

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

GABRIEL MARTINELLI GALHARDO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS PARA O BALANCEAMENTO DE
CÉLULAS DE LÍTIO-ÍON EM SEGUNDA APLICAÇÃO**

CAMPINAS

2023

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DE REDES DE
TELECOMUNICAÇÕES
GABRIEL MARTINELLI GALHARDO

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS PARA O BALANCEAMENTO DE
CÉLULAS DE BATERIA DE LÍTIO-ÍON EM SEGUNDA APLICAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Gestão de Redes de Telecomunicações da Escola Politécnica, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como exigência para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações.

Orientador: Prof(a). Dr(a). Marina Lavorato de Oliveira

CAMPINAS

2023

Ficha catalográfica elaborada por Fabiana Rizzioli Pires CRB 8/6920
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

621.31242 Galhardo, Gabriel Martinelli
G155a

Análise comparativa de métodos para o balanceamento de células de lítio-íon em segunda aplicação / Gabriel Martinelli Galhardo. - Campinas: PUC-Campinas, 2023.

83 f.

Orientador: Marina Lavorato de Oliveira.

Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) - Programa de Pós-Graduação em Gestão de Redes de Telecomunicações, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2023.

Inclui bibliografia.

1. Baterias eletricas. 2. Energia - Armazenamento. 3. Veículos elétricos. I. Oliveira, Marina Lavorato de. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Escola Politécnica. Programa de Pós-Graduação em Gestão de Redes de Telecomunicações. III. Título.

23. ed. CDD 621.31242

GABRIEL MARTINELLI GALHARDO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS PARA O
BALANCEAMENTO DE CÉLULAS DE BATERIA DE
LÍTIO-ÍON EM SEGUNDA APLICAÇÃO**

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações ao Programa de Pós-Graduação em Gestão de Redes de Telecomunicações da Escola Politécnica.

Área de Concentração: Gestão de Redes e Serviços.

Orientador (a): Profa. Dra. Marina Lavorato de Oliveira.

Dissertação defendida e aprovada em 27 de junho de 2023 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



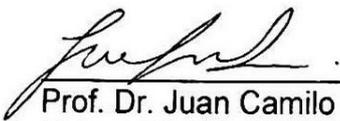
Profa. Dra. Marina Lavorato de Oliveira

Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Cecília de Freitas Moraes

Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Juan Camilo López Amézquita

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Dedico este trabalho a todas as pessoas que acreditaram e me deram apoio durante o desenvolvimento dessa etapa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por toda força e a oportunidade de estar desenvolvendo meus trabalhos. À minha família, por sempre acreditar, apoiar e estar comigo nos momentos em que eu mais precisei.

À instituição e todos os colaboradores do CPQD pelo apoio, colaboração técnica e apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço a minha orientadora Dra. Marina Lavorato de Oliveira pela oportunidade de realizar este trabalho.

RESUMO

A utilização de veículos elétricos tem aumentado nos últimos anos devido à pressão para reduzir as emissões de gases do efeito estufa e minimizar os impactos ambientais. Esses veículos utilizam sistemas de armazenamento com células de lítio-íon devido às suas características de operação. Essas células são acompanhadas por sistemas de proteção e BMS (Sistema de gerenciamento da bateria). No caso dos veículos elétricos, as baterias possuem uma vida útil determinada pelo fabricante, geralmente em torno de 8 anos ou 160 mil quilômetros. No entanto, mesmo ao atingir esse limite, as células da bateria ainda mantêm cerca de 80% de sua capacidade nominal, o que as torna viáveis para uma segunda aplicação menos exigente. Para evitar problemas causados pelo desbalanceamento da bateria, é necessário um sistema de balanceamento das células. Nesse contexto, pretende-se aplicar e analisar três métodos de equalização: balanceamento passivo com resistor de derivação comutado, balanceamento ativo com conversor flyback e balanceamento capacitivo comutado clássico. O objetivo é determinar qual método melhor se adapta às células de bateria de lítio ferro fosfato em segunda aplicação, prolongando sua vida útil e garantindo o funcionamento adequado do sistema de armazenamento para a aplicação desejada. Serão realizadas simulações, análise dos dados coletados e determinação dos benefícios obtidos com cada método aplicado.

Palavras-chave: equalização de baterias, balanceamento ativo, balanceamento passivo, segunda aplicação.

ABSTRACT

The use of electric vehicles has increased in recent years due to pressure to reduce greenhouse gas emissions and minimize environmental impacts. These vehicles use storage systems with lithium-ion cells due to their operating characteristics. These cells are accompanied by protection systems and BMS (Battery Management System). In the case of electric vehicles, batteries have a useful life determined by the manufacturer, usually around 8 years or 160 thousand kilometers. However, even when reaching this limit, the battery cells still maintain around 80% of their nominal capacity, making them viable for a second, less demanding application. To avoid problems caused by battery imbalance, a cell balancing system is required. In this context, we intend to apply and analyze three equalization methods: passive balancing with switched shunt resistor, active balancing with flyback converter and classic switched capacitive balancing. The objective is to determine which method best adapts

to lithium iron phosphate battery cells in the second application, extending their useful life and ensuring the proper functioning of the storage system for the desired application. Simulations will be carried out, analysis of the collected data and determination of the benefits obtained with each applied method.

Keywords: Battery equalization, active balancing, passive balancing, second life.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Crescimento das vendas e os maiores mercados para veículos elétricos.	17
Figura 2: Representação em blocos de um veículo elétrico à bateria.	21
Figura 3: Estrutura interna de uma LIB cilíndrica.	23
Figura 4: Partes constituintes da bateria de lítio-íon.	24
Figura 5: Estrutura de uma célula de bateria de lítio-íon.	25
Figura 6: Diagrama simplificado das características das principais tecnologias de LIB's.	28
Figura 7: Estrutura básica de um sistema de gerenciamento de baterias (BMS).	29
Figura 8: Topologias de balanceamento de células de bateria.	31
Figura 9: Método de balanceamento com resistores de derivação fixos.	32
Figura 10: Método de Resistores de Derivação Comutados.	33
Figura 11: Método Capacitor Comutado.	35
Figura 12: Método Capacitor Comutado Único.	35
Figura 13: Método de Capacitor Comutado de Camada Dupla.	36
Figura 14: Método de equalização com conversores flyback.	38
Figura 15: Arquitetura do Sistema de Gerenciamento de Baterias.	39
Figura 16: Pack de baterias com células conectadas em série.	48
Figura 17: Modelo de circuito equivalente da célula de lítio íon.	50
Figura 18: Estrutura do pack associado com o circuito de balanceamento passivo com resistor de derivação comutados.	52
Figura 20: Esquemático Simulink Balanceamento Passivo.	56
Figura 21: Circuito de um LTC3300-1 utilizado para o balanceamento ativo com conversor flyback.	57
Figura 22: Esquemático de um circuito com um número ímpar de CI's contendo seis células em cada.	58
Figura 24: Modelo genérico implementado no software Matlab/Simulink para o balanceamento ativo com conversor flyback.	62
Figura 25: Estrutura do circuito de balanceamento ativo com capacitivo comutado clássico.	63
Figura 26: Modelo genérico implementado no software Matlab/Simulink para o balanceamento ativo com capacitor comutado clássico.	64
Figura 27: SoC e tensão das células para a última simulação do Caso 1 do balanceamento passivo.	68

Figura 28: SoC e tensão das células para a última simulação do Caso 2 do balanceamento passivo.	68
Figura 29: SoC e tensão das células para a última simulação do Caso 3 do balanceamento passivo.	69
Figura 30: Boxplot da velocidade de balanceamento de 12 células para os três casos do balanceamento passivo.	70
Figura 31: SoC e tensão das células para a última simulação do Caso 1 do balanceamento com conversor flyback.	71
Figura 32: SoC e tensão das células para a última simulação do Caso 2 do balanceamento com conversor flyback.	71
Figura 33: SoC e tensão das células para a última simulação do Caso 3 do balanceamento com conversor flyback.	72
Figura 34: Boxplot da velocidade de balanceamento de 12 células para os três casos do balanceamento por conversor flyback.	72
Figura 35: Boxplot da eficiência de balanceamento de 12 células para os três casos do balanceamento por conversor flyback.	73
Figura 36: SoC e tensão das células para a última simulação do Caso 1 do balanceamento com Capacito Comutado Clássico.....	74
Figura 37: SoC e tensão das células para a última simulação do Caso 2 do balanceamento com Capacito Comutado Clássico.....	74
Figura 38: SoC e tensão das células para a última simulação do Caso 3 do balanceamento com Capacito Comutado Clássico.....	75
Figura 39: Boxplot da velocidade de balanceamento de 12 células para os três casos do balanceamento com Capacitor Comutado Clássico.....	75
Figura 40: Boxplot da eficiência de balanceamento de 12 células para os três casos do balanceamento com Capacitor Comutado Clássico.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais características das células de bateria.....	25
Tabela 2: Parâmetros da célula de bateria de lítio íon.	49
Tabela 3: Parâmetros utilizados para a simulação dos modelos de balanceamento.	50
Tabela 4 - Casos propostos para a simulação dos métodos de equalização.	67
Tabela 5: Resumo dos dados referentes às medianas da velocidade e eficiência de balanceamento para os casos e métodos analisados.	76

SUMÁRIO

1	Introdução	15
1.1	Motivação	16
1.2	Justificativa	17
1.3	Objetivos	18
1.3.1	Objetivos específicos	18
1.4	Organização do trabalho	18
2	Fundamentação teórica	19
2.5	Veículos Elétricos e Híbridos	19
2.6	Baterias de Lítio-íon (LIB)	22
2.6.1	Composição das LIB's	22
2.6.2	Partes constituintes de uma LIB	23
2.6.3	Funcionamento das LIB's	24
2.6.4	Características das células de bateria	25
2.6.5	Principais tecnologias de baterias de lítio-íon	27
2.7	<i>Battery Management System (BMS)</i>	28
2.7.1	Conceitos Básicos	29
2.7.2	Balanceamento	30
2.7.3	Arquitetura	38
2.8	Segunda Vida	40
2.8.1	Utilização de LIB's em Segunda Aplicação	41
3	Estado da Arte	42
4	Metodologia	48
4.1	Características de Simulação	49
4.2	Balanceamento passivo por resistor de derivação comutado	51
4.2.1	Algoritmo de Balanceamento	52
4.3	Balanceamento com Conversor <i>Flyback</i>	56
4.3.1	Algoritmo de Balanceamento	60
4.4	Balanceamento com Capacitor Comutado Clássico	62
4.5	Metodologia de Avaliação	64
5	Resultados	67
5.1	Balanceamento passivo por resistor de derivação comutado	67
5.2	Balanceamento ativo por conversor <i>flyback</i>	70
5.3	Balanceamento com Capacitor Comutado Clássico	73
5.4	Comparação entre os métodos de balanceamento	76
6	Conclusão	78
7	Referências	80

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

AFE	Analog Front-End
Ah	Ampère-hora
BMS	Battery Management System
BESS	Battery Energy Storage System
BMC	Battery Management Controller
BNEF	Bloomberg New Energy Finance
CAN	Controller Area Network
CC	Corrente Contínua
CI	Circuito Integrado
DoD	Depth of Discharge
EREV	Extended Range Electric Vehicle
EP	Eletroposto
ECM	Equivalent Circuit Model
HEV	Hybrid Electric Vehicle

IHM	Interface Homem-máquina
LFP	Lítio Ferro Fosfato
LIB	Lithium ion Battery
LFP	Lítio Ferro Fosfato
LMO	Lítio Manganês Spinel
LTO	Lítio Titanato
LiCoO ₂	Óxido de Lítio Cobalto
ME	Motor Elétrico
MCI	Motor a Combustão Interna
NCA	Lítio Níquel Cobalto Alumínio
NMC	Lítio Níquel Manganês Cobalto
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PoC	Prova de Conceito
RMS	Root Mean Square Value
RUL	Remaining Useful Life
RC	Resistor-Capacitor
SoC	State of Charge
SoH	State of Health

SEEG	Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SC	Swiched Capacitor
SPDT	Single-Pole Double-Throw Switch
USABC	Advanced Battery Consortium
VEB	Veículos Elétricos à Bateria

1 INTRODUÇÃO

Há uma grande preocupação mundial com as emissões de poluentes atmosféricos. Em 2021, o Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) lançou o relatório de análise das emissões brasileiras de Gases de Efeito Estufa (GEE). Este documento aponta que, dentro do setor de energia, o subsetor de transportes é a principal fonte de emissões de poluentes no país, sendo que no ano anterior foi responsável por cerca de 41,4 % do total de emissões do setor, correspondendo a 185,4 milhões de toneladas de CO₂ liberados na atmosfera (SEEG, 2021). Com base nos números, é cada vez mais importante a elaboração de estratégias sustentáveis para a mobilidade urbana, que pode ser alcançada pela expansão dos sistemas coletivos como metrô, trens, e pela utilização de veículos elétricos (VE's) (AUDAZ TECNOLOGIA, [s.d.]).

As vendas de VE's estão aumentando mundialmente, em relatório publicado em 2021 pela *Bloomberg New Energy Finance* (BNEF) há indicação de que em 2020 foram vendidos cerca de 10 milhões de VE's. Nesse contexto, é apresentada uma perspectiva de cerca de 65 milhões de VE's até 2040. As vendas de veículos para passageiros chegam à aproximadamente 6,56 milhões em 2021 (BLOOMBERGNEF, [s.d.]).

Entre as tecnologias de baterias aplicáveis a VE's, a mais utilizada atualmente é a tecnologia de lítio-íon. As células de lítio-íon possuem maior eficiência energética, densidade de potência, ampla faixa de temperatura de operação, capacidade de recarga rápida, ausência de efeitos de memória, ciclo de vida longo e baixa taxa de autodescarga, de forma que elas podem ter menor peso e volume quando comparada a outras tecnologias. Dessa forma, essa tecnologia se torna vantajosa para aplicações em veículos elétricos e armazenamento de energia.

Ainda que os veículos elétricos sejam uma grande solução para a redução de emissões, é necessária uma ação governamental e das indústrias para o desenvolvimento de um sistema de reciclagem das unidades de armazenamento de energia (RICCHINI, [s. d.]). Conforme o USABC (*United Station Advanced Battery Consortium*), o fim da vida útil das baterias para aplicação em VE's é de 80% da capacidade energética nominal. No entanto, essas baterias podem ser reutilizadas em aplicações como redes inteligentes (do inglês *smart grid*), estabilização de rede, *backup* ou aplicações estacionárias surgindo assim o conceito de segunda vida (HOSSAIN *et al.*, 2019).

As baterias de lítio-íon necessitam de proteção e BMS (Sistema de Gerenciamento de Baterias, do inglês *Battery Management System*) desde a sua primeira aplicação. Os BMS's são essenciais para o bom funcionamento das células ou *packs* (conjunto de células interligadas em série ou paralelo para formar uma bateria), pois eles realizam em tempo real: o controle de cada célula da bateria, a comunicação com dispositivos externos, o cálculo do Estado de Carga (*SoC* - do inglês *State of Charge*), do Estado de Saúde (*SoH* - do inglês *State of Health*) e da Vida Útil Remanescente (*RUL* - do inglês *Remainig Useful Life*) da bateria, além de medir os parâmetros da bateria (tensão, corrente e temperatura). Um sistema de gerenciamento bem desenvolvido, implica em maior qualidade, segurança e maior tempo de vida do sistema de baterias.

Dentre todas as funções do BMS, a principal delas é a realização do balanceamento de carga das células da bateria. O balanceamento das células é necessário para evitar problemas de variação de capacidade derivados da sua fabricação, variação de impedância interna e diferença das taxas de descarga e recarga de célula para célula, além de outros fatores que auxiliam no desbalanceamento das unidades de armazenamento.

Portanto, a proposta deste trabalho é realizar uma comparação entre os métodos de balanceamento passivo por resistor de derivação, o método de balanceamento com capacitor comutado clássico e o método de balanceamento *flyback* para células de bateria de Lítio Ferro Fosfato (LFP) (LiFePO_4) em aplicações de segunda vida (do inglês *Second life*).

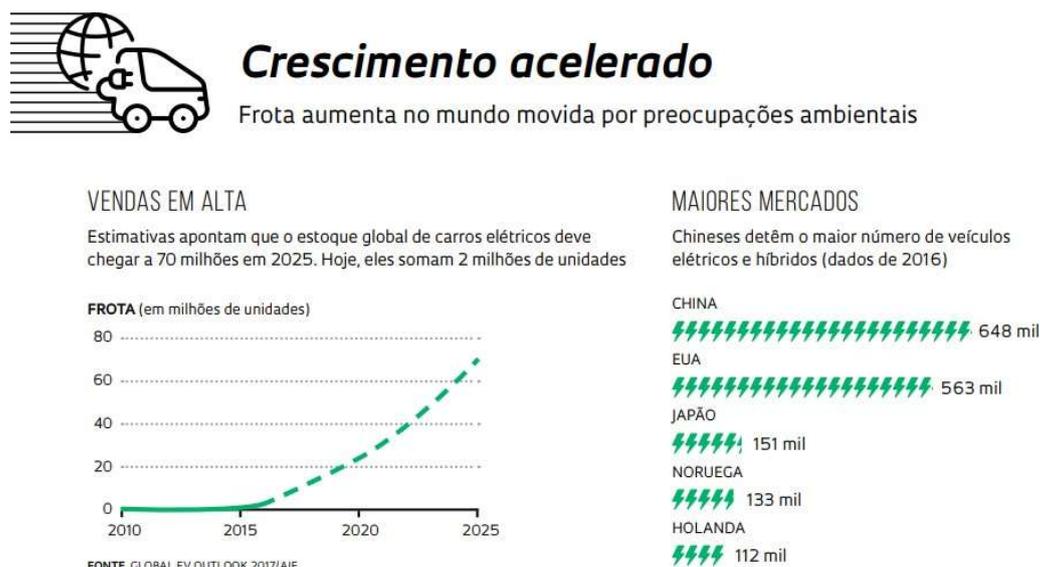
1.1 MOTIVAÇÃO

As motivações dessa pesquisa são o contínuo crescimento do uso de veículos elétricos, a importância da reutilização das baterias para fins econômicos, sociais e ambientais e a importância do uso de algoritmos e métodos de balanceamento de células de baterias para resolver o problema de desbalanceamento em segunda vida.

O aumento da utilização dos veículos elétricos como fonte de transporte limpo, fez com que houvesse uma preocupação maior nos últimos anos por parte dos governos e indústrias em relação ao destino dessas baterias após o fim da vida útil. No entanto, essas baterias podem conter cerca de 80% da sua capacidade energética nominal, podendo ser aplicadas em outros segmentos menos exigentes, como redes inteligentes e armazenamento de energia estacionário, antes de sofrerem o processo de reciclagem.

Dessa forma, pesquisadores e empresas estão realizando estudos para possíveis aplicações, regulamentação e desenvolvimento de métodos de gerenciamento para baterias de segunda vida, existindo assim diversas oportunidades de estudo na área. A Figura 1 ilustra o crescimento acelerado das vendas de veículos elétricos e os maiores mercados consumidores.

Figura 1: Crescimento das vendas e os maiores mercados para veículos elétricos.



Fonte: (YURI VASCONCELOS, 2017)

Com base na Figura 1, observa-se que com o aumento das vendas de veículos elétricos, haverá muitas células de lítio íon disponíveis para serem utilizadas em outras aplicações que não exijam tanto das unidades de armazenamento. Dessa forma, percebe-se o elevado potencial para o desenvolvimento de sistemas de gerenciamento e controle para segunda aplicação de bateria, devido ao avanço técnico, científico, sustentável e a modernização dos sistemas de armazenamento. Logo, trata-se de um tema atual e elevado potencial para o desenvolvimento de novas pesquisas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Em consequência do aumento da utilização de veículos elétricos, há um crescimento na busca por métodos de reutilização das células de baterias antes da sua reciclagem. Partindo do princípio de que as baterias retiradas dos VE's estão com 80% da sua capacidade original, se torna viável sua utilização em outras aplicações menos exigentes. No entanto, essas unidades de armazenamento necessitam de um sistema de

gerenciamento e controle para atender as necessidades de balanceamento e segurança das células em sua segunda aplicação.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é aplicar três métodos de balanceamento de células de baterias de lítio ferro fosfato em segunda aplicação e avaliar qual o melhor método para estender a vida útil da célula e garantir que o Sistema de Armazenamento de Energia (do inglês *Battery Energy Store System -BESS*) execute sua funcionalidade de modo satisfatório para a aplicação ao qual foi destinado.

1.3.1 Objetivos específicos

- Implementar três métodos de balanceamento de células de baterias de lítio íon;
- Realizar o estudo e a análise comparativa entre os métodos de balanceamento das células de lítio-íon;
- Realizar a comparação dos ganhos obtidos entre os métodos e determinar qual é o melhor a ser aplicado.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A dissertação é estruturada em sete capítulos. O Capítulo 1 introduz o problema do balanceamento das células de bateria de lítio-íon em segunda aplicação, fornecendo uma visão geral, a motivação e os objetivos do trabalho. No Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica abrangendo configurações e tecnologias de veículos elétricos, baterias de lítio-íon, sistemas de gerenciamento e controle, além de segundas aplicações, com o propósito de contextualizar o leitor sobre o assunto abordado. O Capítulo 3 traz pesquisas relacionadas a métodos de balanceamento e aplicações em segunda vida de células de bateria. No Capítulo 4, é detalhada a metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho, descrevendo minuciosamente as atividades de pesquisa realizadas. Os principais resultados obtidos são apresentados no Capítulo 5, onde são descritas as simulações realizadas com base nos métodos estudados e as avaliações realizadas. A conclusão do trabalho é exposta no Capítulo 6, enquanto o Capítulo 7 lista as referências bibliográficas utilizadas como embasamento teórico para a condução da pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são apresentados de forma resumida os conceitos de veículos elétricos, células eletroquímicas de lítio-íon, sistemas de gerenciamento e segunda vida, que são encontrados na literatura especializada.

2.5 VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS

Esta seção visa apresentar os conceitos básicos em torno dos veículos elétricos ou veículos elétricos à bateria (VE) e os veículos elétricos híbridos (HEV), suas classificações e características.

