

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS
GERAIS**

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Jonathan Silva de Oliveira

**ESTRATÉGIAS DE BALANCEAMENTO DE ESTADO DE
CARGA E SAÚDE PARA SISTEMAS DE
ARMAZENAMENTO BASEADOS EM BATERIAS
INTELIGENTES**

Belo Horizonte

2023

Jonathan Silva de Oliveira

**ESTRATÉGIAS DE BALANCEAMENTO DE ESTADO DE
CARGA E SAÚDE PARA SISTEMAS DE
ARMAZENAMENTO BASEADOS EM BATERIAS
INTELIGENTES**

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e da Universidade Federal de São João del-Rei, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Allan Fagner Cupertino
Coorientador: Prof. Dr. Erick Matheus da
Silveira Brito

Belo Horizonte, MG

2023

Oliveira, Jonathan Silva de
O48e Estratégias de balanceamento de estado de carga e saúde para sistemas de armazenamento baseados em baterias inteligentes / Jonathan Silva de Oliveira. – 2023.
74 f.: il., gráfs, tabs.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica em associação ampla entre a UFSJ e o CEFET-MG.
Orientador: Allan Fagner Cupertino.
Coorientador: Erick Matheus da Silveira Brito.
Banca examinadora: Allan Fagner Cupertino, Erick Matheus da Silveira Brito, Eduardo Moreira Vicente e Tomás Perpétuo Correa.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

1. Baterias elétricas – Teses. 2. Baterias elétricas – Modelos – Teses.
3. Baterias de armazenamento – Propriedades – Teses. 4. Ciclo de vida do produto – Teses. I. Cupertino, Allan Fagner. II. Brito, Erick Matheus da Silveira. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Universidade Federal de São João del-Rei. V. Título.

CDD 621.31242



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Jonathan Silva de Oliveira

“ESTRATÉGIAS DE BALANCEAMENTO DE ESTADO DE CARGA E SAÚDE PARA SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO BASEADOS EM BATERIAS INTELIGENTES”

Dissertação nº312 apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João Del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais em 12 de Dezembro de 2023 como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, aprovada pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Allan Fagner Cupertino (Orientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

Prof. Dr. Erick Matheus da Silveira Brito (Coorientador)
Universidade Federal de Viçosa - UFV

Prof. Dr. Eduardo Moreira Vicente
Universidade Federal de São João Del Rei - UFSJ

Prof. Dr. Tomás Perpétuo Correa
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG



Emitido em 12/12/2023

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 33/2023 - PPGEL (11.52.08)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 28/12/2023 12:15)

TOMÁS PERPETUO CORRÊA

ASSINANTE EXTERNO

CPF: ###.###.336-##

(Assinado digitalmente em 29/12/2023 04:17)

ERICK MATHEUS DA SILVEIRA BRITO

ASSINANTE EXTERNO

CPF: ###.###.155-##

(Assinado digitalmente em 29/12/2023 10:01)

ALLAN FAGNER CUPERTINO

ASSINANTE EXTERNO

CPF: ###.###.706-##

(Assinado digitalmente em 28/12/2023 09:51)

EDUARDO MOREIRA VICENTE

ASSINANTE EXTERNO

CPF: ###.###.176-##

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: **33**, ano: **2023**, tipo:
ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO, data de emissão: **27/12/2023** e o código de verificação: **32b7aec7c7**

Agradecimentos

Este mestrado foi uma oportunidade única, repleta de momentos de aprendizagem e crescimento acadêmico. O final desta etapa é marcado por um profundo sentimento de gratidão àqueles que colaboraram para tornar este momento possível. Em primeiro lugar agradeço a Deus pela vida e por ser a base das minhas conquistas. Ao professor orientador Allan Fagner Cupertino e ao professor coorientador Erick Matheus da Silveira Brito, pelo apoio e disposição a ensinar e guiar o desenvolvimento desta dissertação. Gostaria de agradecer também à Capes e a Cemig pelo apoio financeiro para realização do trabalho. À minha esposa Dayane pelo amor, incentivo, paciência e compreensão. A toda minha família pelo suporte e estímulo a nunca desistir.

Resumo

A busca por métodos mais eficientes de se armazenar energia elétrica é impulsionada pela alta demanda de veículos elétricos e de fontes de geração de energia elétrica não despacháveis, como solar fotovoltaica e eólica. Dentre as formas de se armazenar energia elétrica, o uso de baterias torna-se uma das melhores opções, devido a maior facilidade de projetar e aplicar esta tecnologia. O aumento da vida útil de uma bateria é um dos principais temas atuais, visto que em aplicações como veículos elétricos, a bateria corresponde a grande parte do investimento inicial e geralmente é substituída após perder cerca de 20% de sua capacidade nominal. Com o objetivo de utilizar as baterias de veículos elétricos por mais tempo surgem técnicas que utilizam o conceito de baterias inteligentes. O termo bateria inteligente se destina a métodos distribuídos de se gerenciar baterias. Portanto, este trabalho tem como objetivo estudar técnicas de balanceamento de estado de carga e estado de saúde em baterias inteligentes. Para alcançar esse objetivo tornou-se necessário o desenvolvimento de um modelo de bateria com representação da sua degradação no software PLECS. Além disso, foi implementado um modelo de balanço de potência do conversor *c.c./c.c. boost* com o intuito de reduzir a complexidade do modelo e permitir simulações de longo período. Uma técnica de balanceamento do estado de carga, com ganho proporcional fixo, encontrada na literatura, é implementada. Na sequência, a técnica encontrada na literatura tem seu ganho fixo alterado para um ganho variável, que dependerá dos dados atuais da bateria. Uma técnica de balanceamento do estado de saúde, em cascata, é apresentada e sua ação de controle é aplicada como um *offset* na técnica de balanceamento do estado de carga. É realizado um estudo de caso em dez baterias, com capacidades e estados de carga diferentes. O balanceamento de estado de carga da técnica com ganho variável foi cerca de cinco vezes mais rápido, considerando um erro máximo de estado de carga de 0,2%. Além disso, a técnica com ganho variável assegurou um erro em regime permanente menor em comparação com a técnica de balanceamento com ganho fixo. O balanceamento de estado de saúde demonstrou uma dinâmica mais lenta do que o balanceamento de estado de carga, mas seu emprego possibilita a extensão do número de ciclos das baterias e a postergação de uma eventual substituição por falha.

Palavras-chaves: Baterias inteligentes, modelo elétrico de baterias, modelo de degradação de baterias, balanceamento, estado de carga, estado de saúde.

Abstract

The high demand for electric vehicles, and power generation sources such as photovoltaic and wind drives the search for more efficient electrical energy storage methods. Among the ways to store electricity, the use of batteries becomes one of the best options, due to the faster response in systems connected to the electricity grid. Increasing the life of a battery is one of the main current issues, since in applications such as electric vehicles, the battery corresponds to a large part of the initial investment and is usually replaced after losing about 20% of its nominal capacity. To use the batteries of electric vehicles for longer, techniques that use the concept of smart batteries arise. The term smart battery is intended for distributed methods of managing batteries. Therefore, this study aims to study techniques for balancing the state of charge and state of health in smart batteries. To achieve this goal, a battery model was developed on PLECS software to compute online degradation. In addition, an average model of the dc/dc boost converter was considered to reduce the complexity of the model and allow long-term simulations. The state of charge balancing technique is implemented with fixed proportional gain, as found in the literature. Subsequently, the method used in the literature has been transformed from a fixed gain to a variable gain, which will depend on the current battery data. A state-of-health cascading balancing technique is presented and its control action is applied as a reference to the state-of-charge balancing technique in the state-of-charge balancing technique. A case study is conducted on ten batteries, with different capacities and charge states. The state-of-charge balancing of the variable gain technique was about five times faster, considering a maximum state-of-charge error of 0.2%. In addition, the technique with variable gain ensured a smaller permanent regime error than the balancing technique with fixed gain. Health state balancing demonstrated a slower dynamic than state-of-charge balancing. Still, its use allows the extension of the number of cycles of the batteries and the postponement of an eventual replacement for failure.

Keywords: Smart batteries, electrical model of batteries, battery degradation model, balancing, state of charge, state of health.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Estoque Global de Veículos Elétricos e Veículos elétricos Híbridos <i>plug-in</i> entre 2010 e 2022.	1
Figura 2 – Histórico anual de instalações Fotovoltaicas, entre 2010 e 2020.	2
Figura 3 – Despacho de energia com baterias.	3
Figura 4 – Abordagens empregadas em um sistema de armazenamento de energia por baterias: (a) abordagem convencional. (b) abordagem baseada em baterias inteligentes.	4
Figura 5 – Comparativo das tecnologias de armazenamento de Energia Elétrica (a) Número de Ciclos X Eficiência; (b) Densidade de Potência X Densidade de Energia.	9
Figura 6 – Comparativo das topologias de BMS no BESS: (a) centralizado; (b) modular com mestres independentes; (c) modular com mestre/escravos; (d) distribuído com comunicação entre módulos.	11
Figura 7 – Diagrama de blocos do controle empregado para (a) controle mestre; (b) controle local.	12
Figura 8 – Topologia do <i>IntellBatt</i> , proposta da matriz de célula de bateria.	13
Figura 9 – Modo de operação em módulos de bateria inteligente: (a) carga; (b) descarga, (c) <i>by-pass</i> e (d) conexão direta.	14
Figura 10 – Conversores aplicados em bateria inteligente: (a) <i>half-bridge</i> ; (b) <i>boost</i> , (c) <i>buck</i> , (d) <i>buck-boost</i> não inversor e (e) conversor c.c./c.c. dois estágios.	15
Figura 11 – Modelos elétricos de baterias: (a) modelo resistivo, (b) modelo de primeira ordem, (c) modelo de segunda ordem, e (d) modelo com elemento de fase constante.	18
Figura 12 – Modelo térmico da Bateria.	19
Figura 13 – Definição dos parâmetros \overline{SOC} e cd para computação da perda de capacidade da i -ésima bateria.	21
Figura 14 – Modelo de degradação <i>online</i> da bateria.	22
Figura 15 – Fluxograma de funcionamento do bloco detector de ciclos implementado no modelo apresentado na Fig. 14.	23
Figura 16 – Tensão de circuito aberto <i>versus</i> dados de estado de carga utilizados nas simulações.	24
Figura 17 – Diagrama de blocos do circuito de controle de corrente aplicado ao circuito de validação do modelo.	25
Figura 18 – Perfil da corrente do PCS imposta pelo controlador da Fig. 17, para validação do modelo implementado.	26
Figura 19 – Resultados das simulações para os cenários 1_a , 1_b e 1_c	26

Figura 20 – Resultados das simulações para os cenários 2_a , 2_b e 2_c	27
Figura 21 – Resultados das simulações para os cenários 3_a , 3_b e 3_c	27
Figura 22 – Arquiteturas de balanceamento de estado de carga em baterias pelo método de redistribuição de energia: (a) <i>adjacent</i> C2C; (b) <i>direct</i> C2C; (c) <i>parallel</i> C2P; (d) <i>series</i> C2P.	31
Figura 23 – Diagrama de blocos do controlador de balanceamento de estado de carga.	32
Figura 24 – Topologia do conversor <i>c.c./c.c. boost</i> : (a) empregado na bateria inteligente; (b) modelo de balanço de potência para simulação.	34
Figura 25 – Modelo completo do balanço de potência do conversor <i>boost</i>	34
Figura 26 – Diagrama de blocos do controlador de balanceamento de estado de carga com ganho variável.	39
Figura 27 – Condições iniciais do estado de carga e do estado de saúde das baterias empregadas nas simulações.	41
Figura 28 – Diagrama de blocos do controle proporcional-integral utilizado para regular a corrente do PCS e assegurar que o SOC_{avg} seja igual a SOC_{REF} .	42
Figura 29 – Perfil aproximado da corrente do PCS fornecido pelo controlador apresentado na Fig. 28, com forma de onda retangular e frequência constante para carga/descarga do BESS.	42
Figura 30 – Comparação do resultado do balanceamento de estado de carga do modelo e a análise matemática: (a) seção 4.3; (b) seção 4.4.	44
Figura 31 – 1° cenário de simulação (a) estado de carga e (b) tensão na saída dos conversores.	45
Figura 32 – 2° cenário de simulação (a) estado de carga e (b) tensão na saída dos conversores.	46
Figura 33 – 3° cenário de simulação (a) estado de carga e (b) tensão na saída dos conversores.	47
Figura 34 – (a) Máximo erro de estado de carga em cada cenários de simulação; (b) comportamento da tensão no barramento <i>c.c.</i> nos três cenários de simulação.	48
Figura 35 – Comportamento: (a) do controle da corrente do PCS nos três cenários; (b) do estado de carga instantâneo nas dez baterias, convergindo para SOC_{REF}	49
Figura 36 – Estratégias de balanceamento (a) de estado de saúde, análoga à apresentada em (Qahouq, 2016) para o balanceamento de estado de carga; e (b) de estado de saúde em cascata, proposta neste trabalho.	53
Figura 37 – Técnica de balanceamento de estado de saúde com ganho variável.	54
Figura 38 – 1° cenário de simulação: (a) estado de saúde, (b) estado de carga nas baterias e (c) visualização ampliada do estado de carga.	56

