 1 ϕ AC – 3 ϕ | 32A | 230 – 250V 480V | 7.6Kw 15.3Kw | |
| Modo 3 | AC – 1 ϕ AC – 3 ϕ | 32 – 250A | 230 – 250V 480V | 60Kw 120Kw | |
| Modo 4 | DC | 250 – 400A | 600 – 1000V | > 150Kw | |

Fonte: a autora, baseado em [1].

2.3.2.2 *Troca de Baterias e Carregamento Sem Fio*

Alternativamente, a troca de baterias oferece uma solução rápida ao substituir a bateria descarregada por uma completamente carregada, eliminando o tempo de espera para o carregamento tradicional. Esse modelo tem ganhado atenção em várias iniciativas de mobilidade elétrica, permitindo que os usuários permaneçam em movimento sem longas interrupções [17].

O carregamento sem fio, por sua vez, aproveita campos eletromagnéticos variáveis para transferir energia da rede elétrica diretamente para a bateria do veículo. Este método se divide em três categorias distintas: capacitivo, que utiliza campos elétricos para a transferência de energia; indutivo, que depende de campos magnéticos; e indutivo ressonante, uma tecnologia mais avançada de carregamento indutivo que melhora a eficiência e permite maiores distâncias de carregamento [17].

Esses métodos ainda estão em fase de testes e pesquisa para melhorar a viabilidade de aplicação em larga escala. À medida que avançam, é esperado que contribuam significativamente para a evolução das tecnologias de carregamento de veículos elétricos, oferecendo alternativas que tornem o EV cada vez mais próximo de atingir a facilidade de um veículo a combustão.

2.3.2.3 *Carregamento Rápido Consciente - Futuro dos Carregadores de Veículos Elétricos*

O carregamento rápido consciente visa reduzir significativamente os tempos de recarga de veículos elétricos para atingir paridade com os tempos de reabastecimento de veículos convencionais. A indústria e a academia têm como meta alcançar tempos de carregamento rápido inferiores a 15 minutos, cobrindo de 10% a 80% da capacidade da bateria. Contudo, este objetivo ainda permanece desafiador para a tecnologia atual de células de íons de lítio em diversas condições operacionais [18].

Para uma estratégia ideal de carregamento rápido, é crucial minimizar o tempo necessário, ao mesmo tempo que se preserva a longevidade das baterias. Durante o carregamento rápido, é essencial controlar com precisão a corrente, respeitando os limites físicos para evitar condições que possam levar ao envelhecimento não linear da bateria ou, em casos extremos, à fuga térmica [18].

A redução gradual da corrente ao longo do tempo é fundamental para mitigar tanto a degradação da capacidade quanto o aumento da resistência interna,

assegurando assim a longevidade durante ciclos repetitivos de carregamento rápido. No entanto, os mecanismos de envelhecimento das baterias têm origens complexas, que são difíceis de rastrear em aplicações do mundo real. Por exemplo, o desempenho do eletrólito durante o carregamento rápido é um problema bem documentado, mas desafiador de quantificar ao longo do ciclo de vida [18-19].

Para simplificar a determinação do estado de saúde (SOH – do inglês *State of Health*) das baterias, frequentemente realizada pelo sistema de gerenciamento de bateria, é essencial aplicar um ajuste fisicamente motivado do modelo eletroquímico. Esses ajustes são esperados para resultar em um controle mais conservador da corrente de carregamento rápido, contribuindo para prolongar a vida útil das células. Em suma, o contínuo desenvolvimento de algoritmos para carregamento rápido de baterias de íons de lítio é crucial para a evolução e ampla adoção de veículos elétricos e outras aplicações de armazenamento de energia [18-19].

As técnicas avançadas de controle estão sendo cada vez mais exploradas para melhorar a eficiência do carregamento, estender a vida útil da bateria e assegurar a segurança durante as operações de carga rápida, promovendo assim a transição para uma mobilidade elétrica sustentável.

2.4 SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIA - BMS

O sistema de gerenciamento de bateria é um componente essencial para veículos elétricos e outros sistemas de armazenamento de energia. Ele desempenha um papel crucial na regulação do desempenho das células da bateria, monitorando e controlando uma série de parâmetros elétricos e mecânicos [20-21].

O BMS utiliza atuadores, sensores e algoritmos avançados para garantir a segurança, confiabilidade e eficiência da bateria. Suas funções incluem o equilíbrio das células, o controle do estado de carga, a gestão elétrica de carga e descarga, além de aumentar a vida útil da bateria [21-22]. Além disso, o BMS coleta dados em tempo real sobre temperatura, tensão, corrente e outros parâmetros de células individuais, utilizando estratégias e algoritmos para estimar o SOC, estado de operação, SOH e vida útil remanescente da bateria [20-21].

Essas informações são fundamentais para o controle do veículo, gerenciamento de energia e intervenção eficaz em condições adversas. O BMS também fornece dados cruciais à unidade de controle do veículo, responsável pela gestão da distribuição e controle de energia no veículo elétrico. Em resumo, o BMS

não apenas protege a bateria contra danos, mas também melhora seu desempenho, assegurando a eficiência, segurança e a confiabilidade operacional dos veículos elétricos e outros sistemas de armazenamento de energia [22].

2.4.1 Estado de carga – SOC

O estado de carga refere-se à quantidade de energia elétrica armazenada na bateria e é uma medida essencial para o sistema de gerenciamento de baterias, garantindo eficiência e segurança durante o processo de carregamento. Comparável a um medidor de combustível em um veículo, o SOC indica a quantidade de energia restante na bateria, influenciando diretamente aspectos críticos de desempenho, como alcance e economia de combustível. O SOC é normalmente expresso em porcentagem, onde 0% indica uma bateria vazia e 100% uma bateria completamente carregada [7-22].

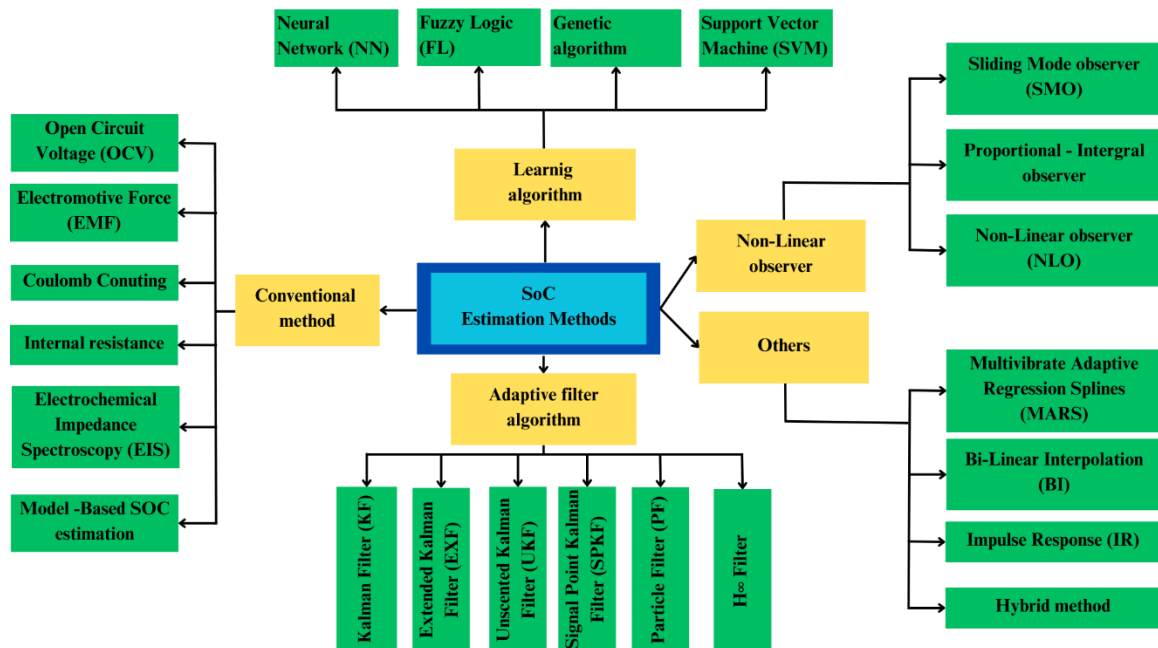
O SOC pode ser calculado como

$$SOC\% = 100 \frac{(Q_0 + Q)}{Q_{max}} \quad (1)$$

onde $Q_0(mAh)$ é a carga inicial da bateria, $Q(mAh)$ é a quantidade de eletricidade fornecida a bateria e $Q_{max}(mAh)$ é a carga máxima que pode ser armazenada [7-22].

A determinação precisa e confiável do SOC é crucial para o gerenciamento de energia do veículo e o projeto ideal dos sistemas de controle. Para fornecer estimativas de SOC em tempo real, diversos métodos têm sido propostos e podem ser classificados em cinco grupos principais: métodos convencionais, algoritmos de filtro adaptativo, algoritmos de aprendizagem, observadores não lineares e técnicas avançadas. A Figura 5 ilustra os métodos de estimar o SOC.

Figura 5 – Diagrama de Possíveis Métodos de Estimar SOC



Fonte: a autora, baseado em [22].

2.4.1.1 Métodos Convencionais

Os métodos convencionais de estimativa de SOC incluem a técnica de Tensão de Circuito Aberto (OCV – do inglês *Open Circuit Voltage*) e a Contagem de Coulomb (CC – do inglês *Coulomb Counting*). A OCV é precisa e fácil de implementar, mas exige um período prolongado para alcançar o equilíbrio, o que a torna inadequada para aplicações que necessitam de estimativas em tempo real. A CC é um método direto que integra a corrente ao longo do tempo para determinar o SOC, sendo simples de implementar, muito utilizado e exigindo poucos cálculos de energia, embora possa acumular erros ao longo do tempo [22].

O método CC é calculado conforme

$$SOC_{(t)} = \int \frac{i_t \cdot \eta_{(SOH,T)}}{Q_{(SOH,T)}} dt \quad (2)$$

onde $Q_{(SOH,T)}$ é o parâmetro de capacidade total, i_t é a corrente da célula, e $\eta_{(SOH,T)}$ é o coeficiente de eficiência de Coulomb.

A Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS – do inglês *Electrochemical Impedance Spectroscopy*) avalia a impedância da bateria em várias frequências para estimar o SOC, utilizando modelos eletroquímicos apropriados e métodos de ajuste de mínimos quadrados não lineares. A EIS oferece precisão

notável, eficiência de custo e operabilidade online. A estimativa baseada em modelos, por sua vez, utiliza modelos de bateria, como eletroquímicos e de circuito equivalente, permitindo estimativas contínuas e precisas, essenciais para sistemas online [22-23].

2.4.1.2 Algoritmo de Filtro Adaptativo - AF

O Filtro de Kalman (KF – do inglês *Kalman Filter*) é amplamente utilizado na estimativa de SOC devido à sua capacidade de autocorreção e previsão precisa do estado atual da bateria com base em medições contínuas, resultando em menor erro estimado de Raiz Quadrada Média (RMS). O Filtro de Kalman Estendido (EKF – do inglês *Extend Kalman Filter*) adapta o KF para sistemas não lineares, utilizando linearização através de derivadas parciais e expansão em série de Taylor, embora possa introduzir erros em sistemas altamente não lineares [22-23].

O Filtro H^∞ (H-infinito) destaca-se por sua robustez frente a incertezas e variações nos modelos de sistemas, não exigindo um conhecimento detalhado sobre o ruído ou medições [22]. Ele avalia as funções do sistema através de uma função polinomial, sendo eficaz na minimização dos efeitos adversos de ruídos e distúrbios.

Comparado ao EKF, o Filtro de Kalman de Ponto Sigma (SPKF – do inglês *Sigmal Point Kalman Filter*) lida melhor com não linearidades, selecionando pontos sigma com a mesma média e covariância do modelo, resultando em precisão aprimorada, menor consumo de memória e menor carga de trabalho computacional [22].

2.4.1.3 Algoritmo de Aprendizagem

Algoritmos de aprendizagem como Redes Neurais Artificiais (ANN – do inglês *Artificial Neural Networks*) estimam o SOC utilizando dados treinados, operando efetivamente em condições não lineares, embora exijam grande quantidade de dados para treinamento e memória significativa. A Lógica Fuzzy, por sua vez, utiliza funções de pertinência e regras baseadas em entradas e saídas para estimar o SOC em modelos não lineares complexos, oferecendo precisão considerável, apesar da necessidade de cálculos complexos e grande capacidade de armazenamento [22].

O Algoritmo Genético (GA – do inglês *Genetic Algorithm*) identifica parâmetros ótimos para melhorar a eficiência do sistema, resultando em alta precisão com erro menor que 1%. O Algoritmo de Máquina de Vetores de Suporte (SVM – do inglês *Support Vector Machine*) transforma dados não lineares em forma linear para análise eficaz, utilizando dados de treinamento para estimar o SOC com precisão, embora possa ser demorado devido à necessidade de ajustes por tentativa e erro [22-23].

2.4.1.4 Observador Não Linear - NLO

Os observadores não lineares, como o Observador de Modo Deslizante (SMO – do inglês *Sliding Mode Observer*), aumentam a resiliência e estabilidade do sistema na presença de incertezas do modelo e interferências ambientais. Incorporando um circuito RC, o SMO regula a taxa de descarga ou carga com alta sofisticação, proporcionando maior precisão na estimativa de SOC [22].

A estimativa de SOC utilizando observadores não lineares (NLO – do inglês *Non Linear Observer*) é eficaz para ciclos de condução e testes de descarga, oferecendo estimativas rápidas, precisas e menos dispendiosas em comparação com métodos como o EKF e o SMO estendido. Os NLOs proporcionam uma alternativa robusta e eficiente para a estimativa de SOC em sistemas dinâmicos [22].

2.4.1.5 Técnicas Avançadas de Estimativa de SOC

Técnicas avançadas de estimativa de SOC, como algoritmos de aprendizado profundo (DLA – do inglês *Deep Learning Algorithms*), utilizam redes neurais recorrentes, convolucionais e memórias de longo e curto prazo (LSTM - do inglês *Long Short-Term Memory*) para melhorar significativamente a estimativa de SOC. Esses métodos utilizam dados de tensão, corrente e temperatura da bateria, destacando-se pela capacidade de autoaprendizagem e desempenho competitivo em várias temperaturas [22].

Metodologias híbridas combinam características de vários algoritmos para obter melhor desempenho e precisão na estimativa de SOC, apesar de exigirem grande capacidade de memória para cálculos matemáticos extensivos. Essas abordagens proporcionam resultados consistentes e operacionais, reduzindo os custos do sistema de gerenciamento de baterias. O uso de modelos não lineares,

filtros H^∞ e técnicas híbridas melhora a precisão e a eficiência da estimativa de SOC, abordando os desafios específicos de cada método [22].

2.4.2 Estado de saúde – SOH

A saúde de uma bateria correlaciona-se diretamente com sua capacidade de desempenho e sua condição geral. Esse parâmetro avalia o quanto a capacidade de armazenamento de energia da bateria diminuiu em comparação com sua capacidade original, ou nominal, quando nova. Essa redução pode ser causada pelo uso contínuo, pelo envelhecimento natural ou por condições ambientais adversas, tais como alta temperatura [7].

O SOH é determinado pela comparação entre a capacidade real atual (Q_c) da bateria e sua capacidade nominal (Q_n) [7], como demonstrado a seguir:

$$SOH(\%) = 100 \frac{Q_c}{Q_n} \quad (3)$$

Além disso, o SOH pode ser avaliado usando a resistência interna ôhmica [22]

$$SOH(\%) = 100 \frac{R_{termi} - R_{cu}}{R_{termi} - R_n} \quad (4)$$

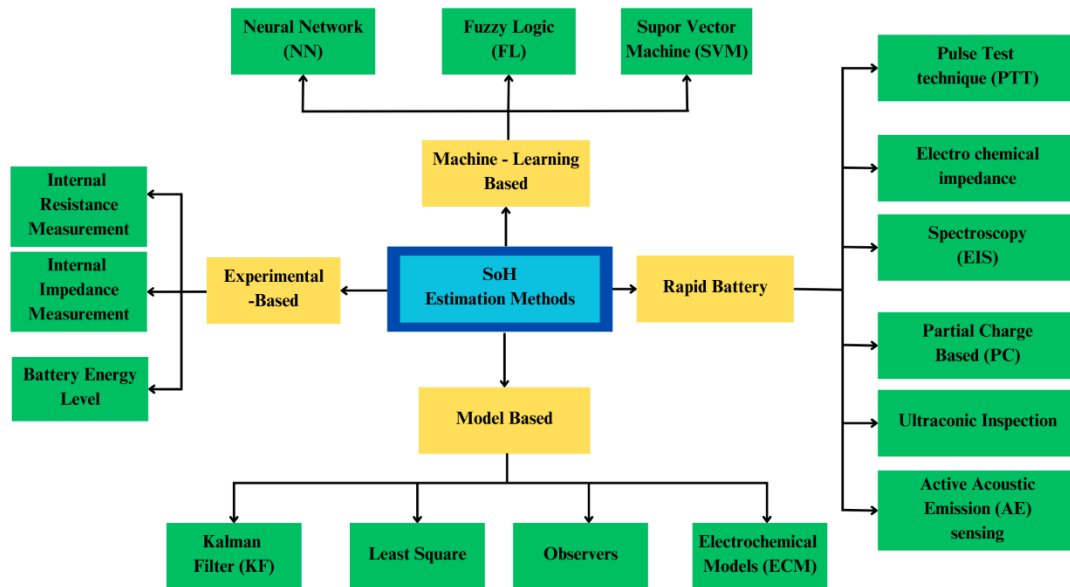
onde, R_{termi} representa a resistência interna ôhmica ao final da vida útil da bateria, R_{cu} refere-se ao estado atual e R_n representa o estado inicial fornecido pelo fabricante.