2.5.1 Veículos Elétricos Híbridos

Um veículo híbrido opera com duas fontes de potência distintas para a produção de energia e movimento, ou seja, motor elétrico e motor a combustão interna, e pode ser classificado de acordo com a sua orientação interna dos motores, podendo ser em série (utilizando o Motor Elétrico (ME) para propulsão do veículo, com o Motor a Combustão Interna (MCI) fornecendo energia elétrica para o ME), paralelo (utiliza dos dois motores para mover o veículo), ou série-paralelo, vislumbrando simultaneamente os dois aspectos descritos anteriormente. No entanto, os veículos elétricos híbridos ainda são classificados da seguinte forma (RIBEIRO; FERREIRA, 2010; RINALDI, 2021; VASCONCELOS, 2017):

2.5.1.1 Híbridos Puros

Nos veículos híbridos (HEV – *Hybrid Electric Vehicle*), o motor elétrico funciona como um apoio ao motor a combustão interna. A locomoção é feita de forma exclusiva pelo MCI e o ME é utilizado apenas como suporte para uma melhor eficiência do motor a combustão. Suas baterias são recarregáveis exclusivamente por meio dos freios regenerativos, em outras palavras, durante o deslocamento do veículo o ME retira a energia das baterias para girar as rodas, criando a energia cinética para ele se mover, no entanto, ao desacelerar ou acionar os freios, o processo se reverte e a energia cinética faz com que as rodas girem o motor elétrico, tornando-o em um gerador que realimenta as células da bateria (RIBEIRO; FERREIRA, 2010; RINALDI, 2021; VASCONCELOS, 2017).

2.5.1.2 Híbrido Elétrico Plug-in

O veículo híbrido *plug-in* (PHEV – *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) utiliza o motor a combustão interna em paralelo com o motor elétrico, garantindo uma maior

autonomia. A recarga de suas baterias pode ser realizada de duas formas, pelo sistema regenerativo de frenagem e a partir de uma fonte de energia externa conectando-se a uma estação de recarga (Eletropostos -EP) via cabo de alimentação. (RIBEIRO; FERREIRA, 2010; RINALDI, 2021; VASCONCELOS, 2017).

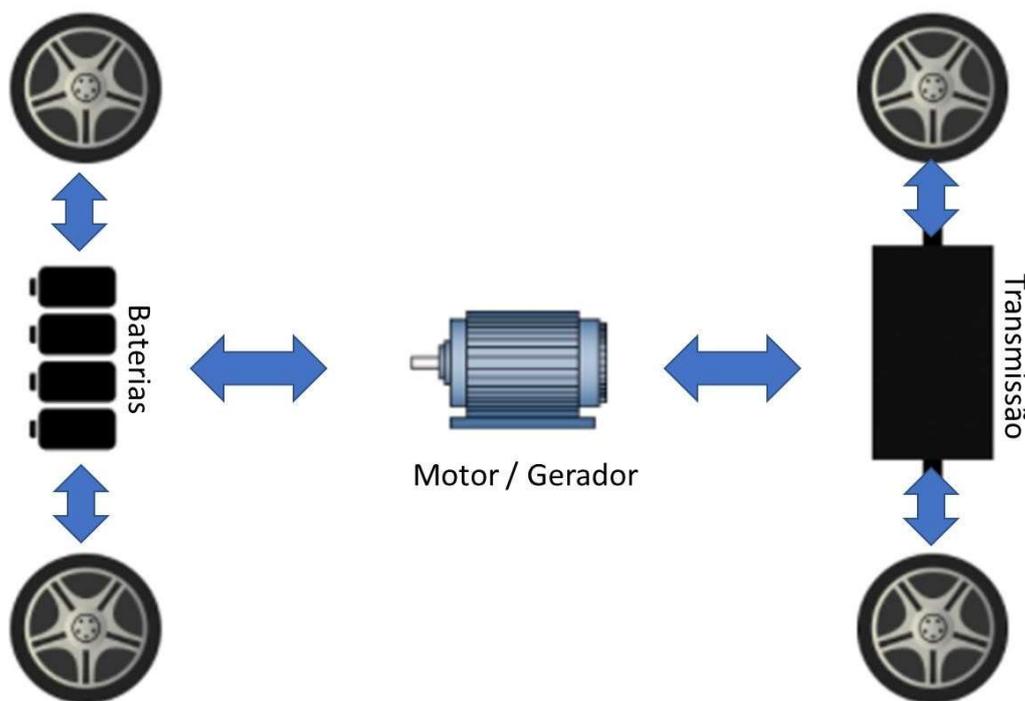
2.5.1.3 Híbrido de Longo Alcance

Nos híbridos de longo alcance (EREV – *Extended Range Electric Vehicle*), o deslocamento é realizado utilizando o motor elétrico até que o estado de carga (SoC) da bateria seja insuficiente, a partir desse ponto o motor a combustão interna passa a atuar na propulsão do veículo. Nessa arquitetura o ME é a principal fonte de deslocamento e a recarga das células de bateria pode ser realizada via rede elétrica e pelo sistema de freios regenerativos (RIBEIRO; FERREIRA, 2010; RINALDI, 2021; VASCONCELOS, 2017).

2.5.2 Veículos elétricos à bateria

Nos veículos elétricos à bateria (VE), a energia utilizada para propulsão é proveniente exclusivamente das células de baterias, que podem ser recarregadas via eletropostos e pelo sistema de frenagem regenerativo. A Figura 2 mostra a arquitetura básica de um veículo elétrico à bateria.

Figura 2: Representação em blocos de um veículo elétrico à bateria.



Fonte: Elaboração própria

Os VE's possuem em sua arquitetura um motor elétrico, controladores eletrônicos de velocidade e células de baterias. As configurações de montagem dos veículos a MCI são mais complexas do que as dos VE's, pois os VE's não precisam de sistemas de transmissão complicados, exaustão de gases, entradas de ar, combustão e ignição. Devido ao número reduzido de componentes, os VE's se tornam menos dependentes de manutenção ao longo do seu uso (RIBEIRO; FERREIRA, 2010; RINALDI, 2021; VASCONCELOS, 2017).

As principais vantagens do VE's são: a ausência de emissões de poluentes atmosféricos e sonoros, além do custo da energia elétrica ser inferior ao valor dos combustíveis utilizados por veículos a combustão. Apesar disso, os maiores desafios encontrados para que os VE's se tornem competitivos com os carros tradicionais são, a necessidade de que as baterias possuam a capacidade de armazenamento para proporcionar aos VE's uma autonomia semelhante ou superior à dos veículos a combustão, e a recarga das células deve ser feita de forma relativamente rápida. Outro grande problema para sua aceitação pelos usuários é o custo das células de bateria, que podem corresponder a até 50% do valor do VE.

Dado que a eficiência energética é caracterizada pelo índice de conversão da energia da célula de bateria e a redução do consumo de combustível depende do modelo do veículo e da sua eletrificação, os VE's podem possuir uma eficiência energética de até 90% e uma redução do consumo de 100%. Os veículos elétricos híbridos possuem uma eficiência à na faixa de 40 a 50% e uma redução do consumo na faixa de 25 a 40%. No caso dos modelos plug-in a redução do consumo está no intervalo de 40 a 65% e os veículos a combustão possuem uma eficiência energética de 25% (VASCONCELOS, 2017)

Entretanto, o sistema de armazenamento de energia é o principal desafio técnico e científico para o desenvolvimento e popularização dos veículos elétricos em geral. Nesse sentido, há uma grande procura por parte das empresas, centros de pesquisa e universidades por avanços técnicos e econômicos na área de sistemas de armazenamento de energia, os quais requerem de uma eficiência cada vez maior, um aumento do acúmulo energético e uma redução do tamanho.

2.6 BATERIAS DE LÍTIO-ÍON (LIB)

As células de bateria de lítio-íon (LIB - Lithium-ion battery) se tornaram mais populares nas últimas duas décadas, o que gerou um aumento nas vendas. Essa tecnologia de bateria tem dominado o mercado de equipamentos móveis (telefone celular, laptop, *smartwatch* etc.) e é considerada uma das mais promissoras para aplicações em VE's. Dessa forma, esse tipo de bateria vem sendo cada vez mais empregado em sistemas de armazenamento de energia para operar em conjunto com sistemas de energia renováveis, substituindo assim a utilização de baterias de chumbo-ácido que são mais prejudiciais ao meio ambiente, e em outras aplicações de tração elétrica como empilhadeiras, bicicletas e patinetes.

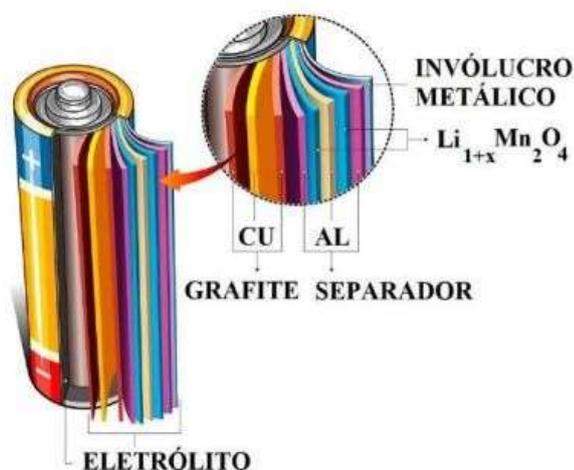
2.6.1 Composição das LIB's

As células de lítio-íon são compostas por um ânodo (eletrodo negativo) que possui camadas de grafite, e pelo cátodo (eletrodo positivo) constituído por óxido de lítio e metais. No cátodo, se encontram as principais diferenças entre as tecnologias de baterias de lítio do mercado, as quais consistem em modificações na composição de sua estrutura química visando buscar uma maior ciclabilidade ou densidade de energia/potência (IEEE, 2018).

Entre as estruturas do ânodo e cátodo existe um separador (normalmente constituído por um material polimérico, mas que permite a troca dos íons de lítio entre

os eletrodos), que possui como objetivo isolar eletricamente os eletrodos evitando autodescarga e curto-circuito da célula. Esse componente é embebido em um eletrólito líquido formado por sais de lítio misturados em solventes orgânicos. Complementarmente, tais eletrólitos podem ser além de líquidos, poliméricos, gel e cerâmicos. O material de contato utilizado como condutor para o eletrodo negativo é o cobre e para o positivo é o alumínio, por causa de suas características de estabilidade para diferentes materiais (IEEE, 2018). A Figura 3 representa a estrutura interna de uma célula de lítio-íon cilíndrica.

Figura 3: Estrutura interna de uma LIB cilíndrica.



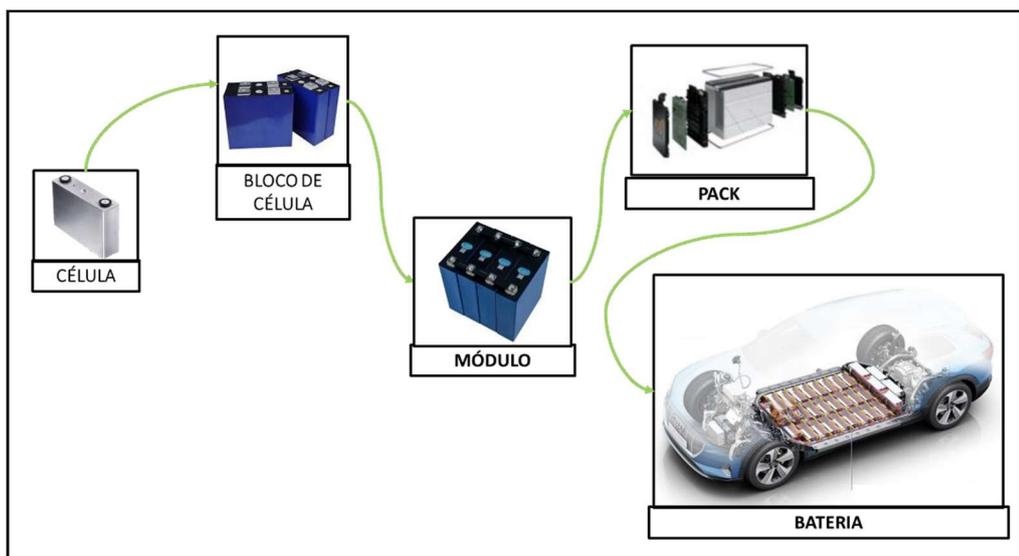
Fonte: (ROTEK, 2020)

2.6.2 Partes constituintes de uma LIB

A menor parte e fundamental de uma bateria de lítio-íon é a célula, podendo ser construída a partir de diversas unidades ligadas entre si em paralelo buscando o aumento da corrente e capacidade ou em série para obter uma tensão mais alta. Inúmeras células podem ser interligadas formando blocos, os blocos por sua vez, são acomodados dentro de módulos. Diversos módulos podem ser associados dentro de um *pack*, juntamente com a adição de um sistema de proteção e BMS. A Figura 4 apresenta as principais partes de uma bateria de lítio.

Uma LIB pode ser constituída de apenas uma célula, como é o caso de alguns equipamentos eletrônicos como *smartphones*, ou por diversas células como, nos veículos elétricos e sistemas de *backup*, porém para que elas possam operar de maneira segura devem obrigatoriamente ter um BMS integrado ao seu sistema.

Figura 4: Partes constituintes da bateria de lítio-íon.



Fonte: Elaboração própria

2.6.3 Funcionamento das LIB's

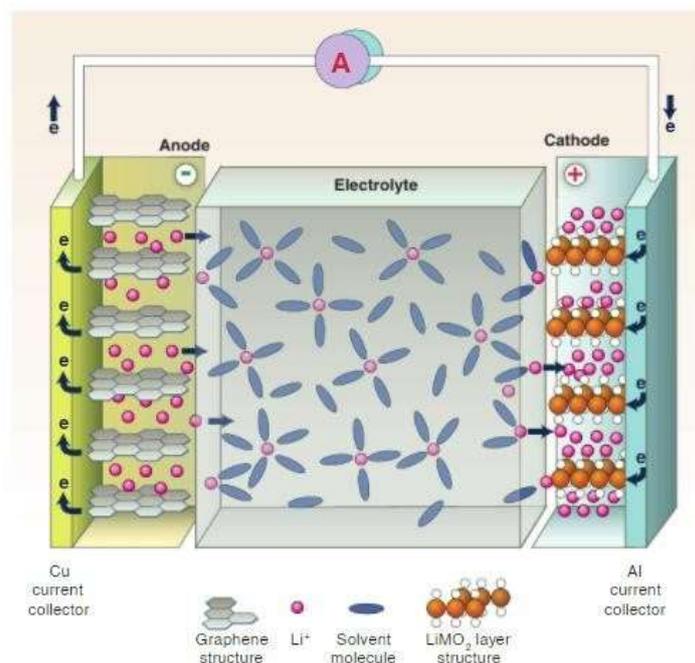
O funcionamento das células de lítio-íon é caracterizado pelo processo de carga e descarga. Durante a realização da descarga, ocorre uma reação denominada como reação de oxidação do eletrodo negativo (ânodo), que possui íons de lítio intercalados no seu interior. Essa reação de oxidação libera elétrons para o circuito externo conectado a bateria e os íons de lítio se deslocam do eletrodo negativo para o positivo (cátodo), onde ocorre a redução dos óxidos de lítio e metais. Os íons de lítio se localizam intercalados na estrutura, sendo esse processo denominado como: mecanismo de intercalação (IEEE, 2018).

Durante o processo de recarga ambos os eletrodos da célula são conectados de forma externa por uma fonte, forçando a saída dos elétrons do eletrodo positivo e se movendo para o eletrodo negativo. Assim os elétrons provenientes da corrente elétrica gerada pelo carregador provocam reações de oxidação no eletrodo positivo e de redução no eletrodo negativo, o que libera íons de lítio do cátodo que vão em direção ao ânodo. Paralelamente, os íons de lítio saem do cátodo em direção ao ânodo por meio do eletrólito. Desse modo, a energia elétrica proveniente da recarga é armazenada na forma de energia eletroquímica no interior da célula da bateria, por meio dos materiais formados nos eletrodos, que possuem diferentes potenciais eletroquímicos (IEEE, 2018).

O diferencial entre as baterias de lítio-íon e as demais é que essa tecnologia possui uma propriedade de intercalação dos íons nas estruturas dos eletrodos, desta

forma não há alteração da estrutura química da célula. A Figura 5 ilustra a estrutura básica de uma célula LIB.

Figura 5: Estrutura de uma célula de bateria de lítio-íon.



Fonte: (DUNN; KAMATH; TARASCON, 2011)

2.6.4 Características das células de bateria

O desempenho das baterias depende de alguns fatores derivados da fabricação dos seus elementos. A Tabela 1 apresenta algumas características importantes para o desempenho e parâmetros eletroquímicos utilizados para caracterizar as células ou baterias.

Tabela 1: Principais características das células de bateria.

Parâmetros	Unidade de medida
Capacidade Específica	Ah
Capacidade Específica Volumétrica	Ah/l
Capacidade Específica Mássica	Ah/kg
Tensão Nominal	V
Taxa de recarga e descarga (C-rate)	C
Corrente	A
Ciclabilidade	-
Energia Específica	Wh
Energia Específica Volumétrica	Wh/l
Energia Específica Mássica	Wh/kg

Mássica	
Potência Específica	W
Potência Específica Volumétrica	W/l
Potência Específica Mássica	W/kg
Temperatura	°C
Peso da Célula	Kg
Dimensões	m

Fonte: (DENG, 2015a; MEZEI, 2011; PINHO; GALDINO, 2014; ROTTEK, 2020)

A capacidade específica é a quantidade total de corrente por tempo que uma célula ou bateria é capaz de fornecer até atingir sua tensão final de descarga. Tensão nominal é a diferença de potencial típica aceita durante o funcionamento entre os potenciais conectados ao ânodo e cátodo de uma célula eletroquímica. A taxa de recarga e descarga (C-rate) mede a velocidade em que a célula será capaz de recarregar e descarregar. Se uma bateria tiver o C-rate de 1C ela é descarregada totalmente (100% a 0%) em 1 hora, já se a mesma taxa for de 2C a bateria chegará em sua descarga total em 30 minutos. A corrente elétrica é o movimento de partículas portadoras de carga (elétrons) que uma célula pode aplicar sob um circuito externo, ou seja, a razão entre a quantidade de carga que trafega pelo condutor por unidade de tempo. Energia específica é a quantidade de energia elétrica que uma célula pode armazenar ou liberar. A potência específica é a capacidade que uma unidade de armazenamento tem para fornecer altas taxas de corrente sob demanda. Por fim, a ciclabilidade é responsável por mensurar a reversibilidade do processo de inclusão e subtração de íons de lítio, considerando o número de cargas e descargas antes da perda significativa da energia ou quando as unidades de armazenamento não conseguem manter a energia do dispositivo ou equipamento no qual está acoplado. Em outras palavras, a ciclabilidade é a quantidade de recargas e descargas que a célula de bateria permite antes do fim da sua vida útil. Para realizar a comparação entre tecnologias é necessário utilizar a capacidade, energia e potência normalizadas em massa (Ah/kg, Wh/kg e W/kg) ou volume (Ah/l, Wh/l e W/l) (DENG, 2015a; MEZEI, 2011; PINHO; GALDINO, 2014; ROTTEK, 2020).

Em aplicações onde é exigida uma quantidade constante de corrente por um longo espaço de tempo com possibilidade de descargas profundas por repetidas vezes (aplicações estacionárias) ou em conjunto com sistemas renováveis de energia, os parâmetros mais significativos são a capacidade de ciclabilidade da unidade de armazenamento, custo e confiabilidade. Já em aplicações mais exigentes como sistemas

portáteis e veículos elétricos, além dos critérios anteriores, o peso, volume, energia específica e segurança são componentes importantes para o bom funcionamento.

As células de lítio possuem como critérios de desempenho: a energia específica, energia volumétrica, capacidade específica, ciclabilidade, segurança, tolerância a abusos e o número de ciclos de recarga e descarga. Assim sendo, as principais características das LIB's são: a alta densidade de energia, alta eficiência de recarga e descarga, vida útil longa, baixas taxas de auto descarga, além disso, podem ter ciclos de recarga e descarga com altos níveis de corrente sem que ocorra grandes perdas de capacidade possibilitando ciclos mais rápidos, bom desempenho em estados parciais de carga, possibilita descargas profundas, possuem faixa de operação segura reduzida, o que faz necessário o uso obrigatório de sistemas de gerenciamento (BMS) para suas aplicações (ANDWARI et al., 2014; DENG, 2015a; LU et al., 2013; MAURO FERNANDO BASQUERA JÚNIOR et al., 2019).

As LIB's têm como ponto crítico os requisitos de tolerância a abusos, principalmente quando se refere a aplicação prática. Para que a bateria seja adequada para determinada aplicação é necessário que haja uma avaliação do protótipo requisitando testes de abusos mecânicos, térmicos e elétricos (DENG, 2015a).

As LIB's passam por avaliações de abusos que compõem testes de abusos mecânicos: contra queda e choque, penetração e imersão em água; testes de abusos térmicos: como estabilidade térmica, sobreaquecimento e testes em baixas temperaturas; e testes de abusos elétricos: como curto-circuito, sobrecarga, subdescarga e testes em elevadas correntes (DENG, 2015a).

2.6.5 Principais tecnologias de baterias de lítio-íon

Atualmente há diversas composições químicas utilizadas em baterias de lítio-íon, as quais são classificadas de acordo com o material ativo utilizado no cátodo. Algumas das tecnologias de baterias mais utilizadas no mercado são a de Lítio Níquel Cobalto Alumínio (NCA), Lítio Níquel Manganês Cobalto (NMC), Lítio Ferro Fosfato (LFP), Lítio Manganês Spinel (LMO), Óxido de Lítio Cobalto (LiCoO_2) e Lítio Titanato (LTO) (IEEE, 2018).

A comparação entre as principais tecnologias de LIB's para aplicações em VE's, é realizada a partir de suas características de custo, densidade de energia específica,

potência específica, segurança, desempenho e vida útil, como pode ser visto na Figura 6.

Figura 6: Diagrama simplificado das características das principais tecnologias de LIB's.



Fonte: (IEEE, 2018; MAURO FERNANDO BASQUERA JÚNIOR et al., 2019)

As composições químicas das baterias de lítio dependem da sua aplicação, pois não existe uma tecnologia que atenda o ponto ótimo, ou seja, que tenha um ótimo desempenho em todas as características descritas anteriormente. Dessa forma, as baterias do tipo NCA e NMC apresentam alta densidade de energia e um custo coerente com suas tecnologias, apesar disso possuem menor segurança e desempenho cíclico quando comparadas às células LFP e LTO. Contudo, as baterias do tipo LFP e LTO possuem maior custo e menor densidade de energia (IEEE, 2018; MAURO FERNANDO BASQUERA JÚNIOR et al., 2019)

Dessa forma, conclui-se que a escolha da tecnologia química a ser utilizada na bateria de lítio-íon deve ser de acordo com a sua aplicação. As baterias do tipo NCA e NMC são comumente encontradas em veículos leves puramente elétricos, no entanto, as baterias NMC apresentam maior vida útil, o que beneficia a sua utilização em PHEV's. Nas aplicações em veículos pesados, sistemas de backup ou sistemas de energia renovável (fotovoltaicos) é predominante no uso das células LFP (IEEE, 2018; MAURO FERNANDO BASQUERA JÚNIOR et al., 2019).