Figura 39 – 2º cenário de simulação: (a) estado de saúde, (b) estado de carga nas baterias e (c) visualização ampliada do estado de carga.	57
Figura 40 – 3º cenário de simulação: (a) estado de saúde, (b) estado de carga nas baterias e (c) visualização ampliada do estado de carga.	58
Figura 41 – 4º cenário de simulação: (a) estado de saúde, (b) estado de carga nas baterias e (c) visualização ampliada do estado de carga.	59
Figura 42 – 5º cenário de simulação: (a) estado de saúde, (b) estado de carga nas baterias e (c) visualização ampliada do estado de carga.	60
Figura 43 – Máximo erro de estado de saúde em cada técnica.	61
Figura 44 – Máximo erro de estado de carga em cada técnica.	62
Figura 45 – Comparativo da perda de capacidade em cada técnica.	62

Lista de tabelas

Tabela 1 – Cenários escolhidos para avaliar o modelo de bateria simulado.	24
Tabela 2 – Número de ciclos necessários para degradar 20% da capacidade nominal, em comparação com o resultado da equação (3.1).	28
Tabela 3 – Parâmetros utilizados para simulação das baterias e dos conversores no BESS.	41
Tabela 4 – Valores dos ganhos aplicados ao controlador proporcional-integral, conforme ilustrado na Fig. 28, para manter um SOC_{avg} constante.	42
Tabela 5 – O tempo necessário, em horas, e o percentual em relação ao pior caso, para que a bateria com a maior degradação inicial atinja o EOL.	63

Lista de abreviaturas e siglas

BCA	<i>Battery Cell Array</i>
BCAM	<i>Battery Cell Array Manager</i>
BESS	Battery Energy Storage System
BEV	<i>Battery Electric Vehicles</i>
BMS	Battery Management Systems
C2C	<i>Cell-to-cell</i>
C2P	<i>Cell-to-pack</i>
CPE	<i>Constant Phase Element</i>
DFN	<i>Doyle Fuller Newman</i>
ECM	<i>Equivalent Electrical Circuit Models</i>
ESS	<i>Energy Storage System</i>
EOL	<i>End-of-Life</i>
EV	<i>Electric Vehicles</i>
FIDVR	<i>Fault-Induced Delayed Voltage Recovery</i>
GESEP	Gerência de especialistas em Sistemas Elétricos de Potência
IBMS	<i>Intelligent Battery Management System</i>
LEACOPI	Laboratório de Eletrônica de Potência, Acionamentos e Controle de Processos Industriais
MMC	<i>Modular Multilevel Converter</i>
MMGD	Micro e Minigeração Distribuída
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMBus	<i>System Management Bus</i>
SMP	<i>Single Particle Model</i>
P2D	<i>Pseudo-2-dimensional</i>

PCS	<i>Power Converter Systems</i>
PDE	<i>Partial Differential Equations</i>
PHEV	<i>Plug-in hybrid Electric Vehicles</i>
ROM	<i>Reduced-Order Model</i>

Lista de símbolos

α	razão entre o valor de $T_{b,2}$ e $T_{b,1}$
A	Termo constate genérico
B	Termo constate genérico
C_1	Capacitância 1
C_2	Capacitância 2
$C_{a,i}$	Capacidade atual da bateria
cd	Profundidade do ciclo
$C_{f,i}$	Perda de capacidade
$C_{f,i,total}$	Perda de capacidade total atual
$C_{f,i,atual}$	Perda de capacidade do ciclo atual da bateria
$C_{f,i,anterior}$	Perda de capacidade acumulada anterior
$C_{n,i}$	Capacidade nominal da bateria
CPE_1	Elemento de fase constante 1
CPE_2	Elemento de fase constante 2
C_t	Capacitância térmica
$h(t)$	Perdas térmicas
$\Delta i_{b,i}$	Incremento de corrente na bateria imposto pelo controlador
$i_{b,i}$	Corrente na bateria
$i_{b,c.c.}$	Parcela comum da corrente do PCS em todas as baterias
i_c	Corrente de saída do conversor
$i_{c.c.}$	Corrente do PCS
K_{SOC}	Ganho do controlador de estado de carga
$K_{SOC,max}$	Ganho máximo do controlador de SOC

K_{SOH}	Ganho do controlador de estado de saúde
L_s	Indutância série
N	Número de células do SAEB
nc	Número de ciclos
$P_{b,i}$	Potência de entrada/saída da bateria
$P_{c,i}$	Potência de entrada/saída do conversor
R	Resistência
R_1	Resistência 1
R_2	Resistência 2
R_s	Resistência série
R_t	Resistência térmica
ΔSOC	Diferença máxima de estado de carga no SAEB
ΔSOC_i	Máxima variação de estado de carga aplicada ao controlador de estado de saúde
ΔSOC_{max}	Máxima variação de estado de carga inicial
$\Delta SOC_{i,max}$	Máxima variação de estado de carga instantâneo
\overline{SOC}	Estado de carga médio da bateria
$SOC_{0,i}$	Valor inicial de estado de carga
SOC_{avg}	Estado de carga médio instantâneo no SAEB
SOC_i	Estado de carga instantâneo
SOC_{REF}	Referência do estado de carga médio instantâneo
ΔSOH	Diferença máxima de estado de saúde no SAEB
$\Delta SOH_{i,max}$	Máxima variação de estado de saúde instantâneo
SOH_{avg}	Estado de saúde médio das baterias
SOH_i	Estado de saúde individual da bateria
τ	Constante de tempo

T	Temperatura
$T_a(t)$	Temperatura ambiente
$T_{b,1}$	Tempo para balanceamento da técnica de balanceamento com ganho fixo
$T_{b,2}$	Tempo para balanceamento da técnica de balanceamento com ganho variável
$\Delta v_{c,i}$	Limite de tensão do conversor
Δv_i	Incremento de tensão do conversor definido pelo controlador
Δv_{max}	Máximo incremento de tensão do conversor
$v_{b,i}$	Tensão da bateria
v_c^*	Referência de tensão para o Conversor
$v_{c.c.}^*$	Referência de tensão para o barramento c.c.
$v_{c.c.}$	Tensão no barramento c.c.
v_{cell}	Tensão da célula de LiFePO_4 utilizada no estudo de caso
$v_{c,i}$	Tensão de saída do conversor
v_{oc}	Tensão de circuito aberto
X_i	Média aritmética de $SOC_{0,i}$
Y_i	Integral da variação de corrente nas baterias
$W_r(t)$	Capacidade de armazenamento de energia

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contexto e relevância	1
1.2	Objetivos	5
1.3	Organização da dissertação	6
1.4	Lista de publicações	6
2	ESTADO DA ARTE DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS	7
2.1	Tecnologia de armazenamento de energia	7
2.2	Sistema de gerenciamento de baterias	9
2.3	Baterias inteligentes	12
2.4	Conclusões do capítulo	16
3	MODELO DE BATERIAS COM DEGRADAÇÃO <i>ONLINE</i>	17
3.1	Modelos de desempenho de baterias	17
3.2	Modelo de vida útil da bateria de lítio	20
3.3	Validação do modelo	23
3.4	Resultados da validação do modelo	26
3.5	Conclusões do capítulo	28
4	ESTRATÉGIAS DE BALANCEAMENTO DE ESTADO DE CARGA	29
4.1	Estado da arte de técnicas de balanceamento de estado de carga	29
4.2	Uso de baterias inteligentes	31
4.3	Implementação do modelo do arranjo de baterias inteligentes	33
4.4	Análise matemática do balanceamento de estado de carga com ganho fixo	35
4.5	Análise matemática do balanceamento de estado de carga com ganho variável	38
4.6	Estudo de caso	40
4.7	Resultados e discussões	43
4.8	Conclusões do capítulo	49
5	ESTRATÉGIAS DE BALANCEAMENTO DE ESTADO DE SAÚDE	51
5.1	Estado da arte de técnicas de balanceamento de estado de saúde	51
5.2	Técnica de balanceamento de estado de saúde em cascata	52
5.3	Estudo de caso	54

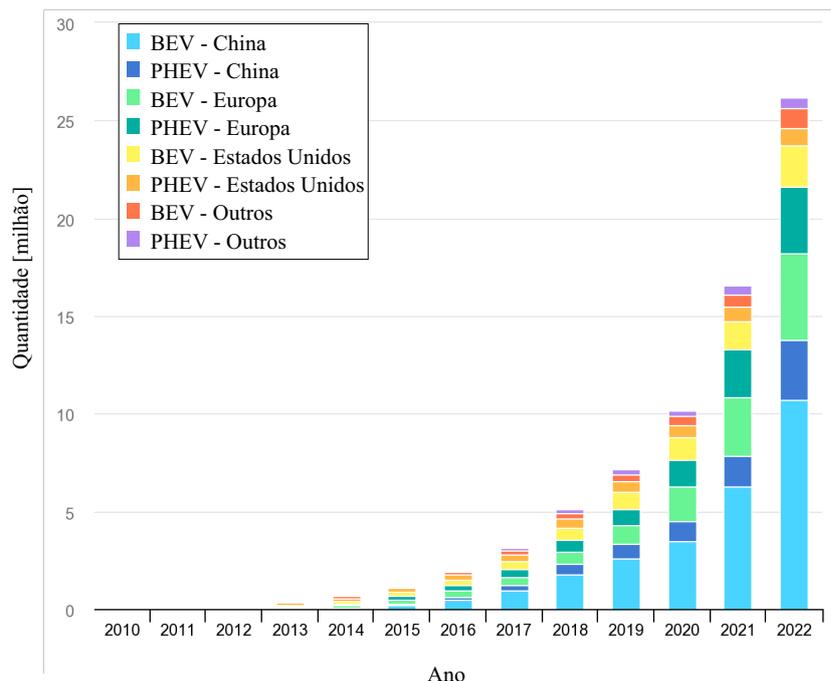
5.4	Resultados e discussões	55
5.5	Conclusões do capítulo	63
6	CONCLUSÕES	64
6.1	Propostas de continuidade	64
	REFERÊNCIAS	66

1 Introdução

1.1 Contexto e relevância

A redução da utilização de combustíveis derivados do petróleo no setor de transporte é fator relevante nos dias atuais, visto que indústrias e agentes políticos querem reduzir a emissão de carbono na atmosfera. Este fato tem impulsionado a demanda por veículos elétricos (EV, do inglês *electric vehicles*), que utilizam da energia elétrica para alimentar seus motores (Bai et al., 2022). O aumento global de veículos elétricos levou a 26 milhões de veículos nas estradas, em 2022, correspondendo a um aumento de 60 % em relação ao ano anterior. Os veículos elétricos à baterias (BEV, do inglês *battery electric vehicles*) são responsáveis por 70% do crescimento anual de EV, onde o restante deste mercado é ocupado principalmente por veículos elétricos híbridos *plug-in* (PHEV, do inglês *plug-in hybrid electric vehicles*). Dado que o aumento da demanda de 2021 para 2022 foi tão alto quanto o de 2020 para 2021, pode-se esperar que exista um padrão de crescimento acentuado nos próximos anos. Como representado na Fig. 1, o crescimento do estoque desde 2010 foi significativo, principalmente em mercados como a China, Europa e Estados Unidos. Nota-se que o restante do mundo representa uma fatia tímida do crescimento destes mercados (IEA, 2023).

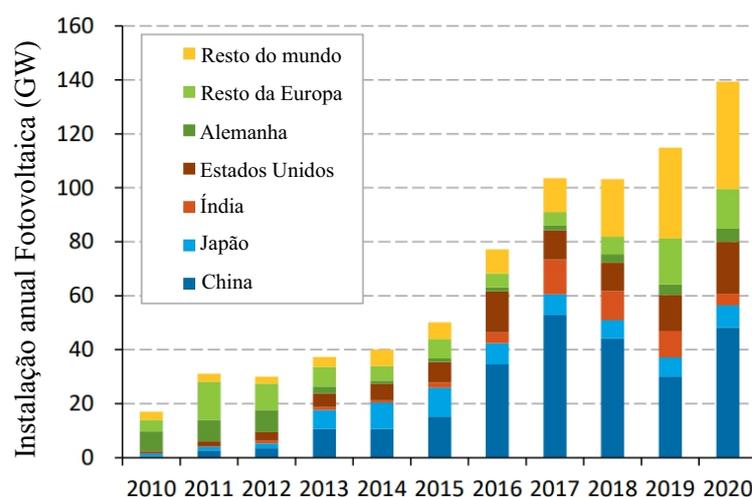
Figura 1 – Estoque Global de Veículos Elétricos e Veículos elétricos Híbridos *plug-in* entre 2010 e 2022.



Fonte: Adaptado de: (IEA, 2023).