Um valor de SOH igual a 100% indica que a bateria está em sua condição original, enquanto valores inferiores indicam uma redução na capacidade. O SOH é uma métrica abrangente que pode ser definida de maneiras variadas em diferentes estudos. Essas definições podem incluir diversas métricas quantitativas de desempenho da bateria, como corrente, taxa de autodescarga, temperatura, resistência, tensão e deformação [22-23].

Com a análise do SOH, é possível prever quando a manutenção ou substituição é necessária, assegurando a confiabilidade e o desempenho dos sistemas que dependem delas. Assim, entender e estimar o SOH é essencial para

otimizar o uso e prolongar a vida útil das baterias. A Figura 6 ilustra os Métodos de Estimar o SOH.

Figura 6 – Diagrama de Possíveis Métodos de Estimar SOH



Fonte: a autora, baseado em [22].

2.4.2.1 Métodos Experimentais de Estimação

Os métodos experimentais de estimativa do estado de saúde das baterias utilizam dados e medições precisas para avaliar o envelhecimento delas. Um dos principais indicadores do SOH é a resistência interna da bateria, que determina a queda de tensão quando uma corrente é aplicada. A técnica mais comum para medir a resistência interna é o pulso de corrente, baseado na Lei de Ohm. Esse método envolve a medição da queda de tensão da bateria na saída para uma corrente específica, permitindo calcular a resistência interna [22].

A resistência interna ($R_{battery}$) é determinada pela tensão do circuito aberto (V_{ocv}), a tensão ($V_{battery}$) e a corrente aplicada (I_{pulse}) [22], como

$$R_{battery} = \frac{V_{ocv} - V_{battery}}{I_{pulse}} \quad (5)$$

A medição da resistência interna é ideal para estimativas precisas em ambientes laboratoriais. Essa resistência aumenta com o tempo de uso, ciclagem repetida, temperaturas extremas, entre outros fatores ambientais e operacionais. Esse aumento indica maior resistência ao fluxo de corrente dentro da bateria,

resultando em maior perda de energia durante a carga e descarga, menor capacidade de corrente disponível e redução na eficiência geral da bateria [22].

Outro método importante para a estimativa do SOH é a medição de impedância interna, que inclui tanto a resistência quanto a reatância da bateria. A Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS – do inglês *Electrochemical Impedance Spectroscopy*) é amplamente utilizada para esse fim. Este método não destrutivo aplica uma corrente alternada senoidal e mede a resposta de tensão, sendo altamente eficaz na identificação do envelhecimento da bateria [7-22].

Além disso, a capacidade de armazenamento de energia de uma bateria diminui com o tempo. Para estimar o SOH, é comum avaliar a capacidade de armazenamento em declínio. Estudos com baterias de íons de lítio, que são carregadas e descarregadas até o fim de sua vida útil, determinam a capacidade de carga baseada na tensão para diferentes níveis de deterioração. Embora este método forneça uma boa estimativa do SOH, ele pode estar mais suscetível a erros.

2.4.2.2 *Métodos Baseados em Modelos*

Os métodos baseados em modelos utilizam indicadores específicos para caracterizar o comportamento e desempenho das baterias. Entre eles, destacam-se as operações matriciais online, como o filtro de Kalman, que é preciso, mas complexo e requer alto esforço computacional, com um erro estimado de $\pm 5\%$ [22].

Adicionalmente, os métodos baseados em mínimos quadrados, também online, são robustos e simples, mas dependem da precisão do modelo selecionado, apresentando um erro semelhante de $\pm 5\%$. Por outro lado, os métodos offline, como os observadores e modelos eletroquímicos, são altamente precisos e robustos, mas exigem controladores de alto desempenho e são custosos, com erros menores de 1% e 2.1%, respectivamente [22].

Essas abordagens são essenciais para identificar e prever o estado de saúde das baterias, cada uma com seus próprios méritos e limitações.

2.4.2.3 *Métodos de Estimativa de SOH Baseados em Machine Learning*

Os métodos de estimativa de SOH baseados em machine learning combinam abordagens experimentais e modelagem. Utilizando dados de

treinamento, medições e modelos durante o processo de aprendizado, esses métodos são capazes de prever o estado de saúde das baterias com maior precisão.

Avanços significativos em métodos orientados a dados, como algoritmos de machine learning, têm melhorado consideravelmente a precisão e o desempenho das estimativas de SOC/SOH. Esses métodos são reconhecidos por sua precisão e robustez, porém são sensíveis à qualidade e quantidade dos dados de treinamento. Além disso, sua implementação prática requer controladores de alto desempenho [22].

Por exemplo, SVMs (do inglês *Support Vector Machines*) são não paramétricos e robustos, mas dependem da qualidade dos dados de treinamento. Métodos como Fuzzy Logic (FL) são aplicáveis a sistemas não lineares, enquanto Redes Neurais (NN - do inglês *Neural Network*) exigem menos dados de treinamento, mas todos requerem um alto desempenho de controle. Os erros estimados variam entre menos de 0,5% para NN e cerca de 9,2% para FL, refletindo suas respectivas capacidades e limitações na estimativa de SOH das baterias [22].

2.4.2.4 Métodos Rápidos de Estimativa de SOH

Métodos rápidos de estimativa de estado de saúde para baterias de veículos elétricos são baseados em parâmetros elétricos e propriedades dos materiais. Estas técnicas podem ser agrupadas em duas categorias principais: a Técnica de Teste de Pulso (PTT – do inglês *Pulse Test Technique*) e a medição do espectro de impedância eletroquímica, além de métodos como inspeção ultrassônica e detecção de Emissão Acústica Ativa (AE – do inglês *Active Acoustic Emission*). Essas metodologias são capazes de operar no nível de célula, bateria, módulo e pacote e estimar rapidamente o SOH das baterias EV, tanto em operação online quanto offline [22].

2.4.3 Balanceamento de Células

Maximizar a capacidade da bateria é, sem dúvida, uma das principais funções oferecidas pelo BMS. Devido as diferenças nas reações químicas e processos de fabricação podem causar inconsistências entre células de bateria, afetando a tensão, estado de carga, impedância, taxa de autodescarga e envelhecimento. Isso resulta em envelhecimento desigual das células, ampliando as

disparidades e levando a um desequilíbrio energético significativo entre as células de um módulo. Esse desequilíbrio pode resultar na degradação do desempenho da bateria, vazamentos, explosões ou incêndios, destacando a importância de equilibrar as células [22-24].

Quando um módulo de bateria contém várias células em série, a corrente que passa por cada célula é a mesma durante o funcionamento. Porém, se uma célula possuir uma capacidade de carga menor em comparação às outras, ela atingirá a carga completa antes das demais. Adicionalmente, durante a descarga, resulta em algumas células mantendo carga enquanto outras se descarregam completamente, levando ao desperdício de energia e à redução da capacidade total do módulo [24-25].

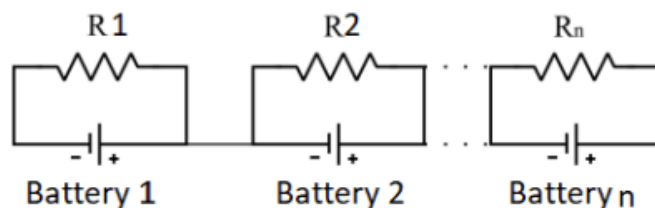
Para solucionar essas discrepâncias e otimizar o desempenho da bateria, são utilizadas técnicas de balanceamento de células. Essas técnicas podem ser classificadas em dois tipos principais: balanceamento passivo e ativo.

2.4.3.1 *Balanceamento Passivo*

O balanceamento passivo é uma abordagem convencional para resolver problemas de células de bateria com diferentes níveis de carga. O sistema busca igualar a carga de todas as células, drenando-as para o mesmo nível, de modo que possam ser recarregadas de maneira uniforme [7].

Existem duas técnicas principais para o balanceamento passivo de células de bateria: o uso de resistores de derivação fixa e resistor de derivação comutado. No método de resistores de derivação fixa, a corrente é continuamente desviada através de resistores conectados em paralelo com cada célula da bateria, como ilustrado na Figura 7, limitando assim as tensões das células. Este método é amplamente utilizado em baterias de chumbo-ácido e níquel.

Figura 7 - Resistores de Derivação Fixa para Balanceamento Passivo

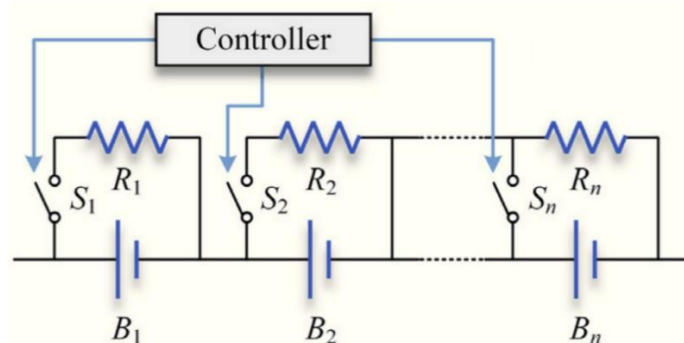


Fonte: P. S. Babu; K. Ilango [24].

O resistor de derivação comutado para balanceamento passivo de células envolve um controlador que liga e desliga interruptores para regular a energia das células superiores através de relés, ilustrado na Figura 8. O sistema opera em duas fases: contínua e de detecção. Na fase contínua, os interruptores operam conforme o sinal de liga/desliga, enquanto na fase de detecção, as tensões das células são monitoradas para determinar qual resistência usar para balancear a carga. Essa técnica é comum em baterias de íons de lítio e sua principal vantagem é o baixo custo e simplicidade [24-25].

Contudo, como na técnica de resistor fixo, a energia excedente das células mais carregadas é dissipada como calor, reduzindo a eficiência energética e a vida útil da bateria. O controlador compara os estados de carga das células e descarrega as células com excesso de SOC através de resistores até que todas estejam balanceadas [24].

Figura 8 - Resistor de Derivação Comutado para Balanceamento Passivo



Fonte: Liu et al. [2].

O balanceamento passivo de células em baterias oferece várias vantagens significativas. Primeiramente, é uma solução economicamente vantajosa, pois utiliza resistores de derivação simples e de baixo custo para equalizar a carga entre as células individuais. Além disso, a simplicidade dessa abordagem facilita o projeto e a implementação de sistemas de bateria, reduzindo a complexidade geral. Outro ponto positivo é a compactação, pois a configuração com resistores de derivação ocupa pouco espaço físico, o que é particularmente benéfico em aplicações onde o espaço é limitado [7-25].

Todavia, o balanceamento passivo de células em baterias apresenta algumas desvantagens significativas. A dissipação de calor é uma preocupação

central, uma vez que os resistores de derivação utilizados para equalizar a carga entre as células convertem parte da energia armazenada em calor, podendo resultar em superaquecimento e requer soluções adequadas de gerenciamento térmico para evitar danos às células da bateria [24].

Além disso, o processo de balanceamento passivo tende a ser mais lento em comparação com métodos ativos, especialmente em baterias de grande porte, o que pode prolongar o tempo necessário para alcançar a equalização completa das células. O balanceamento passivo também não é eficaz durante a descarga da bateria, pois a capacidade do módulo continua limitada pela célula mais fraca [24-25]. Esses aspectos limitam a aplicabilidade do balanceamento passivo em cenários onde a eficiência energética e o tempo de balanceamento são críticos.

2.4.3.2 *Balanceamento Ativo*

O balanceamento ativo surge como uma abordagem mais eficaz para equalizar a carga entre as células de uma bateria durante o carregamento e descarregamento. Este método busca minimizar as perdas de energia ao transferir o excesso de energia diretamente entre as células [2-7].

Este método envolve a transferência contínua de energia entre as células para garantir que todas mantenham níveis de energia equilibrados. Em comparação com o balanceamento passivo, o balanceamento ativo redistribui a energia entre as células, evitando desta forma o desperdício de carga. Além disso, o balanceamento ativo não é limitado pelas propriedades químicas específicas das células, permitindo sua aplicação em diversas tecnologias de bateria [24].

Existem diferentes tipos de técnicas de balanceamento ativo, incluindo o balanceamento baseado em capacitor, indutor e conversor eletrônico de potência. No balanceamento baseado em capacitor, energia é transferida entre células adjacentes usando capacitores para alcançar o equilíbrio. Já no balanceamento baseado em indutor ou transformador, indutores são utilizados para transferir energia entre células ou módulos de células. Por fim, o balanceamento baseado em conversor utiliza conversores DC-DC, como conversor *buck*, conversor *boost*, conversor *buck-boost*, entre outros, para o processo de balanceamento [24].

Entretanto, é importante notar que o balanceamento ativo também apresenta desafios, como custo e complexidade. Os métodos baseados em capacitor requerem o carregamento dos capacitores, o que pode resultar em perdas de

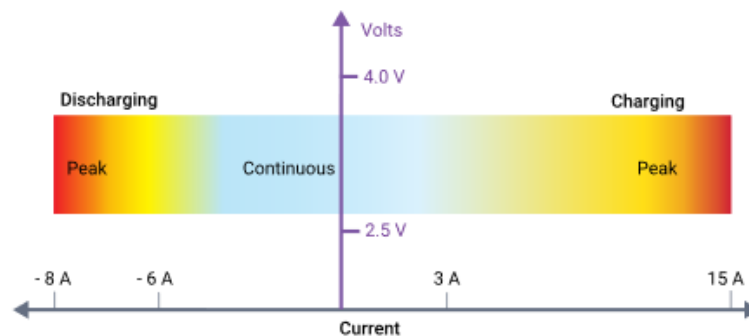
energia e atrasos no processo de balanceamento [25]. O uso de indutores ou transformadores exige a inclusão de capacitores de filtro em cada célula, aumentando o custo geral e as considerações de frequência. Por fim, os conversores eletrônicos de potência oferecem maior controle sobre o processo de balanceamento, mas também são mais complexos e caros de implementar [24].

Por fim, o balanceamento ativo de células oferece uma solução avançada para otimizar o desempenho das baterias, embora suas vantagens venham acompanhadas de desafios técnicos e de custo que devem ser considerados na escolha da técnica mais adequada para cada aplicação.

2.4.4 Gerenciamento de Corrente e Tensão

O sistema de gerenciamento de bateria desempenha um papel crucial no controle da corrente e tensão em veículos elétricos. A Área de Operação Segura (SOA – do inglês *Safe Operating Area*) de qualquer célula de bateria é definida por limites de corrente e tensão, como ilustrado na Figura 9, em que o BMS precisa conhecer para tomar decisões precisas com base na proximidade desses parâmetros [22-26].

Figura 9 - Área de Operação Segura de Corrente e Tensão



Fonte: Chandell [26].

Para proteção contra corrente, o BMS aplica um limite máximo de corrente contínua. Em situações de mudança abrupta, como acelerações súbitas, o BMS responde quase instantaneamente, reduzindo ou interrompendo a corrente, desde que não ultrapasse limites prolongados ou acione fusíveis de segurança devido a curtos-circuitos [22-26].

Além disso, os limites de tensão SOA são rigorosos para maximizar a vida útil da bateria, especialmente devido aos ciclos de carga e descarga. Quando a tensão se aproxima do limite superior, o BMS pode solicitar uma redução gradual da corrente de carga ou interrompê-la completamente. É essencial considerar a histerese de tensão para evitar interrupções indesejadas no controle de desligamento [26].

Por outro lado, quando se aproxima do limite inferior de tensão, o BMS pode solicitar que as principais cargas ativas reduzam suas demandas de corrente. Em um veículo elétrico, isso pode significar a redução do torque do motor de tração para proteger a bateria e garantir a segurança do condutor [26].

O BMS utiliza continuamente sensores dedicados para realizar monitoramento e medições precisas de tensão e corrente nos conjuntos de baterias. Esses sensores captam os sinais elétricos gerados pelas células da bateria, e essas medições são fundamentais para calcular, por exemplo, SOC e SOH.