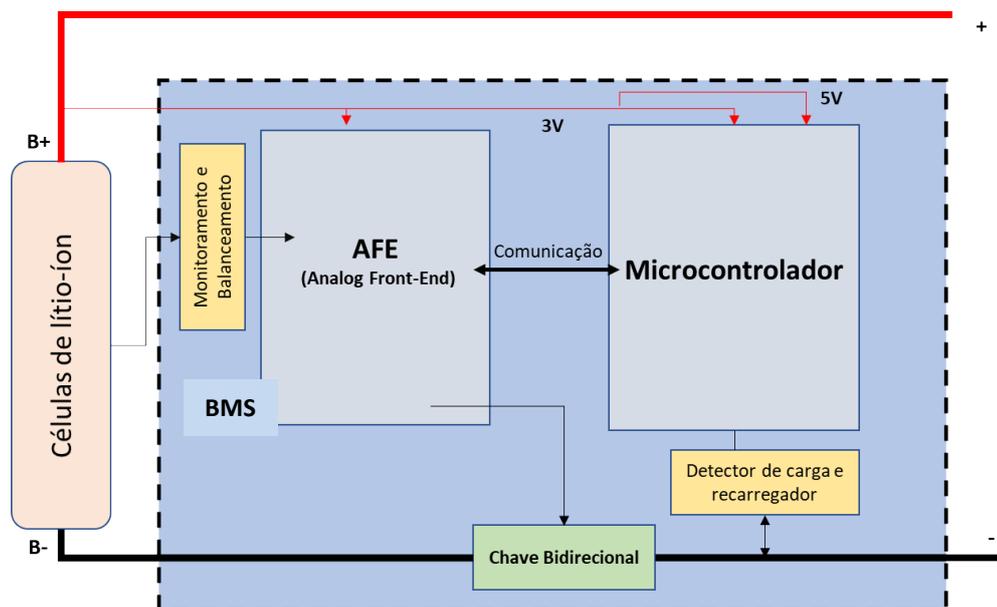
2.7 BATTERY MANAGEMENT SYSTEM (BMS)

Nesta seção serão apresentados de forma breve os conceitos de topologia e funcionalidades dos BMS's.

2.7.1 Conceitos Básicos

Os Sistemas de Gerenciamento de Bateria (BMS) detêm um papel de extrema importância nos sistemas de armazenamento de energia, em aplicações de veículos elétricos, sistemas renováveis de energia ou em sistemas de backup. O BMS possui como principais funções: o controle das condições operacionais e da segurança visando estender sua vida útil e garantir uma utilização segura em sua aplicação. No entanto, existem outras funções muito importantes como a realização da mensuração dos parâmetros de tensão, corrente e temperatura do sistema, balancear/equalizar as células de bateria e realizar a estimação do SoC, SoH e RUL. Essas particularidades em conjunto proporcionam que o BMS exerça outras funcionalidades como proteger as células, controlar os processos de recarga e descarga, adquirir dados e armazenar dados históricos (LU et al., 2013; MAURO FERNANDO BASQUERA JÚNIOR et al., 2019; RAHIMI-EICHI et al., 2013).

Figura 7: Estrutura básica de um sistema de gerenciamento de baterias (BMS).



Fonte: Adaptado de (MAURO FERNANDO BASQUERA JÚNIOR et al., 2019)

O BMS exemplificado na Figura 7 é composto por três placas de circuitos eletrônicos: *Analog Front-End* (AFE), o microcontrolador e a placa de potência. A placa AFE é responsável pela leitura, monitoramento e tratamento dos dados de tensão, corrente e temperatura, além de realizar o balanceamento das células de lítio-íon. O microcontrolador possui os algoritmos embarcados de SoC, SoH e RUL e a interface de

comunicação. A placa de potência é encarregada de acionar as chaves bidirecionais para permitir a recarga e descarga e abri-las caso haja alguma anomalia.

Os circuitos conectados aos sensores de monitoramento dos parâmetros são precisos, devido às pequenas variações entre as células e possíveis descontroles de temperatura em todo o módulo da bateria. O SoC informa a carga disponível armazenada na bateria em comparação com a carga total da bateria. O SoH presume o número de vezes que a bateria pode ser carregada e descarregada até que atinja o fim da sua vida útil. Esses estados protegem a bateria de situações anormais e prolongam a vida útil da bateria e só podem ser obtidos de forma indireta (LU et al., 2013; MAURO FERNANDO BASQUERA JÚNIOR et al., 2019; RAHIMI-EICHI et al., 2013).

O desbalanceamento das células de bateria causado pelas diferenças durante o processo de manufatura e devido às diferenças térmicas no módulo, faz com que a capacidade da bateria seja desperdiçada e o processo de recarga e descarga se limite às células de “melhor” e “pior” condição respectivamente. Dessa forma, faz-se necessária a utilização de métodos de equalização, os quais serão descritos mais a frente (MAURO FERNANDO BASQUERA JÚNIOR et al., 2019; RAHIMI-EICHI et al., 2013).

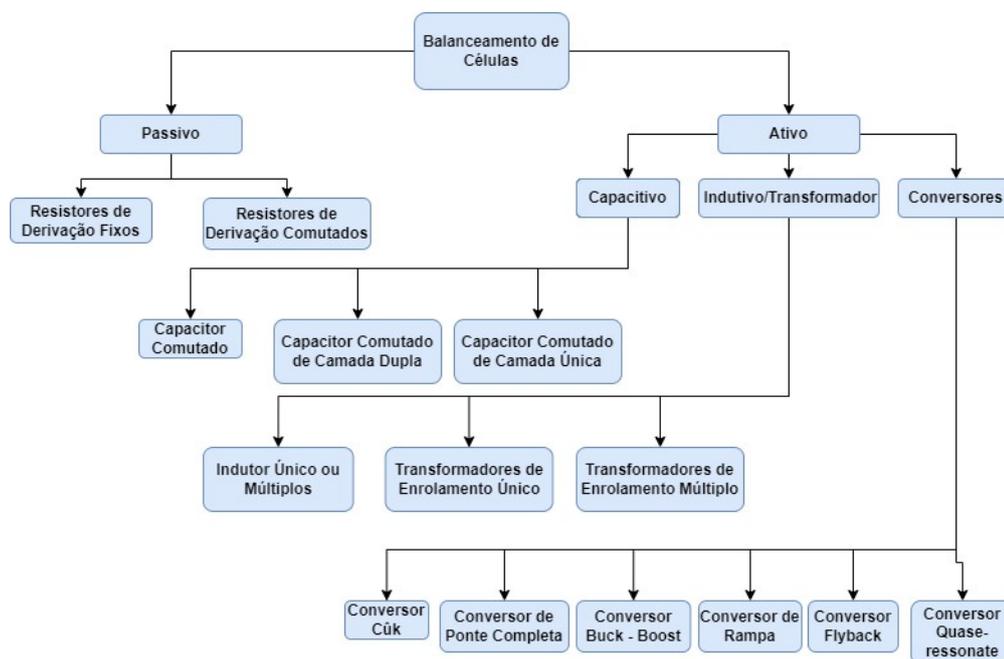
Durante a operação, as baterias estão sujeitas às condições críticas como sobretensão e subtensão, sobretemperatura, sobrecorrente e curto-circuito. Para evitar a ocorrência desses fatores é implementado um sistema de chaves bidirecionais, o qual é responsável pelo controle do processo de recarga e descarga, garantindo a proteção do módulo (MAURO FERNANDO BASQUERA JÚNIOR et al., 2019; RAHIMI-EICHI et al., 2013).

2.7.2 Balanceamento

O balanceamento das células de bateria é um fator essencial do BMS. O desbalanceamento pode ser causado por fatores internos da célula como variação da capacidade de armazenamento das células derivada de pequenas diferenças ocorridas durante a manufatura, variação da impedância interna e fatores de envelhecimento das células ou pode ser causado por componentes externos como temperaturas diferentes entre os empacotamentos das células de bateria, o que pode levar a uma taxa de descarga irregular das células e a drenagem de corrente pelos circuitos integrados de proteção dos módulos.

Os métodos de equalização de baterias levam em consideração algumas características cruciais para o bom funcionamento, sendo elas: o tempo de equalização, complexidade de controle, simplicidade de implementação, capacidade de ciclos de recarga/descarga, aplicações nas quais serão utilizados, custo, tamanho, entre outras características. A Figura 8 apresenta as topologias de balanceamento de células de bateria dividida em dois grandes grupos a) balanceamento passivo e b) balanceamento ativo. Os grupos serão caracterizados a seguir, com um enfoque especial nos métodos ativos à base de capacitores e conversor flyback e os métodos passivos.

Figura 8: Topologias de balanceamento de células de bateria.



Fonte: Adaptado de (DAOWD et al., 2011a)

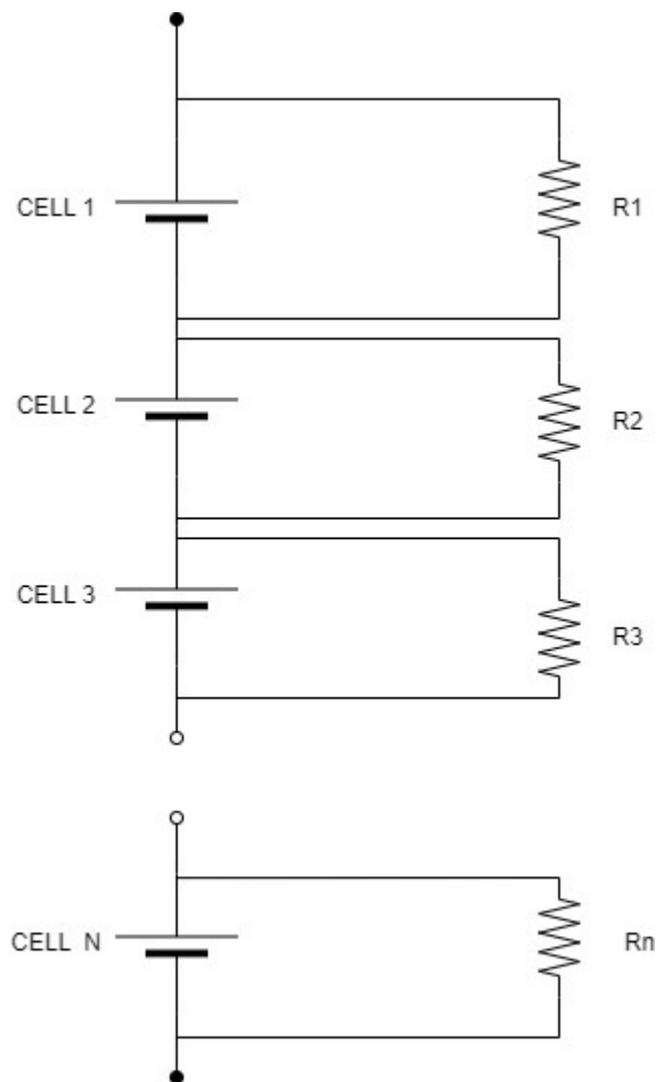
(a) Método Passivo de Balanceamento

O método passivo de balanceamento tem como principal característica o uso de componentes resistivos, principalmente resistores do tipo *shunt* (derivação) e o controlador possui como critério de equilíbrio as baterias com menor nível de tensão. Esse método retira o excesso de energia das células que possuem mais tensão, por meio do direcionamento da corrente das células com maior capacidade para o acionamento dos elementos resistivos do sistema, até que todas as células da bateria estejam equilibradas. Esse método possui dois subgrupos: (i) balanceamento passivo por resistores de derivação fixos e (ii) balanceamento passivo por resistor de derivação comutados.

i) Método de Resistores de Derivação Fixos

O método de resistores de derivação fixos utiliza o desvio constante da corrente das células e o resistor é regulado para limitar a tensão das células da bateria, conforme a Figura 9. Essa técnica é simples e de baixo custo, no entanto, desperdiça energia continuamente em forma de calor (DAOWD et al., 2011a; GALLARDO-LOZANO et al., 2014).

Figura 9: Método de balanceamento com resistores de derivação fixos.



Fonte: Adaptado de (DAOWD et al., 2011a)

ii) Método de Resistores de Derivação Comutados

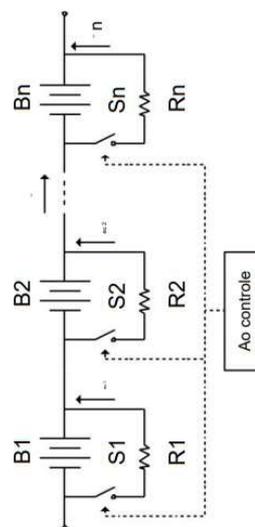
A técnica de resistores de derivação comutados desloca seletivamente a corrente de carregamento das células de forma descontínua à medida que elas se tornam carregadas. O processo de equalização é realizado a partir da associação de n chaves e n

resistores às células, como pode ser visto na Figura 10 (CAO; SCHOFIELD; EMADI, 2008; DAOWD et al., 2011a; GALLARDO-LOZANO et al., 2014; MOORE; SCHNEIDER, 2001).

Esse método pode funcionar de dois modos distintos: modo contínuo ou modo de detecção. O modo contínuo é aquele no qual todas as chaves são conectadas pelo mesmo sinal, ou seja, todas às chaves acionadas ou desativadas. No modo de detecção as tensões das células são monitoradas e cada chave é controlada individualmente, logo quando há a detecção de condições de desequilíbrio, o sistema decide qual resistor deve ser acionado para realizar o desvio de uma pequena fração da corrente para outra célula mais necessitada (DAOWD et al., 2011a; GALLARDO-LOZANO et al., 2014).

O método de resistores comutados é mais eficiente do que o método de resistores de derivação fixos, além de mais simples e confiável.

Figura 10: Método de Resistores de Derivação Comutados.



Fonte: (MOORE; SCHNEIDER, 2001)

(b) Método Ativo de Balanceamento

O método de balanceamento ativo utiliza circuitos externos para conduzir ativamente a energia entre as células de bateria com a finalidade de equalizá-las. A energia retirada das células com maior nível de energia é direcionada para as unidades com menor nível de energia. Essa classificação possui diversas topologias tendo como base capacitores, indutores, transformadores e conversores, como é mostrado na Figura 8 (MOORE; SCHNEIDER, 2001).

i) Método a Base de Capacitores

Os métodos de balanceamento capacitivo utilizam capacitores como dispositivo de armazenamento de energia para conduzir a energia entre as células do *pack* a fim de realizar a equalização. Esse método possui três subgrupos: capacitor comutado clássico, capacitor comutado de camada única e capacitor comutado de camada dupla (DAOWD et al., 2011a).

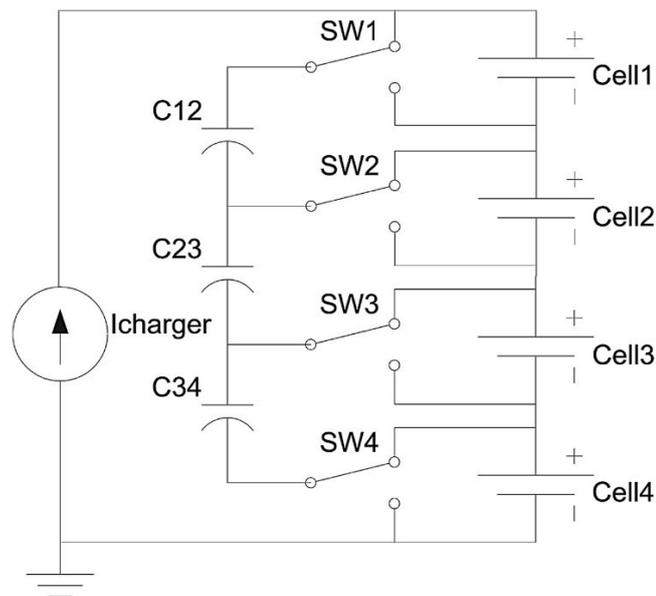
(1) Capacitor Comutado Clássico

O método de capacitor comutado utiliza de capacitores conectados em paralelo com as células, os quais são responsáveis pela transferência de energia entre a célula de carga mais elevada e a célula de carga mais baixa. Assim como ilustrado pela Figura 11, são necessários $n-1$ capacitores e n chaves para balancear n células (DAOWD et al., 2011a; QI; DAH-CHUAN LU, 2014a; YILDIRIM et al., 2019).

Esta técnica possui dois estados que se alternam constantemente. Durante o primeiro estado, cada capacitor é disposto em paralelo com a sua célula superior equivalente e, então, o capacitor é ajustado para a tensão da célula conectada. No segundo estado as células são conectadas em paralelo com a célula inferior associada, transferindo ou recebendo energia para se adequar a esta nova tensão (GALLARDO-LOZANO et al., 2014).

O método descrito possui maior eficiência comparado aos métodos anteriores, baixa complexidade e pode ser atribuído a aplicações de baixa e alta potência. Em contrapartida, esta técnica possui baixa velocidade de equalização devido a pequenas variações entre células vizinhas (DAOWD et al., 2011a; GALLARDO-LOZANO et al., 2014; QI; DAH-CHUAN LU, 2014a; YILDIRIM et al., 2019).

Figura 11: Método Capacitor Comutado.

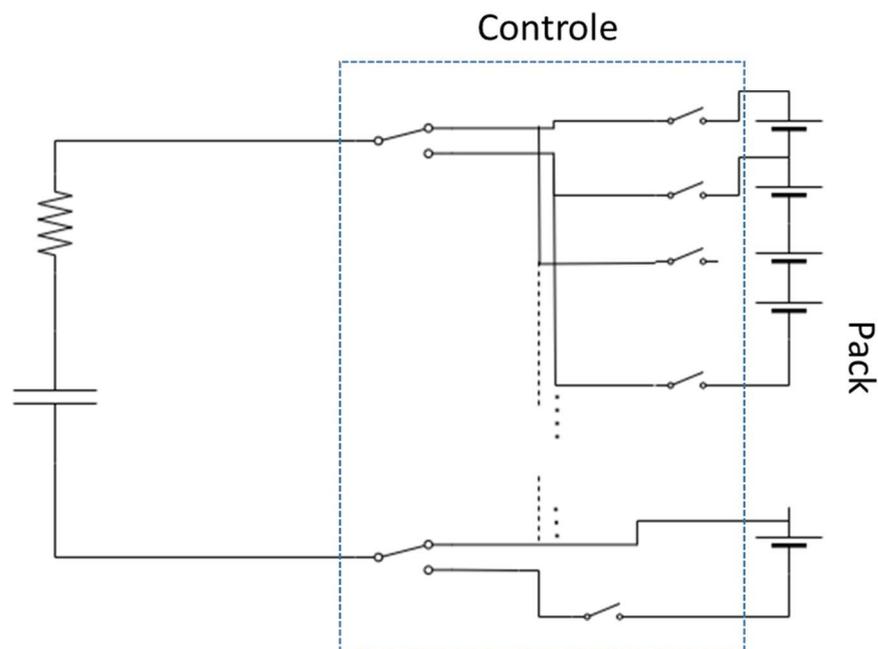


Fonte: (GALLARDO-LOZANO et al., 2014)

(2) Capacitor Comutado de Camada Única

Esta configuração é uma derivação do método anterior, no entanto, utiliza-se apenas de um capacitor conectado em paralelo com as unidades de armazenamento, como é retratado na Figura 12. O controle é realizado a partir da escolha das células com maior e menor energia e as suas respectivas chaves, para que a energia seja transmitida entre elas (DAOWD et al., 2011a; KHANAL et al., 2019).

Figura 12: Método Capacitor Comutado Único.



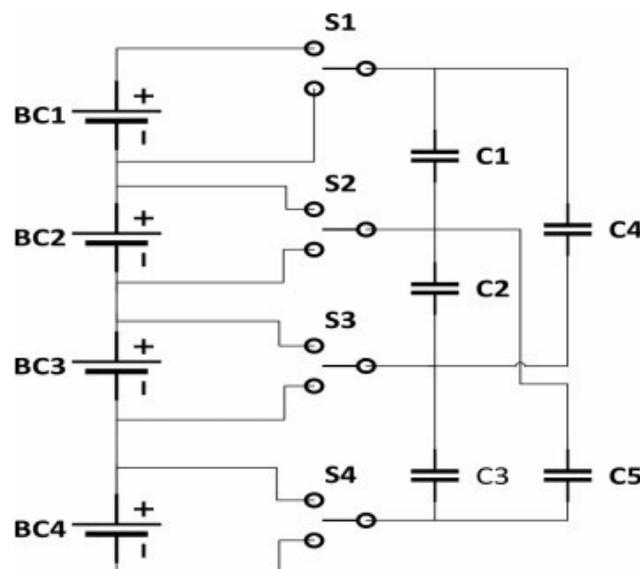
Fonte:(KHANAL et al., 2019)

(3) Capacitor Comutado de Camada Dupla

Esta configuração é uma derivação do método de capacitor comutado, no entanto, adiciona-se uma camada extra de capacitores em paralelo com os capacitores comutados iniciais. Os capacitores adicionais podem fornecer novos caminhos para o deslocamento da energia entre as células, o que proporciona a transferência entre células que não são próximas. Esse método necessita de $2n-3$ capacitores e n interruptores unipolar de duplo alcance (SPDT- do inglês *Single-pole double-throw switch*) para equalizar n células, como é mostrado na Figura 13.

A técnica de capacitor comutado de camada dupla reduz o tempo de equalização em até quatro vezes comparado aos demais métodos descritos acima, podendo operar durante a fase de recarga e descarga, contudo, ocorre um aumento no custo de implementação e em seu tamanho (DAOWD et al., 2011a; GALLARDO-LOZANO et al., 2014; KHANAL et al., 2019; QI; DAH-CHUAN LU, 2014a).

Figura 13: Método de Capacitor Comutado de Camada Dupla.