Outro fator que contribui para a redução da emissão de carbono na atmosfera é o aumento do uso de fontes renováveis de energia elétrica, como eólica e solar fotovoltaica. Destaca-se o mercado de micro e minigeração distribuída (MMGD), que no Brasil teve um aumento de 88% em 2022 em relação ao ano anterior. O mercado de MMGD em 2022 correspondeu a uma produção de energia de 18,42 GWh, sendo a geração solar responsável por 94,3% dessa produção, continuando a ser a principal fonte de produção na MMGD em relação a 2021 (EPE, 2023). No âmbito internacional a energia solar fotovoltaica também está em alta, sendo responsável por 3,1% de toda geração de energia mundial. A capacidade mundial instalada subiu de 17 GW de potência para 139 GW de potência, entre 2010 e 2020. Esse histórico de dados pode ser verificado na Fig. 2. Esse mercado foi liderado no início da década por países europeus, mas o mercado asiático agora está muito maior. A Ásia é responsável por 57% da potência instalada, seguida de Europa com 22% e EUA com 15%. Em 2021 a potência instalada foi de 171 GW, com previsão de instalação de 209 GW para 2022 e 231 GW para 2023. (Nasr Esfahani; Darwish; Williams, 2022).

Figura 2 – Histórico anual de instalações Fotovoltaicas, entre 2010 e 2020.

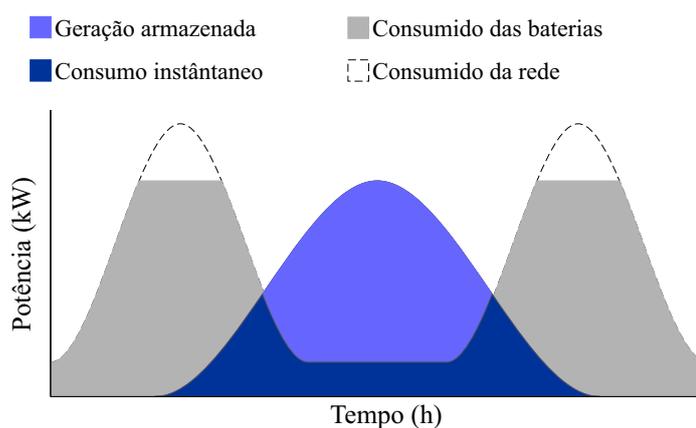


Fonte: Adaptado de: (Nasr Esfahani; Darwish; Williams, 2022).

Segundo (Fernandes, 2022), a adição de MMGD pode causar perturbações na rede elétrica, sendo necessário um suporte ao sistema interligado nacional (SIN). O suporte ao SIN é realizado através de um serviço auxiliar, ou ancilar, e demanda flexibilidade na reserva de energia elétrica. A perturbação à rede elétrica causada pela inserção de MMGD se dá principalmente pela predominância de fontes não despacháveis, como solar fotovoltaica e eólica. Recentemente esse fato vem impactando na aprovação projetos de MMGD no Brasil. Isso se dá pela denominada “inversão de fluxo de energia”, que tem sido alegada pelas concessionárias de energia como um impeditivo para instalação de MMGD. A inversão de fluxo ocorre quando a geração de energia injetada é superior a demanda de energia dos consumidores instalados na rede de distribuição (ABSOLAR, 2023). Uma possibilidade é a utilização de baterias, em que o consumidor poderá armazenar a energia e liberá-la

para a rede em momentos mais oportunos. A Fig. 3 ilustra o exemplo do deslocamento do despacho de energia elétrica de uma sistema fotovoltaico híbrido, com baterias para o armazenamento de energia. A curva azul representa a geração fotovoltaica, sendo a parte mais escura o consumo instantâneo pela carga e a parte mais clara armazenada na bateria. A energia armazenada nas baterias pode então ser usada para alimentar a carga em momentos de pico de consumo (curva cinza), reduzindo a potência fornecida pela rede elétrica (curva tracejada).

Figura 3 – Despacho de energia com baterias.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

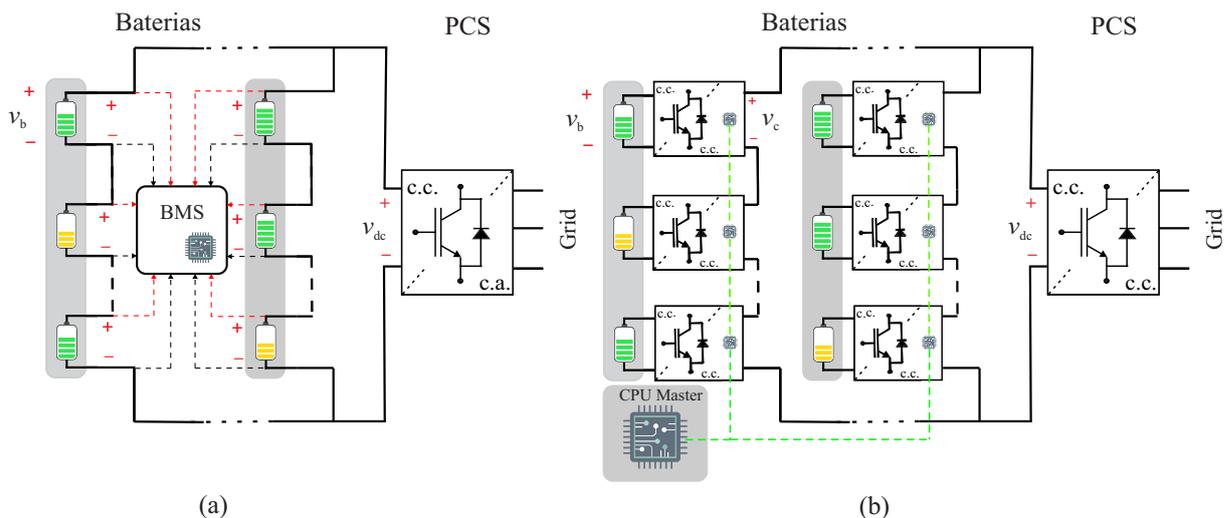
Em aplicações de mobilidade elétrica, a energia armazenada nas baterias dos carros elétricos substitui o tanque de combustível dos veículos convencionais. Por razões de baixa autonomia, estas baterias chegam ao final de sua vida útil quando sua capacidade decai 20% a 30% da sua capacidade nominal, o que corresponde a cerca de 150.000 km, levando a necessidade de sua substituição (Li; Han, 2015c). Baterias que chegam ao fim de sua vida útil podem ter quatro fins alternativos: a reutilização em outros veículos que estão com sua bateria danificada, o que ocorre em caráter provisório e possuem problemas de confiabilidade; a recuperação da bateria por remanufatura, o que nem sempre é uma prática ideal por envolver processos sofisticados; a reciclagem que é uma técnica de reaproveitamento de materiais valiosos presentes nas baterias, porém no atual cenário tecnológico é um processo muito oneroso e com alto consumo de energia; e, por fim, a técnica de reaproveitamento para sistemas com aplicações estacionárias (Azadnia; Onofrei; Ghadimi, 2021).

Baterias que chegaram ao fim de sua vida para utilização em EV ainda possuem capacidade suficiente para serem reaproveitadas no armazenamento de energia em sistemas com requisitos de desempenho reduzido. Estas baterias são chamadas de baterias de segunda vida e podem ser empregadas em microrredes ou onde há presença de fontes de energia elétrica renovável não despachável (Viswanathan; Kintner-Meyer, 2011). Essa reutilização impacta na maximização do uso da bateria, visto que uma bateria é responsável por cerca

de 35% a 55% do total de carbono emitido no ciclo de vida de um EV (Li; Han, 2015c). Baterias de segunda vida tornam-se uma oportunidade essencial no desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS, do inglês *battery energy storage systems*) aplicados a sistemas de energia renovável (Silvestri; Santis; Bella, 2022; Rybárik; Bracinič; Kajanová, 2022).

A tecnologia tradicional do BESS é baseada em baterias conectadas em série e em paralelo, como ilustrado na Fig. 4(a). No entanto, podem existir baterias com capacidades diferentes no BESS, especialmente quando é levado em conta baterias de segunda vida. Como resultado, a capacidade disponível no conjunto de baterias é alterada, devido às baterias com menor capacidade. Uma alternativa é a bateria inteligente (SB, do inglês *smart battery*) (Wey; Jui, 2013). Nesta arquitetura, os conversores eletrônicos que são conectados diretamente a cada bateria são chamados de módulos, apresentado na Fig. 4(b), onde os módulos podem se comunicar através de redes com ou sem fio. Assim, o módulo terá mais flexibilidade e melhor aproveitamento da energia. Neste tipo de aplicação, as saídas dos módulos são conectadas em série para formar o barramento c.c., sem a necessidade de circuito intermediário para regulação de tensão. Esta abordagem também permite que o sistema de conversão de potência (PCS, do inglês *power converter systems*) possa conter um único estágio (não sendo necessária conversão c.c./c.c. a nível de série das baterias) (Li; Han, 2015b).

Figura 4 – Abordagens empregadas em um sistema de armazenamento de energia por baterias: (a) abordagem convencional. (b) abordagem baseada em baterias inteligentes.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

É importante que as baterias operem de forma balanceada. Este balanceamento é comumente realizado em termos de estado de carga. O estado de carga é o parâmetro que representa a carga elétrica armazenada na bateria. Mais recentemente, outra possibilidade que vem sendo discutida é empregar o balanceamento de estado de saúde. O estado de

saúde indica o nível de envelhecimento da bateria (Zhang et al., 2023). Quanto a forma de se alcançar o balanceamento, pode ser ativo ou passivo. Os estudos dos métodos de balanceamento aparecem como oportunidade de gerenciamento da carga em cada bateria do BESS. Esse gerenciamento tem como objetivo limitar a operação das baterias em zonas seguras, mitigando a ação dos estressores que causam o envelhecimento. O estudo de técnica de balanceamento data de 2006, em que foram implementadas técnicas de balanceamento em conjuntos em série de baterias, onde foi notado um aumento da capacidade do BESS. Com o passar dos anos outras técnicas foram surgindo, também com o objetivo de se estender a vida de uma bateria, e nessas novas técnicas adota-se a associação de conversores conectados diretamente as baterias do BESS (Lee et al., 2006). Maiores detalhes sobre o BESS e as técnicas de gerenciamento de estado de carga e estado de saúde serão discutidos no decorrer deste trabalho.

O laboratório LEACOPI/CEFET-MG (Laboratório de Eletrônica de Potência, Acionamentos e Controle de Processos Industriais), em parceria com o GESEP/UFV (Gerência de especialistas em Sistemas Elétricos de Potência) tem realizado pesquisas na área de baterias inteligentes nos últimos anos (Coutinho, 2023; Inácio, 2022; Pinto, 2022). Estes trabalhos foram fundamentais para o controle e implementação de um sistema baseado em baterias inteligentes. Este trabalho de dissertação então surge como uma continuidade dos estudos já realizados por estes grupos de pesquisa. A presente dissertação contribui provendo as seguintes investigações:

- Desenvolvimento de um modelo de bateria com degradação *quasi-real time*;
- Desenvolvimento de uma técnica de balanceamento de estado de carga, considerando o ganho do controlador variável;
- Desenvolvimento de uma técnica de balanceamento de estado de saúde em cascata, onde a malha de balanceamento de estado de saúde calcula uma referência para a malha de balanceamento de estado de carga.

Este projeto foi realizado no LEACOPI em parceria com o GESEP e está inserido no contexto do projeto de “P&D D0727 - Análise de Arranjo Técnico e Comercial Baseado em uma Planta Piloto de Sistema Distribuído de Armazenamento de Energia em Alimentador Crítico da Rede de Distribuição de 13,8 kV” financiado pela CEMIG.

1.2 Objetivos

O estudo em questão possui como objetivo geral a investigação de métodos de balanceamento de estado de carga e estado de saúde em BESS com arquitetura distribuída. Dentre os objetivos específicos, pode-se citar:

- Implementação de um modelo de BESS no software PLECS com capacidade de representar a degradação da bateria ao longo do tempo e que permita simulações de longa duração;
- Implementação de algoritmos para balanceamento do estado de carga e estado de saúde das células do BESS por meio de um modelo de simulação vetorizado;
- Avaliar e comparar as diferentes abordagens através de modelos analíticos e simulações no software PLECS.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos, como apresentado a seguir:

- O capítulo 1 descreve as motivações e objetivos do trabalho.
- O capítulo 2 apresenta o estado da arte sobre armazenamento de energia em baterias.
- O capítulo 3 apresenta o modelo de bateria empregado neste trabalho, que representa a degradação da bateria ao longo do tempo e que permita simulações de longa duração;
- O capítulo 4 investiga o balanceamento de estado de carga em baterias inteligentes.
- O capítulo 5 investiga o balanceamento de estado de saúde em baterias inteligentes bem como sua comparação com a abordagem tradicional baseada em balanceamento de estado de carga.
- O capítulo 6 é dedicado as conclusões deste trabalho, bem como a motivação para trabalhos futuros.

1.4 Lista de publicações

A partir dos resultados obtidos neste trabalho foi elaborado o seguinte artigo:

- J. S. Oliveira, E. M. S. Brito, A. F. Cupertino, H. A. Pereira, “Comparison of State-of-Charge and State-of-Health balancing schemes through a smart battery model with online degradation”. COBEP/SPEC, 2023.

Na data de apresentação desta dissertação, existe um artigo em revista sendo redigido, contemplando o capítulo 4, e deverá ser submetido para revista *IEEE Transactions on Energy Conversion* após a data da defesa.