2.4.5 Gerenciamento Térmico

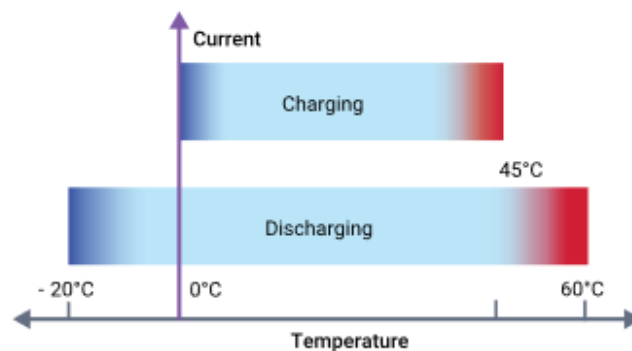
Um BMS é fundamental para regular a temperatura da bateria, coordenando e controlando dispositivos externos de aquecimento e resfriamento. O método de gerenciamento térmico adotado depende de diversos fatores, como o tamanho da bateria, os objetivos de desempenho, os critérios de projeto do BMS e as especificações do produto, incluindo considerações geográficas, como o clima da região onde será utilizado [22-26].

Para o aquecimento, especialmente em climas frios, a energia pode ser extraída de uma fonte de alimentação AC externa ou de uma bateria secundária, ou então um aquecedor elétrico pode ser usado diretamente com energia da própria bateria principal, caso o consumo de corrente seja baixo. No resfriamento, pode-se utilizar técnicas passivas, como o movimento natural do ar durante a condução, otimizando o fluxo com defletores e sensores de velocidade do ar, ou ativas, com ventiladores controlados por temperatura. Além disso, sistemas termo hidráulicos pode circular um refrigerante com uma bomba motorizada para um resfriamento mais eficiente, controlado pelo BMS para manter a temperatura ideal da bateria [22].

Manter a temperatura da bateria dentro de uma faixa operacional ideal, como ilustrado na Figura 10, geralmente entre 20°C e 40°C para baterias de íons de

lítio, é crucial para prevenir degradação prematura e garantir segurança [22]. Temperaturas extremas, tanto altas quanto baixas, podem resultar em problemas como fuga térmica, falhas de desempenho e até risco de combustão ou explosão. Portanto, o BMS monitora e ajusta continuamente a temperatura das células da bateria para garantir uniformidade e segurança operacional.

Figura 10 - Área de Operação Segura de Temperatura



Fonte: Chandel [26].

2.4.6 Desligamento de Emergência e Thermal Runaway

Outra função crucial do BMS é realizar a abertura dos contadores, ou seja, o desligamento de emergência quando as células da bateria operam fora dos parâmetros seguros estabelecidos. Isso inclui desativar a bateria em situações de temperatura excessiva, tensão fora da SOA, sobrecorrente, impacto no veículo ou desconexão do sistema de alta tensão. Essas medidas são essenciais para prevenir danos graves à bateria, ao veículo e ao condutor [21-26].

Um dos fenômenos críticos que o BMS busca evitar é a fuga térmica (*Thermal Runaway*), que pode resultar em um aumento descontrolado da temperatura das células, levando a incêndios ou explosões. A fuga térmica geralmente se inicia com a geração anormal de calor devido a falhas térmicas internas nas células, resultando em aumento de temperatura. Se não controlada, a temperatura pode continuar a subir, levando à inflamação do eletrólito e gases, o que pode terminar em combustão ou explosão [21-22].

Um BMS bem projetado pode detectar rapidamente condições críticas e tomar medidas corretivas, como desativar a bateria ou acionar sistemas de

resfriamento, para evitar danos maiores. Dessa forma, o BMS desempenha um papel essencial na segurança dos veículos elétricos.

2.5 HARDWARE IN THE LOOP

Durante muito tempo, os testes do sistema de controle eram realizados manualmente utilizando *hardware* de diferentes escalas. Nos ciclos de desenvolvimento e validação tradicionais, esses testes geralmente eram realizados apenas durante a fase de verificação e comissionamento, após a criação de um protótipo físico.

Os sistemas físicos e protótipos podem ser substituídos por modelos virtuais, que permitem a realização de simulações detalhadas em um ambiente seguro e flexível. Isso economiza tempo e reduz custos, desde a fase de especificação até manutenção [27]. Com isso, tem-se a simulação de *hardware in the loop* (HIL), uma técnica crucial no desenvolvimento de sistemas complexos, como os encontrados em indústrias como a automotiva, aeroespacial, marítima, entre outras.

O HIL consiste em integrar partes do *hardware* real diretamente no loop de simulação durante o processo de desenvolvimento de sistemas de controle. Isso permite que o sistema de controle receba entradas e envie saídas para o ambiente simulado, aumentando significativamente a fidelidade e a validade das simulações em comparação com modelos matemáticos abstratos [27-28].

No contexto automotivo, por exemplo, antes de implementar novos sistemas de controle em veículos, é essencial verificar seu desempenho em uma simulação que reflita o ambiente real de operação e valide de forma exaustiva antes da aplicação. Isso pode incluir simulações de condições de estrada, comportamento do motor, resposta a emergências e outros cenários. O HIL permite que os engenheiros avaliem como os sistemas de controle se comportam sob diversas condições, garantindo que sejam robustos e seguros antes de serem testados em protótipos físicos ou devidamente aplicados em veículos reais [27-28].

Em resumo, a simulação HIL é uma metodologia robusta que permite o teste e a validação de sistemas de controle em um ambiente virtual controlado, antes de sua implementação real [28-29]. Essa abordagem não apenas aumenta a eficiência do processo de desenvolvimento, mas também aprimora significativamente a qualidade e a confiabilidade dos sistemas, contribuindo para a redução de custos e o aumento da segurança.

2.5.1 Typhoon HIL

O Typhoon HIL é um dos líderes globais em soluções de HIL, focado em eletrônica de potência, micro redes, *e-Mobility* e sistemas de controle. Com mais de uma década de experiência, a empresa se destaca por oferecer soluções completas que integram *hardware* e *software* em uma plataforma única [30].

A plataforma oferece uma abordagem integrada que elimina a necessidade de componentes de terceiros, proporcionando bibliotecas “*plug*” e “*play*” que permitem uma instalação fácil com um simples clique [30]. Isso reduz significativamente o tempo de inatividade necessário para configuração e elimina a necessidade de treinamento extenso, o que simplifica consideravelmente o processo de construção, teste e validação de sistemas complexos.

Além de sua facilidade de uso e abordagem amigável ao usuário, o Typhoon HIL é amplamente adotado por grandes empresas em várias indústrias. Essas organizações utilizam a plataforma para realizar testes em tempo real, replicar milhares de cenários complexos e testar o desempenho de sistemas críticos antes da implementação.

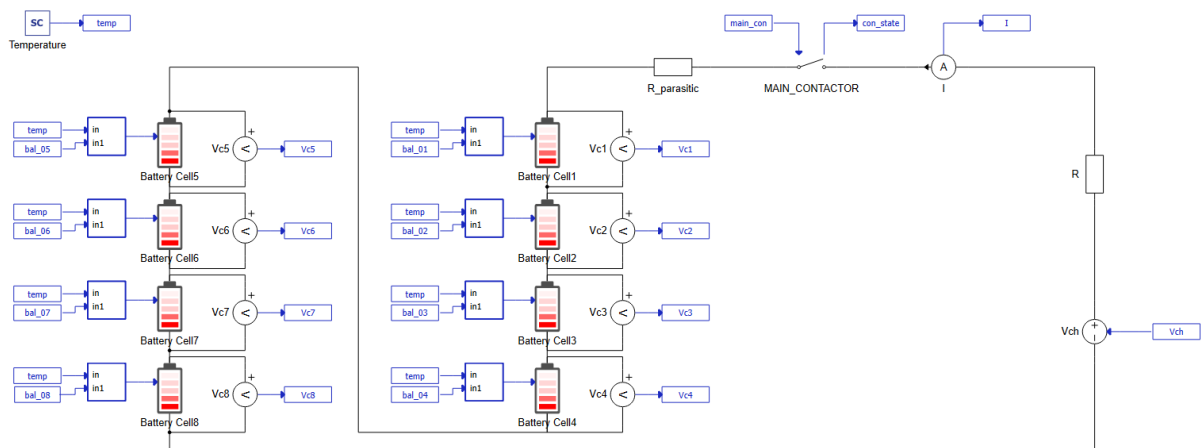
3 VISÃO GERAL DO MODELO DE GERENCIAMENTO DE BATERIA NO HARDWARE IN THE LOOP

O desenvolvimento e a análise de sistemas complexos exigem abordagens eficientes e precisas para assegurar sua funcionalidade e segurança. Nesse contexto, conforme discutido anteriormente, a metodologia *Hardware in the Loop* tem se destacado como uma abordagem robusta para testes e simulações de sistemas em ambientes controlados. Para este estudo, foi utilizado um modelo de BMS fornecido pela biblioteca do Typhoon HIL como referência e base para os testes.

3.1 PACOTE DE BATERIA

O projeto implementado no HIL, consiste em um pacote de baterias de íon de lítio composto por oito células conectadas em série, utilizando uma fonte de tensão controlada e medição de corrente, como ilustrado na Figura 11. Cada célula recebe como entradas a temperatura e o resultado do balanceamento passivo do módulo.

Figura 11 - Pacote de Baterias Conectadas ao Carregador



Fonte: a autora.

Diversas opções de configuração estão disponíveis para cada célula de bateria, incluindo a definição do estado inicial de carga e o ajuste do valor nominal da tensão. No entanto, o estado de saúde das células não é considerado neste modelo específico.

O estado de carga de cada célula é calculado utilizando o método de contagem Coulomb, com um coeficiente de eficiência de Coulomb ajustável, conforme

$$SOC_{(t)} = \int \frac{i_t \cdot \eta_{(SOH,T)}}{Q_{(SOH,T)}} dt \quad (6)$$

onde $Q_{(SOH,T)}$ é o parâmetro de capacidade total, i_t é a corrente da célula, e $\eta_{(SOH,T)}$ é o coeficiente de eficiência Coulomb, aplicado somente durante o carregamento da célula. O SOC dessas células pode variar de 10% a 100%.

O número de células em paralelo também pode ser ajustado; neste estudo, foram utilizadas duas células conectadas em paralelo na sequência das células em série. A tensão de histerese, que se refere à diferença de comportamento da tensão durante a carga e a descarga da bateria, não é considerada neste BMS. No entanto, essa configuração pode ser modificada conforme necessário para incluir o efeito da histerese, se desejado.

Para implementar o balanceamento passivo, um novo sinal é introduzido no sistema de processamento de sinal da célula da bateria, convertendo a entrada original em uma entrada bidimensional, ou seja, um vetor. Este novo sinal é composto por duas partes: a primeira é a medição da temperatura da célula, e a segunda é o controle da chave do circuito de balanceamento. Se o valor da saída desse controle for superior a 0,5 [31], a chave no circuito de balanceamento se fecha, ajustando a corrente usada para determinar os estados e saídas da célula da bateria ao subtrair a corrente que passa pelo resistor de balanceamento da corrente total de entrada.

A tensão nominal da bateria é de 33,2 V. O intervalo de tempo para a execução dos cálculos nos componentes da célula da bateria é de 100 μ s [31], o que determina a frequência com que o sistema recalcula a tensão no terminal da célula, utilizando os estados anteriores da célula e a corrente de entrada como base para esses cálculos.

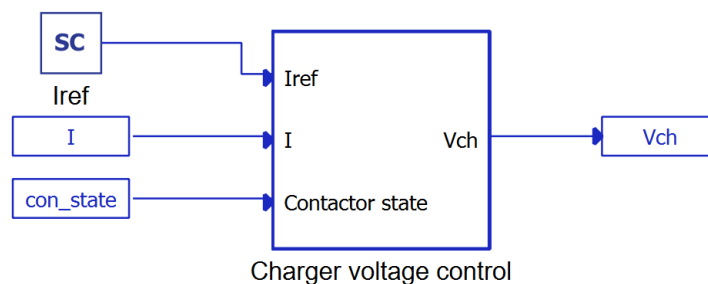
3.2 FONTE DE TENSÃO

O carregador é modelado como uma fonte de tensão regulada, conectada em série com um resistor, como ilustrado na Figura 11. Esse modelo permite que o

carregador atue tanto no processo de carga quanto de descarga da bateria, com a tensão sendo ajustada automaticamente dentro do subsistema, utilizando um controle de corrente em malha fechada [31].

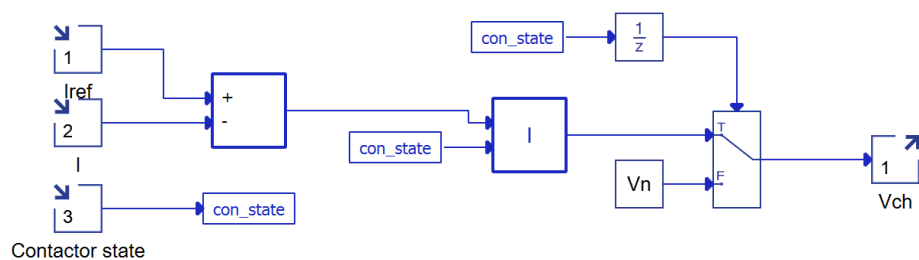
A lógica de controle do carregador é inteiramente desenvolvida com componentes de processamento de sinais, como ilustrado nas Figuras 12 e Figura 13, o que assegura um alto nível de eficiência e precisão no gerenciamento da carga da bateria. Optou-se por adotar os parâmetros pré-estabelecidos do proporcional-integral-derivativo (PID) para a realização dos cenários, mantendo o foco principal nos objetivos estabelecidos, aproveitando as funcionalidades oferecidas pelo sistema implementado no HIL.

Figura 12 - Controle da Fonte de Tensão



Fonte: a autora.

Figura 13 - Controle de Corrente em Malha Fechada



Fonte: a autora.

3.3 BMS E FUNÇÕES

O sistema de gerenciamento de bateria implementado, ilustrado na Figura 14, atende diversas funcionalidades essenciais, como medição, proteção e balanceamento passivo das células. Além disso, incorpora um recurso de segurança que controla o contator principal, desconectando a bateria da carga em situações de emergência.

Com o intuito de proteger a bateria, o BMS compara as tensões medidas em cada célula com faixas de limites predefinidas, juntamente com a temperatura configurada. Caso uma célula apresente valores fora dos limites definidos como aceitáveis, um sinalizador indicando a falha correspondente é acionado e o contator principal que conecta o carregador à bateria é aberto. O contator só é fechado novamente quando os valores se normalizam dentro das faixas aceitáveis, em alguns casos após a intervenção necessária para reiniciar as células com falhas [31].

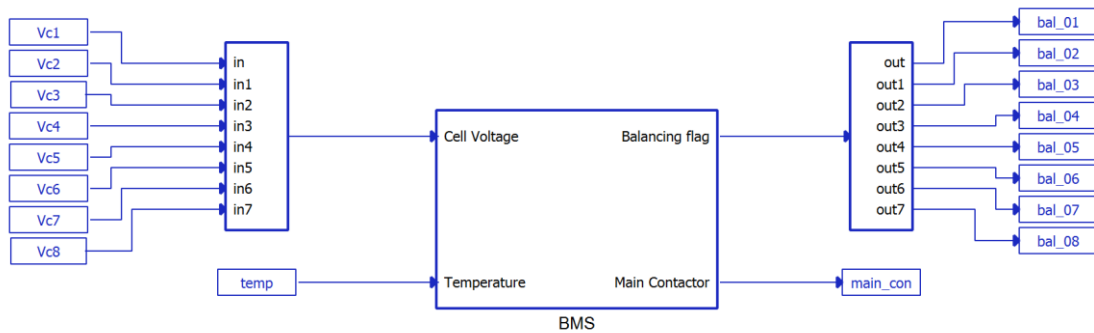
Além disso, o BMS monitora o equilíbrio das células e regula a tensão da bateria como um todo. Para cada célula, o sistema inicia ou interrompe o processo de balanceamento enviando um sinal apropriado à entrada do sistema de balanceamento. Esse balanceamento passivo é realizado através do controle do resistor de balanceamento, que é alternadamente conectado e desconectado por um contator integrado no modelo da célula da bateria [31].

Para realizar o balanceamento passivo de forma eficiente, o sistema do BMS monitora continuamente a tensão de cada célula da bateria e calcula as tensões mínima e máxima permitidas dentro de uma taxa de execução predefinida. Somente é iniciado para uma célula quando sua tensão excede a tensão mínima da célula somada a um limite adicional de balanceamento, ou quando ultrapassa a tensão máxima de balanceamento estabelecida [31]. Nesse momento, o BMS ativa o contador de balanceamento correspondente, que determina por quanto tempo o balanceamento deve continuar.

O processo é interrompido somente quando a tensão medida da célula retorna ao intervalo definido como aceitável ou quando o contador de balanceamento atinge zero. Essa abordagem garante que o balanceamento ocorra apenas quando necessário, visando otimizar a vida útil e o desempenho da bateria.

É importante destacar que, conforme o comportamento típico de outros BMS comerciais, as tensões de cada célula são medidas somente quando o processo de balanceamento não está ativo.