Fonte: (YILDIRIM et al., 2019)

ii) Método à Base de Indutores ou Transformadores

O método a base de indutores ou transformadores realiza o balanceamento a partir da utilização de dispositivos magnéticos como indutores ou transformadores para transferir a energia entre múltiplas células. Com a utilização de correntes mais elevadas durante a equalização das células é possível reduzir o tempo de equilíbrio celular. Porém, os circuitos de balanceamento descritos possuem elevado custo de produção e perdas causadas pelo transformador que devem ser consideradas no projeto de

balanceamento. Esta topologia possui três subgrupos, indutor único ou múltiplos, transformador de enrolamento único e transformador de enrolamento múltiplo (DAOWD et al., 2011a; GALLARDO-LOZANO et al., 2014; KHANAL et al., 2019; LEE et al., 2016; MOORE; SCHNEIDER, 2001).

iii) Método à Base de Conversores

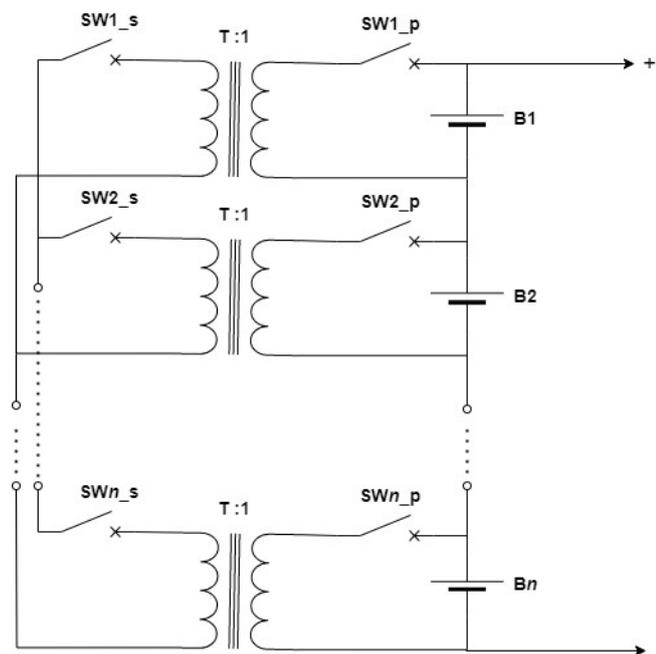
O método a base de conversores utiliza conversores CC-CC para equalizar as células de bateria do sistema. Os circuitos à base de conversores possuem maior eficiência para transmitir energia, porém podem ter elevado tamanho e exigir um controle complexo devido a junção de componentes passivos e ativos. Esta topologia possui diversos subgrupos, conversor Ćuk, buck e/ou boost, flyback, ramp, full-bridge e quasi-resonant (DAOWD et al., 2011a; KHANAL et al., 2019; LEE et al., 2016). Apesar de haverem todos esses tipos de conversores, nesse trabalho haverá um maior foco no conversor flyback, sobre o qual apresentaremos maiores detalhes a seguir.

(1) Conversor Flyback

Este método utiliza-se de conversores *flyback* conectados em estruturas isoladas, podendo ser encontrados em duas configurações: unidirecional e bidirecional. Na estrutura unidirecional, a célula mais carregada transmite sua energia excedente para um transformador quando sua respectiva chave está acionada, e no momento em que a chave é desativada o transformador transfere essa energia acumulada para o *pack*. Na estrutura bidirecional a transmissão de energia é realizada de uma forma mais versátil, ou seja, o conversor *flyback* fornece energia das seguintes formas, *cell to pack*, *pack to cell* e *cell to pack to cell*, dependendo do modelo de controle e comutação (CAMBOIM et al., 2022).

O método de balanceamento utilizando conversores *flyback* pode ser implementado em aplicações com grande número de células, devido a sua alta eficiência e baixo nível de estresse de tensão e corrente. No entanto, essa topologia conta com perdas magnéticas devido ao transformador, apresenta elevado volume e custo, seu controle é complexo. Na Figura 14 é ilustrado o circuito de balanceamento baseado em conversores *flyback* (CARTER; FAN; CAO, 2020; DAOWD et al., 2011a; LEE et al., 2016; QI; DAH-CHUAN LU, 2014b; CAMBOIM et al., 2022).

Figura 14: Método de equalização com conversores flyback.

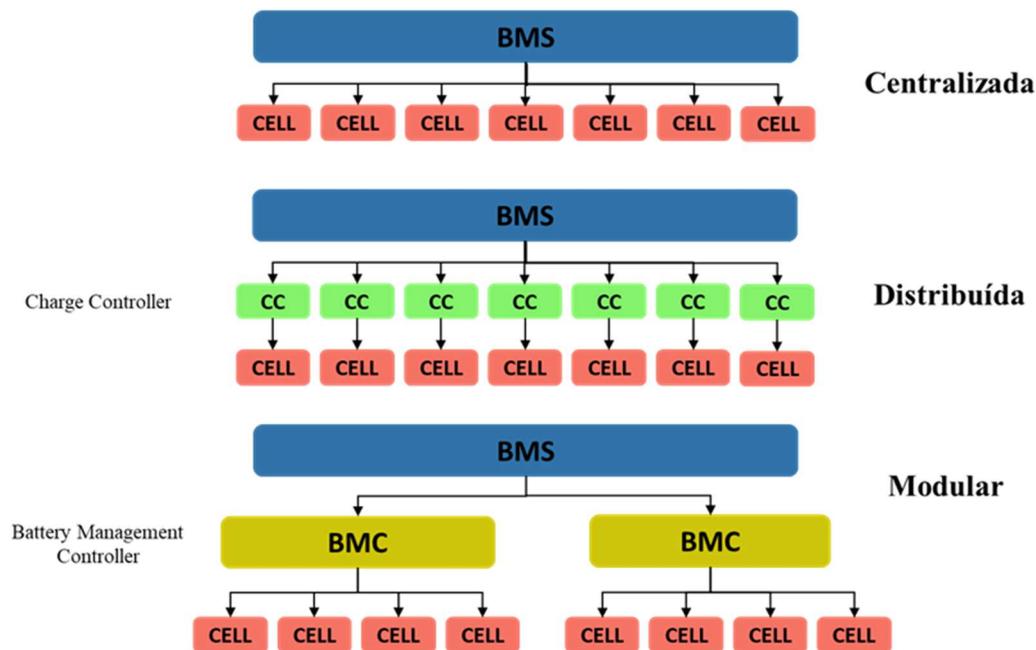


Fonte: (CAMBOIM et al., 2022)

2.7.3 Arquitetura

O sistema de gerenciamento pode ser classificado de acordo com a sua alocação, podendo impactar diretamente de forma técnica e econômica na aplicação. Os BMS's podem ser instalados com arquitetura centralizada, distribuída ou modular, como apresentado na Figura 15.

Figura 15: Arquitetura do Sistema de Gerenciamento de Baterias.



Fonte: (HOQUE et al., 2017)

a) Arquitetura Centralizada

Na arquitetura centralizada todas as funções e os circuitos são localizados apenas em um ponto, no qual ocorre o início das conexões entre as células de bateria e a eletrônica embarcada para o gerenciamento. Essas estruturas são compactas, possuem uma solução de menor custo devido ao agrupamento da eletrônica em um único equipamento, facilidade de manutenção, mas escalabilidade dificultada devido à centralização.

b) Arquitetura Distribuída

A arquitetura distribuída possui características opostas ao modelo apresentado anteriormente como: escalabilidade facilitada devido à descentralização (o sistema é composto por mais conexões, sendo elas mais próximas e de tamanho reduzido), no entanto, apresenta custo elevado devido à aplicação de um número maior de componentes eletrônicos e difícil instalação.

c) Arquitetura Modular

A arquitetura modular busca unir as melhores características contidas nas arquiteturas centralizada e distribuída, trazendo um melhor desempenho para o sistema.

A proposta desse modelo é unir um certo número de células sob um mesmo controlador, havendo um segundo elemento responsável por controlar os dispositivos da camada inferior. Esse sistema é conhecido como Mestre-Escravo, permitindo que o BMS (Mestre) processe os dados e realize a comunicação, enquanto o BMC (Escravo) mensure os parâmetros do sistema. Nessa estrutura, o conjunto de fiação é de fácil manutenção, aceita uma expansão direta de acordo com a necessidade e seu custo é maior comparado as outras arquiteturas devido a duplicação de tarefas.

2.8 SEGUNDA VIDA

As baterias de lítio-íon destinadas à aplicação de tração elétrica em veículos elétricos possuem uma vida útil próxima de 8 anos ou cerca de 160 mil quilômetros rodados (BATTERY UNIVERSITY, 2019). Após completar a quilometragem determinada ou o tempo pré-estabelecido pelo fabricante a bateria perde sua eficiência para aplicações de VE's o que determina o fim da sua vida útil, que é o momento em que a bateria atinge 80% da sua capacidade nominal (HOSSAIN et al., 2019). No entanto, esse nível limitante pode ser atingido mais rapidamente, devido a condições associadas à temperatura, uso excessivo do veículo, problemas durante a manufatura, etc. Dessa forma, o histórico de uso em primeira vida é de extrema importância e influenciará diretamente na sua segunda aplicação.

O envelhecimento das células de bateria pode ser classificado de duas formas: a) por calendário ou b) quantidade de ciclos operados pela bateria durante seu uso. Porém, ambos os casos são responsáveis pelo término da vida útil da célula.

a) Envelhecimento determinado pelo calendário

Esse tipo de envelhecimento é associado à autodescarga que vai ser causada por qualquer motivo, independentemente do uso dado à célula de bateria, ela estando em funcionamento ou não. Essa situação pode ser agravada em ocasiões em que a temperatura no local de armazenamento é aumentada e o estado de carga que ela se encontra quando foi armazenada.

b) Envelhecimento determinado pela quantidade de ciclos

Essa classificação é característica de sistemas em operação, devido à dependência do modo e da frequência de uso do veículo, temperatura, estado de carga, regime de corrente e profundidade de descarga (do inglês *Depth of Discharge - DoD*) na operação (SCHLASZA et al., 2014). Em aplicações onde os ciclos de descarga e recarga não são concluídos, como em aplicações em sistemas de energia renovável e em VE's, a

capacidade total transferida das baterias se torna um identificador de envelhecimento (DUNN; KAMATH; TARASCON, 2011).

2.8.1 Utilização de LIB's em Segunda Aplicação

As células de bateria quando retiradas dos VE's possuem 80% da sua carga nominal, no entanto, ao fim dessa aplicação as células ainda possuem grande capacidade de energia e a forma de reciclar essa célula é empregá-la em outras aplicações menos exigentes. O alto potencial de reuso tem atraído pesquisadores e indústrias devido a capacidade de novas potenciais aplicações no mercado, o que favorece comercialmente os envolvidos. A Figura 1 apresentada no capítulo de introdução ilustra a projeção de disponibilidade de baterias para aplicações futuras no campo de segundas aplicações.

Porém, para que o uso das baterias em segunda aplicação seja viável, é importante que sejam realizados diversos testes. Esses testes podem ser realizados a partir das características específicas da bateria, obtidas por meio do acesso aos dados obtidos pelo BMS durante a primeira aplicação da célula. Os dados fornecidos pelo sistema de controle e monitoramento muitas vezes podem ser utilizados para contabilizar a viabilidade e para prognóstico do comportamento da célula de bateria durante sua degradação em uma segunda aplicação. No entanto, parte desses dados é criptografada, sendo o acesso concedido apenas aos fabricantes automotivos responsáveis, ou não está disponível em forma de dados históricos.

O potencial de aplicação de unidades de armazenamento retiradas de veículos elétricos, deve priorizar aplicações menos exigentes em termos de ciclabilidade e DoD. As aplicações em segunda vida são separadas em: recondicionamento e reaproveitamento.

O processo de recondicionamento geralmente refere-se à substituição de células ou módulos danificados ou com a sua vida útil finalizada, com a intenção de reutilizar o conjunto novamente em veículos elétricos. A ação de reaproveitamento das células ocorre a partir da substituição de algumas células ou módulo, mas a bateria é realocada para aplicações estacionárias como armazenamento de energia.

3 ESTADO DA ARTE

As células de bateria estão sendo utilizadas em diversos âmbitos como, por exemplo, em sistemas de armazenamento de geração renovável, veículos elétricos, indústrias de telecomunicações, sistemas de backup, entre outras aplicações. No entanto, as células possuem pequenas variações entre si, causando um desequilíbrio no sistema de bateria. O desbalanceamento das células pode ser derivado de dois fatores, sendo eles internos causados por pequenas variações durante a fabricação ou externos, como em circuitos integrados.

Para resolver o problema de discrepância entre as células, diversos métodos de equalização têm sido propostos na literatura para prolongar a vida útil, melhorar a segurança durante a operação e aumentar a capacidade útil utilizada das baterias. Em (DAOWD et al., 2011d) são discutidos os principais métodos de balanceamento utilizados em diferentes aplicações. Algumas dessas topologias como resistor de derivação fixo e comutado, capacitor comutado único e de camada dupla, multi-indutor, transformador de enrolamento único e conversor *buck-boost* com sistema de controle são simuladas, respeitando as condições de 4 células de polímero de lítio (Li-Po) com capacidade de 12Ah com SoC de 80, 78, 76 e 74% respectivamente utilizando um modelo em MATLAB/Simulink. Além disso, é realizada a comparação entre as técnicas com base no projeto do circuito, aplicação, implementações, custo, entre outros. Segundo o autor não há uma topologia ótima para todas as aplicações, dessa forma, a escolha do método depende diretamente da aplicação desejada. No entanto, para aplicações de alta potência o resistor de derivação comutada é considerado uma boa alternativa, devido ao seu baixo custo, tamanho reduzido e simplicidade de controle. Em aplicações como HEV (veículos elétricos e híbridos, do inglês *Hybrid Electric Vehicle*) e de controle simples, o método de capacitor comutado é uma boa opção, mas possui período prolongado para o balanceamento. Já para as aplicações que necessitam de equalização rápida, a utilização de indutores e transformadores comutados se torna uma boa opção, mas estas técnicas necessitam de controles complexos e possuem perdas magnéticas. Os métodos de conversão de energia são mais adequados para aplicações de média e alta potência com controle em todo o período de balanceamento, porém possuem alto custo, tamanho elevado e controle complexo.

Outros trabalhos como (CAO; SCHOFIELD; EMADI, 2008; KHANAL et al., 2019; MOORE; SCHNEIDER, 2001; QI; DAH-CHUAN LU, 2014a; YILDIRIM et al.,

2019) apresentam técnicas de balanceamento celular, com pequenas diferenças de classificação e nomenclatura. Em (CAO; SCHOFIELD; EMADI, 2008) as técnicas são organizadas e analisadas conforme a natureza do equilíbrio, os componentes principais para balancear uma cadeia de n células, o melhor período para realizar a técnica e em relação a sua capacidade de design modular. Conclui-se que entre todos os métodos apresentados o resistor dissipativo é uma boa opção para aplicações de baixa potência, a derivação *boost* é uma opção viável para aplicações de baixa e alta potência, pois possui custo relativamente baixo e controle simples enquanto o método de capacitores chaveados é adequado para aplicações em HEV, devido à sua possibilidade de operação na descarga e recarga e simplicidade de controle durante o processo.

Levando em consideração a forma de processamento da energia redundante em células de bateria, (QI; DAH-CHUAN LU, 2014a) caracteriza as técnicas em três grupos, como as que realizam dissipação de energia redundante, transferência de energia entre células e o controle de corrente de carga/descarga de cada célula. O método de dissipação de energia redundante é visto como uma técnica que desperdiça a energia das células em forma de calor e esta modalidade não é aplicada em equalização online, o que se torna uma grande desvantagem. A segunda técnica, utiliza a energia excedente de forma eficiente, porém, necessita de circuitos extras e algoritmos de controle. Por fim, a terceira técnica proposta realiza o controle individual das células, mas exige circuitos e métodos de controle mais complexos.

O balanceamento das células de bateria em sistemas altamente transitórios, em especial em aplicações onde ocorre o carregamento com frequência, como por exemplo em HEV's é estudado em (MOORE; SCHNEIDER, 2001). Os autores apresentam uma revisão dos métodos de equalização das células de lítio íon, caracterizando-as em balanceamento passivo, ativo e das células de fim de carga, para mobilidade elétrica. O carregamento da bateria é limitado pela primeira célula que atinge a tensão de fim de carga, mas muitas vezes isso ocorre prematuramente o que causa um desequilíbrio no sistema. Dessa forma, os autores propõem o controle das células pela tensão de fim de carga, monitorando as unidades que apresentam maior tensão até que as células de baixa tensão alcancem os limites estabelecidos. Em aplicações em HEV's, os métodos de desvio de carga são bons, mas possuem limitação devido ao alto índice de corrente dissipada. O uso de técnicas a base de transformadores é aplicável, mas possuem elevado custo e, devido aos componentes magnéticos, existe uma perda que deve ser levada em consideração, quando aplicadas em sistemas de gerenciamento de baterias. O

método de transporte deve ser evitado neste tipo de aplicação, devido ao alto número de chaves no circuito de controle. No entanto, em HEV's por possuírem baterias menores que os modelos puramente elétricos, é possível a aplicação desse modelo utilizando correntes de comutação de pico menores. A técnica dissipativa é aplicável e possui o menor custo em comparação com as anteriores para os veículos elétricos, mas para HEV's o desenvolvimento do algoritmo acaba sendo mais caro.

Os sistemas de armazenamento por baterias são de grande importância para as redes inteligentes, pois elas buscam compensar os eventos inesperados na geração renovável e do sistema de distribuição. Nestes sistemas as células de bateria são agrupadas em série para aumentar os níveis de tensão da bateria, mas é inevitável que não haja divergências térmicas ou de fabricação entre as células. Em (YILDIRIM et al., 2019) os autores avaliam e comparam os métodos de balanceamento em termos de velocidade e eficiência de equalização, custo, aplicação e complexidade de controle utilizando um modelo em MATLAB/Simulink com 4 baterias de 3,2V, capacidade de 10Ah e com SoC 70, 65, 68, 60% respectivamente. As técnicas dissipativas dependem diretamente da corrente de balanceamento, para correntes elevadas é necessário um investimento maior em sistemas de refrigeração e ocorre o aumento das perdas devido a dissipação de energia em forma de calor. Dessa forma, com limitação de correntes elevadas, a velocidade de equalização é lenta, possui baixa eficiência energética e é indicado para aplicações de baixa potência. O método de capacitor comutado é adequado para prolongar o tempo de serviço da bateria e em aplicações de alta potência. Contudo, as técnicas que utilizam capacitores para fazer o transporte da energia dependem da diferença de tensão entre as células, o que limita a velocidade e a precisão de equalização do sistema. Este método possui alta eficiência energética sendo próxima de 97% com três células, mas com o aumento das unidades de armazenamento a sua eficiência diminui. A técnica de balanceamento em tempo de execução utiliza de conversores CC-CC para fazer a equalização das células. Este método é propício para o uso em aplicações que empregam células pré-utilizadas, possuem alta eficiência e rápida velocidade de balanceamento.

Com o intuito de analisar e comparar as topologias de balanceamento em sistemas de gestão de bateria, (KHANAL et al., 2019) realiza a simulação em MATLAB/Simulink dos métodos de equalização passivo de resistores de derivação comutados e em seguida a técnica ativa com capacitor comutado único, para dois grupos de células de tensões diferentes. O sistema analisado constitui-se de 2 grupos de células

com tensões 3,3 V e 7,1 V, contendo 3 células por grupo com capacidade de 2,3Ah cada, SoC's iniciais de 100, 90 e 60% respectivamente e as unidades de armazenamento são consideradas balanceadas quando seu SoC está dentro de uma variação de 5% entre elas. Dessa forma, os resultados obtidos para a simulação com tensão de 3,3V foram 60, 50 e 60% de SoC final, obtidos após 2200 segundos com uma perda de energia de 7,1mWh para o método passivo. O balanceamento ativo não conseguiu atingir o balanceamento mesmo após 12 horas, alcançando um SoC final de 94, 90 e 66% com uma perda de 0,5 mWh. Para a simulação com tensão de 7,1V o método passivo obteve um SoC final de 65, 65, 60% em 950 segundos, com uma perda de energia de 11,5 mWh. O balanceamento ativo foi efetivado após 40000 segundos, com um SoC final de 85, 85, 80% e 0,5 mWh de perda de energia. Conclui-se que ambas as técnicas são válidas, no entanto, o método de capacitor comutado único possui um custo maior de tempo de equalização.

Os autores de (TONG; KLEIN; PARK, 2014) propõem um projeto de armazenamento estacionário de energia para redes inteligentes utilizando baterias de segunda vida. O trabalho tem como objetivos suportar a demanda energética de uma família utilizando energia elétrica e painéis fotovoltaicos, otimizar a dependência da rede com a utilização de sistemas de armazenamento, fornecer energia à rede durante o horário de pico onde o custo da energia é maior e realizar o carregamento de um PHEV utilizando uma estação de carregamento tipo 2. O autor utilizou um sistema contendo 12 painéis fotovoltaicos conectados em série fornecendo 2,16kW de potência nominal, uma estação de recarga veicular nível 2, que realiza o carregamento do PHEV diariamente com uma demanda variável entre 2kWh e 8kWh, possuindo uma potência nominal total de 10kW para o sistema interligado, um sistema de baterias composto por 9 células de LiFePO₄ conectadas em paralelo para formar um banco e 15 bancos conectados em série formando um pack, sendo que cada banco de bateria é conectado a um sistema de gerenciamento de baterias (BMS) para detectar a tensão e a temperatura, além disso, são conectados a sensores de corrente, a um sistema de balanceamento passivo para desviar parte da energia de um banco, reduzindo assim o desequilíbrio entre as unidades de armazenamento, por fim, é vinculado a um modelo de monitoramento e controle de dados de todo o sistema descrito.

Para a realização dos testes os autores de (TONG; KLEIN; PARK, 2014) consideraram: um ciclo de uso de um dia típico; um conjunto de decisões baseadas em três variáveis (a) status da bateria, (b) preço da concessionária variável no tempo e (c)

demanda de energia com o desconto derivado da produção renovável; e duas estratégias de gerenciamento do sistema. Na estratégia (1), a bateria recebe a energia derivada da geração fotovoltaica se a geração for maior que a demanda de energia da casa e o preço da concessionária está no horário fora de pico. Logo, a bateria descarregará para sustentar a demanda da residência caso a produção advinda da geração fotovoltaica não seja suficiente para sustentar a carga do imóvel e o preço da concessionária estiver no horário de pico. Na estratégia (2), a unidade de armazenamento recarrega se a produção derivada da geração fotovoltaica for maior que a energia demandada pelo domicílio, independente do custo da energia no instante. Dessa forma, conclui-se que o sistema que opera utilizando a estratégia (1) envia a energia da geração fotovoltaica para a rede obtendo uma melhor economia utilizando menos da bateria, ou seja, esse método é mais dependente da rede. No entanto, a estratégia (2) utiliza a energia excedente da geração renovável para sempre recarregar a bateria, ou seja, este modo depende mais da bateria e menos da rede de energia elétrica. Em geral, o sistema proposto pelo autor produziu 218,3kWh de energia derivada da geração fotovoltaica e a bateria forneceu 63kWh de energia, trazendo uma economia mensal de US\$32,8 dólares em um mês de inverno. No entanto, há a necessidade futura de um estudo detalhado sobre os aspectos da extensão da vida útil dessas células de bateria (TONG; KLEIN; PARK, 2014).