2 Estado da Arte de Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias

Neste capítulo será apresentado o estado da arte de sistemas de armazenamento de energia elétrica. Algumas das tecnologias utilizadas para este fim serão tratadas, com um foco no sistema de armazenamento de energia em baterias. Uma pequena definição do sistema clássico de gerenciamento de baterias traz uma base para se entender as vantagens de se utilizar as baterias inteligentes, que são o foco deste estudo de balanceamento de estados em baterias.

2.1 Tecnologia de armazenamento de energia

Segundo (Argyrou; Christodoulides; Kalogirou, 2018) o armazenamento de energia elétrica (ESS, do inglês *energy storage system*) é um recurso de conversão de energia elétrica em um tipo de energia que se possa armazenar, para posterior conversão em energia elétrica. Os autores classificam as tecnologias de armazenamento quanto a duração e o tipo de armazenamento. São definidos pelos autores cinco tipos de armazenamento de energia: mecânico, eletroquímico, elétrico, químico e térmico. É apresentado ainda no trabalho as seguintes tecnologias de armazenamento de energia: armazenamento hidrelétrico bombeado; armazenamento de energia de ar-comprimido; armazenamento em baterias, onde diversas químicas podem ser utilizadas; armazenamento de energia de hidrogênio, em células combustíveis; armazenamento de energia térmica; armazenamento de energia magnética supercondutora; armazenamento de energia em volante de inércia; e armazenamento em supercapacitores.

Dentre os métodos de ESS encontrados na literatura, o BESS tem como vantagem o rápido tempo de resposta. Essa característica torna-se chave para resolução da flutuação de potência, tensão e frequência. Essa é uma excelente solução para o impacto das fontes de energias renováveis não despacháveis (Chatrunga, 2019). Em (Dantas et al., 2022) o BESS é aplicado na suavização de energia de curto prazo, possibilitando a redução dos efeitos adversos da oscilação de potência na geração eólica. Em (Cifuentes et al., 2019) os autores propõem a aplicação do BESS para suporte a rede elétrica com potência reativa durante a ocorrência de curto-circuito. Essa aplicação se dá somente pela rápida resposta do BESS no tempo. Os autores em (Chen et al., 2023) propõem a implementação de um BESS para corrigir o efeito da recuperação de tensão retardada induzida por falha (FIDVR,

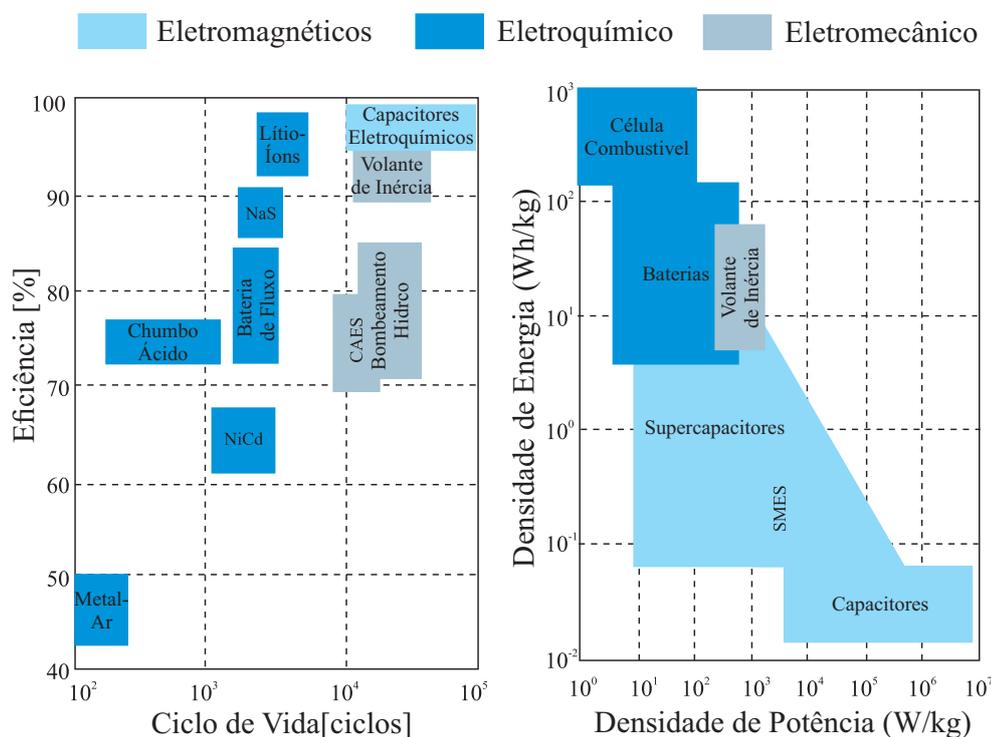
do inglês *fault-induced delayed voltage recovery*) em linhas de transmissão.

A concepção de uma bateria, utilizada no BESS, se dá pela inserção de dois eletrodos, anodo e catodo, em um eletrólito condutor de íons, com a intenção de armazenar energia elétrica. Durante a escolha de uma bateria deve ser levado em consideração alguns fatores, tais como: características físicas da bateria, data de validade, o período de carga/descarga e questões climáticas. As baterias podem ser divididas em dois tipos principais: baterias primárias e baterias secundárias. Uma bateria que pode ser descarregada apenas uma vez é denominada bateria primária. Essa característica de ser utilizada apenas uma vez se dá pelo fato de as reações químicas provocadas pelo descarregamento da bateria serem irreversíveis. Já as baterias secundárias, termo que não deve ser confundido com o empregado para baterias reutilizadas, são caracterizadas pela possibilidade de serem recarregadas após seu uso. Nesse segundo tipo de bateria a reação química resultante do descarregamento é revertida durante o carregamento da bateria (Pushpalatha et al., 2023).

Em (Akinyele; Belikov; Levron, 2017) os autores fazem uma breve revisão sobre algumas das químicas mais utilizadas em baterias secundárias, tais como: chumbo-ácido, sódio-enxofre (NaS), níquel-cádmio ($Ni - Cd$), íon-lítio, zinco-bromo ($Zn - Br$), cloreto de sódio-níquel ($NaNiCl_2$), vanádio redox e bromo polissulfetos (PSB). No texto, o autor apresenta as características operacionais, de composição e das reações químicas que ocorrem durante o processo de carga/descarga das baterias. Ainda é apresentado um breve histórico, que reflete os principais desenvolvimentos tecnológicos das baterias entre os anos de 1600 e 2002. Como forma de comparar o desempenho dos sistemas de armazenamento, uma das possibilidades é avaliar a eficiência em relação ao número de ciclos de armazenamento e a densidade de energia/potência. A Fig. 5, adaptada de (Pinto, 2022), apresenta as três comparações citadas anteriormente para algumas tecnologias de ESS. Nota-se que as baterias de lítio apresentam as maiores eficiências em relação às outras tecnologias de baterias. Além disso, as baterias estão entre as maiores densidades específicas de energia, perdendo apenas para as células combustíveis.

O histórico do emprego de baterias integradas à rede elétrica não é recente, e mesmo que ainda não seja amplamente utilizada, vem crescendo nos últimos anos. Esse crescimento decorre de sua versatilidade, alta densidade de energia e eficiência (Lawder et al., 2014). A bateria de lítio íon é uma das tecnologias de baterias mais aplicadas no armazenamento de energia de fontes renováveis. Essa aplicação se dá devido a sua capacidade de carga/descarga, ao maior ciclo de vida e a baixa autodescarga (Chikezie; Chen, 2020). Em especial a bateria de $LiFePO_4$ é amplamente utilizada por possuir características como baixo custo, comparado a outras baterias de lítio, baixa toxicidade, bom desempenho e longa vida útil. Fatores estes que trazem como resultado a ampla aplicação em EV (Muangjai et al., 2022). Em (Ati et al., 2010), os autores destacam que a segurança e o custo representam os principais desafios na implementação do BESS.

Figura 5 – Comparativo das tecnologias de armazenamento de Energia Elétrica (a) Número de Ciclos X Eficiência; (b) Densidade de Potência X Densidade de Energia.



Fonte: Adaptado de: (Pinto, 2022).

As baterias de LiFePO_4 são apontadas como escolhas promissoras para EV, uma vez que conseguem mitigar esses aspectos desfavoráveis da tecnologia de baterias. Além de abordar a preocupação com os custos, essas baterias oferecem vantagens adicionais, como segurança aprimorada e baixa toxicidade. Em (Jung; Jung, 2016) é apresentado que a bateria de LiFePO_4 é mais utilizada devido a sua maior estabilidade térmica e eletroquímica, entretanto o autor cita que a química não possui boa condutividade elétrica e a difusividade do lítio íon é baixa, fatores estes que restringem sua capacidade de energia. Em (Pinto, 2022) o autor apresenta uma breve revisão das tecnologias de baterias de lítio íon e seu histórico de utilização. A escolha específica da bateria de LiFePO_4 neste trabalho é respaldada pela sua aplicabilidade predominante nos dias atuais. Além disso, o modelo de degradação adotado é derivado do trabalho de (Stroe, 2014), que desenvolveu um equacionamento experimental específico para essa química.

2.2 Sistema de gerenciamento de baterias

O sistema de gerenciamento de baterias (BMS, do inglês *battery management system*) é o elemento responsável por gerenciar as características das baterias, garantindo proteção contra sobrecarga e descargas profundas, além da proteção contra altas temperaturas, fator esse que pode causar explosão ou incêndios. O funcionamento do BMS é caracterizado pelo

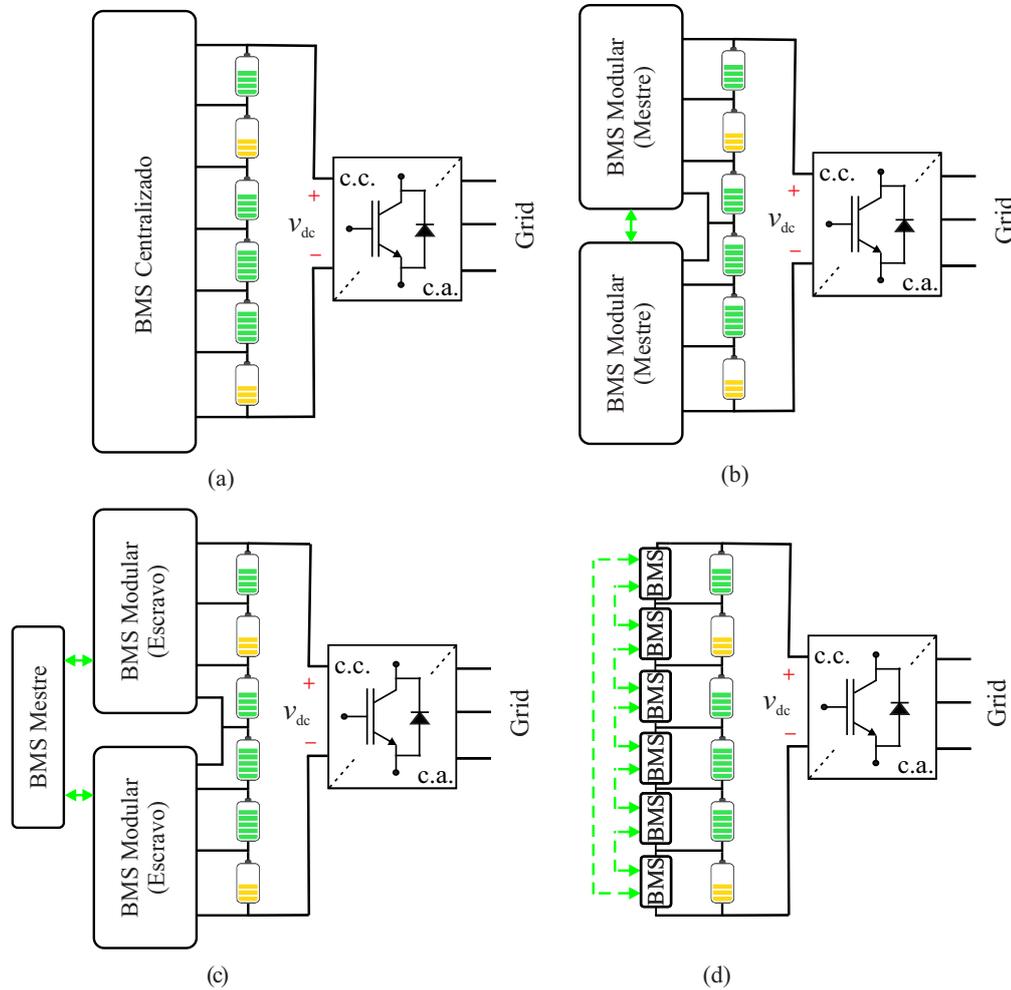
emprego de medições diversas, como temperatura, corrente e tensão das células. É comum uma medição de corrente por série de baterias (Kandarattil; Nema; Ojha, 2020; Nizam et al., 2019). Em caso de sobretensão, subtensão, curto-circuito ou superaquecimento, a bateria defeituosa é desconectada do BESS. Além das características autônomas do BMS, é necessária uma interface com o usuário. Essa interface auxilia no desligamento programado do BESS. Complementar a proteção sistêmica proporcionada pelo BMS, são utilizados fusíveis para garantir uma proteção em caso de falha do sistema de monitoramento. O fusível garante a interrupção de sobrecorrentes e correntes de curto-circuito, evitando assim problemas com aumentos inesperados de temperatura nas baterias (Faranda; Fumagalli; Bielli, 2019).