Figura 14 - BMS Implementado no HIL



Fonte: a autora.

3.4 CÓDIGO NA LINGUAGEM C DO BMS

Para modelar algumas funções do BMS, utilizou-se a programação em linguagem C. As principais entradas do subsistema incluem as tensões terminais medidas em cada célula e a temperatura. Além disso, foram adotadas algumas entradas pré-definidas, tais como limite de balanceamento, período de balanceamento pretendido, tensões de balanceamento mínimas e máximas, bem como limites de sobretensão, subtensão, alta temperatura e baixa temperatura. Ademais, comandos para redefinir sinalizadores e conectar o contator principal também podem ser emitidos para o BMS através de entradas do sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*).

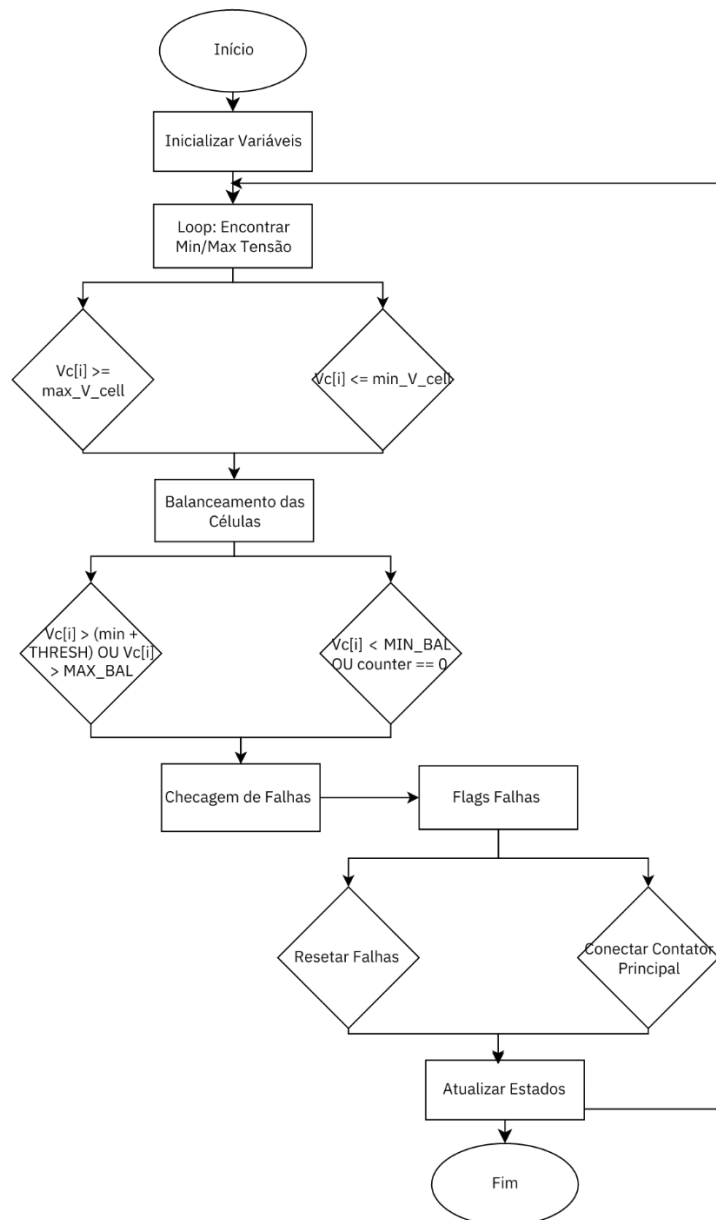
O fluxograma apresentado na Figura 15 ilustra o processo lógico implementado no código em C do BMS. Inicialmente, o algoritmo inicia com a configuração das variáveis principais, como o estado do contator principal e as flags de detecção de erros. Em seguida, ele entra em um primeiro loop para determinar a tensão mínima e máxima entre as células da bateria. Durante essa fase, o algoritmo atualiza dinamicamente os valores da tensão mínima e máxima conforme necessário.

Posteriormente, um segundo loop é executado para realizar o balanceamento das células. Nesse estágio, o algoritmo verifica se a tensão de cada célula atende aos critérios para iniciar o balanceamento, baseado nos limites predefinidos. Caso uma célula exceda os limites ou o tempo de balanceamento se esgote, o processo de balanceamento é interrompido. Após o balanceamento, o algoritmo realiza verificações para identificar as possíveis falhas. Se alguma falha for

detectada, as flags correspondentes são ativadas e o contator principal é desligado para evitar danos ao sistema.

Finalmente, o algoritmo inclui rotinas para redefinir as flags de falha e reconectar o contator principal conforme necessário. Ao término do processo, as variáveis de estado são atualizadas para refletir as mudanças ocorridas, garantindo que as células da bateria sejam monitoradas e balanceadas adequadamente para manter a segurança e a eficiência operacional do sistema como um todo.

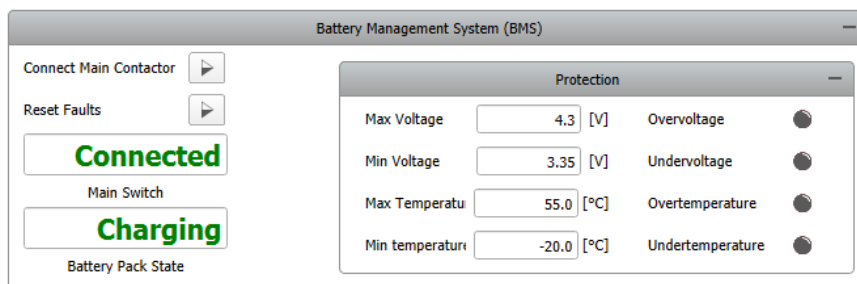
Figura 15 - Fluxograma do Código em C



3.5 AMBIENTE SCADA

O modelo possui um ambiente SCADA para monitorar, realizar e testar diferentes casos e cenários. No display BMS, ilustrado na Figura 16, é possível visualizar o estado do contator principal, o estado da bateria com três possíveis estados: carregando, descarregando e inativo. Além de conter um painel onde é possível ajustar os limites de proteção, que caso atingidos exibe sinalizadores de falha.

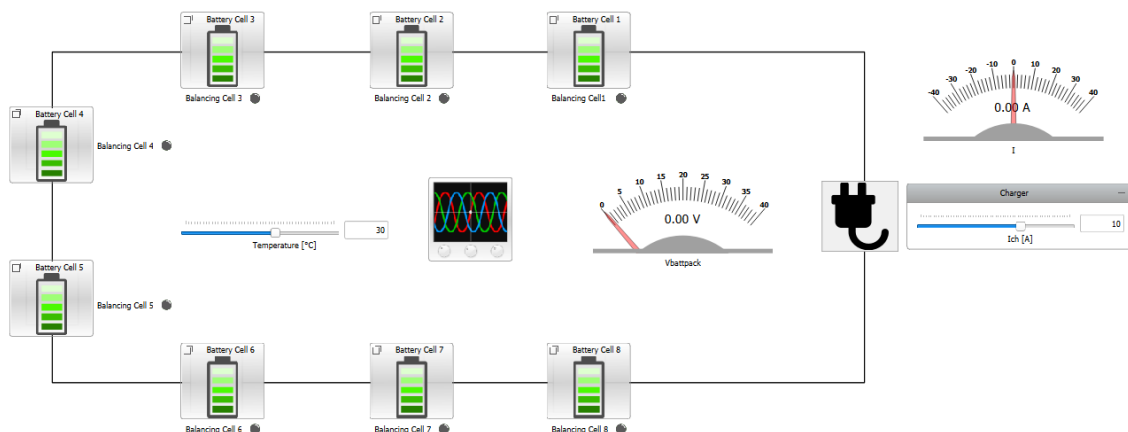
Figura 16 - Painel BMS no SCADA



Fonte: a autora.

Conforme a Figura 17, o sistema permite ajustar a temperatura e a corrente do carregador. Além disso, a interface possibilita a visualização da tensão total da bateria e, através de uma luz indicadora, mostra se as células estão sendo balanceadas. Cada célula possui sub-painéis dedicados que exibem o SOC e a tensão individualmente, proporcionando um monitoramento detalhado e preciso do seu desempenho.

Figura 17 - Painel SCADA



Fonte: a autora.

4 ANÁLISES DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIA NO HARDWARE IN THE LOOP VIRTUAL

Neste capítulo, serão apresentados os testes e análises realizados para diferentes cenários do BMS implementado no ambiente de *HIL* virtual utilizando o software Typhoon HIL.

4.1 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Para conduzir os testes visando analisar o BMS implementado no ambiente do HIL, foram elaborados diversos cenários diferentes a explorar suas funcionalidades. Para isso, inicialmente foi definido os limites do sistema conforme detalhado na Tabela 3.

Tabela 3 - Limites Definidos no Sistema

| Parâmetros de Limite | Limite Definido |
|----------------------|-----------------|
| Temperatura Máxima | 50°C |
| Temperatura Mínima | -20°C |
| Tensão Máxima | 4,3V |
| Tensão Mínima | 3,35V |

Fonte: a autora.

Continuamente, considera-se o estado de 0% para denotar uma descarga completa da bateria, enquanto o estado de 100% indicará uma carga completa. Dentro desses limites, o BMS possui a capacidade de decidir entre carregar ou descarregar a bateria, dependendo das condições operacionais e das necessidades do sistema.

Cada cenário foi projetado para examinar o comportamento do BMS em condições variadas e extremas. Ao final de cada simulação e teste de cenário, foi realizado uma análise para avaliar os resultados obtidos e oferecer sugestões para possíveis melhorias no sistema. Esse processo não apenas confirmou que o BMS funciona corretamente, mas também ofereceu ideias importantes para melhorar a eficiência, segurança e vida útil das células de bateria em sistemas de veículos elétricos.

4.1.1 Cenário 1 - Condições Extremas de Temperaturas

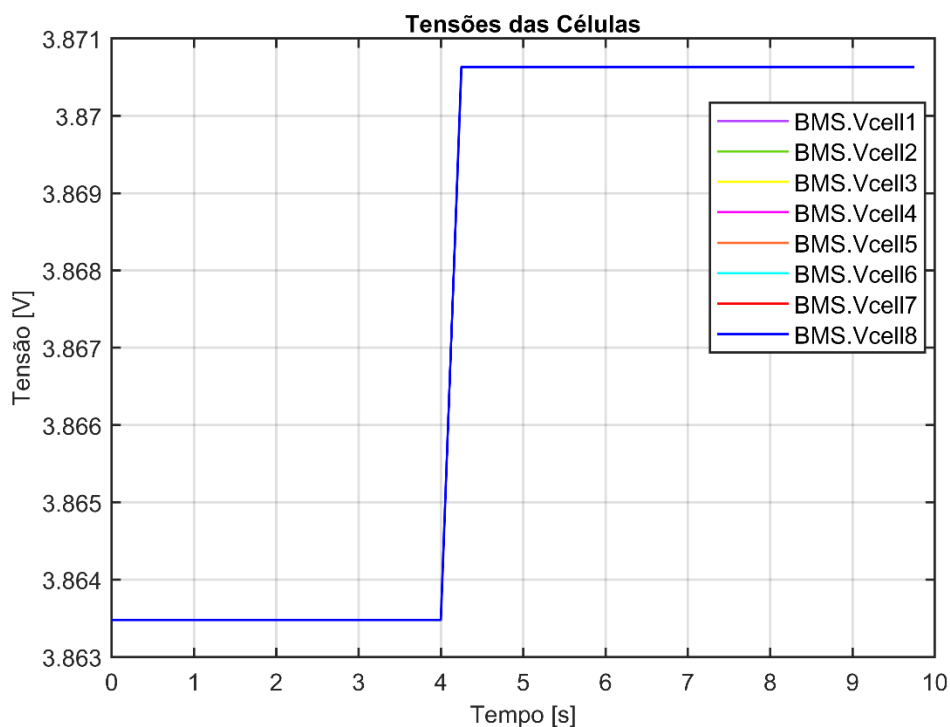
Inicialmente, as células da bateria estão com 50% de SOC e o contator principal está conectado, permitindo a operação normal do sistema. Neste Cenário, testa-se a resposta do BMS a condições extremas de temperaturas.

Importante salientar que todas as células reagem da mesma forma porque possuem os mesmos parâmetros de configuração. Ademais, a temperatura introduzida é na forma de um degrau e definida para ultrapassar os valores de limites de temperatura definidos no sistema, como na Tabela 3.

4.1.1.1 Proteção contra Alta Temperatura

Ao aplicar uma temperatura elevada de 60°C às células da bateria em 4 segundos de operação, embora seja visível o pico de tensão, a variação é pequena sendo 7,15mV conforme demonstrado na Figura 18. Esse fenômeno ocorre devido à relação entre temperatura e a dinâmica interna das células: o aumento da temperatura reduz a resistência interna das células, permitindo que a tensão aumente até que o BMS responda.

Figura 18 - Variação das Tensões das Células da Bateria em Resposta a Condições de Alta Temperatura



Fonte: a autora.

Após a aplicação do degrau de temperatura, o BMS detectou a condição de alta temperatura e levou 0,25 segundos para processar a informação, conforme apresentado na Figura 19, acionar o indicador LED e abrir o contator principal, como apresentado na Figura 20, desconectando assim o pacote de baterias para proteger o sistema.

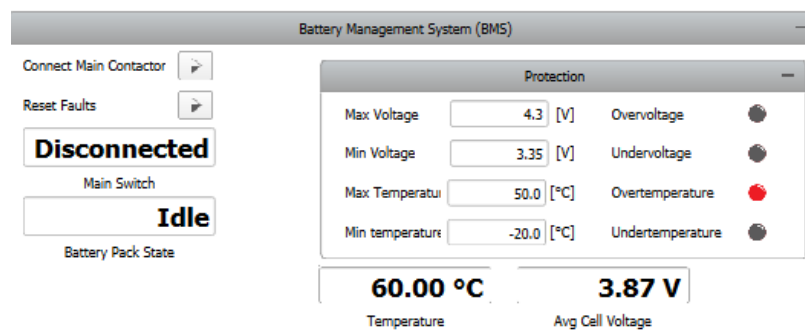
Na Figura 18, pode-se observar que, após a intervenção do BMS, a tensão das células se estabiliza e permanece constante. Isso ocorre porque, com o contator aberto, as células da bateria não estão sendo nem carregadas nem descarregadas.

Figura 19 – Tensões das Células a Alta Temperatura

| Signal Name | Cursor 1 | Cursor 2 | Delta |
|---|-------------|--------------|-------|
| ▼ Viewport 1 | | | |
| 🕒 Time | 4.0s | 4.25s | 0.25 |
| ■ BMS.Vcell1 | 3.863478899 | 3.8706307411 | |
| ■ BMS.Vcell2 | 3.863478899 | 3.8706307411 | |
| ■ BMS.Vcell3 | 3.863478899 | 3.8706307411 | |
| ■ BMS.Vcell4 | 3.863478899 | 3.8706307411 | |
| ■ BMS.Vcell5 | 3.863478899 | 3.8706307411 | |
| ■ BMS.Vcell6 | 3.863478899 | 3.8706307411 | |
| ■ BMS.Vcell7 | 3.863478899 | 3.8706307411 | |
| ■ BMS.Vcell8 | 3.863478899 | 3.8706307411 | |

Fonte: a autora.

Figura 20 – Painel do BMS indicando Alta Temperatura, desconexão do contator, entre outras coisas



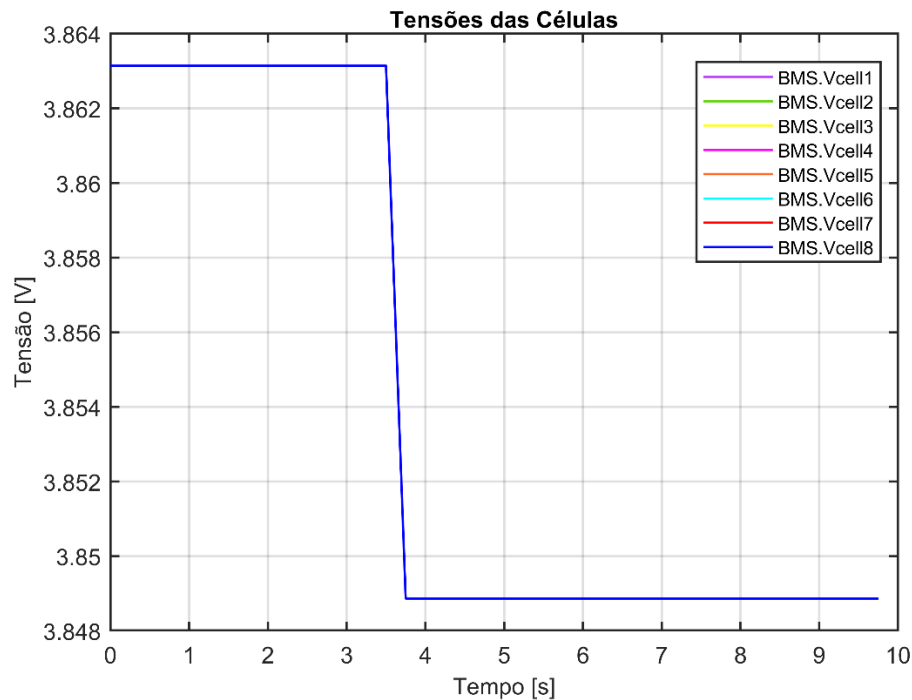
Fonte: a autora.