Buscando analisar a viabilidade da implementação de baterias de segunda vida em sistemas de carregamento veicular que utilizam sistemas fotovoltaicos off-grid, em (TONG et al., 2013) é realizada uma investigação experimental da viabilidade para esta aplicação simulando um modelo matemático em MATLAB/Simulink para diferentes condições. O sistema proposto baseia-se em uma matriz fotovoltaica com seis módulos conectados em série por conjunto de módulo (string), e quatro strings em paralelo produzindo uma potência nominal de 1,44kW. Os módulos fotovoltaicos são conectados a um controlador CC-CC para que a energia advinda dos painéis seja regulada e direcionada às unidades de armazenamento. O conjunto de baterias de lítio ferro fosfato (LFP) é dividido em dois grupos levando em consideração sua capacidade remanescente. O primeiro grupo é constituído de células com capacidade restante de 32-36Ah (80% - 90% da capacidade nominal da célula) e o segundo grupo é composto por células com capacidade restante de 23-26Ah (60% - 65% da capacidade nominal). Para minimizar as desigualdades de capacidade nos bancos de bateria foram adicionadas 9 células, sendo que cinco são do grupo 1 e quatro do grupo 2 conectadas em série por módulo, totalizando quinze módulos conectados em paralelo fornecendo uma

capacidade total de 13,9kWh. Além disso, o sistema de baterias conta com a utilização do método de balanceamento passivo para otimizar a capacidade das células e com o BMS para monitorar e regular a tensão de cada banco e a tensão e corrente de todo o conjunto de bateria. Por fim, o conjunto de células é conectado a um inversor para que o veículo elétrico seja carregado (TONG et al., 2013).

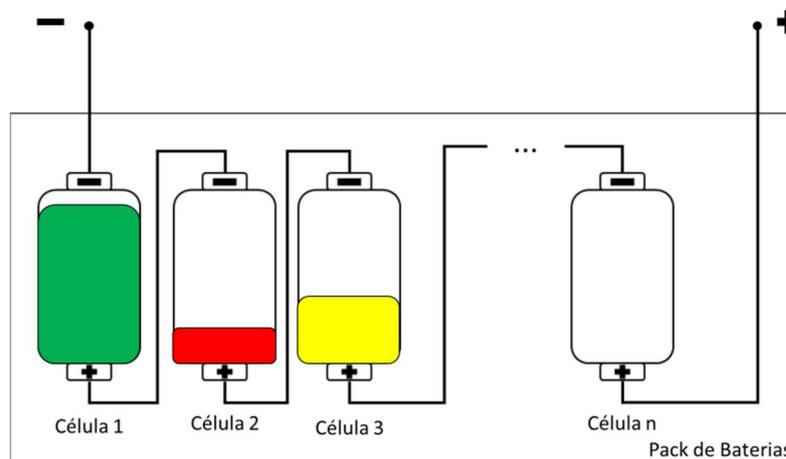
Para definir os parâmetros do modelo, o sistema da bateria estudado em (TONG et al., 2013) foi submetido a testes de tensão de circuito aberto (do inglês *Open Circuit Voltage* - OCV) e de pulso para o banco de células mais fraco devido às limitações dos testes. A matriz fotovoltaica foi submetida a um conjunto de diferentes dados de irradiância, OCV, corrente de curto-circuito, entre outras variáveis para diferentes temperaturas. Baseando-se no modelo e no parâmetro, os autores realizaram simulações considerando o consumo diário de uma unidade de carregamento de veículos elétricos de 10kWh, uma geração fotovoltaica de 2,16kW e um conjunto de baterias de 13,9kWh, considerando sete cidades com diferentes níveis de irradiação. Concluiu-se que o sistema é eficaz, com um sistema de controle apropriado é possível obter um rendimento anual de 2952kWh em Sacramento/CA, e com a utilização de células de segunda vida reduz-se o custo do sistema em 50%. O método proposto depende da geração local, necessitando de possíveis otimizações dependendo da irradiância do local instalado e, se bem projetadas, as células em segunda aplicação podem ter um desempenho semelhante a células novas (TONG et al., 2013).

Baseando-se nos trabalhos apresentados nessa seção, este trabalho busca avaliar os três métodos de balanceamento propostos para a aplicação em células já degradadas que serão direcionadas a uma nova aplicação e assim contribuir para comunidade científica com novas informações em relação as células de segunda vida e os métodos de equalização.

4 METODOLOGIA

As células de lítio-íon quando utilizadas em aplicações de Sistema de Armazenamento de Energia (BESS), são conectadas em série ou paralelo para atingir os requisitos de energia do sistema de armazenamento. A conexão em série das células faz com que todo o sistema conectado forneça e receba a mesma corrente. No entanto, cada célula possui características próprias de fabricação, possuindo pequenas diferenças de parâmetros como capacidade total, impedância, eficiência e autodescarga entre si. Dessa forma, quando submetidas a ciclos de carga e descarga, as células da bateria apresentam com o passar do tempo pequenas diferenças em relação ao nível de tensão e ao SoC, o que pode ser prejudicial para o *pack*. A Figura 16 apresenta um conjunto de células conectadas em série com diferentes níveis de SoC.

Figura 16: Pack de baterias com células conectadas em série.



Fonte: Elaboração própria

Quando o *pack* de bateria é descarregado o sistema de proteção do BMS limita o fornecimento da energia baseando-se na célula mais descarregada e quando ela é recarregada, o sistema limita a energia baseando-se na célula mais carregada. Esse desbalanceamento entre as células faz com que o *pack* tenha sua capacidade de fornecimento reduzida o que pode prejudicar o seu funcionamento em diferentes aplicações. Essas diferenças podem causar danos significativos como subtensão, sobretensão e com o passar do tempo as diferenças tendem a aumentar com a degradação das células, pois as células com menor capacidade serão expostas a tensões extremas, sobrecarga e subdescarga.

A implementação de mecanismos de balanceamento celular, permite a transferência de carga de células selecionadas de forma a solucionar os efeitos das discrepâncias do SoC, aumentando a eficiência e garantindo o funcionamento seguro dos *packs* de bateria.

Como já explicado nas seções anteriores, as células de bateria de lítio-íon têm como principal aplicação o armazenamento de energia em veículos elétricos e híbridos. No entanto, quando as células atingem 80% da sua capacidade nominal elas são retiradas dos VE's, passam por um processo de remanufatura e, em seguida, essas células podem ser destinadas a uma segunda aplicação menos exigente, ou seja, em aplicações em que as células de bateria não sejam submetidas à níveis elevados de estresse, como em sistemas de armazenamento estacionário, ciclabilidade e *backup*.

Essas células destinadas às segundas aplicações são mais propícias às diferenças descritas anteriormente. Dessa forma, este trabalho visa estudar os efeitos da equalização dissipativa e não-dissipativa das células de lítio íon. Para isso, os métodos de balanceamento com resistor comutado, balanceamento com capacitor comutado clássico e com conversores *flyback's* são estudados, simulados e comparados com base na velocidade e eficiência de balanceamento com o intuito de analisar as vantagens e desvantagens das metodologias para à aplicação.

4.1 CARACTERÍSTICAS DE SIMULAÇÃO

O objeto de estudo desse trabalho é um conjunto de estratégias de balanceamento aplicadas em células de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO₄) de segunda vida. Esta tecnologia de bateria possui excelente segurança, longo tempo de serviço, bom desempenho de temperatura e baixo custo. A Tabela 2 mostra algumas características básicas desse modelo de célula.

Tabela 2: Parâmetros da célula de bateria LFP.

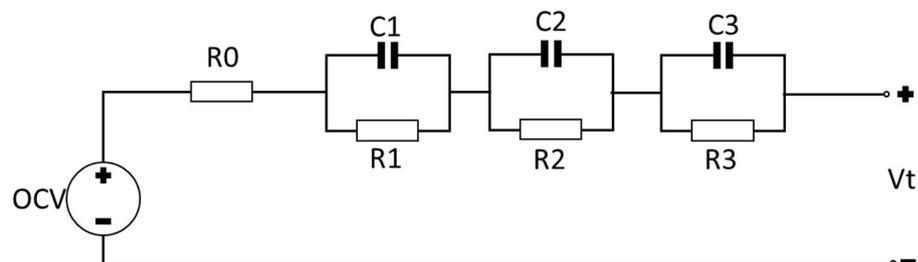
Características Básicas	
Química da bateria	LiFePO ₄
Capacidade nominal	25 Ah
Tensão nominal	3.20 V
Tensão máxima de recarga	3.65 V
Corrente de recarga final (modo cv)	0.05C
Tensão mínima de descarga	2.00 V

Corrente máxima de descarga	CONTÍNUA: 3C
	PULSO: 5C
Faixa de tempera em recarga	0~+45°C
Faixa de tempera em descarga	-20~+55°C

Fonte: Elaboração própria

As células de lítio utilizadas na bateria foram simuladas no software MATLAB/Simulink utilizando um modelo de circuito equivalente (do inglês *Equivalent Circuit Model* – ECM), como mostra a Figura 17, composto uma fonte de Tensão de Circuito Aberto (OCV) que representa a tensão da célula quando a mesma não é submetida a regimes de carga ou descarga durante grandes períodos. Na Figura 17, R_0 retrata todas as resistências ôhmicas internas e expressa a variação instantânea da tensão celular quando aplicado um degrau de corrente em seus terminais, os ramos RC (Resistor-Capacitor) paralelos conectados em série representam o comportamento das reações eletroquímicas das células e V_t é a tensão terminal da unidade de armazenamento. Associado ao circuito, são utilizadas diversas tabelas de consulta (do inglês *Lookup Table* – LUT) com os dados de tensão OCV, SoC e dos componentes RC do sistema.

Figura 17: Modelo de circuito equivalente da célula de lítio íon.



Fonte: Elaboração própria

Para a realização das simulações foram determinadas algumas condições iniciais como: o tempo de simulação, o intervalo entre as iterações, número de células, número de células por *pack*, número de *pack's*, desvio dos parâmetros do circuito equivalente, desvio da capacidade e do estado de carga, valor *threshold* de balanceamento, resistência de balanceamento e as tensões máximas e mínimas utilizadas. A Tabela 3 mostra os parâmetros iniciais dos modelos de balanceamento.

Tabela 3: Parâmetros utilizados para a simulação dos modelos de balanceamento.

Parâmetros	Valor
Número de Simulações	50

Número de Células (N_{cell})	12
Número de Células por pack (Num_cell)	4
Número de Packs (Num_pack)	3
Tempo de Simulação	86400 s
Tempo de Iteração	50×10^{-3} s
SoC <i>Threshold</i> de Balanceamento	2%
Tensão <i>Threshold</i> de Balanceamento	20 mV
Resistência de Balanceamento	5Ω
Tensão Mínima	3.00V
Tensão Máxima	3.65V
Desvio dos Parâmetros do ECM	10%
Desvio de Capacidade	5%
Desvio do Estado de Carga	10%

Fonte: Elaboração própria

A partir das informações apresentadas, três métodos de equalização são implementados para o balanceamento das células de lítio íon em segunda aplicação: método passivo por resistor de derivação (dissipativo), método ativo com base em conversores flyback (não-dissipativo) e o método ativo com capacitor chaveado clássico (não-dissipativo).

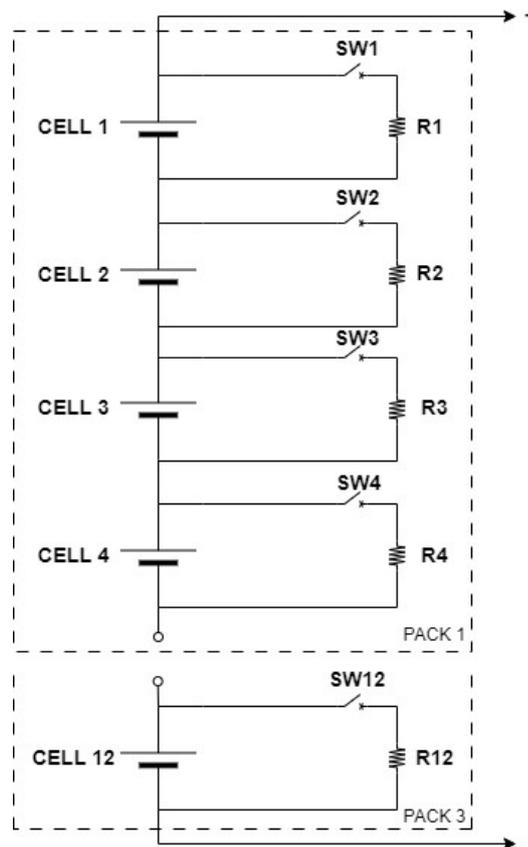
4.2 BALANCEAMENTO PASSIVO POR RESISTOR DE DERIVAÇÃO COMUTADO

O balanceamento passivo por resistor de derivação comutado é baseado no circuito representado na Figura 18. Esta técnica possui como característica a remoção da energia das células que possuem maior nível de tensão de forma controlada, tendo como opção o controle das chaves de forma individual, onde o sistema de controle monitora e determina quais são as células que possuem a necessidade de serem equalizadas. Comparado com o método de resistores fixos apresentado na seção 2.7.2.(a).i, esse método é mais eficiente sem perder em simplicidade e custo, e apresenta como vantagem a confiabilidade e a possibilidade de aplicação em baterias de lítio.

Para cada célula do sistema de bateria existe um resistor de balanceamento (R_i , $i = 1, \dots, n$) e um interruptor (SW_i , $i = 1, \dots, n$) conectado em paralelo. No processo de recarga, se alguma célula apresenta o SoC ou tensão acima do intervalo de confiança estipulado pelo algoritmo, ela é considerada como uma célula desequilibrada. O interruptor responsável por essa célula afetada é acionado, e o resistor associado drena uma parcela da sua corrente de recarga, enquanto as demais células do sistema

continuam a receber a corrente total de recarga, tendendo a reduzir o seu estado de carga para o valor médio do *pack*.

Figura 18: Estrutura do pack associado com o circuito de balanceamento passivo com resistor de derivação comutados.



Fonte: Elaboração própria

4.2.1 Algoritmo de Balanceamento

O algoritmo de balanceamento passivo é composto por duas partes: Agrupamento e chaveamento. Seu objetivo é identificar as células que requerem balanceamento e realizar a equalização necessária.

A primeira parte do algoritmo realiza o agrupamento das células de lítio em dois grupos de acordo com o seu SoC e com isso, são estimadas as unidades desequilibradas.

Etapa 1: Recebe os parâmetros de entrada como o número de células (N_{cell}), o valor limiar de balanceamento determinado *Balancing threshold* (SoC_{th}) e o SoC de cada célula em determinado tempo (t).

Etapa 2: Realiza-se cálculo da distância euclidiana ($\Delta\text{SoC}(m, n)$) entre os valores de SoC de duas células distintas, denominadas m e n para qualquer $m = 1, \dots, N$, $n = 1, \dots, N$ e $m \neq n$. A distância euclidiana é calculada utilizando a equação (1), enquanto a equação (2) retrata a somatória das distâncias ($w(m)$) entre as células m e as demais.

$$\Delta\text{SoC}(m, n) = |\text{SoC}_m - \text{SoC}_n| \quad (1)$$

$$w(m) = \sum_{i=1}^N \Delta\text{SoC}(m, i), i \neq m \quad (2)$$

Etapa 3: Identificação dos índices das células com o SoC (t) mais alto e mais baixo (idxmax e idxmin , respectivamente).

Etapa 4: Se a diferença entre o valor máximo e o mínimo de $w(m)$ for maior ou igual ao valor de *threshold* de balanceamento previamente definido, as células são encaradas como desequilibradas, ou seja, Bal recebe o valor de “1”. Dessa forma são criados dois grupos (*clusters*), onde as células com menor e maior valor de w são definidas como centroides do grupo 1 (células equalizadas) e grupo 2 (células desequalizadas) nesta ordem.

As outras células são correlacionadas a um dos grupos, conforme a distância da célula ao correspondente centroide do grupo. As células associadas ao centroide com menor valor de w são consideradas equilibradas, mas as células correlacionadas ao centroide com maior valor de w são classificadas como desequilibradas.

Etapa 5: Se a diferença entre o valor máximo e o mínimo de $w(m)$ for menor do que o valor de *threshold* de balanceamento previamente definido, as células são encaradas como equilibradas, ou seja, Bal recebe o valor de ‘0’ e nada será realizado até que esteja na próxima iteração.

Etapa 6: Nesta etapa é realizada uma nova avaliação do SoC (t) para que cada célula do grupo em desequilíbrio alcance o SoC médio do grupo equilibrado.

Etapa 5: Retorna à Etapa 1 da Parte 1.

Ao fim da parte de clusterização, o algoritmo realiza o acionamento das chaves e necessita das saídas da parte 1 do algoritmo. Essa parte do algoritmo, as unidades de armazenamento que compõem o grupo com maior nível de SoC serão descarregadas através dos seus respectivos resistores de balanceamento até que a célula atinja o valor médio do grupo.

Etapa 1: Como entrada o algoritmo recebe o *array* com os grupos (*clusters*) e as suas determinadas células além do indicador (Bal) obtidos na parte de agrupamento das células.

Etapa 2: Avalia se a variável Bal é **verdadeira** (Bal = 1), se for verdade as respectivas células são consideradas desbalanceadas. Caso Bal for **falso** (Bal = 0) as respectivas células são consideradas balanceadas e as chaves referentes a essas células recebe o valor **falso** (Bal_{sw} = 0).

Etapa 3: Avalia a variável *cluster*, se o *cluster* for igual a “1” a chave da respectiva célula não é acionada (Bal_{sw} = 0). Já se o *cluster* for igual a “2” a chave da respectiva célula é acionada e a célula relacionada a esse sinal é descarga.

Etapa 4: Avalia o novo SoC (t) mensurado.

Etapa 5: Retorna à **Etapa 1** da **Parte 2**.

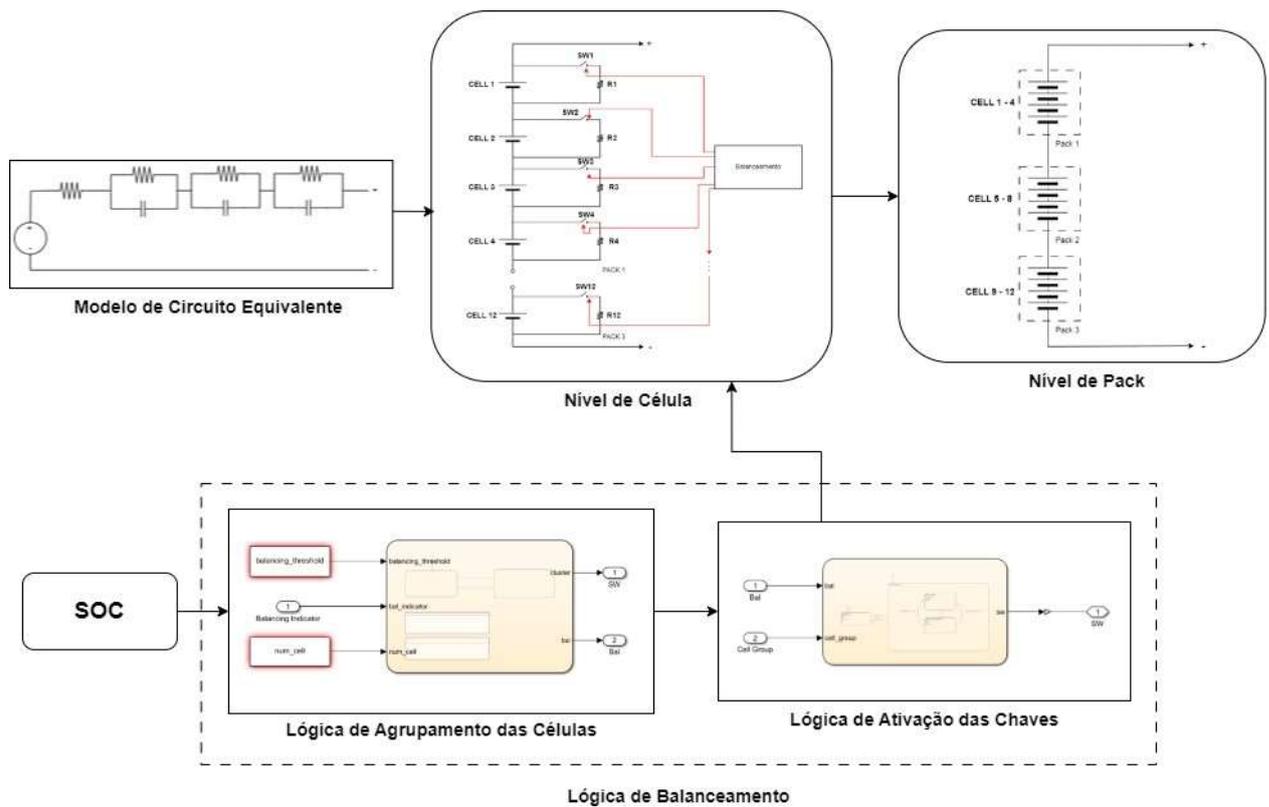
O algoritmo genérico do balanceamento passivo é apresentado a seguir e o modelo implementado no software Matlab/Simulink pode ser visualizado na Figura 19.

Algoritmo: Algoritmo de Balanceamento Passivo com Resistor de Derivação Comutado

{Parte 1}

1. **{Etapa 1}** Leitura dos valores de SoC (t), Ncell e SoC_{th}.
2. **{Etapa 2}** Cálculo da diferença de SoC (t) entre as células (ΔSoC)
3. **Se** $\Delta\text{SoC} \geq \text{SoC}_{th}$
4. **{Etapa 3}** Determinação dos índices das células com o SoC(t) mais alto e mais baixo (idxmax e idxmin, respectivamente)
5. **{Etapa 4}** Clusterização das células em dois grupos
{Etapa 5} Bal é definido como **verdadeiro**
7. **Senão** ($\Delta\text{SoC} < \text{SoC}_{th}$):
8. **{Etapa 5}** Bal é definido como **falso**
9. **Fim**

Figura 19: Esquemático Simulink Balanceamento Passivo.