Segundo (Devi; Kumar, 2022), o BMS não é responsável apenas pela medição das grandezas elétricas, esse circuito eletrônico também é responsável por estimar o estado de carga e o estado de saúde de uma bateria. De acordo com (Faranda; Fumagalli; Bielli, 2019) a funcionalidade de balanceamento de estado de carga da bateria pode ser realizada por meio de circuitos externos. O balanceamento geralmente limita a carga de células com estados de carga elevados e limita a descarga em células com estados de carga baixos, mitigando assim que as células atinjam limites máximos e mínimos de tensões. Contudo, esse gerenciamento limita a capacidade geral do BESS quando comparado a uma condição em que as células estão equilibradas.

O BMS pode ser aplicado como monitor, protetor ou balanceador. Os mais simples, os monitores, trazem apenas funções de medição, proteção e conectividade, esses geralmente são utilizados em laboratórios. O BMS protetor é caracterizado por gerenciar uma bateria sem comunicação externa, geralmente utilizado em aplicações embarcadas, de pequeno porte, ou ferramentas elétricas. Já o de funcionalidade mais complexa, o balanceador, é caracterizado por funções como balanceamento de estado de carga ou estado de saúde, além das funções presentes nos monitores. Os métodos utilizados para medição das grandezas disponíveis em uma bateria são os responsáveis por caracterizar a tecnologia de um BMS, que pode ser: analógico ou digital. Em relação a topologia, um BMS pode ser classificado como não distribuído ou distribuído. A topologia não distribuída pode ser classificada em: centralizada, apresentado na Fig. 6(a); modular, apresentado na Fig. 6(b); e mestre/escravo, apresentado na Fig. 6(c), já a topologia distribuída, é apresentada na Fig. 6(d) e é caracterizada por controle individual das células. A escolha de diferentes abordagens na indústria vai ser afetada por critérios de segurança, custo e flexibilidade (Barreras, 2017).

A escolha do BMS não é tarefa fácil, pois ter que alinhar o menor custo da topologia centralizado com a capacidade de gerenciamento da topologia descentralizado traz certo grau de complexidade. Em (Faiz et al., 2023) os autores propõem combinar os benefícios do BMS centralizado com os benefícios do BMS descentralizado. Já (Sarin; Mani, 2022)

Figura 6 – Comparativo das topologias de BMS no BESS: (a) centralizado; (b) modular com mestres independentes; (c) modular com mestre/escravos; (d) distribuído com comunicação entre módulos.



Fonte: Adaptado de: (Barreras, 2017).

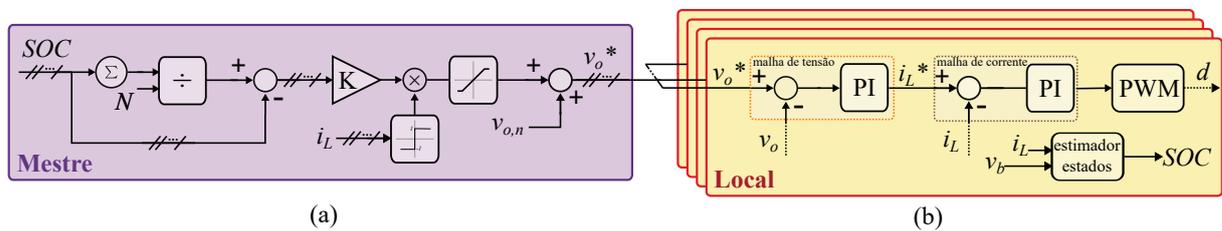
propõem um sistema de gerenciamento de baterias inteligentes (IBMS, do inglês *Intelligent Battery Management System*). O sistema proposto é definido no artigo através de cinco premissas que o tornam: adaptativo, escalável e dinâmico. Os autores em (Hemavathi, 2021) propõem um BMS distribuído analógico, nesta aplicação o BMS foi utilizado com o objetivo de proteger a bateria durante o processo de carga/descarga. Ainda segundo o autor o BMS analógico é caracterizado por possuir os melhores recursos de proteção para uma bateria de lítio íon. Uma proposta de BMS para gerenciamento de baterias em um BESS centralizado é apresentado em (Silveira et al., 2023), nessa topologia os autores propõem uma estratégia de gerenciamento de energia para evitar a operação da bateria em condições prejudiciais, aumentando os ciclos de vida do BESS.

2.3 Baterias inteligentes

Segundo (Li; Han, 2015c), as técnicas convencionais de equalização em BESS centralizados não são eficazes o bastante para corrigir significativamente o desequilíbrio das células do pacote com rapidez. Outro fator limitante para a maioria das técnicas de equalização é que esses métodos não são capazes de gerenciar baterias que utilizam químicas ou até mesmo capacidades diferentes. O surgimento do conceito de baterias inteligentes, ligado a sistemas de gerenciamento de baterias, data do início do século XXI. Em (Chatzakis et al., 2003), os autores detalham o desenvolvimento de um BMS aplicado a baterias inteligentes, uma ideia de BMS tolerante a falhas e flexível. Um conjunto de células são gerenciadas por um sub-módulo inteligente, de tal forma que ocorre uma maximização da energia entregue pela série de células conectadas a ele. Deve ainda existir um módulo mestre, que seja responsável por: comunicação, controle do sistema e solicitações externas. Nessa aplicação, os autores propõem um número de medições, de parâmetros, pelo menos duas vezes maior que a encontrada em uma bateria normal. Uma ideia de computação descentralizada é apresentada, a fim de descentralizar o gerenciamento das baterias.

Em (Coutinho, 2023), é implementada uma topologia de bateria inteligente, na qual o controle é dividido em dois estágios. O primeiro, chamado de controle mestre, tem a função de calcular a referência de tensão a ser sintetizada pelo conversor *boost*. O autor apresenta um controle mestre com a característica de balancear o estado de carga da bateria, conforme mostrado na Fig. 7(a). O segundo controle, chamado de controle local, é responsável por manter a tensão de saída do conversor *boost* de acordo com a referência definida pelo controle mestre. Este é dividido em duas malhas de controle: a malha de tensão e a malha de corrente, como apresentado na Fig. 7(b).

Figura 7 – Diagrama de blocos do controle empregado para (a) controle mestre; (b) controle local.

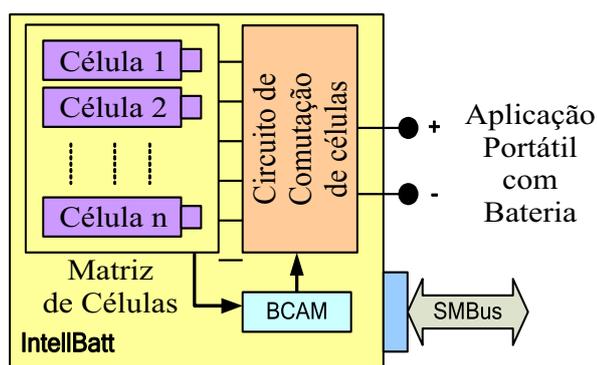


Fonte: (Coutinho, 2023).

Em (Mandal et al., 2008), é proposto uma forma de gerenciamento de carga/descarga alinhado com o aumento de vida útil da bateria. O artigo apresenta um conceito de bateria inteligente denominado *IntellBatt*, que aplica um novo conceito de matriz de células de baterias (BCA, do inglês *battery cell array*). A utilização do BCA deve permitir diversos benefícios, tais como: monitoramento de status da célula, seleção dinâmica de células e efeitos de recuperação de carga. O circuito do *IntellBatt* é basicamente composto por três

elementos: células, circuito de comutação de células, e de um gerenciador de matriz de células de baterias (BCAM, do inglês *battery cell array manager*). O BCAM é responsável por determinar a interconexão de uma célula a partir da corrente de carga necessária pelo sistema. A troca de informações entre o BCAM e o circuito de comutação de células ocorre através de um barramento de comunicação denominado sistema de gerenciamento de barramento (SMBus, do inglês *system management bus*). A topologia da aplicação pode ser visualizada na Fig. 8.

Figura 8 – Topologia do *IntellBatt*, proposta da matriz de célula de bateria.



Fonte: Adaptado de: (Mandal et al., 2008).

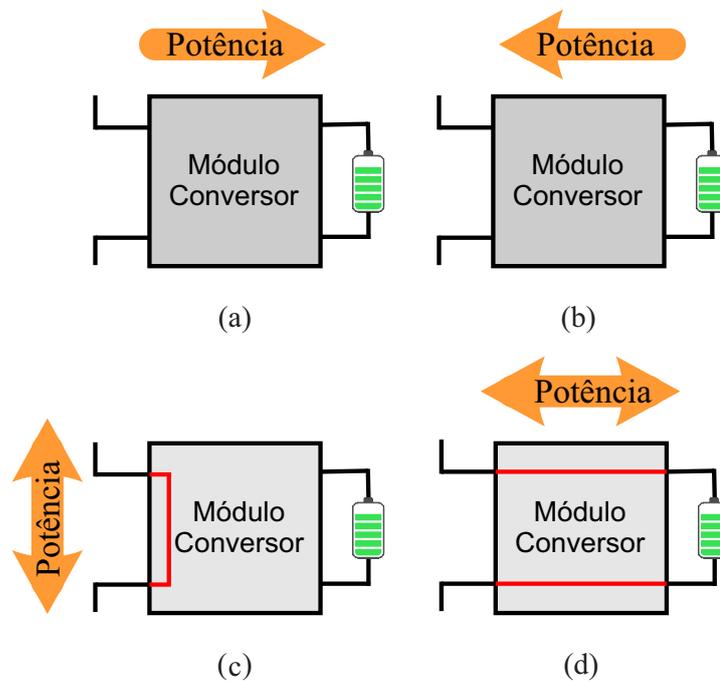
O sistema de baterias inteligentes também é referido como BESS distribuído, apresentado na Fig. 4(b), onde opta-se pela integração da eletrônica de potência (módulo conversor) em cada célula da bateria (Maia et al., 2022; Chowdhury et al., 2018; Li; Han, 2015a; Li; Han, 2014). Esses módulos podem ser integrados em uma única célula ou diversas células, tornando-o personalizável de acordo com a aplicação desejada. Assim, passará a ter um melhor aproveitamento da energia armazenada em cada bateria. Neste tipo de aplicação os módulos são conectados em série para integrar o barramento c.c., sem a necessidade de um circuito intermediário para regulação da tensão do barramento. Com isso, toda parte de controle da tensão de carga e descarga é integrada a cada módulo, de forma individual e compacta. Isso permite que as células sejam monitoradas individualmente e ainda que cada célula possua um perfil de carga/descarga ideal para seu estado de carga e estado de saúde atual (Li; Han, 2014).

Como benefícios da topologia de BESS distribuído, tem-se a possibilidade de um controle bidirecional de corrente/tensão em cada módulo. Esse controle possibilita a aplicação de diferentes taxas de carga/descarga, para as células do BESS, garantindo que módulos com estado de carga maior tenham uma taxa de carga menor e descarga maior e módulos com estado de carga menor tenham taxa de carga maior e descarga menor. Além do balanceamento de estado de carga é possível aplicar aos módulos um controle de estado de saúde garantindo maior confiabilidade. Neste sentido, é possível retirar de operação células que não estão em condições de operação, com estado de saúde muito baixo ou temperaturas elevadas. Não é preciso inserir mais células que o necessário, pois o

controle do arranjo de baterias altera o nível de tensão dos módulos para compensar a célula perdida (Li; Han, 2016).

Em (Li; Han, 2014) o módulo discutido anteriormente é apresentado com quatro modos distintos de operação. No primeiro, Fig. 9(a), está em modo de carga, e a potência entra de acordo com o calculado para cada módulo. No segundo, Fig. 9(b), está em modo de descarga, e a potência de saída do módulo é calculada com base no estado de carga atual da bateria conectada a ele. O terceiro considera uma situação em que a bateria associada ao módulo apresenta defeito, assim ocorrerá um *by-pass* na entrada do módulo, Fig. 9(c), e o mesmo será desconectado do BESS. Quando uma bateria necessitar de uma carga/descarga de maior intensidade, ocorrerá a possibilidade de se conectar a bateria diretamente a série de baterias, Fig. 9(d), assim as perdas serão reduzidas.

Figura 9 – Modo de operação em módulos de bateria inteligente: (a) carga; (b) descarga, (c) *by-pass* e (d) conexão direta.