4.1.1.2 Proteção contra Baixa Temperatura

Já, ao submeter as células da bateria a uma temperatura de -30°C , abaixo do limite mínimo estabelecido, observou-se uma queda na tensão de aproximadamente

14,28mV, conforme demonstrado na Figura 21. Este efeito também é atribuído à relação entre temperatura e a dinâmica interna das células, onde temperaturas mais baixas aumentam a resistência interna das células, diminuindo sua capacidade de manter uma tensão estável sob carga.

Figura 21 - Variação das Tensões das Células da Bateria em Resposta a Condições de Baixa Temperatura



Fonte: a autora.

O BMS levou o mesmo tempo anterior, 0,25 segundos conforme a Figura 22, para detectar a falha, acionar LED indicador e desativar o contator principal. Mais uma vez, após a intervenção do BMS, a tensão das células se estabiliza e permanece constante.

Figura 22 - Tensões das Células a Baixa Temperatura

| Signal Name | Cursor 1 | Cursor 2 | Delta |
|---|--------------|--------------|-------|
| ▼ Viewport 1 | | | |
| 🕒 Time | 3.5s | 3.75s | 0.25 |
| ■ BMS.Vcell1 | 3.8631410599 | 3.8488650322 | |
| ■ BMS.Vcell2 | 3.8631410599 | 3.8488650322 | |
| ■ BMS.Vcell3 | 3.8631410599 | 3.8488650322 | |
| ■ BMS.Vcell4 | 3.8631410599 | 3.8488650322 | |
| ■ BMS.Vcell5 | 3.8631410599 | 3.8488650322 | |
| ■ BMS.Vcell6 | 3.8631410599 | 3.8488650322 | |
| ■ BMS.Vcell7 | 3.8631410599 | 3.8488650322 | |
| ■ BMS.Vcell8 | 3.8631410599 | 3.8488650322 | |

Fonte: a autora.

4.1.1.3 *Análise e Sugestões do Cenário 1*

Com a aplicação tanto de temperatura acima quanto abaixo dos limites, o BMS demonstrou atender à resposta esperada de proteção das células da bateria ao desativar o contator principal. No entanto, o uso de temperatura como um degrau repentino pode não reproduzir com precisão as variações naturais e a gradualidade das temperaturas encontradas em aplicações reais, mas serve para representar uma situação fictícia de pior caso. Para aprimorar a precisão e o realismo, sugere-se implementar uma modelagem térmica mais sofisticada no BMS, capaz de simular variações graduais de temperatura ao longo do tempo. Isso não apenas permitiria uma resposta mais realista do sistema, mas também poderia reduzir danos potenciais causados pela resistência interna das células, evitando aumento ou quedas significativas na tensão e degradação do SOC.

Adicionalmente, é fundamental que o BMS registre eventos de falha como este para posterior análise e diagnóstico. Isso garante que todas as medidas corretivas necessárias sejam tomadas antes de retornar à operação normal. A revisão dos registros de temperatura e tensão é essencial para compreender melhor o impacto do evento no desempenho das células da bateria e no sistema como um todo. Após a temperatura retornar aos níveis seguros, o BMS deve permitir a reconexão do contator principal de maneira controlada e segura, sem a necessidade de reiniciar o sistema, restaurando assim a funcionalidade sem comprometer a integridade das células ou a operação do veículo elétrico.

4.1.2 Cenário 2 - Descarregamento com Tensão Abaixo do Limite Especificado

Neste cenário, parte-se de um estado inicial com SOC de 10% e tensão de 3,52V em cada célula da bateria, submetida a uma temperatura ambiente de 30°C. Essa situação representa a tentativa de um usuário utilizar o veículo elétrico em uma condição com baixo SOC.

O sistema de baterias é então submetido a um processo de descarregamento com uma corrente de 20A. Durante este processo, o BMS monitora continuamente a tensão e o SOC das células.

À medida que a descarga continua, a tensão das células diminui gradualmente. Quando a bateria atinge 5% de SOC e a tensão cai para 3,35V, apresentado na Figura 23, o BMS identifica que a tensão está abaixo do limite especificado para operação segura. Imediatamente, o BMS responde desativando o contator principal e acionando LED indicador de *undervoltage* para proteger as células.

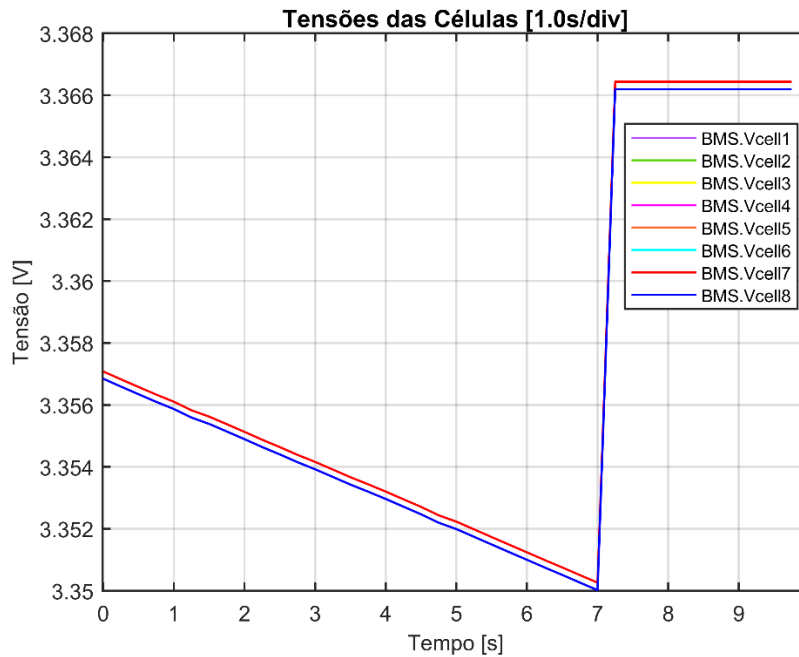
Figura 23 - Tensões das Células a Baixa Tensão durante Descarregamento

| Signal Name | Cursor 1 | Cursor 2 | Delta |
|---|--------------|--------------|-------|
| ▼ Viewport 1 | | | |
| 🕒 Time | 7.0s | 7.25s | 0.25 |
| ■ BMS.Vcell1 | 3.3500180244 | 3.3661942482 | |
| ■ BMS.Vcell2 | 3.3500180244 | 3.3661942482 | |
| ■ BMS.Vcell3 | 3.3500180244 | 3.3661942482 | |
| ■ BMS.Vcell4 | 3.3500180244 | 3.3661942482 | |
| ■ BMS.Vcell5 | 3.3500180244 | 3.3661942482 | |
| ■ BMS.Vcell6 | 3.3500180244 | 3.3661942482 | |
| ■ BMS.Vcell7 | 3.3502602577 | 3.3664364815 | |
| ■ BMS.Vcell8 | 3.3500180244 | 3.3661942482 | |

Fonte: a autora.

Após desconectar do contator, ocorre um pico de tensão, ilustrado na Figura 24, estabilizando as células em aproximadamente 3,366V. Isso ocorre devido à interrupção da corrente de descarga, o que causa uma leve recuperação da tensão das células. Sabe-se que durante o processo de descarga, as células estão sujeitas a uma carga contínua que reduz sua tensão. Porém, quando a descarga é interrompida abruptamente, como no caso da desativação do contator, a corrente de descarga cessa instantaneamente. Esta interrupção permite que a tensão das células se recupere parcialmente, resultando em um leve aumento na tensão.

Figura 24 - Variação das Tensões das Células da Bateria em Resposta a Condições de Baixa Tensão durante Descarregamento

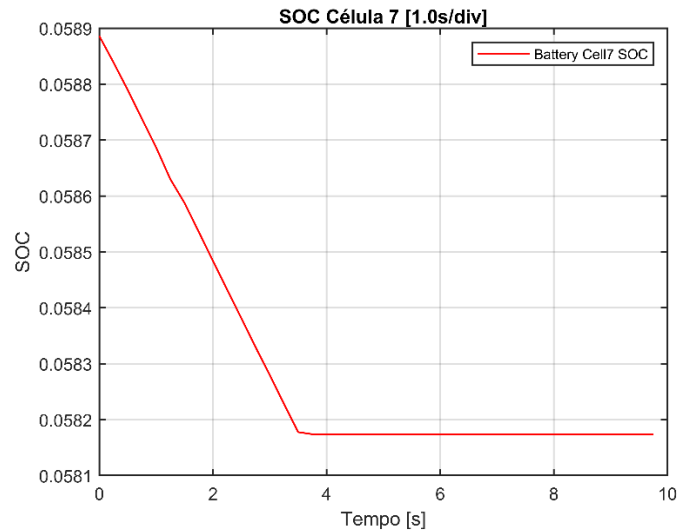


Fonte: a autora.

Entretanto, é importante notar que o SOC permanece no valor aproximado de 5%, conforme Figura 25, refletindo o estado de carga reduzido da bateria. A recuperação da tensão não altera o SOC, pois este é determinado pela quantidade de carga efetivamente armazenada nas células.

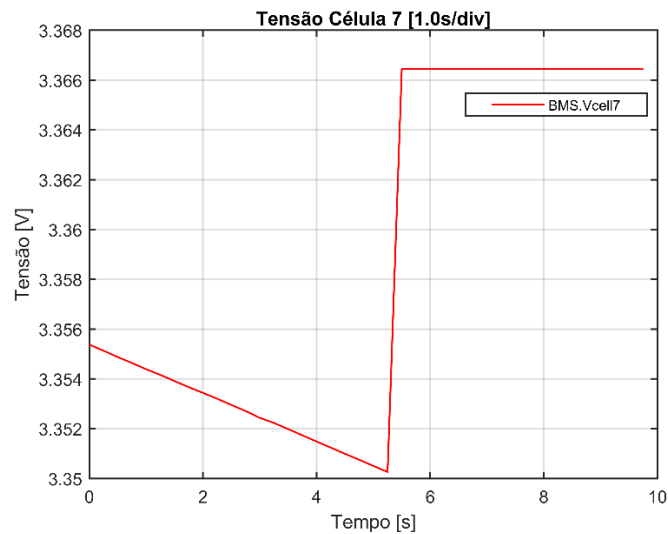
Um ponto significativo a destacar neste cenário é o comportamento específico da Célula 7, ilustrado na Figura 25 e na Figura 26. Devido à sua natureza não linear, a tensão desta célula é ligeiramente superior às outras, com uma diferença mínima de aproximadamente 0,2mV, mas que fica visível no gráfico da Figura 25.

Figura 25 - SOC da Célula 7 Durante o Teste de Descarregamento



Fonte: a autora.

Figura 26 - Tensão da Célula 7 Durante o Teste de Descarregamento



Fonte: a autora.

Os gráficos apresentados indicam que as reações das tensões das células e o estado de carga ocorrem simultaneamente durante o processo de descarga. No entanto, os registros de tempo nos gráficos mostram discrepâncias, apesar de utilizarem as mesmas configurações e ponto de operação. Todos os gráficos estão configurados com uma escala de 1.0s/div, significando que cada divisão no eixo do tempo representa 1 segundo, garantindo uma visualização clara e detalhada das variações ao longo de uma janela de plotagem de 10 segundos. A diferença nos tempos registrados pode ser atribuída à falta de sincronização perfeita entre os

canais de medição e a pequenos atrasos no processamento dos dados. Assim, embora as mudanças nas variáveis monitoradas ocorram no mesmo instante, os tempos registrados apresentam diferenças devido a essas limitações na sincronização dos sistemas de aquisição de dados.

4.1.2.1 Análise e Sugestões

No cenário testado, o BMS demonstrou novamente atender o resultado esperado ao monitorar e proteger as células da bateria contra descargas extremas, respondendo prontamente ao detectar tensões abaixo do limite seguro. Contudo, a ocorrência de um pico de tensão após a desativação abrupta do contator principal indica a necessidade de aprimorar a estratégia de desligamento. Implementar um método de dissipação gradual da corrente antes da desconexão completa pode suavizar essa transição, mitigando o impacto do pico de tensão observado visando preservar melhor as células, além de não resultar em uma parada imediata do veículo.

Além disso, a variação na tensão da Célula 7, embora pequena, é importante pois indica a importância de melhorar o sistema de balanceamento individual das células. A utilização de sensores de tensão mais precisos e algoritmos de balanceamento mais robustos pode minimizar essas diferenças, garantindo uma distribuição mais uniforme da carga entre as células e prolongando a vida útil do sistema.

4.1.3 Cenário 3 - Carregamento com Tensão Acima do Limite Especificado

4.1.3.1 Carregamento Tensão Acima do Limite Especificado – Teste 1

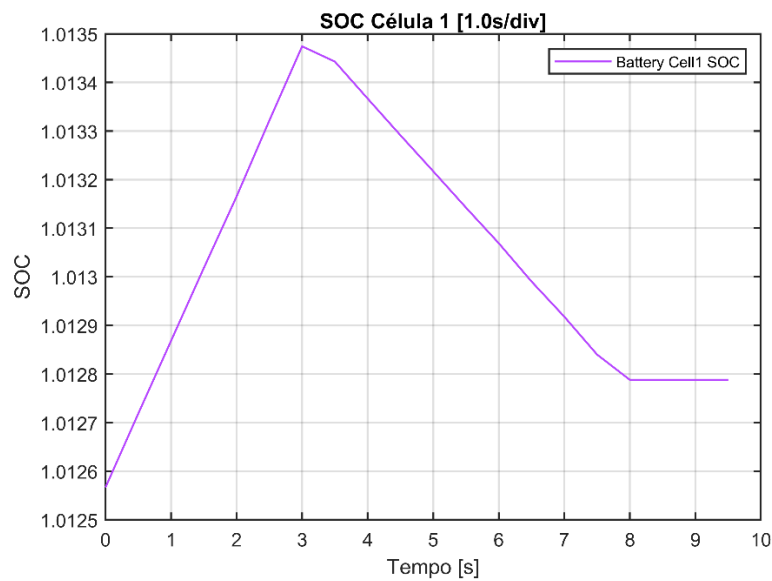
Neste Teste 1, parte-se de um estado inicial com SOC de 95% e tensão de 4,09V em cada célula da bateria, sob uma temperatura ambiente de 25°C. O sistema de baterias é então submetido a um processo de carregamento com uma corrente de 30A. Essa situação representa o comportamento incorreto do usuário querer carregar as baterias do veículo em um estado de carga quase completo de 95%.

À medida que o carregamento continua, a tensão das células aumenta gradualmente. Quando a bateria atinge a tensão de aproximadamente 4,2V, conforme apresentado na Figura 27, o BMS identifica que a tensão está no limite

Fonte: a autora.

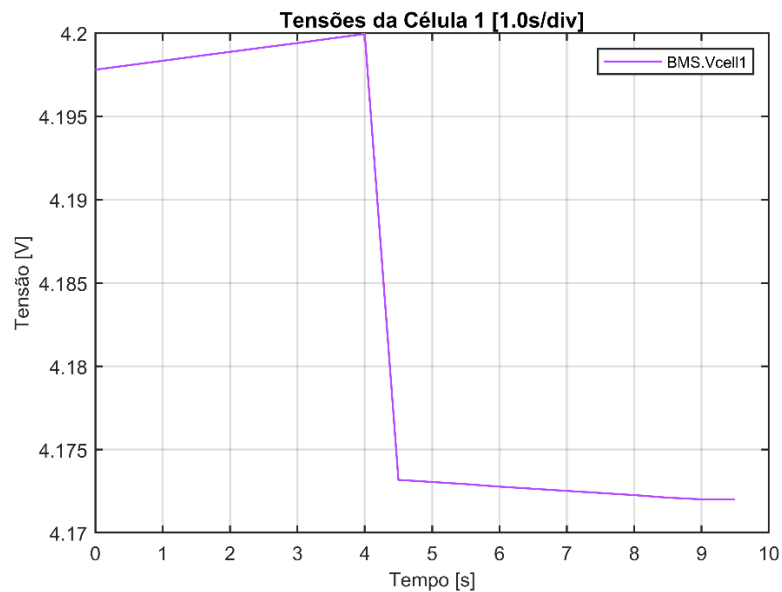
É importante destacar que o SOC ultrapassou os 100% devido à inércia do sistema e ao tempo de resposta do BMS, resultando em um ligeiro excesso de carga antes da interrupção do carregamento, conforme ilustrado na Figura 29 da célula 1 como referência. A queda de tensão, ilustrada na Figura 30, não altera o SOC, pois este é determinado pela quantidade de carga efetivamente armazenada nas células.