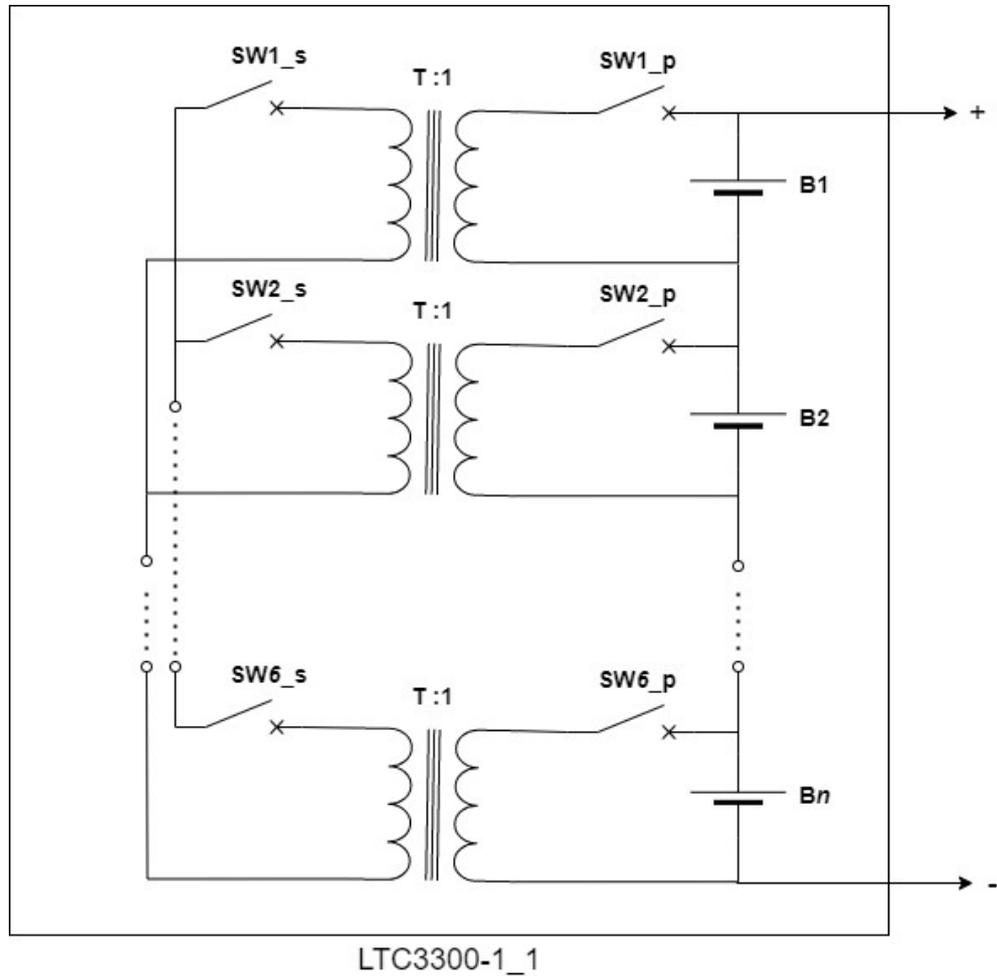
Fonte: Elaboração própria

4.3 BALANCEAMENTO COM CONVERSOR *FLYBACK*

Para o desenvolvimento deste trabalho implementou-se o método de balanceamento com conversor *flyback* proposto por (CAMBOIM et al., 2022) que por sua vez utiliza de circuitos integrados (CI's) do tipo LTC3300-1 produzido pela empresa *Analog Devices* para a realização da equalização das células de lítio. Esse componente eletrônico possui alta eficiência, utiliza conversores que transferem a energia de forma bidirecional para as células, permite o balanceamento de até 6 células ao mesmo tempo por CI e o mesmo pode ser associado a outros LTC's por meio de intercalação das conexões secundárias do transformador, alcançando o deslocamento de energia entre os grupos de células adjacentes e restringindo as condições de tensão de ruptura das chaves de potência do lado primário e secundário. Quando se associa à um número par de LTC's, o lado secundário da célula do CI inferior é conectado a célula mais elevada do CI superior e quando se associa um número ímpar de LTC's não é possível conectar o lado secundário do CI à célula mais elevada do LTC3300-1 superior, diante desse fato, o secundário é conectado à célula superior do grupo (CAMBOIM et al., 2022; DEVICES, [s.d.]). A Figura 20 ilustra o circuito para um

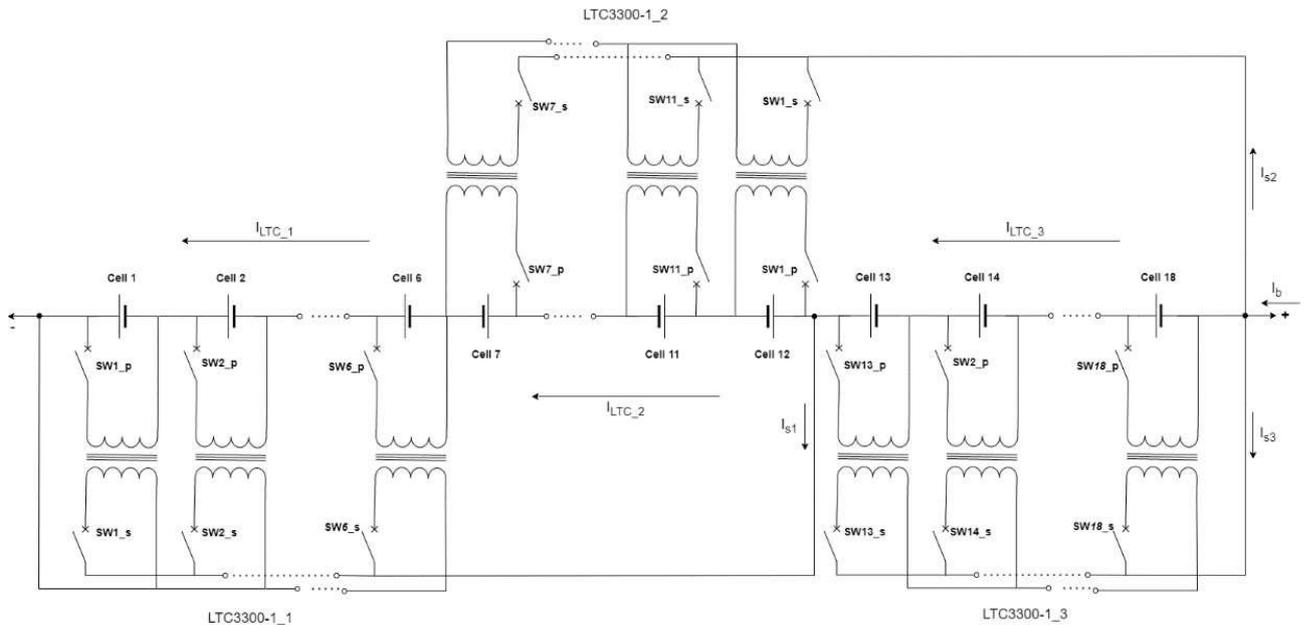
componente LTC3300-1 e a Figura 21 apresenta o esquemático de uma conexão com um número ímpar de CI's.

Figura 20: Circuito de um LTC3300-1 utilizado para o balanceamento ativo com conversor flyback.



Fonte: Adaptado de (CAMBOIM et al., 2022)

Figura 21: Esquemático de um circuito com um número ímpar de CI's contendo seis células em cada.



Fonte: Adaptado de (CAMBOIM et al., 2022)

O LTC3300-1 é composto por múltiplos conversores síncronos bidirecionais, em que o lado primário do transformador é conectado à célula e o lado secundário é conectado em paralelo com o lado secundário do próximo transformador. Cada conversor é conectado de forma individual a sua célula, o que permite que a energia seja transferida entre a célula e um conjunto de células adjacentes (descarga síncrona) ou de um grupo de células vizinho para uma determinada unidade de armazenamento (recarga síncrona) sem que haja atrasos entre os ciclos (CAMBOIM et al., 2022; DEVICES, [s.d.]).

No momento em que a descarga é acionada para uma célula, a chave conectada ao primário (SW_{Pi}) é ligada e a corrente no lado primário (I_{pi}) do transformador é aumentada até que a corrente previamente determinada (I_{p_p}) seja atingida. Então, o interruptor (SW_{Pi}) é desativado, a energia retirada da célula é acumulada no transformador e transmitida para as células conectadas no lado secundário do transformador, isso faz com que a corrente flua no enrolamento secundário. Visando a minimização das perdas de energia durante o período em que a energia está sendo transmitida, a chave do lado secundário (SW_{Si}) é mantida ativada até que a corrente no segundo enrolamento (I_{si}) decaia a zero e então SW_{Si} é desligada finalizando um ciclo (DEVICES, [s.d.]). A corrente média de descarga do lado do primário ($I_{p_{dsch}}$) e do

lado secundário ($I_{s_{dsch}_i}$) de uma célula é determinada respectivamente pelas equações (5) e (6) (CAMBOIM et al., 2022).

$$I_{p_{dsch}_i} = \frac{I_{p_p}}{2} \times \frac{Ns}{Ns + T} \quad (5)$$

$$I_{s_{dsch}_i} = \frac{I_{p_p}}{2} \times \frac{1}{Ns + T} \quad (6)$$

Onde Ns é o número de células conectadas ao lado secundário do transformador e T é a relação de transformação do transformador do lado primário para o secundário.

Quando as células entram em modo de recarga, a chave do lado secundário (SW_{S_i}) é ativada e a corrente do grupo de células (I_{S_i}) é transferida para o transformador até que a corrente pré-definida (I_{s_p}) para o secundário seja atingida. Então, SW_{S_i} é desativada, a energia retirada do grupo de células é transmitida para a célula do lado primário do transformador. Com o fim de minimizar as perdas de energia durante o período em que a energia está sendo transmitida, a chave do lado primário (SW_{P_i}) é mantida ativada até que a corrente no primeiro enrolamento (I_{P_i}) caia a zero e então SW_{P_i} é desligada finalizando um ciclo de recarga (DEVICES, [s.d.]). A corrente média de recarga do lado do secundário ($I_{s_{ch}_i}$) e do lado primário ($I_{p_{ch}_i}$) de uma célula é determinada respectivamente pelas equações (7) e (8) (CAMBOIM et al., 2022).

$$I_{p_{ch}_i} = \frac{I_{p_s}}{2} \times \frac{Ns \times T}{Ns + T} \quad (7)$$

$$I_{s_{ch}_i} = \frac{I_{s_s}}{2} \times \frac{T}{Ns + T} \quad (8)$$

Quando se trata de apenas um componente LTC3300-1, o somatório das médias das correntes das i células ($i = 1, \dots, n_{cell} = 6$) no lado secundário, pode ser encontrado pela equação (9). A variável $bal_f_i^j$ sinaliza se a i -ésima célula do primeiro CI está sendo balanceada ou não, ou seja, se a variável assume valor igual a '1' ($bal_f_i^j = 1$) ela está sendo balanceada, caso assuma valor igual a '0' ($bal_f_i^j = 0$) o balanceamento está desativado; I_{S_i} é a corrente média no lado secundário do transformador conectado à i -ésima célula do primeiro CI, a corrente é dada pelas equações (6) ou (8), conforme o modo de operação no instante atual (CAMBOIM et al., 2022).

$$\sum_{j=1}^{n_{LTC}} I_S^j = \sum_{i=1}^{n_{cell}} I_S^i \times bal_f_i^j \quad (9)$$

Considerando a conexão de j CI's como na Figura 21, a corrente em cada componente ($I_{LTC}^j = 1, \dots, n_{LTC}$) é encontrada com a equação (10). Onde I_b é a corrente de carga e/ou descarga da bateria.

$$\begin{aligned} I_{LTC}^1 &= I_b - \sum_{j=1}^{n_{cell}} I_S^1 \\ I_{LTC}^2 &= I_b - \sum_{i=1}^{n_{cell}} I_S^1 - \sum_{i=1}^{n_{cell}} I_S^2 \\ I_{LTC}^j &= I_b - \sum_{i=1}^{n_{cell}} I_S^{j-1} - \sum_{i=1}^{n_{cell}} I_S^j \end{aligned} \quad (10)$$

Durante a descarga síncrona o circuito de balanceamento move a energia no sentido crescente (LTC_1 até o $LTC_{n_{LTC}}$) e durante a recarga síncrona o sentido da energia é decrescente ($LTC_{n_{LTC}}$ até o LTC_1). Além disso, a energia pode ser transmitida entre as células de um componente para ambos os estados de atuação.

Por fim, a corrente média da i -ésima unidade de armazenamento do j -ésimo CI ($I_{c,i}^j$) é obtida a partir da equação (11). A variável $I_{p,i}^j$ é a corrente média no lado primário do transformador conectado a i -ésima célula do j -ésimo CI, a corrente é dada pelas equações (5) ou (7), conforme o modo de operação no instante atual (CAMBOIM et al., 2022).

$$I_{c,i}^j = I_b - I_{p,i}^j \times bal_f_i^j \quad (11)$$

4.3.1 Algoritmo de Balanceamento

O algoritmo de balanceamento com *flyback* implementado é dividido em duas partes. Na primeira parte, o objetivo principal é agrupar as células de uma LiB em dois grupos distintos com base no seu estado de carga (SoC). Ele recebe como entrada o valor de SoC de cada célula em um determinado tempo (SoC (t)). As saídas são uma matriz que mostra a qual grupo cada célula pertence, o valor médio (centroide) de cada grupo e um sinalizador (*bal*) que indica se o balanceamento está ativado ou não.

Inicialmente, o módulo lê o valor de SoC de cada célula por um período de tempo determinado. Em seguida, verifica-se se a LiB está balanceada, comparando a diferença entre o valor máximo e mínimo de SoC (t) ($\Delta\text{SoC}(t)$), com um limite predefinido (SoCth).

Se a condição de desbalanceamento não for identificada ($\Delta\text{SoC}(t) \leq \text{SoCth}$), o sinalizador *bal* é definido como falso e o ciclo é encerrado. No entanto, se houver desbalanceamento, as células são divididas em dois grupos com base no seu SoC (t), usando o algoritmo de aprendizado não supervisionado. Esse algoritmo determina o grupo a que cada célula pertence e calcula o centroide de cada grupo. Além disso, o sinalizador *bal* é definido como verdadeiro. Este módulo é executado sempre que uma nova medição de SoC (t) está disponível.

Durante a segunda fase, são definidas quais células serão balanceadas e o modo de operação (descarga ou recarga). Como entradas o módulo recebe as saídas obtidas da etapa de agrupamento das células e o *array* do SoC (t). Como saída do sistema, obtêm um array booleano que indica se cada célula deve ser balanceada (*bal_f*), caso essa variável assumira valor igual a '1' (*bal_f* = 1) ela está sendo balanceada, caso assumira valor igual a '0' (*bal_f* = 0) o balanceamento está desativado e a variável que indica a direção do balanceamento (*Bal_d*) (CAMBOIM et al., 2022).

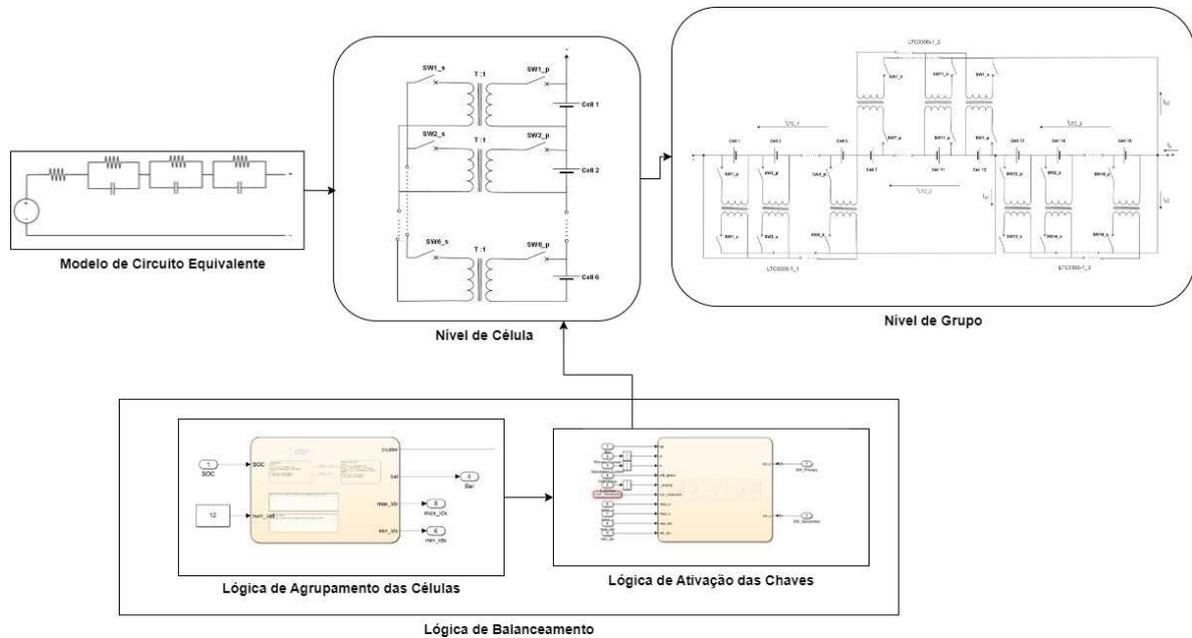
No início da segunda fase do algoritmo de balanceamento, são lidas as entradas derivadas da primeira fase onde é realizada um agrupamento e é verificado o valor de *Bal*, caso o valor de *Bal* for '0' então o balanceamento é desligado. No entanto, se o valor de *Bal* for '1' o modo deve identificar os índices i das células com o nível mais alto ($\text{ref}_{\text{máx}}$) e mais baixo ($\text{ref}_{\text{mín}}$) de SoC (t) (CAMBOIM et al., 2022).

Se $\text{ref}_{\text{máx}} > \text{ref}_{\text{mín}}$ a energia flui pelo circuito de balanceamento de forma decrescente, dessa forma a descarga é ativada para o grupo com a maior centroide. Porém, se $\text{ref}_{\text{máx}} < \text{ref}_{\text{mín}}$ a energia flui pelo circuito de balanceamento de forma crescente, acionando dessa forma a recarga é ativada para o grupo com a menor centroide. Independente do estado em que se encontra no momento, as células do grupo oposto não estão balanceadas (CAMBOIM et al., 2022).

Neste trabalho foram utilizados três LTC3300-1 contendo quatro células cada, essas células seguem as características descritas anteriormente na Tabela 2. O algoritmo genérico do balanceamento ativo com conversor flyback é apresentado a seguir e o

modelo implementado no software Matlab/Simulink pode ser visualizado na Figura 22.

Figura 22: Modelo genérico implementado no software Matlab/Simulink para o balanceamento ativo com conversor flyback.

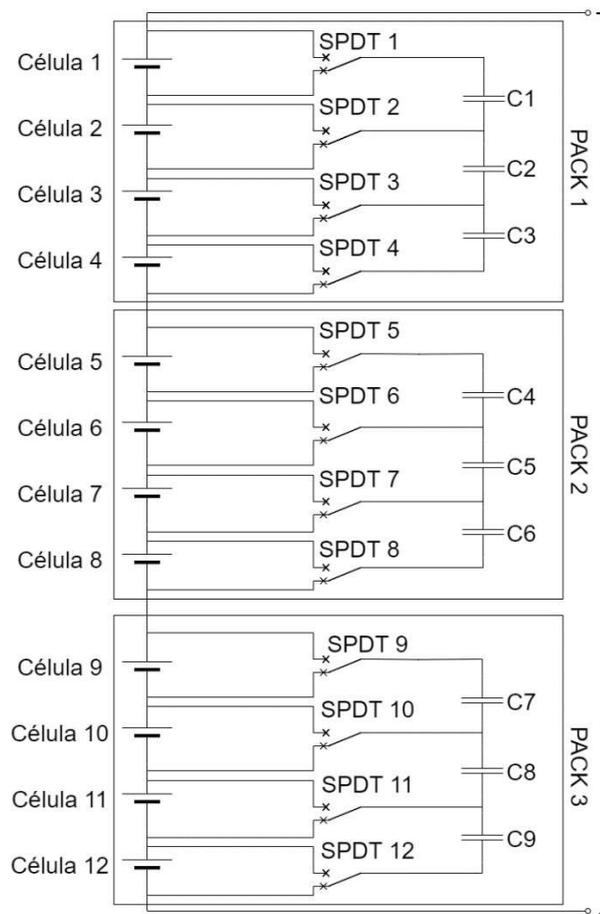


Fonte: Adaptado de (CAMBOIM et al., 2022)

4.4 BALANCEAMENTO COM CAPACITOR COMUTADO CLÁSSICO

O método de balanceamento com capacitor comutado (SC – do inglês *Switched Capacitor*) clássico é composto por n células para n interruptores SPDT conectados nos lados positivos e negativos das células e $n-1$ capacitores como é apresentado na Figura 23.

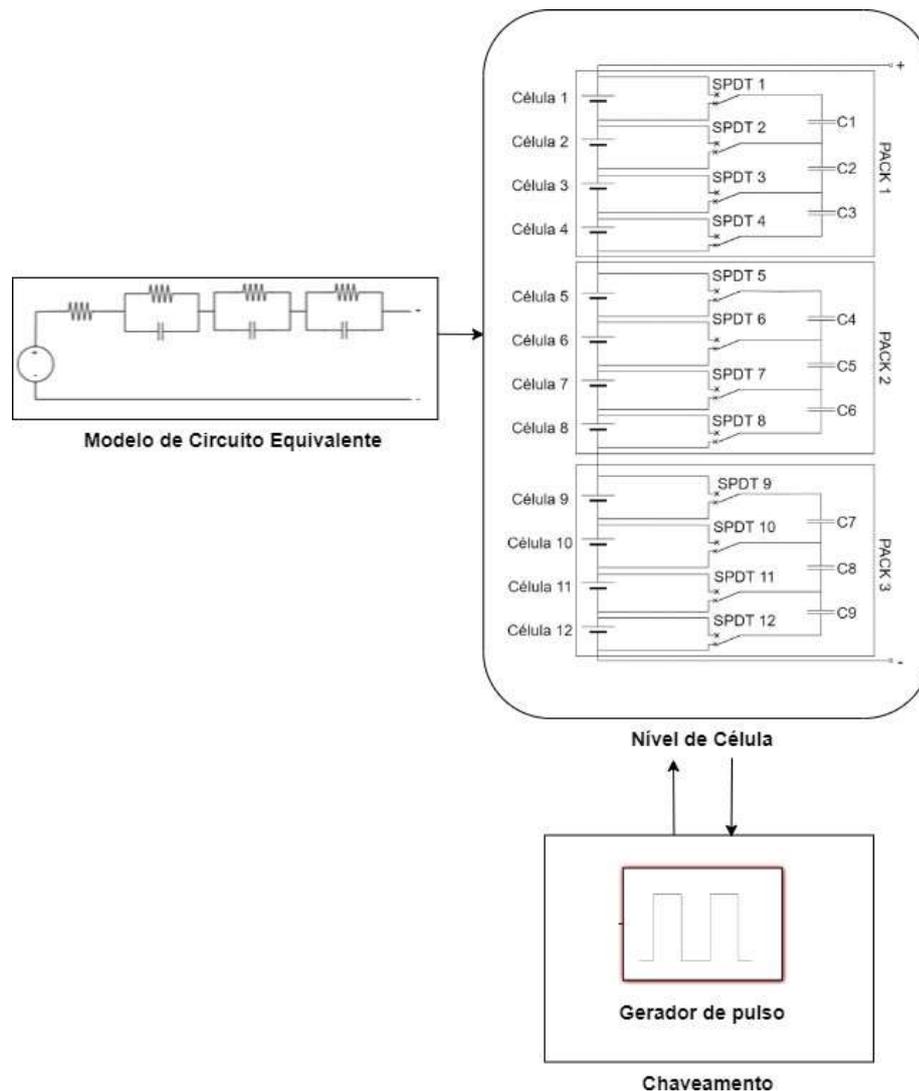
Figura 23: Estrutura do circuito de balanceamento ativo com capacitivo comutado clássico.