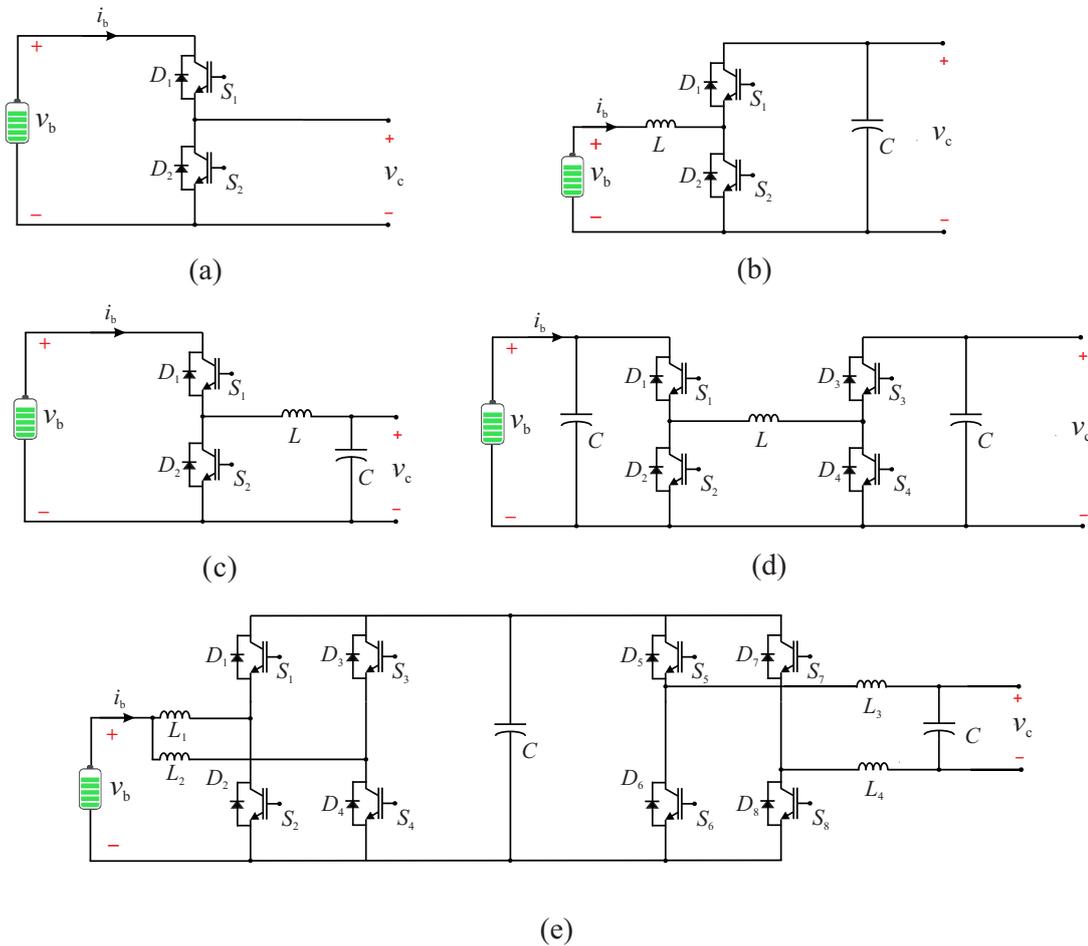


Fonte: Adaptado de: (Li; Han, 2014).

Em (Kulkarni; Teodorescu, 2023), é empregado o *half-bridge* integrado em cada célula, Fig. 10(a). A topologia permite controlar quando uma célula será inserida ou retirada do BESS, o que assegura a operação pulsativa contínua dela. Já em (Li; Han, 2014) são apresentadas três topologias distintas de conversores para aplicação em baterias inteligentes, dentre elas o autor opta por utilizar o conversor *boost*, Fig. 10(b). O conversor *boost* é utilizado também por (Coutinho, 2023; Yu et al., 2013). O conversor *boost* é uma boa escolha pela simplicidade de aplicação e por elevar a tensão da bateria. É possível o uso do conversor *buck*, Fig. 10(c), porém não é uma topologia amplamente empregada. Em (Inácio, 2022) é utilizado um conversor *buck-boost* não inversor, Fig. 10(d) nessa aplicação

a tensão de saída pode ser maior ou menor que a tensão da bateria. Já em (Maia et al., 2022) é apresentada uma associação de baterias com um conversor c.c./c.c. bidirecional de dois estágios, Fig. 10(e). Nessa aplicação o conversor bidirecional de dois braços irá permitir a distribuição de potência com melhor desempenho. É importante destacar que o uso da tecnologia de baterias inteligentes não está restrito ao tipo de conversor aplicado, uma vez que diversas topologias podem ser empregadas na construção de um módulo integrado na bateria. No entanto, por razões de simplicidade de controle e operação, a topologia *boost* foi escolhida para este trabalho.

Figura 10 – Conversores aplicados em bateria inteligente: (a) *half-bridge*; (b) *boost*, (c) *buck*, (d) *buck-boost* não inversor e (e) conversor c.c./c.c. dois estágios.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A integração de uma bateria à rede elétrica demanda o uso de conversores c.c./c.a. para conversão da energia armazenada. Uma das topologias adota a conversão de único estágio, em que se emprega apenas um conversor c.c./c.a. na conversão. Outra topologia emprega sistemas de conversão de duplo estágio, em que se utiliza um conversor c.c./c.c. para o primeiro estágio e um c.c./c.a. no segundo estágio. Em (Pinto, 2022) é apresentada uma revisão de literatura a respeito de conversores implementados para as topologias de único estágio e duplo estágio.

2.4 Conclusões do capítulo

Este capítulo teve como objetivo apresentar conceitos pertinentes ao ESS. Vale ressaltar que o uso de BESS vem crescendo, e mesmo não sendo a tecnologia mais utilizada, atualmente, tem grande potencial devido a suas características. Dentre as químicas apresentadas, um destaque para a de lítio íon que apresenta maior eficiência e número de ciclos. Em particular, a bateria de LiFePO_4 possui maior segurança e menor custo de aplicação, comparada a outras químicas de lítio íon. O BMS é apresentado como um importante elemento, que é responsável pelo gerenciamento das baterias associadas ao BESS. Quatro topologias de BMS são apresentadas, onde a escolha deve se basear em requisitos de projetos. Contudo mesmo com o BMS distribuído, a corrente de carga e descarga é a mesma em uma série de baterias, o que dificulta o gerenciamento de baterias defeituosas associadas a série. Por fim é apresentado um conceito de baterias inteligentes, que vem sendo discutido desde o início do século XXI. Essa tecnologia garante maior flexibilidade e gerenciamento de parâmetros de uma bateria. As aplicações mais recentes trazem módulos descentralizados para cada célula, destaque para algumas topologias de baterias inteligentes que são apresentadas.

3 Modelo de Baterias com Degradação Online

Neste capítulo serão apresentados alguns métodos utilizados para se construir modelos de baterias. Um olhar especial será voltado para o modelo de circuito elétrico equivalente, que representa as características elétricas de uma bateria através de componentes básicos de circuitos elétricos. Uma abordagem para construir o modelo de degradação da bateria de LiFePO_4 será investigada e implementada em um software de simulação.

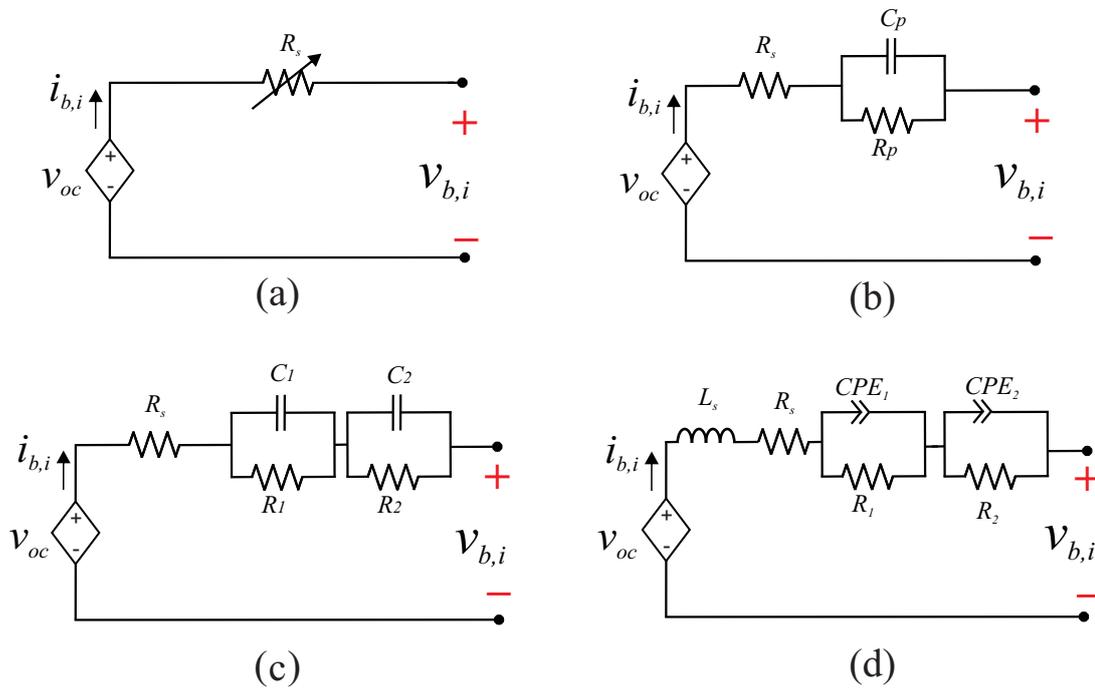
3.1 Modelos de desempenho de baterias

Conforme apresentado no capítulo anterior, o BMS desempenha um papel crucial no BESS, sendo responsável por assegurar o equilíbrio do estado de carga/saúde. Para cumprir essa função, ele deve ser capaz de calcular o desempenho elétrico da célula da bateria em diferentes condições de operação (Mishra; Swain; Samantaray, 2021). Modelos de desempenho de baterias de lítio podem ser construídos através de diversas abordagens encontradas na literatura. Cada abordagem trará diferentes graus de complexidade e assertividade (Marin-Garcia et al., 2020). Em (López-Granados et al., 2021) e (Marin-Garcia et al., 2020) são apresentadas as seguintes abordagens na construção de modelos de desempenho: modelo de circuito elétrico equivalente (ECM, do inglês *equivalent electrical circuit models*), modelo térmico, modelo de envelhecimento, modelo eletroquímico e modelo matemático. A seguir será apresentada uma breve revisão de cada abordagem apresentada.

O ECM, que utiliza os elementos básicos de um circuito elétrico, se destaca como uma das abordagens simplificadas para a elaboração de modelos de bateria. Em (Liu; Forsyth; Todd, 2019) os autores propõem um modelo de desempenho elétrico para prever as perdas elétricas na bateria. Este modelo usa um resistor variável e uma fonte de tensão v_{oc} dependente do estado de carga. Em (Nemes et al., 2019) são citados dois tipos de ECM sendo um modelo de primeira ordem e um circuito equivalente de segunda ordem: eles utilizam resistores, capacitores e uma fonte de tensão controlada. Em (Xia; Abu Qahouq, 2020) e (Stanciu et al., 2015), além dos elementos apresentados anteriormente, é utilizado um elemento de fase constante (CPE, do inglês *constant phase element*) e um indutor. O CPE é utilizado para caracterizar o comportamento de um capacitor não ideal, característico de um efeito de dupla camada que ocorre entre os eletrodos ânodo e cátodo. Quando o CPE está conectado em paralelo com uma impedância tem sua associação denominada como ZARC. O elemento ZARC descreve o comportamento de um

semicírculo no diagrama da impedância (Pinto, 2022). Em (Sihvo et al., 2019) também é utilizado um circuito equivalente elétrico com resistor, ZARC e indutor, neste o autor apenas representa o comportamento da impedância interna da bateria. Na Fig. 11 são apresentadas algumas aproximações do ECM da bateria. Neste estudo, a escolha recaiu sobre o modelo simplificado apresentado na Fig. 11(a), devido à sua menor demanda computacional. No entanto, é importante observar que o resistor utilizado será tratado como constante.

Figura 11 – Modelos elétricos de baterias: (a) modelo resistivo, (b) modelo de primeira ordem, (c) modelo de segunda ordem, e (d) modelo com elemento de fase constante.

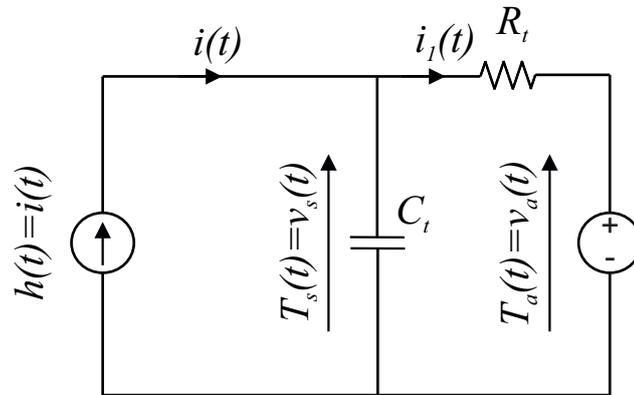


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Além do conhecimento dos parâmetros elétricos apresentados anteriormente é importante também conhecer o comportamento térmico de uma bateria. Isso se agrava ainda mais quando se trata de baterias de lítio que possuem grande sensibilidade a elevação da temperatura. Para que esse gerenciamento seja possível é necessário o desenvolvimento de um modelo térmico da bateria. O circuito equivalente térmico pode ser representado por um equivalente elétrico, neste é utilizado um resistor R_t , um capacitor C_t , uma fonte de tensão $T_a(t)$ e uma fonte de corrente $h(t)$, apresentado na Fig. 12. Esse modelo permite representar a transferência de calor através do resistor, a geração de calor através da fonte de corrente, a temperatura ambiente através da fonte de tensão e a capacidade térmica da bateria através do capacitor (Li et al., 2021; Kumar et al., 2021). Adicionalmente, é possível utilizar um observador de estado para estimar a distribuição de temperaturas no interior de uma bateria. Este método em (Rath; Hoedemaekers; Wilkins, 2020) é projetado baseando-se em filtro de Kalman. Em (Bouchareb et al., 2021) os autores apresentam

um modelo eletrotérmico que integra um ECM de segunda ordem com três estados e um modelo térmico de dois estados. Nesse modelo existe uma relação entre os parâmetros elétricos e térmicos para o estado de carga. Já em (Zhao et al., 2022) os autores propõem um modelo térmico de nós, baseado na simulação de elementos finitos, que pode ajudar na melhoria da precisão do modelo térmico proposto. Neste trabalho, parte-se da premissa de que a temperatura não influenciará no estado de carga da bateria. Portanto, optou-se por manter a temperatura ambiente e temperatura da bateria constantes. Dessa maneira, não foi incorporado um modelo térmico para a bateria simulada.