Figura 29 - SOC da Célula 1 Durante o Teste de Carregamento



Fonte: a autora.

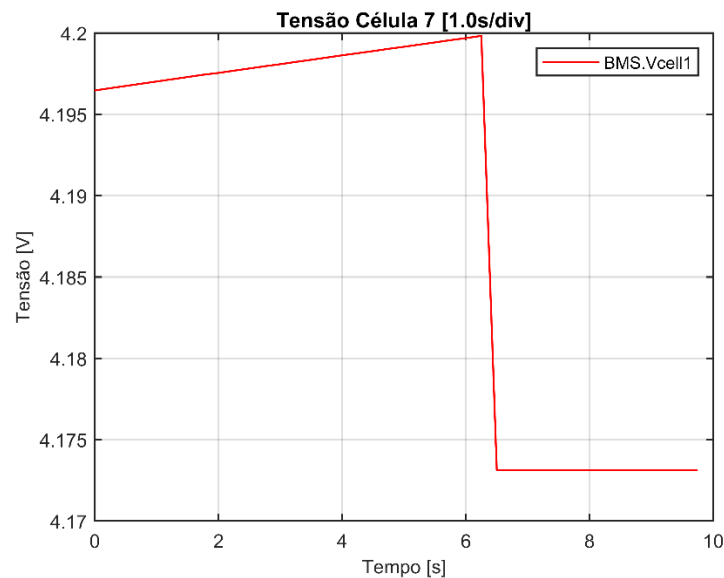
Figura 30 - Tensão da Célula 1 Durante o Teste de Carregamento



Fonte: a autora.

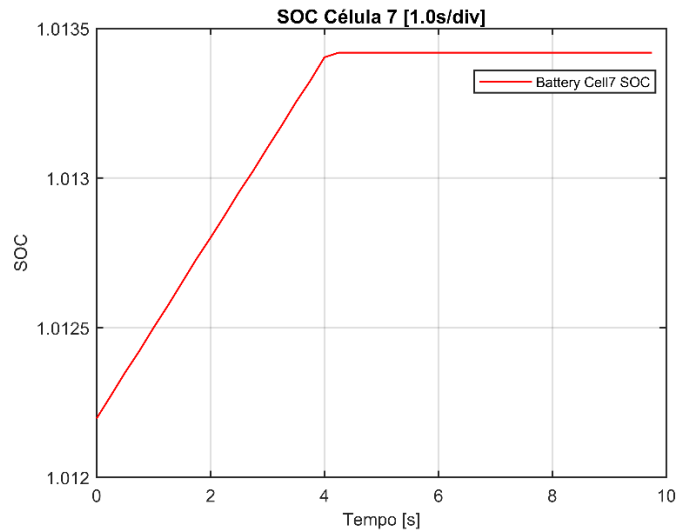
Um ponto significativo a destacar neste cenário é o comportamento específico da Célula 7 novamente, conforme ilustrado na Figura 31. Devido à sua natureza não linear, a tensão desta célula é ligeiramente inferior às demais, apresentando uma diferença mínima de aproximadamente 0,15mV, conforme visível no gráfico da Figura 28. Essa diferença ocorre porque a Célula 7 possui uma resistência interna e uma capacidade de resposta à variação de corrente distintas. Assim, quando o contator do BMS é desativado, a Célula 7 se estabiliza mais rapidamente, como ilustrado na Figura 32 do SOC da Célula 7. Isso se deve ao resultado da menor variação na resposta da Célula 7 à interrupção abrupta da corrente de carregamento, permitindo que sua tensão se estabilize antes das outras células.

Figura 31 - Tensão da Célula 7 Durante o Teste de Carregamento



Fonte: a autora.

Figura 32 - SOC da Célula 7 Durante o Teste de Carregamento



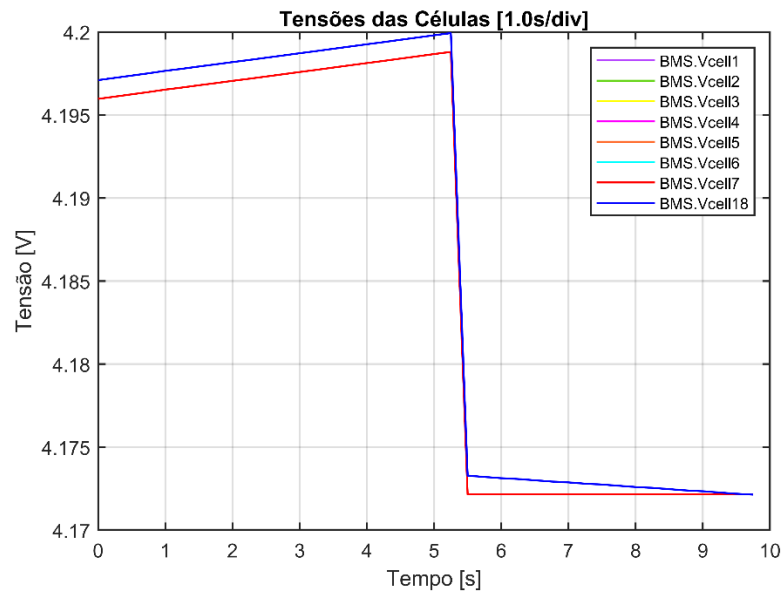
Fonte: a autora.

4.1.3.2 Carregamento Tensão Acima do Limite Especificado – Teste 2

Já, neste teste 2, parte-se de um estado inicial com SOC de 50% e tensão de 3,87V em cada célula da bateria, sob uma temperatura ambiente de 25°C. O sistema de baterias novamente é submetido ao processo de carregamento com uma corrente de 30A. Essa situação reflete o comportamento típico de um usuário que deseja carregar as baterias do veículo quando o estado de carga está em aproximadamente metade da capacidade total, como ocorre em preparativos para viagens de longas distâncias.

Obteve-se resultados muito similares, conforme Figura 33. Após a desconexão do contator, ocorre a queda de tensão e novamente devido à sua natureza não linear, a tensão da Célula 7 é ligeiramente inferior às demais

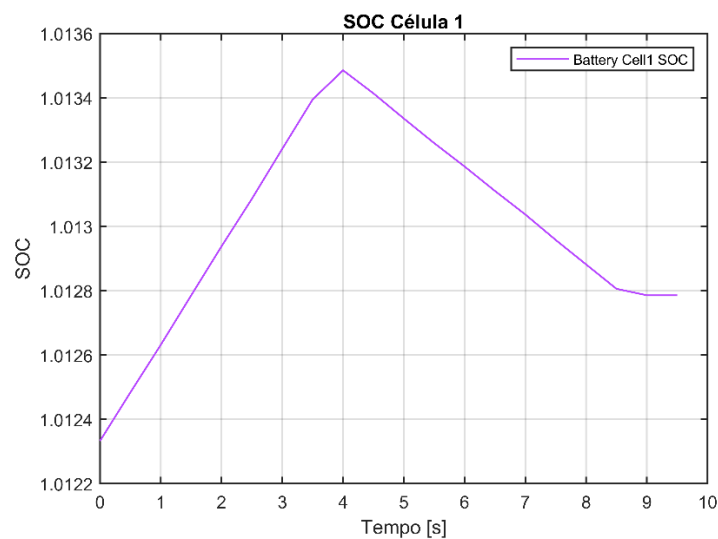
Figura 33 - Variação das Tensões das Células da Bateria em Resposta a Condições de Alta Tensão durante Carregamento



Fonte: a autora.

É importante notar que, em ambos os cenários avaliados, o estado de carga ultrapassou os 100% devido à inércia do sistema e ao tempo de resposta do BMS, resultando em um leve excesso de carga, ilustrado na Figura 34, antes da interrupção do processo de carregamento.

Figura 34 - SOC da Célula 1 Durante o Teste de Carregamento



Fonte: a autora.

4.1.3.3 *Análise e Sugestões*

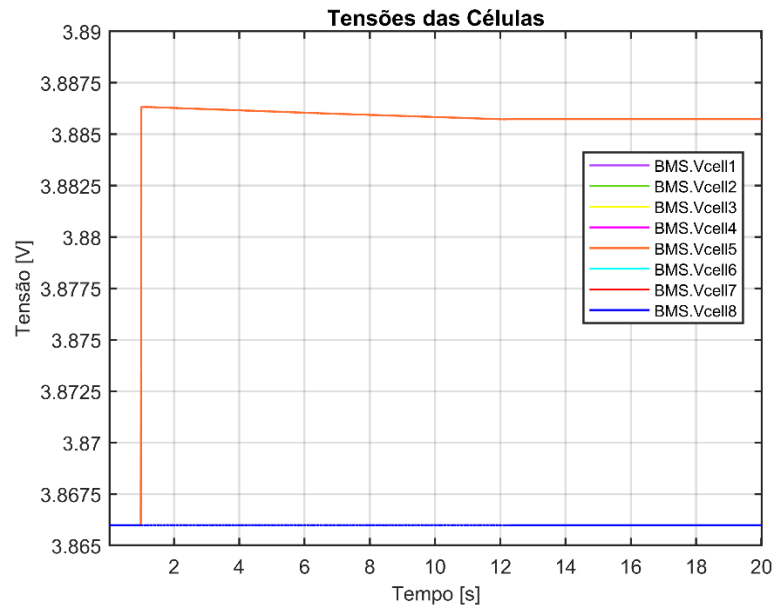
A análise do Cenário 3 revela que, ao atingir a tensão limite definida de 4,2V durante o carregamento, o BMS respondeu adequadamente ao desativar o contator principal, protegendo as células da bateria de sobrecarga. No entanto, foi observado que o SOC ultrapassou os 100% devido à inércia do sistema e ao tempo de resposta do BMS, resultando em um ligeiro excesso de carga antes da interrupção. Para aprimorar a precisão do BMS, sugere-se melhorar a detecção e resposta aos limites de tensão, possivelmente implementando algoritmos de previsão que possam antecipar a aproximação aos limites seguros e reduzir a corrente de carga gradualmente antes de atingir a tensão máxima permitida.

Além disso, a resposta da Célula 7 destaca a necessidade de considerar as características não lineares das células individuais no design do BMS. A Célula 7 se estabilizou mais rapidamente devido à sua resistência interna específica e à capacidade de resposta à variação de corrente. Esta variação sugere que o BMS poderia ter ajustes individuais para cada célula, garantindo uma proteção mais uniforme. A implementação de técnicas avançadas, como o balanceamento ativo que leve em conta essas diferenças, poderia aprimorar o desempenho global e aumentar a durabilidade das baterias.

4.1.4 Cenário 4 – Balanceamento das Células Após o Limite de Tensão Estabelecido ser excedido por uma Célula

No Cenário 4, simula-se a tensão da Célula 5 excedendo o limite de equilíbrio estabelecido, conforme observado na Figura 35. Essa situação emula uma falha eletroquímica da Célula 5.

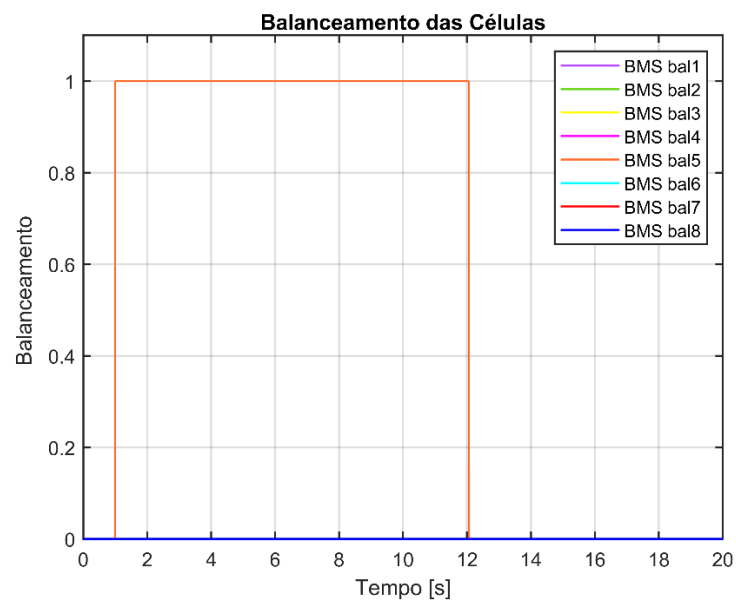
Figura 35 - Variação das Tensões das Células da Bateria Após o Limite de Tensão Estabelecido ser Excedido



Fonte: a autora.

O BMS identifica essa condição e inicia imediatamente o processo de balanceamento específico para a Célula 5, conforme Figura 36. Nesse contexto, 0 indica que o balanceamento está desativado e 1 indica que está ativado.

Figura 36 - Resposta do Sistema ao Balanceamento Após o Limite de Tensão Estabelecido ser Excedido

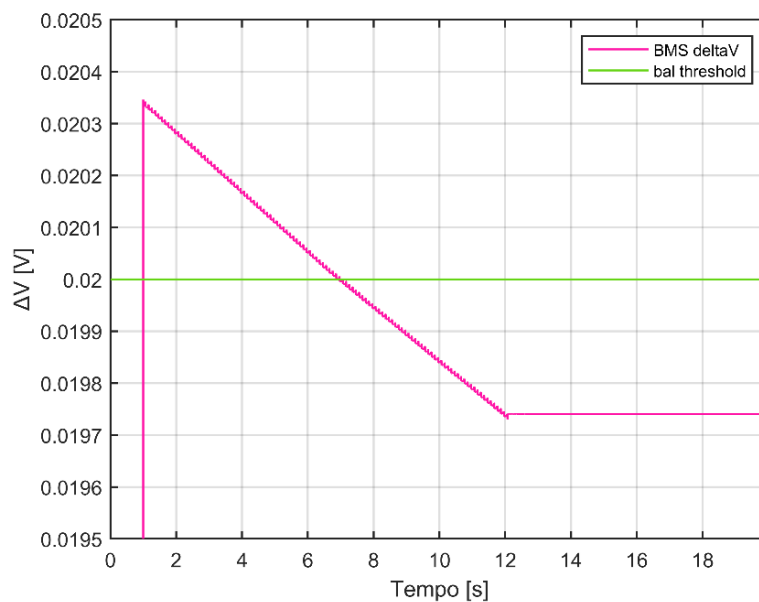


Fonte: a autora.

Durante esse processo de balanceamento passivo por contagem de Coulomb, o BMS direciona uma corrente de equilíbrio da Célula 5 para as células que estão com tensões mais baixas. Esse método permite reduzir gradualmente a tensão da Célula 5, ajustando sua carga elétrica até que todas as células da bateria estejam dentro dos limites seguros de operação. Na Figura 35, é possível visualizar essa redução.

Antes do início do balanceamento, observa-se um aumento repentino no delta V (ΔV) e o limite do balanceamento definido, como apresentados na Figura 37. O ΔV representa a diferença de tensão entre a Célula 5, que apresenta a maior tensão, e as outras células da bateria. Esse aumento indica a disparidade inicial entre a Célula 5 e as demais. Contudo, após o início do balanceamento, observa-se uma diminuição gradual do ΔV .

Figura 37 – Resposta do ΔV ao Balanceamento Após o Limite de Tensão Estabelecido ser excedido



Fonte: a autora.

O processo de balanceamento continua até que o ΔV caia abaixo do limite pré-definido, indicando que as tensões entre as células estão dentro dos níveis seguros estabelecidos. Importante destacar que na simulação, o sistema desliga automaticamente o processo de balanceamento após um atraso de 5 segundos desde o momento em que o ΔV atinge esse limite.

Na Figura 38, observa-se que o BMS dedicou aproximadamente 12 segundos para concluir o balanceamento da célula específica. Após o término do processo, foi identificado que a célula balanceada apresentava uma diferença de aproximadamente 19mV em relação às demais células da bateria.

Figura 38 - Resposta do Sistema ao Balanceamento Após o Limite de Tensão Estabelecido ser excedido

| Signal Name | Cursor 1 | Cursor 2 | Delta |
|-----------------|-------------|-------------|---------|
| ▼ Viewport 1 | | | |
| 🕒 Time | 1.01557s | 12.06727s | 11.0517 |
| 🔴 BMS.Vcell1 | 3.8659875 | 3.865994 | |
| 🟢 BMS.Vcell2 | 3.8659875 | 3.865994 | |
| 🟡 BMS.Vcell3 | 3.8659875 | 3.865994 | |
| 🟠 BMS.Vcell4 | 3.8659875 | 3.865994 | |
| 🟣 BMS.Vcell5 | 3.8863225 | 3.8857248 | |
| 🟢 BMS.Vcell6 | 3.8659875 | 3.865994 | |
| 🔴 BMS.Vcell7 | 3.8659875 | 3.865994 | |
| 🟢 BMS.Vcell8 | 3.8659875 | 3.865994 | |
| ▼ Viewport 2 | | | |
| 🕒 Time | 1.01557s | 12.06727s | 11.0517 |
| 🔴 BMS.bal_01 | 0 | 0 | |
| 🟢 BMS.bal_02 | 0 | 0 | |
| 🟡 BMS.bal_03 | 0 | 0 | |
| 🟠 BMS.bal_04 | 0 | 0 | |
| 🟣 BMS.bal_05 | 1 | 0 | |
| 🟢 BMS.bal_06 | 0 | 0 | |
| 🔴 BMS.bal_07 | 0 | 0 | |
| 🟢 BMS.bal_08 | 0 | 0 | |
| ▼ Viewport 3 | | | |
| 🕒 Time | 1.01557s | 12.06727s | 11.0517 |
| 🔴 BMS.delta V | 0.020334959 | 0.019730568 | |
| 🟢 bal_threshold | 0.02 | 0.02 | |

Fonte: a autora.