Fonte: Elaboração própria

A camada de capacitores é conectada às células no interior dos *packs*, proporcionando a transferência de energia em dois modos de operação com base na conexão do SPDT. No primeiro estado, o capacitor é conectado em paralelo com a célula superior equivalente, em seguida, o capacitor recebe ou fornece energia até que sua tensão seja próxima da tensão da célula. No segundo estado, o capacitor se conecta com a célula inferior e, em seguida, o capacitor recebe ou fornece energia para a célula conforme a necessidade dela. Para o método SC clássico não há a utilização de lógicas de balanceamento, dessa forma, o acionamento dos interruptores é controlado a partir de um sinal de frequência de chaveamento fixa, permitindo que o SPDT se conecte ao lado superior e inferior com o mesmo ciclo de trabalho. Uma representação genérica implementada no software Matlab/Simulink pode ser visualizada na Figura 24.

Figura 24: Modelo genérico implementado no software Matlab/Simulink para o balanceamento ativo com capacitor comutado clássico.



Fonte: Elaboração própria

4.5 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

Neste trabalho buscou-se avaliar os métodos de balanceamento passivo por resistor de derivação (dissipativo), o método ativo com base em conversores *flyback* (não-dissipativo) e o método ativo com capacitor comutado clássico baseando-se na velocidade em que o método estudado era capaz de realizar a equalização e na eficiência de balanceamento de 12 células de lítio ferro fosfato de 25Ah.

Para quantificar a velocidade de balanceamento (Bal_{vel}) dos sistemas estudados utilizou-se a equação (12) proposta por (CAMBOIM et al., 2022).

$$Bal_{vel} = \frac{\delta SoC}{\Delta t} \times Capacidade \quad (12)$$

Em que a variável δSoC é a diferença entre o SoC no início (ΔSoC_{in}) e no final (ΔSoC_{out}) do balanceamento, Δt é a variação do tempo em horas necessário para a equalização das células e a *Capacidade* nominal das células é dada em Ah. Dessa forma, a velocidade de balanceamento é a quantidade de energia que o sistema consegue transportar durante uma hora de equalização.

Outra métrica utilizada para avaliar a eficácia dos métodos propostos é a eficiência energética (η). A eficiência da transferência de energia entre as células é de extrema importância, pois, se uma grande quantidade de energia é perdida na transferência, o método acaba não sendo muito eficaz. Nas aplicações práticas, a eficiência energética pode ser quantificada a partir da relação entre a energia que saiu da célula (E_{out}) e a energia que foi inserida na célula (E_{in}) como é apresentado na equação (13) (BAUGHMAN; FERDOWSI, 2008).

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (13)$$

O cálculo da eficiência para o método capacitivo ($\eta_{capacitivo}$) utiliza a equação (14) proposta por (KIM et al., 2014), enquanto o método com conversor flyback obtém a eficiência do circuito ($\eta_{flyback}$) a partir da equação (15). No caso do balanceamento passivo, a energia é dissipada e não transferida de uma célula para outra, por esse motivo não à uma equação para calculá-la.

$$\eta_{capacitivo} = \frac{\sum(V_{dsch} \times I_{bal_{dsch}})}{\sum(V_{ch} \times I_{bal_{ch}})} \times 100 \quad (14)$$

$$\eta_{flyback} = \frac{\sum(V_{Srms} \times I_{Srms})}{\sum(V_{p_{rms}} \times I_{p_{rms}})} \times 100 \quad (15)$$

Em que a variável V_{dsch} representa a tensão das células durante a descarga; V_{ch} representa a tensão das células durante a recarga; $I_{bal_{dsch}}$ é a corrente de balanceamento das células durante a descarga; $I_{bal_{ch}}$ é a corrente de balanceamento das células durante a recarga; V_{Srms} é a tensão eficaz (RMS - do inglês *Root Mean Square Value*) no secundário do transformador; $V_{p_{rms}}$ é a tensão eficaz no lado primário do transformador; I_{Srms} é a corrente eficaz no lado secundário do transformador e a variável $I_{p_{rms}}$ representa a corrente eficaz no lado primário do transformador. O tempo

t é desconsiderado para o cálculo da energia pois o mesmo é constante, ou seja, o tempo de medição dos parâmetros é realizado a cada 1 segundo.

5 RESULTADOS

As simulações foram realizadas baseando-se nos métodos e equacionamentos descritos no capítulo 4 deste trabalho. Para obtenção dos resultados, foram criados três casos em que a taxa do desvio de capacidade e estado de carga são variados para cada método de equalização. A Tabela 4 apresenta os três casos propostos para a simulação dos métodos de equalização.

Tabela 4 - Casos propostos para a simulação dos métodos de equalização.

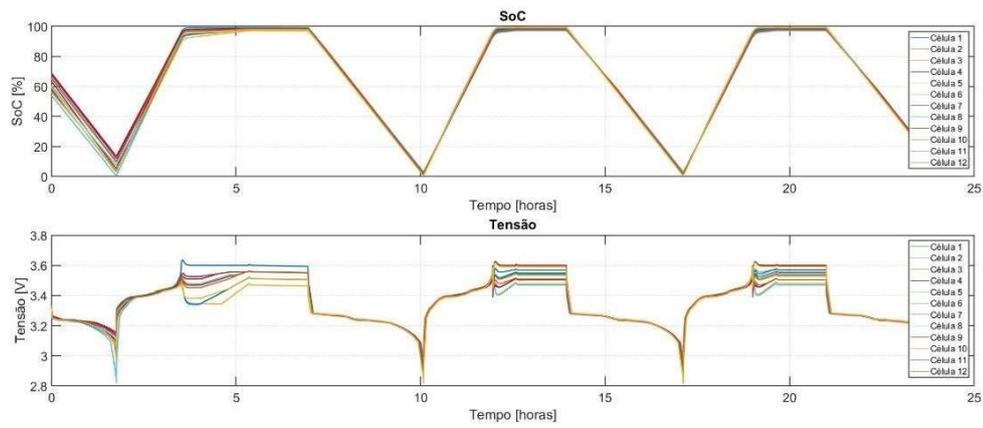
Variáveis	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Desvio de Capacidade	5%	10%	15%
Desvio de SoC	10%	15%	20%

Fonte: Elaboração própria

5.1 BALANCEAMENTO PASSIVO POR RESISTOR DE DERIVAÇÃO COMUTADO

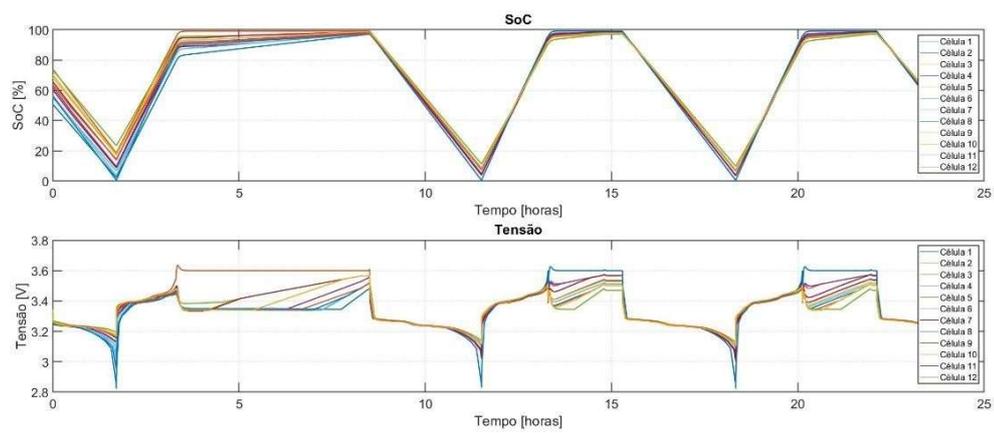
Foram realizadas 50 simulações para cada um dos três casos considerando 12 células conectadas a um circuito resistivo e a cada simulação o SoC das células e suas capacidades são inicializadas de forma aleatória respeitando as condições de dispersão. Dessa forma, os gráficos resultantes das simulações dos estados de carga e das tensões das células para cada caso são apresentados respectivamente pelas Figura 25, Figura 26 e a Figura 27. Com base nas figuras apresentadas, observou-se o comportamento periódico das tensões e do estado de carga, isso ocorre porque as células estão realizando ciclos de recarga, descarga e repouso durante a execução. Além disso, ao variar a dispersão da capacidade e do SoC das células, o tempo de equalização aumenta de forma proporcional para que o estado de balanceamento seja atingido com êxito.

Figura 25: SoC e tensão das células para a última simulação do Caso 1 do balanceamento passivo.



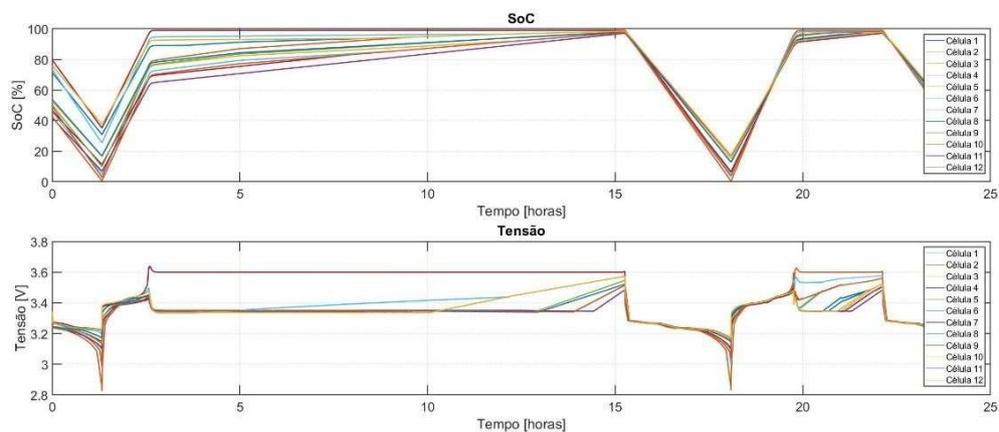
Fonte: Elaboração própria

Figura 26: SoC e tensão das células para a última simulação do Caso 2 do balanceamento passivo.



Fonte: Elaboração própria

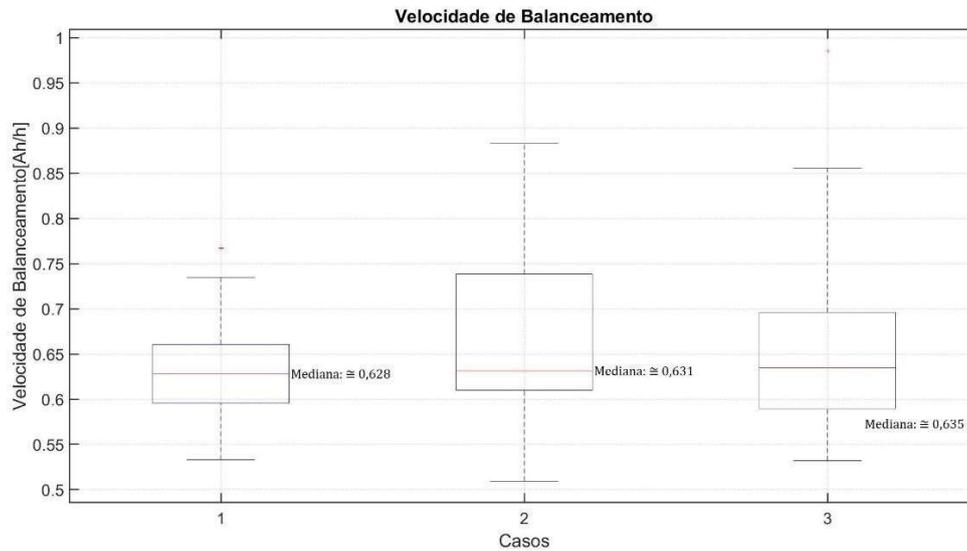
Figura 27: SoC e tensão das células para a última simulação do Caso 3 do balanceamento passivo.



Fonte: Elaboração própria

Para avaliar o método de balanceamento utilizou-se o cálculo da velocidade de balanceamento (Bal_{vel}) dada pela equação (12). Para o método passivo, a energia inserida na célula (E_{in}) é igual a zero devido ao método ser dissipativo, ou seja, não há transferência de energia entre células. Nesse método, as células são descarregadas até que atinja o valor médio do grupo de células consideradas equalizadas. O gráfico *boxplot* apresentado na Figura 28, ilustra a velocidade de balanceamento de cada caso estudado para as 50 simulações realizadas. Ao analisar o gráfico, notou-se que a mediana de Bal_{vel} dos casos 1, 2 e 3 é de aproximadamente 0,628Ah/h, 0,631Ah/h e 0,635Ah/h respectivamente. Constatou-se que ao variar a faixa de dispersão de capacidade e SoC há um acréscimo próximo de 0,003Ah/h para o método passivo. A Tabela 5 apresenta de forma resumida os resultados obtidos a partir das simulações realizadas.

Figura 28: Boxplot da velocidade de balanceamento de 12 células para os três casos do balanceamento passivo.



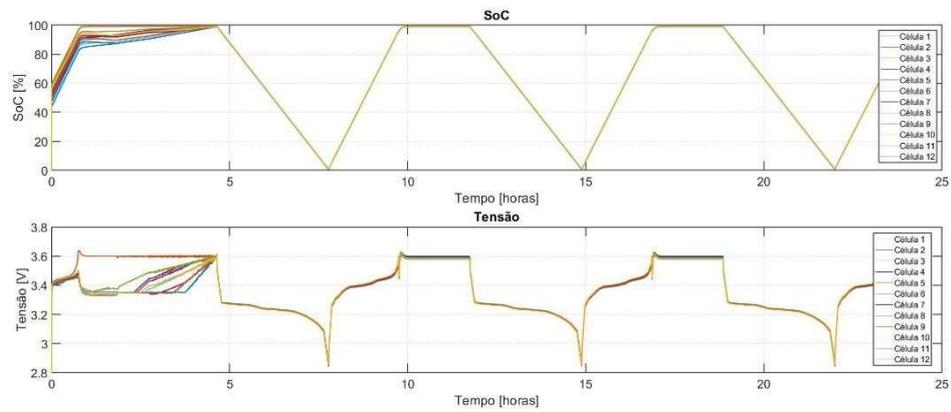
Fonte: Elaboração própria

5.2 BALANCEAMENTO ATIVO POR CONVERSOR *FLYBACK*

Realizaram-se 50 simulações para cada um dos três casos considerando 4 células por LTC3300-1 totalizando três CI's e 12 células e, a cada simulação, o SoC das células e suas capacidades são inicializados de forma aleatória respeitando as condições de dispersão determinadas para cada caso apresentado na Tabela 4. Para analisar o funcionamento do método de balanceamento baseado no conversor *flyback*, foram utilizados o cálculo da velocidade de equalização (Bal_{vel}) dada pela equação (12) e a eficiência do balanceamento ($\eta_{flyback}$) obtida a partir da equação (15).

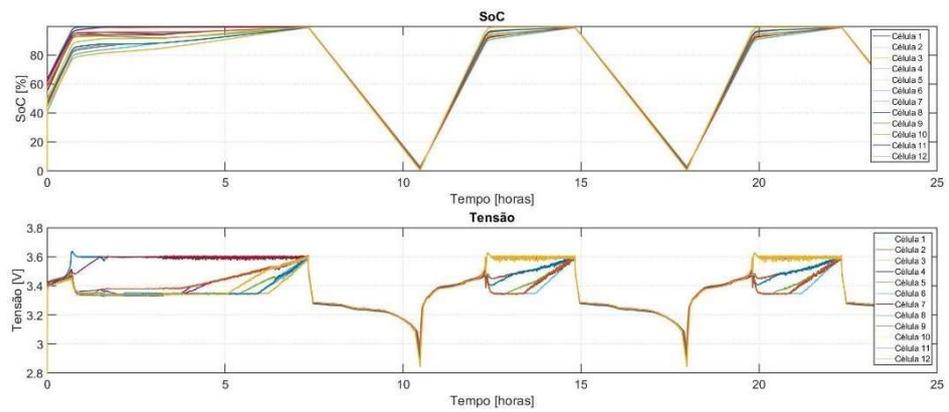
As curvas de tensão e de SOC para os três casos propostos estão ilustrados nas Figura 29, Figura 30 e na Figura 31 respectivamente para a última simulação da sequência. Com base nas figuras apresentadas, observou-se o comportamento periódico das tensões e do estado de carga, isso ocorre porque as células estão realizando ciclos de recarga, descarga e repouso durante a execução. Além disso, pode-se constatar que ao variar a dispersão da capacidade e do SOC das células, o tempo de equalização aumenta de forma proporcional para que o estado de balanceamento seja atingido com êxito.

Figura 29: SoC e tensão das células para a última simulação do Caso 1 do balanceamento com conversor *flyback*.



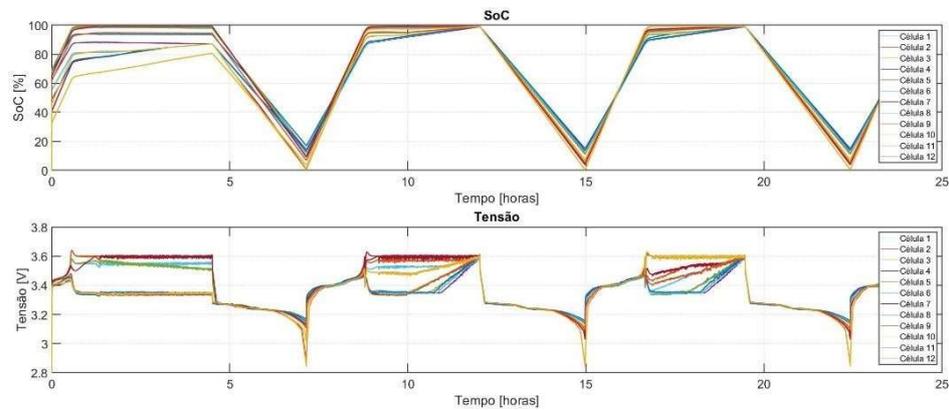
Fonte: Elaboração própria

Figura 30: SoC e tensão das células para a última simulação do Caso 2 do balanceamento com conversor *flyback*.



Fonte: Elaboração própria

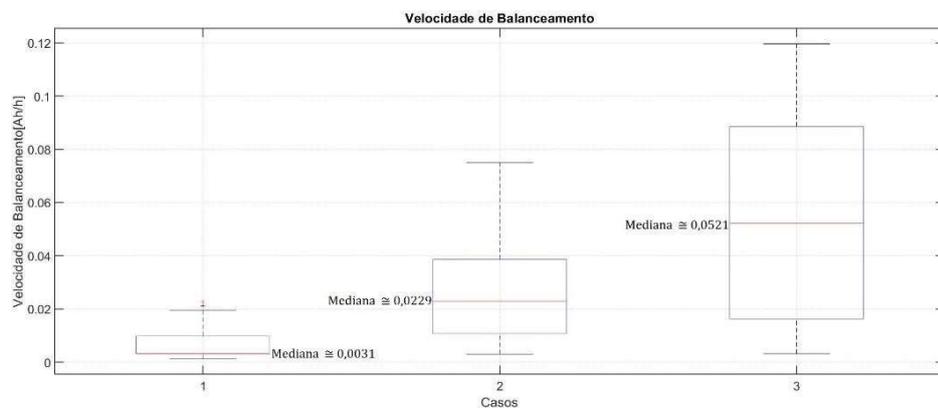
Figura 31: SoC e tensão das células para a última simulação do Caso 3 do balanceamento com conversor *flyback*.



Fonte: Elaboração própria

Baseando-se na documentação fornecida pelo fabricante do CI LTC3300-1 (DEVICES, [s.d.]) e nos resultados obtidos a partir da pesquisa utilizada como base para o estudo deste método (CAMBOIM et al., [s.d.]) constata-se que ao aumentar o número de CI's a velocidade e a eficiência tendem a diminuir proporcionalmente. Dessa forma, utilizando três LTC's detectou-se que a mediana da Bal_{vel} dos casos 1, 2 e 3 é de aproximadamente 0,0031Ah/h, 0,0229Ah/h e 0,0521Ah/h respectivamente. O gráfico *boxplot* apresentado na Figura 32, ilustra a velocidade de balanceamento de cada caso estudado com base no número de simulações pré-definidas.

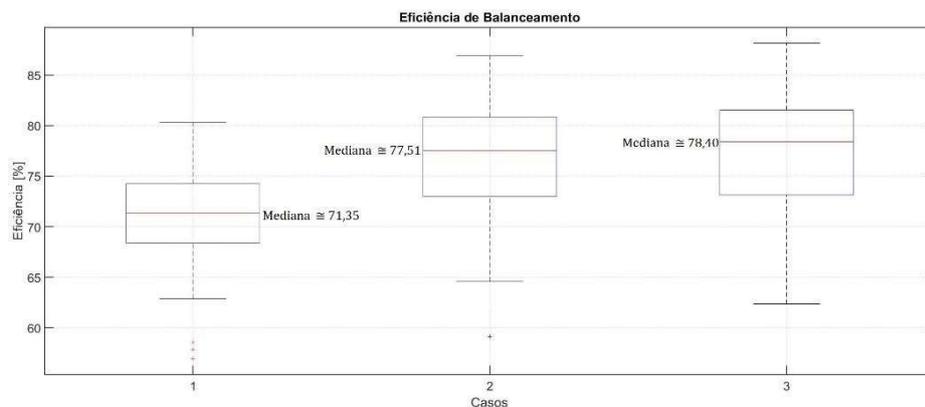
Figura 32: *Boxplot* da velocidade de balanceamento de 12 células para os três casos do balanceamento por conversor *flyback*.



Fonte: Elaboração própria

Utilizando a mesma configuração verificou-se que a mediana da $\eta_{flyback}$ para os casos 1, 2 e 3 é de aproximadamente 71,35%, 77,51% e 78,40% respectivamente. Com base nas informações encontradas e no gráfico *boxplot* apresentado na Figura 28 que ilustra a eficiência do balanceamento para cada caso estudado, observou-se que apesar do aumento dos parâmetros de análise causados pelo número de CI's, o método ainda possui uma boa eficiência para 12 células.

Figura 33: *Boxplot* da eficiência de balanceamento de 12 células para os três casos do balanceamento por conversor *flyback*.