Figura 12 – Modelo térmico da Bateria.



Fonte: Adaptado de: (Kumar et al., 2021).

A construção de modelos eletroquímicos é uma abordagem com alta precisão, porém exige grande poder computacional para resolução das equações diferenciais parciais acopladas (PDE, do inglês *partial differential equations*), exigindo grande tempo de simulação. Um modelo pseudo-2-dimensional (P2D) pode ser utilizado para resolução das PDE do modelo eletroquímico, contudo essa abordagem exige a resolução de cinco PDE e uma equação algébrica (Tran et al., 2018). Em (Tran et al., 2018) o autor propõe, a utilização de um modelo de partícula única (SPM, do inglês *single particle model*), que reduz o número de equações a serem utilizadas no P2D para apenas uma PDE. Segundo (Bhat; Channegowda, 2022) uma das técnicas mais fundamentais para relacionar as características elétricas com a eletroquímica é a abordagem Doyle Fuller Newman (DFN). Com essa abordagem é possível representar perfeitamente o movimento de cargas de íon de lítio no processo de carga e descarga da bateria. Em (Chen et al., 2019) os autores propõem um observador baseado na técnica *backstepping*, e utiliza o método Clank-Nicolson para resolução das equações diferenciais. Já em (Miguel et al., 2021) os autores utilizam um modelo de ordem reduzida (ROM, do inglês *reduced-order model*) para reduzir a complexidade computacional exigida para simulação do modelo eletroquímico.

Construir modelos de desempenho matemáticos não é a melhor técnica para representar o comportamento elétrico e da curva de corrente/tensão de uma bateria. Isso ocorre devido a forma como o modelo é obtido, e seu comportamento não está relacionado

ao comportamento da curva de corrente/tensão da bateria, tornando-o impreciso (Stroe, 2014). Porém ainda sim é possível utiliza-lo para aplicações onde não se requer grande precisão (Bae et al., 2014). Em (Li et al., 2018) é apresentado o modelo de Shepherd, que trata-se de um modelo matemático baseado no princípio da operação de carga/descarga e na estrutura da bateria. Já em (Moussa; Ben Ghorbal, 2022) os autores utilizam um modelo denominado modelo de Shepherd modificado. E mesmo que essa técnica seja amplamente utilizada, ainda não representa o comportamento preciso da dinâmica entre a tensão e a corrente do modelo. Além dos métodos utilizados pelos autores anteriores, (Hussein; Batarseh, 2011) apresenta dois métodos diferentes para construção de um modelo matemático da bateria, o modelo universal de Unnewer e o modelo de Nernst.

A melhor precisão para se representar o modelo de uma bateria está associada ao modelo eletroquímico, contudo esse modelo apresenta grande complexidade de elaboração. Por outro lado, o modelo matemático é mais simples de se desenvolver, porém não é uma aproximação muito precisa. Assim a utilização do ECM é apresentada como a técnica com melhor desempenho, comparado com o matemático, e maior simplicidade comparado com o eletroquímico (Stroe, 2014). Por este motivo, esta abordagem será empregada neste trabalho.

3.2 Modelo de vida útil da bateria de lítio

O conhecimento dos mecanismos de envelhecimento permite ao projetista desenvolver técnicas para maximizar a vida útil e aumentar a atratividade dos projetos de BESS. O envelhecimento é responsável por aumentar a impedância interna da bateria, reduzindo a sua potência e capacidade, basicamente está relacionado a dois mecanismos distintos, mas complementares: envelhecimento de calendário e envelhecimento de ciclagem. No envelhecimento do calendário os eletrodos, positivos e negativos, sofrem degradação devido a instabilidades eletrodinâmicas. No eletrodo positivo, o envelhecimento é observado por oxidação contra o eletrólito. O eletrodo negativo tem o aspecto mais crítico do envelhecimento e está relacionado ao grafite, que não é eletroquimicamente estável na presença da maioria dos eletrólitos. O envelhecimento do calendário é potencializado por alta temperatura e alto estado de carga durante o armazenamento (Broussely et al., 2005), no entanto, esse efeito não se aplica a este trabalho, porque o ciclo da bateria ocorrerá continuamente.

Os efeitos cinéticos induzidos são responsáveis por causar o envelhecimento das baterias em ciclos e são observados através da variação de volume ou gradiente de concentração. Tal como acontece com o envelhecimento do calendário, o envelhecimento do ciclo ocorre em ambos os eletrodos da bateria. Esse envelhecimento é potencializado por fatores como temperatura (T), estado de carga médio da i -ésima bateria (\overline{SOC}),

profundidade do ciclo (cd) e número de ciclos (nc) (Stroe, 2014). A expressão matemática para a perda da capacidade da i -ésima bateria ($C_{f,i}$) de LiFePO_4 é obtida em (Stroe, 2014) através de testes de aceleração e é apresentada da seguinte forma:

$$C_{f,i} = 0,0001299e^{-0,01943\overline{SOC}} e^{0,01705T} cd^{0,7162} nc^{0,5}. \quad (3.1)$$

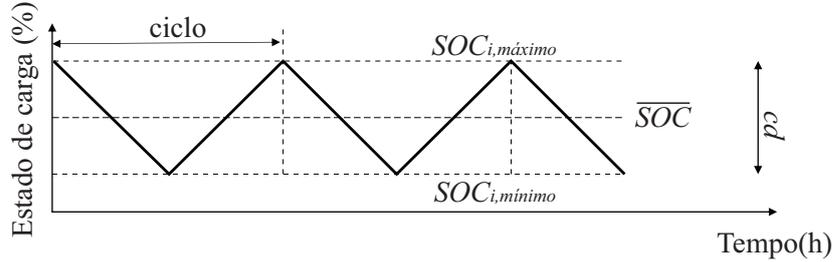
A capacidade atual da bateria ($C_{a,i}$) é calculada por:

$$C_{a,i} = C_{n,i}(1 - C_{f,i}). \quad (3.2)$$

em que $C_{n,i}$ representa a capacidade nominal da i -ésima bateria.

O valor \overline{SOC} é calculado por uma média entre o valor mais alto e o mais baixo de cada ciclo da i -ésima bateria, enquanto cd é a diferença entre o estado de carga máximo ($SOC_{i,máximo}$) e o estado de carga mínimo ($SOC_{i,mínimo}$) do ciclo. Esses valores são usados para calcular $C_{f,i}$. A Fig. 13 ilustra a definição dos parâmetros utilizados em (3.1).

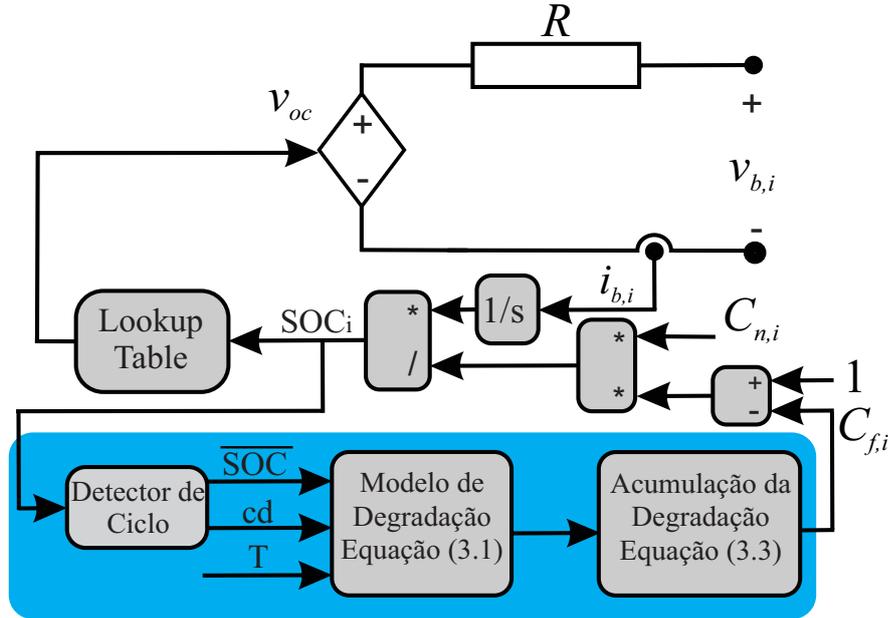
Figura 13 – Definição dos parâmetros \overline{SOC} e cd para computação da perda de capacidade da i -ésima bateria.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O modelo proposto para degradação da bateria realiza a atualização do estado de saúde da bateria toda vez que o estado de carga chega em $SOC_{i,mínimo}$. Assim, a atualização de $C_{f,i}$ ocorre à cada ciclo da bateria. Uma vantagem notável da atualização da capacidade a cada ciclo é a obtenção de um comportamento de carga e descarga mais fiel à realidade, uma vez que a degradação da bateria ocorre de maneira contínua. Este modelo simplificado considera a bateria como uma fonte de tensão controlada e uma resistência elétrica em série. Ele permite simulações com baixa complexidade computacional. Uma *look-up table* é usada para obter o valor da tensão de circuito aberto da bateria em função do estado de carga instantâneo (SOC_i). Neste caso, dados experimentais da referência (Stroe, 2014) são empregados.

O modelo de degradação é baseado em (3.1). Esta equação é usada para calcular a $C_{f,i}$ de acordo com o número de ciclos completos. Entretanto, como o número de ciclos para baterias de segunda vida nem sempre é conhecido, pode-se aproximar a degradação da bateria por uma expressão não linear. Assim, o total de $C_{f,i}$ ($C_{f,i,total}$) pode ser definido

Figura 14 – Modelo de degradação *online* da bateria.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

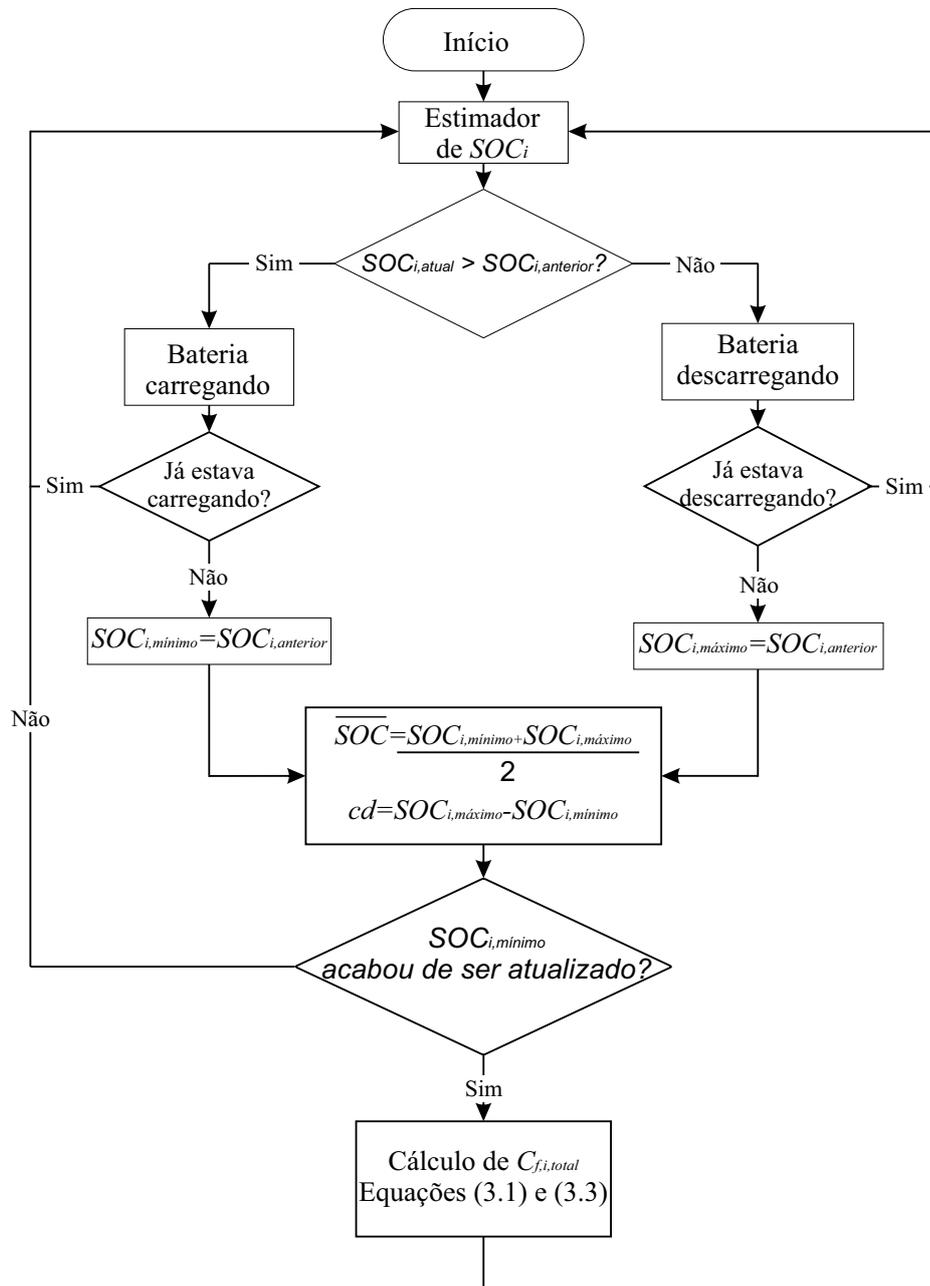
como uma função da perda de capacidade do ciclo atual ($C_{f,i,atual}$) e a perda de capacidade acumulada da bateria ($C_{f,i,anterior}$) (Pinto, 2022). Portanto, $C_{f,i,total}$ é calculado por:

$$C_{f,i,total} = \sqrt{C_{f,i,atual}^2 + C_{f,i,anterior}^2}. \quad (3.3)$$

vale ressaltar que, em (Pinto, 2022), o modelo de degradação da bateria é atualizado de forma assíncrona, ou seja, o $C_{f,i}$ é calculado de tempos em tempos *offline*. A detecção dos limites $SOC_{i,máximo}$ e $SOC_{i,mínimo}$ neste estudo foi conduzida com sucesso para ciclos claramente definidos. Entretanto, há a necessidade de uma investigação mais aprofundada para a implementação em situações em que os ciclos não são tão bem definidos.