4.1.4.1 Análise e Sugestões

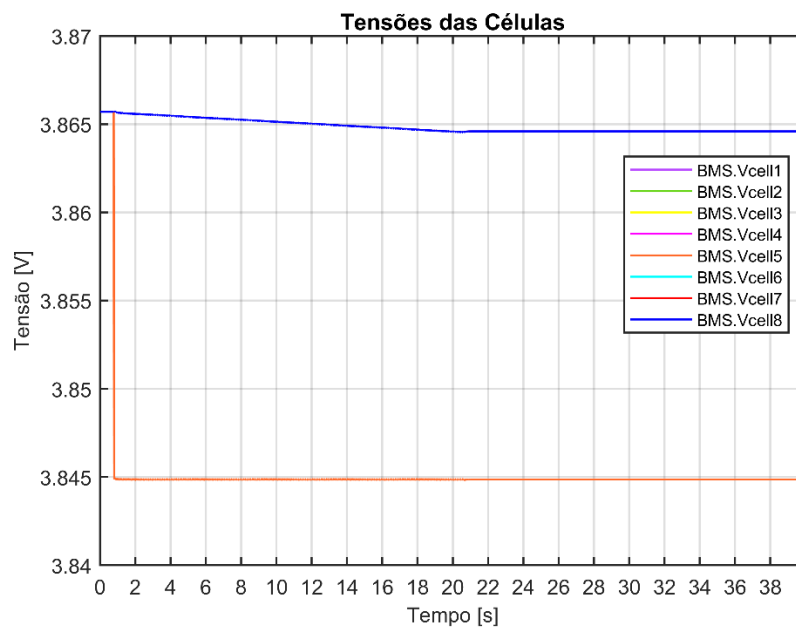
Este cenário destaca a eficácia do BMS em responder a variações de tensão, assegurando a operação segura e eficiente de todas as células da bateria. Após detectar que a Célula 5 excedeu o limite de tensão estabelecido, o BMS concluiu o processo de balanceamento em aproximadamente 12 segundos o que é relativamente aceitável para este BMS implementado.

Embora a diferença de 19mV seja considerada dentro do limite aceitável para operações normais, é importante ressaltar a importância de um balanceamento preciso para garantir a uniformidade na distribuição de carga entre todas as células da bateria. Diferenças prolongadas ou excessivas podem levar a um desgaste desigual das células, reduzindo a capacidade de armazenamento de energia e potencialmente diminuindo a vida útil da bateria.

4.1.5 Cenário 5 - Balanceamento das Células Após o Limite de Tensão Mínima Estabelecido ser excedido

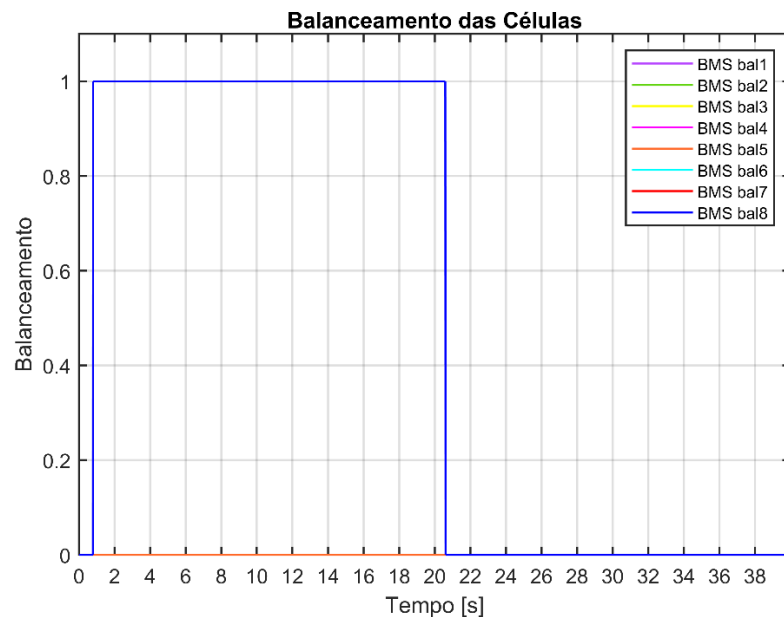
No Cenário 5, simula-se a tensão da Célula 5 diminuindo abaixo do limite de equilíbrio estabelecido, também caracterizado uma situação de falha eletroquímica, conforme observado na Figura 39. O BMS detecta essa condição e gera imediatamente os sinalizadores de balanceamento correspondentes para todas as células, exceto a Célula 5, como ilustrado na Figura 40. Neste caso, o valor 0 significa que o balanceamento está desligado, enquanto o valor 1 indica que o balanceamento está ligado.

Figura 39 - Variação das Tensões das Células da Bateria Após o Limite de Tensão Mínima Estabelecido ser excedido



Fonte: a autora.

Figura 40 - Resposta do Sistema ao Balanceamento Após o Limite de Tensão Mínima Estabelecido ser excedido



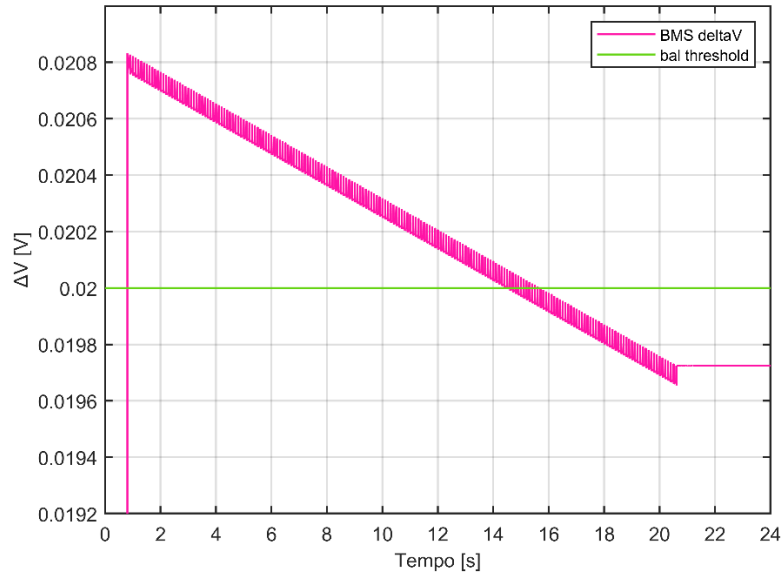
Fonte: a autora.

Durante o processo de balanceamento, o BMS identifica que a tensão da Célula 5 está consistentemente abaixo das outras células, mantendo-se em torno de 3.84V, enquanto as tensões das demais células estão ligeiramente acima de 3.86V. Para equilibrar as tensões, o BMS descarrega as células com tensões mais altas. Essa descarga controlada reduz as tensões dessas células até que todas as células estejam próximas da mesma tensão.

Conforme a Figura 39, inicialmente, as células com tensões mais altas começam a ser descarregadas pelo BMS, resultando numa ligeira diminuição em suas tensões ao longo do tempo. Além disso, antes do início do processo de balanceamento é possível observar um aumento repentino no ΔV , ilustrado na Figura 41. No entanto, ocorre uma redução nas tensões de todas as células, com exceção da Célula 5, acompanhada por uma diminuição gradual do ΔV .

Esse comportamento indica que o BMS está funcionando corretamente, redistribuindo a carga elétrica de forma eficiente, garantindo que todas as células da bateria alcancem tensões similares e fiquem dentro dos limites seguros de operação. Novamente, o processo de balanceamento continua até que o ΔV caia novamente abaixo do limite pré-definido.

Figura 41 - Resposta do ΔV ao Balanceamento Após o Limite de Tensão Mínima Estabelecido ser excedido



Fonte: a autora.

Na Figura 42, observa-se que o BMS levou em média 19,81 segundos para concluir o balanceamento das células. Após o término do processo, ilustrado na Figura 43, verificou-se que todas as células apresentaram uma redução mínima de tensão.

Figura 42 – Tempo durante o Balanceamento

Viewport 2

| 🕒 Time | 0.80362s | 20.61597s | 19.81235 |
|--------------|----------|-----------|----------|
| 🔴 BMS.bal_01 | 1 | 0 | |
| 🟢 BMS.bal_02 | 1 | 0 | |
| 🔵 BMS.bal_03 | 1 | 0 | |
| 🟡 BMS.bal_04 | 1 | 0 | |
| 🟠 BMS.bal_05 | 0 | 0 | |
| 🟣 BMS.bal_06 | 1 | 0 | |
| 🔴 BMS.bal_07 | 1 | 0 | |
| 🟢 BMS.bal_08 | 1 | 0 | |

Fonte: a autora.

Figura 43 – Tensões das Células Antes e Após o Balanceamento Passivo

| Signal Name | Cursor 1 | Cursor 2 | Delta |
|---|-----------|-----------|----------|
| ▼ Viewport 1 | | | |
| 🕒 Time | 0.70301s | 20.61597s | 19.91296 |
| ■ BMS.Vcell1 | 3.8657012 | 3.864535 | |
| ■ BMS.Vcell2 | 3.8657012 | 3.864535 | |
| ■ BMS.Vcell3 | 3.8657012 | 3.864535 | |
| ■ BMS.Vcell4 | 3.8657012 | 3.864535 | |
| ■ BMS.Vcell5 | 3.8657012 | 3.8448112 | |
| ■ BMS.Vcell6 | 3.8657012 | 3.864535 | |
| ■ BMS.Vcell7 | 3.8657012 | 3.8645368 | |
| ■ BMS.Vcell8 | 3.8657012 | 3.864535 | |

Fonte: a autora.

4.1.5.1 Análise e Sugestões

O sistema de gerenciamento de bateria demonstrou sua eficácia ao detectar e corrigir rapidamente desequilíbrios de tensão entre as células da bateria no Cenário 5. A capacidade do BMS de identificar quando a tensão da Célula 5 caiu abaixo do limite de equilíbrio e, em seguida, ativar o balanceamento para todas as outras células, exceto a Célula 5, mostra um nível bom de monitoramento e controle.

O processo de balanceamento, que envolveu a descarga controlada das células com tensões mais altas, conseguiu reestabelecer as tensões dentro dos limites seguros de operação em um curto período, indicando uma resposta eficiente do sistema. Todavia, há espaço para melhorias.

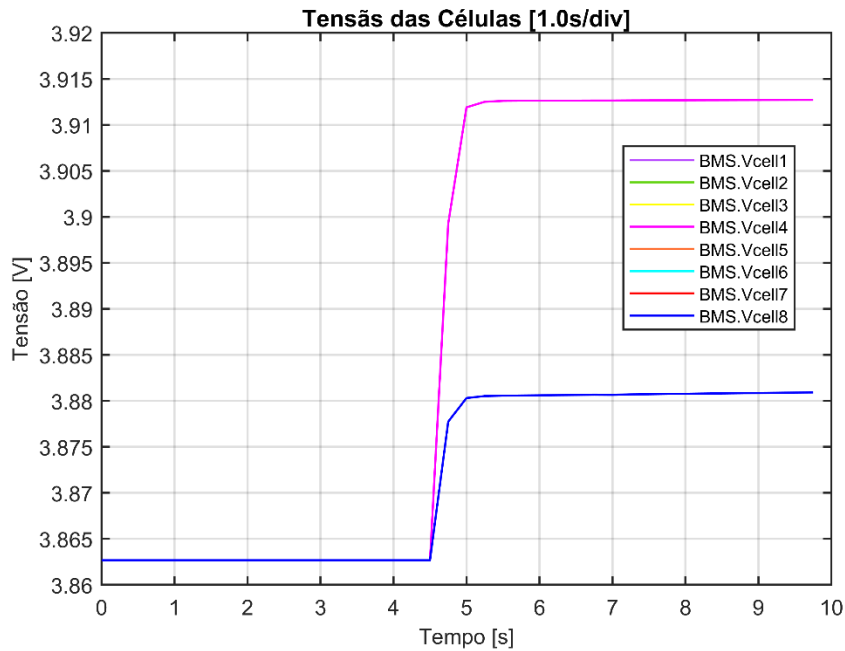
Primeiramente, a detecção do aumento repentino no ΔV antes do início do balanceamento pode ser utilizada para antecipar a necessidade de balanceamento, permitindo ao BMS iniciar o processo preventivamente e evitar grandes desequilíbrios. Adicionalmente, a implementação de balanceamento mais robustos, que ajustem continuamente as correntes de equilíbrio com base em variações de carga e temperatura, pode melhorar ainda mais equilíbrio das tensões entre as células, prolongando a vida útil da bateria e aumentando a eficiência operacional.

4.1.6 Cenário 6 - Resistência Interna da Célula Elevada

Neste cenário, simula-se que a Célula 4 possui uma resistência interna mais elevada em comparação às demais. Esse aumento na resistência interna pode ser atribuído ao envelhecimento da célula, devido à degradação química ao longo do tempo, ou a danos físicos.

Inicialmente, todas as células começam com um estado de carga de 50%. No entanto, ao iniciar o carregamento com uma corrente de 20 A, observa-se um pico de tensão mais elevado na Célula 4, conforme a Figura 44.

Figura 44 – Tensões das Células em Resposta a Resistência Interna da Célula 4 Elevada



Fonte: a autora.

O pico deve-se a célula 4 possuir maior resistência interna. Quando a corrente de carregamento é aplicada, a célula com maior resistência interna mostra uma variação de tensão mais pronunciada devido à maior queda de tensão interna, conforme descrito pela Lei de Ohm

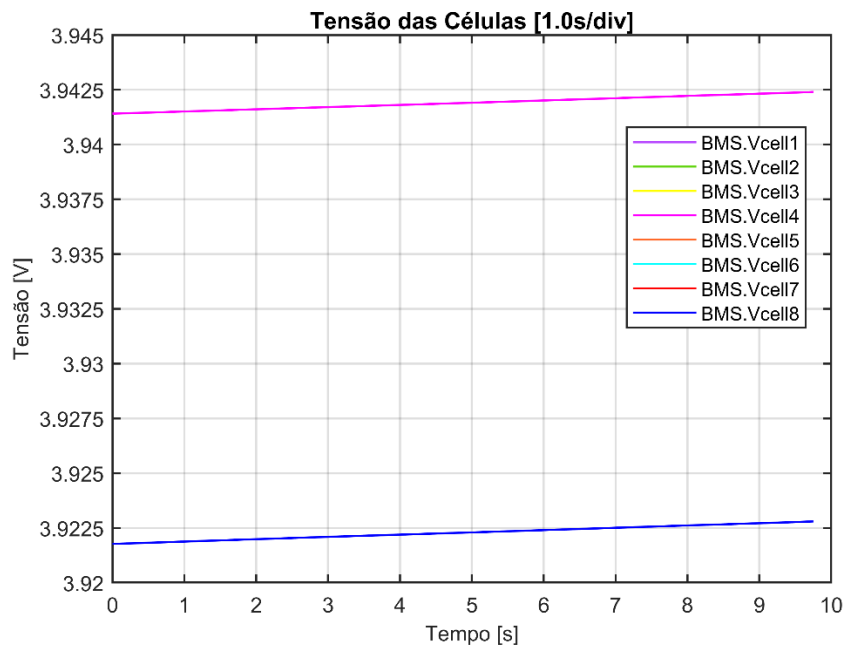
$$V = I \cdot R_{int} \quad (7)$$

onde V é a tensão resultante, I a corrente de carga e R_{int} a resistência interna da célula. Essa diferença é devida à maior perda de energia na forma de calor dentro da célula com maior resistência interna, refletindo-se em uma tensão momentaneamente superior no início do processo de carregamento.

Imediatamente após o início do carregamento, o balanceamento passivo é ativado para equilibrar as tensões das células da bateria. Durante o processo de balanceamento, observa-se que a Célula 4 carrega mais lentamente, como ilustrado

na Figura 45, pois a energia extra está sendo dissipada na forma de calor. As outras células, por outro lado, continuam carregando normalmente. Este processo de dissipação de energia visa assegurar que todas as células atinjam um estado de carga equilibrado, evitando que qualquer célula exceda os limites de tensão ou capacidade de armazenamento.