Fonte: Elaboração própria

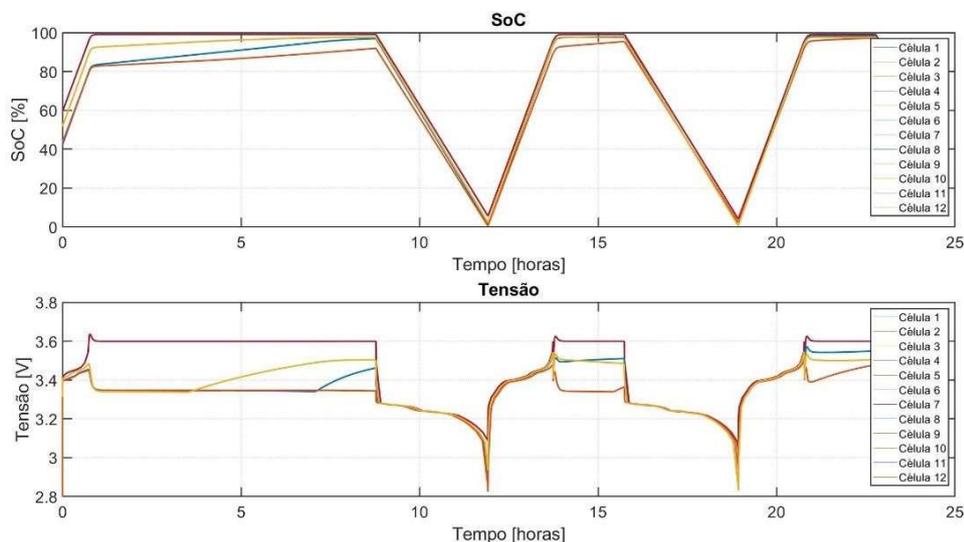
5.3 BALANCEAMENTO COM CAPACITOR COMUTADO CLÁSSICO

Para o método de balanceamento com capacitor comutado clássico foram realizadas 50 simulações para cada um dos três casos considerando 12 células conectadas a um circuito capacitivo e a cada simulação o SoC, sendo a tensão das células e suas capacidades inicializadas de forma aleatória respeitando as condições de dispersão determinadas para cada caso apresentado na Tabela 4. A fim de analisar o funcionamento do método de balanceamento com capacitor comutado clássico, foram utilizados o cálculo da velocidade de balanceamento (Bal_{vel}) dada pela equação (12) e a eficiência do balanceamento ($\eta_{capacitivo}$) é obtida a partir da equação (14).

As curvas de SoC e de tensão para os três casos propostos são apresentadas nas Figura 34, Figura 35 e Figura 36 respectivamente para cada um dos casos. Foi possível observar a partir das curvas apresentadas que ao variar a dispersão da capacidade e do SoC das células, o tempo de balanceamento aumenta para que o estado de equalização

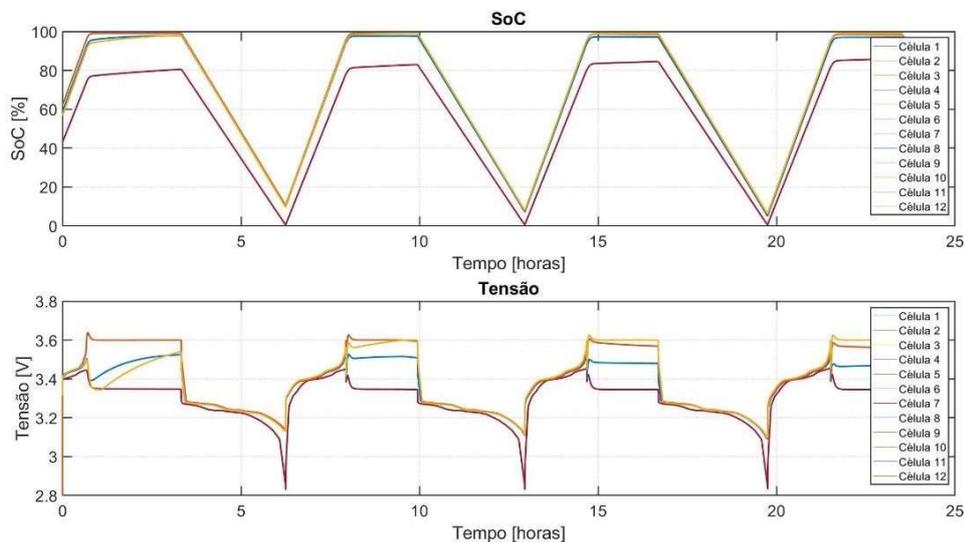
seja atingido com êxito. Além disso, nota-se uma periodicidade causadas pelos estados de recarga, descarga e repouso das células durante um ciclo.

Figura 34: SoC e tensão das células para a última simulação do Caso 1 do balanceamento com Capacito Comutado Clássico.



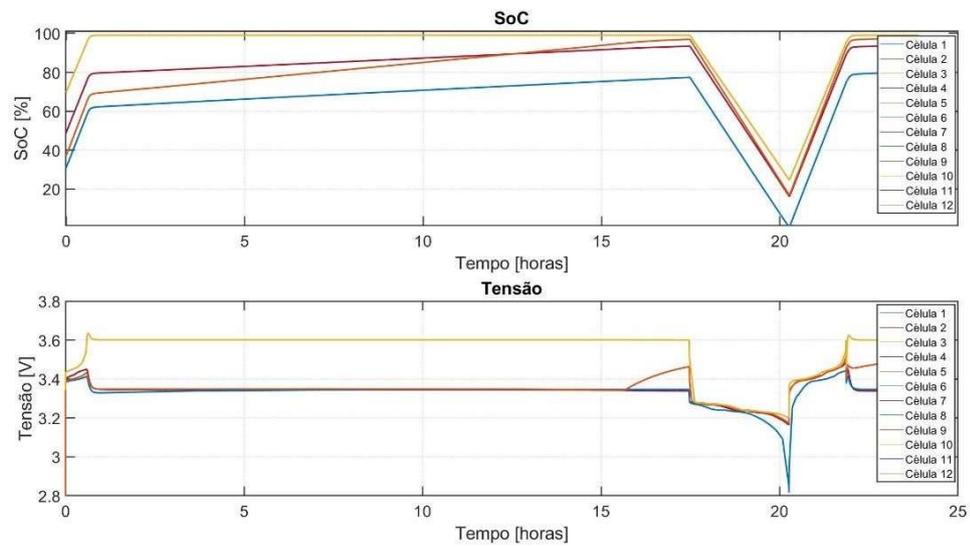
Fonte: Elaboração própria

Figura 35: SoC e tensão das células para a última simulação do Caso 2 do balanceamento com Capacito Comutado Clássico.



Fonte: Elaboração própria

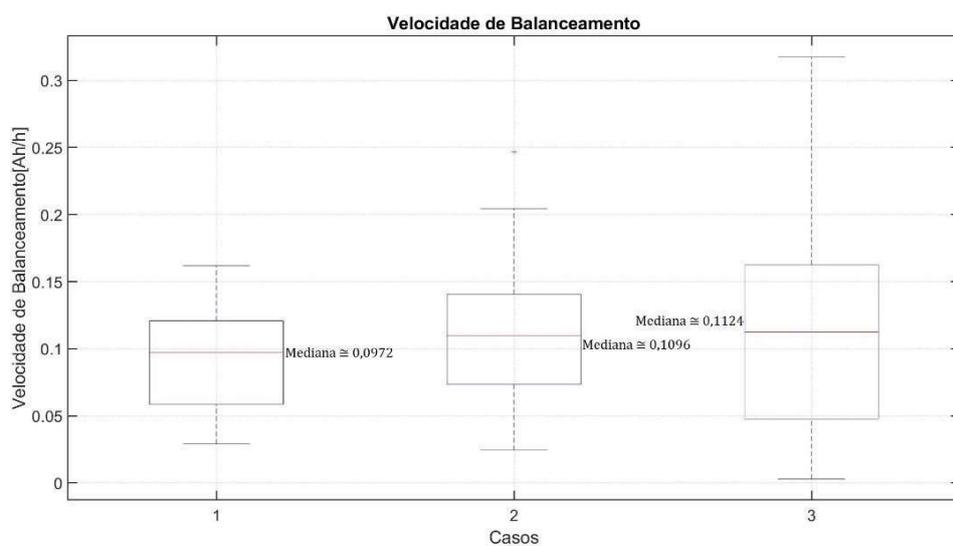
Figura 36: SoC e tensão das células para a última simulação do Caso 3 do balanceamento com Capacitor Comutado Clássico.



Fonte: Elaboração própria

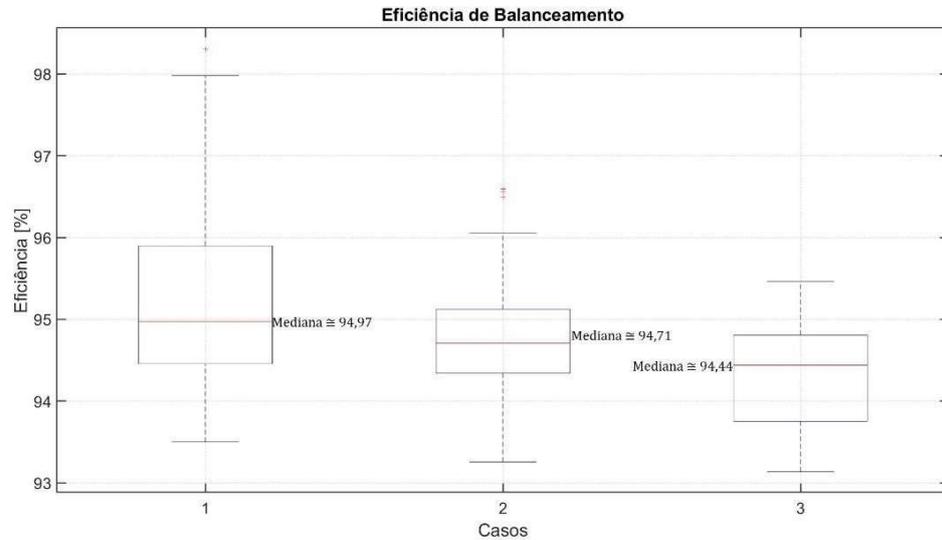
O gráfico *boxplot* da velocidade de balanceamento, apresentado na Figura 37, exibe as medianas dos casos 1, 2 e 3, com valores aproximados de 0,0972Ah/h, 0,1096Ah/h e 0,1124Ah/h, respectivamente. Da mesma forma, o gráfico *boxplot* na Figura 38 mostra as medianas da eficiência de balanceamento, as quais são aproximadamente 94,97%, 94,71% e 94,44% para cada um dos respectivos casos.

Figura 37: *Boxplot* da velocidade de balanceamento de 12 células para os três casos do balanceamento com Capacitor Comutado Clássico.



Fonte: Elaboração própria

Figura 38: *Boxplot* da eficiência de balanceamento de 12 células para os três casos do balanceamento com Capacitor Comutado Clássico.



Fonte: Elaboração própria

Com base na análise dos dados, pode-se observar que o método de balanceamento com capacitor comutado clássico apresenta uma velocidade de balanceamento relativamente alta. Além disso, demonstra uma eficiência de balanceamento elevada para um sistema com 12 células de lítio.

5.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE BALANCEAMENTO

A Tabela 5 resume os resultados obtidos das avaliações, por meio de simulações, para os casos e métodos propostos, apresentando as medianas tanto para o Bal_{vel} (velocidade de balanceamento) quanto para a η (eficiência).

Tabela 5: Resumo dos dados referentes às medianas da velocidade e eficiência de balanceamento para os casos e métodos analisados.

Parâmetros	Método por resistor de derivação comutado			Método por conversor flyback			Método por capacitor comutado clássico		
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Bal_{vel} [Ah/h]	0,628	0,631	0,635	0,0031	0,0229	0,0521	0,0972	0,1096	0,1124
η [%]	n/a	n/a	n/a	71,35	77,51	78,40	94,97	94,71	94,44

Fonte: Elaboração própria

Com base nos dados apresentados na Tabela 5, podemos observar que o método de balanceamento por resistor de derivação não é eficiente e leva mais tempo para

realizar a equalização. Isso ocorre devido à natureza dissipativa desse método e por se tratar de um circuito resistivo. Por outro lado, o método de balanceamento por conversor flyback demonstra a maior velocidade de equalização entre as técnicas estudadas. Já o método capacitivo se destaca pela melhor eficiência de balanceamento. Os métodos de balanceamento ativo são mais rápidos e eficientes devido às características dos componentes dos circuitos de equalização e por serem não-dissipativo.

Para determinar uma metodologia como a mais correta deve-se avaliar a aplicação que o mesmo fará parte. Caso a aplicação necessitar de um balanceamento mais rápido, é recomendado a aplicação de uma metodologia ativa de balanceamento devido a sua velocidade de equalização. No entanto, as metodologias ativas possuem custos mais elevados devido aos seus componentes eletrônicos. Em contrapartida, se a aplicação não requer uma equalização rápida, pode-se utilizar as técnicas de balanceamento passivo que possui menor custo, mas ocorre uma maior perda de energia devido a sua característica dissipativa.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram implementadas três metodologias de balanceamento para células de lítio ferro fosfato de segunda vida. Foi possível notar que os estudos das metodologias de equalização de células de lítio íon estão avançados, o que permite o desenvolvimento de novos estudos voltados para células que já foram utilizadas em aplicações como em veículos elétricos.

A partir do estudo dos principais métodos utilizados para o balanceamento de células de lítio, foram escolhidos dois modos sendo eles, um passivo (dissipativo) e dois ativos (não dissipativo) e os seus respectivos esquemáticos, lógicas e metodologia de avaliação foram desenvolvidos em MATLAB/Simulink. A primeira metodologia escolhida para o estudo foi o método passivo com a utilização de resistores de derivação comutada, que consiste em conectar um circuito composto por um resistor e uma chave em paralelo com cada uma das células. Esse circuito resistivo, é utilizado sempre que a célula tenha sua tensão superior à tensão média das células do grupo com menor energia. A segunda metodologia escolhida foi o balanceamento ativo com a utilização de conversores flyback, no qual o circuito utilizado é composto por três circuitos integrados LTC3300-1 produzido pela empresa *Analog Devices* conectados em série. Por fim, a terceira metodologia escolhida foi o balanceamento ativo com o uso de capacitores comutados, que consiste em conectar um circuito composto por chaves SPDT's e capacitores conectados em paralelo com as células.

Para testar os métodos, foram considerados três casos distintos onde são variados a dispersão da capacidade e do SoC e para cada caso realizaram 50 simulações, nas quais as variáveis das células são iniciadas de forma aleatória. No caso 1, o grau de dispersão das capacidades e SoC entre as células é de 5% e 10% respectivamente. No caso 2, dispersão das capacidades e SoC entre as células é de 10% e 15% respectivamente. Por fim, o caso 3 assume que as dispersões de capacidade e SoC entre as células são de 15% e 20% respectivamente. Além de avaliar diferentes casos, utilizou-se o cálculo da velocidade e da eficiência do balanceamento com o intuito de analisar a eficácia do método.

Para o método passivo observou-se que por se tratar de um método dissipativo não há transferência de energia entre as células adjacentes, dessa forma sua eficiência no transporte de energia é nula. A velocidade de balanceamento deste método apresenta

um acréscimo entre os casos estudados, o que é justificado pelo aumento das dispersões de capacidade e SoC e, comparando com o método ativo, sua velocidade diminuiu significativamente o que a torna mais lenta para atingir o final do balanceamento. Para o método ativo com o uso de conversores *flyback* notou-se uma pequena variação da eficiência e da velocidade de balanceamento entre os casos estudados. No entanto, este método é eficiente e atinge a equalização das células de lítio de forma rápida, o que é favorável para algumas aplicações como na regulamentação de frequência e/ ou tensão da rede. Para o método ativo com o uso de capacitor comutado, observou-se que a velocidade de balanceamento é relativamente baixa comparada com o método *flyback* e o método realiza o balanceamento mais lento do balanceamento ativo. Além disso, a eficiência de balanceamento do método capacitivo é alta comparada com os outros métodos estudados.

Com base no estudo realizado, é possível constatar que os três métodos investigados são aplicáveis para o balanceamento das células de lítio. Levando em consideração que cada uma delas pode apresentar um perfil distinto para a mesma aplicação, é necessário avaliar se a aplicação requer um balanceamento mais rápido (como em veículos elétricos) ou se pode tolerar um processo mais lento (como em aplicações estacionárias). Além disso, é importante considerar a relação custo-benefício.

Dessa forma, ao avaliar os três métodos de balanceamento propostos para a aplicação em células já degradadas que serão direcionadas a uma nova aplicação constatou-se que a velocidade e eficiência do balanceamento dependem da aplicação em que serão implementados, assim como do grau de dispersão das variáveis envolvidas. Além disso, este trabalho contribuiu para comunidade científica com novas informações em relação as células de segunda vida e os métodos de equalização.

Para trabalhos futuros, sugere-se reduzir o número de circuitos integrados no balanceamento ativo por *flyback*, aplicar camadas extras e desenvolver uma lógica de balanceamento para o método capacitivo. Também seria interessante realizar comparações com outras metodologias disponíveis e com aplicações reais como em sistemas de energia fotovoltaica e em eletropostos.

7 REFERÊNCIAS

- ANDWARI, A. M. et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews. **ScienceDirect**, v. 41, n. October, p. 1277–1287, 2014.
- AUDAZ TECNOLOGIA. **Mobilidade sustentável: o que é, quais são suas vantagens e seus desafios**. Disponível em: <<https://audaztec.com.br/blog/mobilidade-sustentavel/>>. Acesso em: 16 jun. 2022.
- BAUGHMAN, A. C.; FERDOWSI, M. Double-Tiered Switched-Capacitor Battery Charge Equalization Technique. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS**, v. 55, n. 6, 2008.
- BLOOMBERGNEF. **Electric Vehicle Outlook 2021**. Disponível em: <<https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/#toc-viewreport>>. Acesso em: 22 nov. 2021.
- CAMBOIM, M. M. et al. **A Control Strategy and Cell Balancing Speed Analysis Considering the Integrated Circuit LTC3300-1**. 2022.
- CAO, J.; SCHOFIELD, N.; EMADI, A. Battery balancing methods: A comprehensive review. **2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2008**, p. 3–8, 2008.
- CARTER, J.; FAN, Z.; CAO, J. **Cell equalisation circuits: A review**. **Journal of Power Sources** Elsevier B.V., , 1 fev. 2020.
- DAOWD, M. et al. A review of passive and active battery balancing based on MATLAB/Simulink. **International Review of Electrical Engineering**, v. 6, n. 7, p. 2974–2989, 2011a.
- DENG, D. Li-ion batteries: Basics, progress, and challenges. **Energy Science and Engineering**, v. 3, n. 5, p. 385–418, 2015a.
- DEVICES, A. **LT3300-1 (Rev. 0)**. [s.l: s.n.].
- DUNN, B.; KAMATH, H.; TARASCON, J. M. Electrical energy storage for the grid: A battery of choices. **Science**, v. 334, n. 6058, p. 928–935, 2011.
- GALLARDO-LOZANO, J. et al. Battery equalization active methods. **Journal of Power Sources**, v. 246, p. 934–949, 2014.
- HOQUE, M. M. et al. Battery charge equalization controller in electric vehicle applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, n. November 2015, p. 1363–1385, 2017.
- HOSSAIN, E. et al. A Comprehensive Review on Second-Life Batteries: Current State, Manufacturing Considerations, Applications, Impacts, Barriers Potential Solutions, Business Strategies, and Policies. **IEEE Access**, v. 7, p. 73215–73252, 2019.
- IEEE. **1679.1-2017 - IEEE Guide for the Characterization and Evaluation of Lithium-Based Batteries in Stationary Applications**. [s.l.] IEEE, 2018.
- KHANAL, A. et al. Comparative Analysis of Cell Balancing Topologies in Battery Management Systems. **Comparative Analysis of Cell Balancing Topologies in Battery Management Systems**. n. May, p. 301–307, 2019.
- KIM, M. Y. et al. A chain structure of switched capacitor for improved cell balancing speed of lithium-ion batteries. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 61, n. 8, p. 3989–3999, 1 ago. 2014.
- LEE, Y. et al. Comparison on cell balancing methods for energy storage applications. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 9, n. 17, 2016.
- LU, L. et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. **Journal of Power Sources**, v. 226, p. 272–288, 2013.

MAURO FERNANDO BASQUERA JÚNIOR et al. **Baterias de lítio-íon, uma visão geral** . Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/baterias-de-lítio-íon-uma-visão-geral-mauro-fernando-basquera-jr/?originalSubdomain=pt>>. Acesso em: 28 nov. 2021.

MEZEI, F. **Basics Concepts**. [s.l.: s.n.].

MOORE, S. W.; SCHNEIDER, P. J. A review of cell equalization methods for lithium ion and lithium polymer battery systems. **SAE Technical Papers**, 2001.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. [s.l.: s.n.].

QI, J.; DAH-CHUAN LU, D. Review of battery cell balancing techniques. **2014 Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2014 - Proceedings**, n. October, p. 1–6, 2014a.

RAHIMI-EICHI, H. et al. Battery management system: An overview of its application in the smart grid and electric vehicles. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 7, n. 2, p. 4–16, 2013.

RIBEIRO, B. H.; FERREIRA, T. T. Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. **Bndes**, p. 273, 2010.

RINALDI, A. **Conheça cada tecnologia dos carros elétricos e híbridos - Revista Carro**. Disponível em: <<https://revistacarro.com.br/conheca-cada-tecnologia-dos-carros-eletricos-e-hibridos/>>. Acesso em: 25 nov. 2021.

ROTEK. **Baterias De Lítio**. p. 220, 2020.

SCHLASZA, C. et al. Review on the aging mechanisms in Li-ion batteries for electric vehicles based on the FMEA method. **2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo: Components, Systems, and Power Electronics - From Technology to Business and Public Policy, ITEC 2014**, p. 1–6, 2014.

SEEG. **Relatório Analítico 2020**. [s.l.: s.n.].

TONG, S. J. et al. Off-grid photovoltaic vehicle charge using second life lithium batteries: An experimental and numerical investigation. **Applied Energy**, v. 104, p. 740–750, 2013.

TONG, S.; KLEIN, M. P.; PARK, J. W. **Second Life Battery Pack as Stationary Energy Storage for Smart Grid**. [s.l.: s.n.].

YILDIRIM, B. et al. Evaluation and Comparison of Battery Cell Balancing Methods. **Proceedings of 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, ISGT-Europe 2019**, 2019.

YURI VASCONCELOS. Ascensão dos elétricos. **Pesquisa Fapesp**, p. 18–25, 2017.