Figura 45 – Tensão das Células em Resposta ao Balanceamento Passivo

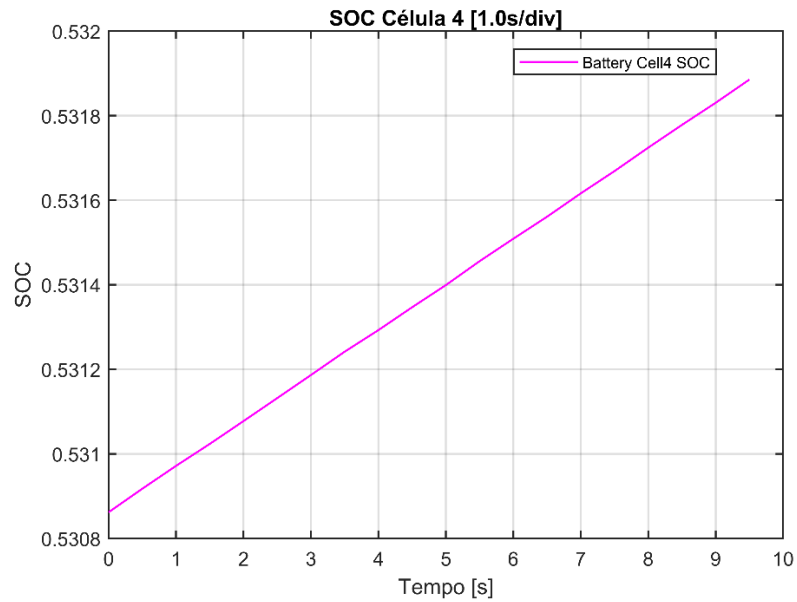


Fonte: a autora.

A célula 4, devido à sua maior resistência interna, apresenta uma capacidade reduzida de armazenamento de energia. Isso resulta em uma queda mais acentuada de tensão sob carga e uma eficiência menor durante o processo de carregamento. As Figuras 46 e 47 ilustram simultaneamente a diferença no estado de carga entre a célula 4 e a célula 8, que está operando adequadamente.

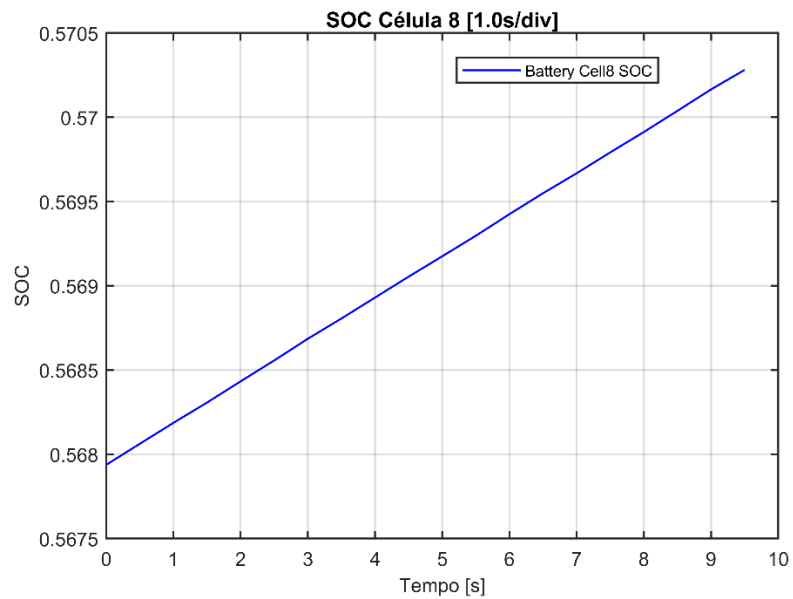
A elevação da resistência interna em uma célula pode diminuir sua capacidade de armazenamento, resultando em um estado de carga mais baixo mesmo quando as tensões são semelhantes. O estado de carga da Célula 4 muda mais lentamente porque, devido à sua maior resistência interna, ela armazena menos energia útil para a mesma quantidade de carga aplicada.

Figura 46 – Estado de Carga da Célula 4 Após um Período de Carregamento



Fonte: a autora.

Figura 47 - Estado de Carga da Célula 8 Após um Período de Carregamento



Fonte: a autora.

4.1.6.1 Análise e Sugestões

Analisando o desempenho geral do BMS no cenário descrito, observa-se que ele demonstrou eficácia ao detectar e mitigar os efeitos da célula com resistência interna elevada. O sistema foi capaz de iniciar o balanceamento passivo

para buscar equalizar as tensões das células durante o carregamento, evitando que a Célula 4 excedesse os limites de tensão ou capacidade de armazenamento.

No entanto, a velocidade de carga mais lenta da Célula 4 evidencia uma oportunidade de melhoria. Para otimizar ainda mais o desempenho do BMS, sugere-se a implementação de um algoritmo adaptativo de balanceamento, capaz de ajustar dinamicamente a corrente de carga ou a duração do carregamento para compensar as variações individuais das células. Além disso, integrar um sistema de monitoramento mais sensível à resistência interna das células durante todo o ciclo de vida da bateria pode proporcionar uma gestão mais precisa e eficiente do estado de carga, prolongando a vida útil e a eficiência do sistema de armazenamento de energia.

Este comportamento também serve como um indicativo crucial de células degradadas ou danificadas, destacando a importância da monitorização contínua. Devido às mudanças eletroquímicas ou danos físicos individuais das células, é comum que algumas apresentem alterações diferentes das outras ao longo do tempo. Essa variabilidade realçada reforça a necessidade de um BMS adaptativo, capaz de ajustar-se dinamicamente às condições específicas de cada célula para garantir a segurança e a eficiência operacional do sistema de gerenciamento da bateria.

4.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A VERSATILIDADE DO MODELO

O modelo utilizado possui versatilidade notável, possibilitando a realização de testes em diferentes cenários. Isso implica que muitos outros cenários, além dos testados, podem ser investigados para analisar o sistema de gerenciamento de baterias em HIL. A simulação de diferentes contextos operacionais, que varia desde situações típicas até cenários extremos, desempenha um papel fundamental na garantia da robustez e confiabilidade do BMS em diversas circunstâncias.

De modo geral, a necessidade primordial do BMS surge durante operações anormais, uma vez que seu desempenho esperado em condições normais é considerado padrão. É durante esses momentos excepcionais que sua eficiência se torna crucial. Com isso, os cenários testados foram escolhidos especificamente para representar situações extremas reais encontradas na utilização de veículos elétricos. Por exemplo, é comum que uma célula apresente uma tensão significativamente

mais baixa devido a diferenças eletroquímicas entre as células ou ao carregamento forçado, mesmo quando a carga já está em níveis elevados.

Testar esses cenários permite avaliar como o BMS responde a essas situações críticas e assegura que o sistema pode manter a segurança e eficiência do pacote de baterias sob condições adversas.

5 CONCLUSÃO

A ascensão dos veículos elétricos está transformando a indústria automotiva e promovendo uma mobilidade mais sustentável. Este trabalho ofereceu um estudo abrangente das tecnologias relacionadas, incluindo baterias, carregadores e sistemas de gerenciamento de bateria. As análises realizadas centraram-se em um sistema de gerenciamento de baterias implementado em um ambiente de simulação *Hardware in the Loop* virtual. Este estudo empregou técnicas de monitoramento e balanceamento de células, proteção de células e otimização de desempenho, com o objetivo de assegurar a operação segura e eficiente das células de baterias de íon-lítio.

Os cenários simulados permitiram avaliar a eficácia do sistema de gerenciamento de bateria em diferentes condições de operação, como temperaturas extremas, célula fora do equilíbrio do sistema e tensões extremas. A implementação do modelo em um ambiente de HIL virtual proporcionou um nível elevado de realismo e precisão nas simulações. Este método facilitou a análise detalhada do comportamento das células da bateria em diversas condições operacionais, contribuindo para verificar a robustez e a confiabilidade do sistema desenvolvido.

Os conceitos de estado da arte foram fundamentais para analisar o desempenho do BMS e identificar possíveis melhorias para tecnologias futuras. A pesquisa mostrou que a implementação de um sistema de gerenciamento eficaz não só protege as células contra condições adversas, mas também otimiza o desempenho geral do sistema, visando prolongar sua vida útil.

Além disso, é crucial destacar que o sistema de gerenciamento de bateria é uma tecnologia emergente, sujeita a contínuas modificações e pesquisas intensivas. As fabricantes de veículos estão realizando investimentos significativos no desenvolvimento de sistemas de gerenciamento de bateria como o wBMS (do inglês *wireless Battery Management System*), visando não apenas simplificar a comunicação e reduzir a fiação nos veículos, mas também aprimorar o monitoramento do estado de saúde das baterias por meio dessas tecnologias inovadoras.

Em suma, este trabalho demonstrou a importância das tecnologias de veículos elétricos, além das técnicas avançadas de monitoramento e balanceamento, bem como a eficácia da simulação HIL virtual como ferramenta de desenvolvimento e testes. Os resultados obtidos ressaltam a relevância do

progresso contínuo nessas tecnologias para promover uma mobilidade elétrica sustentável e eficiente.

5.1 ESTUDOS FUTUROS

A continuidade desta pesquisa poderá explorar novas abordagens e algoritmos para aprimorar ainda mais os sistemas de gerenciamento de baterias. Recomenda-se a implementação de um sistema que simule a temperatura de forma contínua e realista, proporcionando uma análise mais precisa do comportamento térmico das células. Além disso, explorar métodos de balanceamento ativo, que redistribuem a energia entre as células de forma dinâmica, pode aumentar a eficiência e a vida útil da bateria, reduzindo o desgaste desigual das células.

Também é importante considerar a histerese das células, que pode afetar a precisão das medições de tensão e SOC, e incorporar a análise do SOH das células. Isso permitiria desenvolver algoritmos de controle mais precisos e implementar estratégias de manutenção preditiva, garantindo um desempenho consistente e prolongado do sistema de baterias.

REFERÊNCIAS

- [1] S. S. G. ACHARIGE et al. **Review of Electric Vehicle Charging Technologies, Standards, Architectures, and Converter Configurations.** IEEE Access, v. 11, p. 41218–41255, 2023.
- [2] LIU, W.; PLACKE, T.; CHAU, K. T. **Overview of batteries and battery management for electric vehicles.** Energy Reports, v. 8, p. 4058–4084, 1 nov. 2022.
- [3] MOHAMMADI, F.; SAIF, M. **A comprehensive overview of electric vehicle batteries market.** e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, v. 3, p. 100127, 1 mar. 2023.
- [4] DOS SANTOS, R. et al. **Sistemas de armazenamento de energia baseados em baterias: tecnologias para sistemas de geração distribuída.**
- [5] **Stellantis Reveals STLA Medium Platform Designed to Electrify the Heart of the Global Market with Future-Proof Customer Innovations.** Disponível em: <<https://www.stellantis.com/en/news/press-releases/2023/july/stellantis-reveals-stla-medium-platform-designed-to-electrify-the-heart-of-the-global-market-with-future-proof-customer-innovations>>. Acesso em: 10 jan. 2024.
- [6] MARTINS, L. S. et al. **Electric car battery: An overview on global demand, recycling and future approaches towards sustainability.** Journal of Environmental Management, v. 295, p. 113091, 1 out. 2021.
- [7] R. R. KUMAR et al. **Advances in Batteries, Battery Modeling, Battery Management System, Battery Thermal Management, SOC, SOH, and Charge/Discharge Characteristics in EV Applications.** IEEE Access, v. 11, p. 105761–105809, 2023.
- [8] ADAIKKAPPAN, M.; SATHIYAMOORTHY, N. **Modeling, state of charge estimation, and charging of lithium-ion battery in electric vehicle: A review.** International Journal of Energy Research, v. 46, n. 3, p. 2141–2165, 2022.
- [9] LIU, K. et al. **A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles.** Frontiers of Mechanical Engineering, v. 14, n. 1, p. 47–64, 1 mar. 2019.
- [10] ASMARE, M.; ZEGEYE, M.; KETEMA, A. **Advancement of electrically rechargeable metal-air batteries for future mobility.** Energy Reports, v. 11, p. 1199–1211, 1 jun. 2024.
- [11] FERTIG, M. P. et al. **A Medium-Temperature All-Solid-State Sodium Battery Utilizing Sodium-Beta Alumina and a Polymeric Composite Positive Electrode.** Journal of The Electrochemical Society, v. 170, n. 5, p. 050501, 3 maio 2023.
- [12] KURTULMUŞ, Z. N.; KARAKAYA, A. **Review of lithium-ion, fuel cell, sodium-beta, nickel-based and metal-air battery technologies used in electric vehicles.** International Journal of Energy Applications and Technologies, v. 10, n. 2, p. 103–113, dez. 2023.
- [13] XUE, T.; FAN, H. J. **From aqueous Zn-ion battery to Zn-MnO₂ flow battery: A brief story.** Journal of Energy Chemistry, v. 54, p. 194–201, 1 mar. 2021.
- [14] SUN, J. et al. **A novel multiobjective charging optimization method of power lithium-ion batteries based on charging time and temperature rise.** International Journal of Energy Research, v. 43, 26 jul. 2019.
- [15] LI, Y. et al. **Optimized charging of lithium-ion battery for electric vehicles: Adaptive multistage constant current–constant voltage charging strategy.** Renewable Energy, v. 146, p. 2688–2699, 1 fev. 2020.

- [16] ARAGON-AVILES, S. et al. **Modeling, Analysis, Design, and Simulation of a Bidirectional DC-DC Converter with Integrated Snow Removal Functionality for Solar PV Electric Vehicle Charger Applications**. *Energies*, v. 15, n. 8, p. 2961, 18 abr. 2022.
- [17] H. ARYA; M. DAS. **Fast Charging Station for Electric Vehicles Based on DC Microgrid**. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, v. 4, n. 4, p. 1204–1212, out. 2023.
- [18] WASSILIADIS, N. et al. **Model-based health-aware fast charging to mitigate the risk of lithium plating and prolong the cycle life of lithium-ion batteries in electric vehicles**. *Journal of Power Sources*, v. 561, p. 232586, 30 mar. 2023.
- [19] C. ZOU et al. **Electrochemical Estimation and Control for Lithium-Ion Battery Health-Aware Fast Charging**. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 65, n. 8, p. 6635–6645, ago. 2018.
- [20] S. THANGAVEL et al. **A Comprehensive Review on Electric Vehicle: Battery Management System, Charging Station, Traction Motors**. *IEEE Access*, v. 11, p. 20994–21019, 2023.
- [21] S. MISHRA; S. C. SWAIN; R. K. SAMANTARAY. **A Review on Battery Management system and its Application in Electric vehicle**. 2021 International Conference on Advances in Computing and Communications (ICACC). Em: 21 out. 2021.
- [22] NYAMATHULLA, S.; DHANAMJAYULU, C. **A review of battery energy storage systems and advanced battery management system for different applications: Challenges and recommendations**. *Journal of Energy Storage*, v. 86, p. 111179, 1 maio 2024.
- [23] HABIB, A. K. M. A. et al. **Lithium-Ion Battery Management System for Electric Vehicles: Constraints, Challenges, and Recommendations**. *Batteries*, v. 9, n. 3, p. 152, mar. 2023.
- [24] P. S. BABU; K. ILANGO. **Comparative Analysis of Passive and Active Cell Balancing of Li Ion Batteries**. 2022 Third International Conference on Intelligent Computing Instrumentation and Control Technologies (ICICT). Em: 11 ago. 2022.
- [25] S. KARMAKAR; T. K. BERA; A. K. BOHRE. **Review on Cell Balancing Technologies of Battery Management Systems in Electric Vehicles**. 2023 IEEE IAS Global Conference on Renewable Energy and Hydrogen Technologies. Em:11 mar. 2023.
- [26] CHANDEL, T. A. **Hybrid Energy Storage Systems for Renewable Energy Integration and Application**. *Advances in Civil and Industrial Engineering*. IGI Global, 2023. p. 174–198.
- [27] MIHALIČ, F.; TRUNTIČ, M.; HREN, A. **Hardware-in-the-Loop Simulations: A Historical Overview of Engineering Challenges**. *Electronics*, v. 11, n. 15, 2022.
- [28] M. BACIC. **On hardware-in-the-loop simulation**. *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*. Em: PROCEEDINGS OF THE 44TH IEEE CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL. 15 dez. 2005.
- [29] G. LAUSS; K. STRUNZ. **Accurate and Stable Hardware-in-the-Loop (HIL) Real-Time Simulation of Integrated Power Electronics and Power Systems**. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 36, n. 9, p. 10920–10932, set. 2021.
- [30] **Discover the Story Behind Typhoon HIL**. Disponível em:

<<https://www.typhoon-hil.com/community/our-company/about-us/>>. Acesso em: 16 marc. 2024.

- [31] **Typhoon HIL Documentation. topic.** Disponível em: <https://www.typhoon-hil.com/documentation/typhoon-hil-software-manual/topics/software_manual_introduction.html>. Acesso em: 5 marc. 2024.