A fim de calcular o \overline{SOC} e o cd , um detector de ciclos foi implementado no modelo conforme mostra a Fig. 14. Este bloco é responsável por identificar os valores de $SOC_{i,máximo}$ e $SOC_{i,mínimo}$ para calcular os valores de \overline{SOC} e cd . A Fig.15 apresenta o fluxograma do algoritmo utilizado no bloco detector de ciclos. A contagem de ciclos emprega basicamente as mudanças de derivada consecutivas no perfil de estado de carga. Deve-se notar que o cálculo do modelo de degradação e a atualização da capacidade da bateria executam um período de amostragem diferente da simulação, tendo em vista que a perda de capacidade é calculada após o desenvolvimento de um ciclo completo. Este sincronismo é garantido pelo próprio detector de ciclos desenvolvido. Tendo em vista que a capacidade da bateria é atualizada após o desenvolvimento dos ciclos (e não em tempo contínuo), o modelo desenvolvido é considerado *quasi-real time*.

Figura 15 – Fluxograma de funcionamento do bloco detector de ciclos implementado no modelo apresentado na Fig. 14.



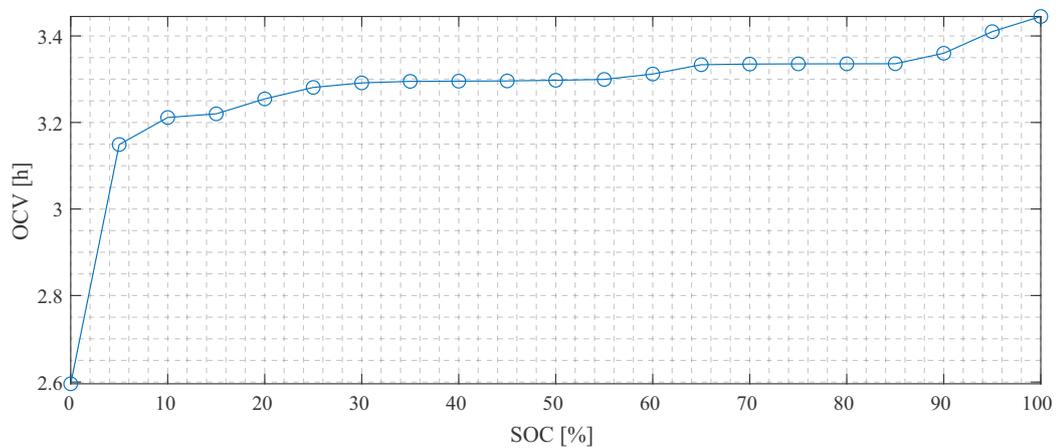
Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.3 Validação do modelo

O objetivo desta seção é validar o resultado do modelo de degradação com o resultado proveniente da equação 3.1. Essa validação foi realizada com o objetivo de comparar o modelo desenvolvido com o resultado da equação encontrada na literatura. Para realizar a simulação foi utilizado o software PLECS versão 4.7.5. A bateria simulada é da química de LiFePO_4 . Essa bateria possui tensão nominal de aproximadamente 3 V, já sua capacidade é de 2,5 Ah. Contudo a tensão da bateria é função do seu estado de

carga, assim essa relação é apresentada na Fig. 16 (Pinto, 2022). A validação do modelo utilizado, neste trabalho, ocorreu com a análise de nove cenários de simulação. O resultado proveniente da equação (3.1) foi comparado com o resultado obtido na simulação do PLECS. Nos três primeiros cenários, foram aplicados valores iguais de temperatura e \overline{SOC} , já o valor de cd foi alterado a cada caso simulado. Nos três cenários subsequentes, os valores aplicados para \overline{SOC} e cd ficaram constantes, e a temperatura foi alterada em cada caso simulado. Para os três últimos cenários, os valores de temperatura e de cd ficaram iguais, sendo aplicados valores distintos para o \overline{SOC} , para cada caso. Os cenários avaliados são sumarizados na Tab. 1.

Figura 16 – Tensão de circuito aberto *versus* dados de estado de carga utilizados nas simulações.



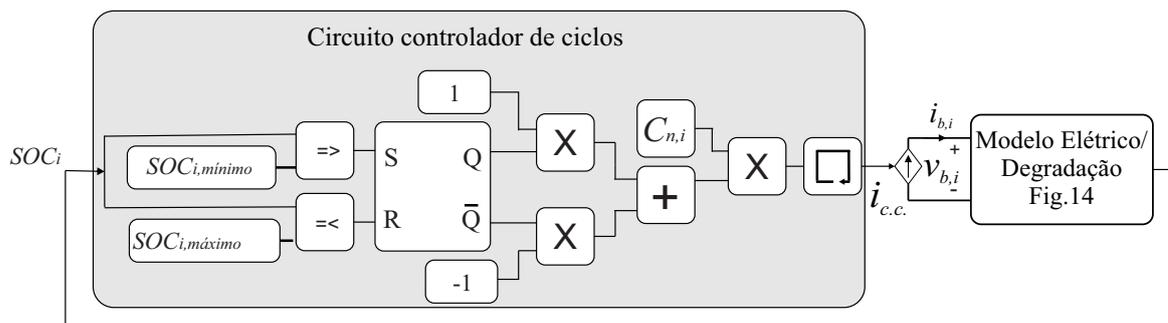
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 1 – Cenários escolhidos para avaliar o modelo de bateria simulado.

Sequência da Simulação	Dados Simulados		
	<i>Temperatura</i>	\overline{SOC}	cd
1 _a	50°C	50%	10%
1 _b			35%
1 _c			60%
2 _a	35°C	50%	60%
2 _b	42,5°C		
2 _c	50°C		
3 _a	42,5°C	27,5%	35%
3 _b		50%	
3 _c		72,5%	

O ciclo de teste implementado possui um período de aproximadamente uma hora. Esse valor é reduzido devido à perda de capacidade da bateria decorrente de sua degradação, dado que a corrente aplicada à bateria é proporcional à sua capacidade nominal. Isso implica que à medida que a capacidade da bateria diminui, os ciclos tornam-se mais curtos. Com o objetivo de garantir um ciclo de carga/descarga constante na bateria, um circuito de controle do PCS foi desenvolvido no PLECS. Esse circuito é responsável por calcular a corrente c.c. aplicada na bateria. Na Fig. 17, é apresentado o circuito de controle da corrente de teste acoplado ao modelo de degradação da bateria da Fig. 14. Nesse contexto, o circuito da Fig. 14 está conectado a uma fonte de corrente controlada, cujo valor é determinado pela saída do circuito controlador de ciclos. O circuito controlador de ciclos, por sua vez, recebe como entrada o estado de carga instantâneo da bateria, extraído do circuito da Fig. 14.

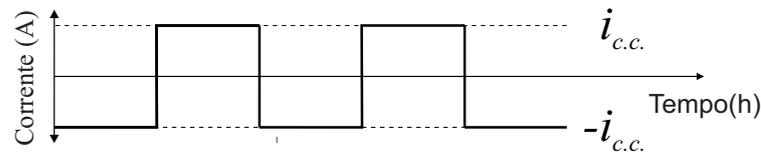
Figura 17 – Diagrama de blocos do circuito de controle de corrente aplicado ao circuito de validação do modelo.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os comparadores desempenham o papel crucial de determinar o momento de ativação ou desativação da saída Q do flip-flop. Quando a saída Q está ativada, a corrente é positiva, indicando que a bateria está sendo carregada. Em contraste, quando a saída Q está desativada, a corrente é negativa, sinalizando que a bateria está em processo de descarga. A capacidade nominal da bateria é multiplicada pelo resultado da operação realizada pelo flip-flop, determinando assim o valor da corrente proveniente da fonte. A contagem de ciclo é realizada sempre que o estado de carga mínimo é alcançado. Graças ao controle de ciclos, o \overline{SOC} permanece constante em todos os momentos da simulação. A temperatura é incorporada ao modelo por meio de um bloco constante. Quanto ao valor de nc , este é acumulado a cada alteração de descarga para carga da bateria. A Fig. 18 apresenta o perfil da corrente $i_{c.c.}$ aplicado ao circuito simulado, esse perfil é garantido pelo controlador da Fig. 17.

Figura 18 – Perfil da corrente do PCS imposta pelo controlador da Fig. 17, para validação do modelo implementado.

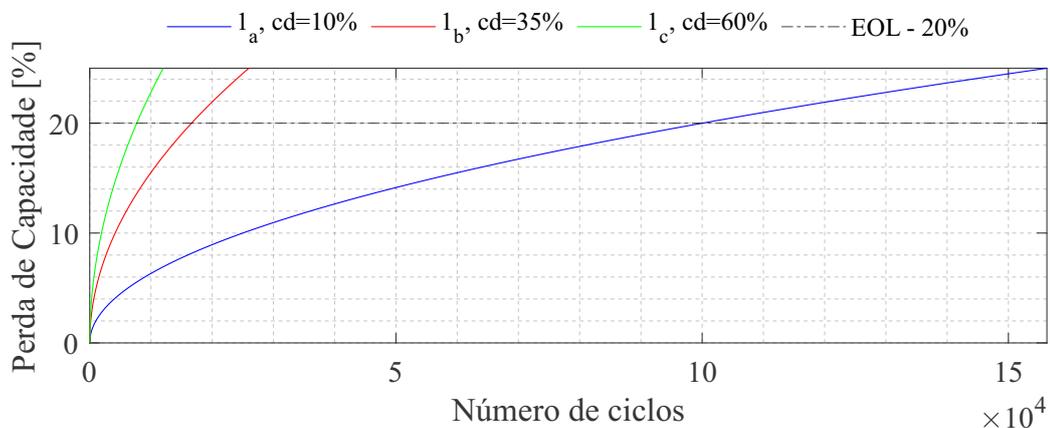


Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.4 Resultados da validação do modelo

Nesta seção, serão apresentados os resultados das simulações realizadas para validar o modelo de vida útil da bateria. Essa validação será conduzida mediante a comparação com os resultados obtidos a partir da equação (3.1), a qual foi elaborada com base em ensaios experimentais realizados na bateria de LiFePO_4 . Para os três primeiros cenários de teste, a temperatura foi fixada em 50°C e o $\overline{\text{SOC}}$ em 50%. No primeiro caso cd foi definido em 10%, isso significa que a bateria foi carregada e descarregada de 45% a 55% de estado de carga. No segundo caso cd foi definido em 35%, isso corresponde a um estado de carga mínimo de 32,5% e um estado de carga máximo de 67,5%. E por último o cd foi definido em 60%, o que corresponde a um perfil de carga e descarga de 20% até 80% do estado de carga. Os resultados dessas condições de teste estão apresentados na Fig. 19, em que é possível observar o número de ciclos ao qual a bateria foi submetida até que a mesma atingisse fim da vida útil (EOL, do inglês *end-of-life*). A partir do resultado apresentado na Fig. 19 é possível observar a característica de degradação da bateria de LiFePO_4 . Como pode ser visto, o número de ciclos é reduzido à medida que se aumenta o cd e, conseqüentemente, a bateria alcançará o EOL mais rapidamente. É importante notar a característica quadrática da perda de capacidade com o número de ciclos, o que acelera ainda mais o desgaste da bateria.

Figura 19 – Resultados das simulações para os cenários 1_a , 1_b e 1_c .

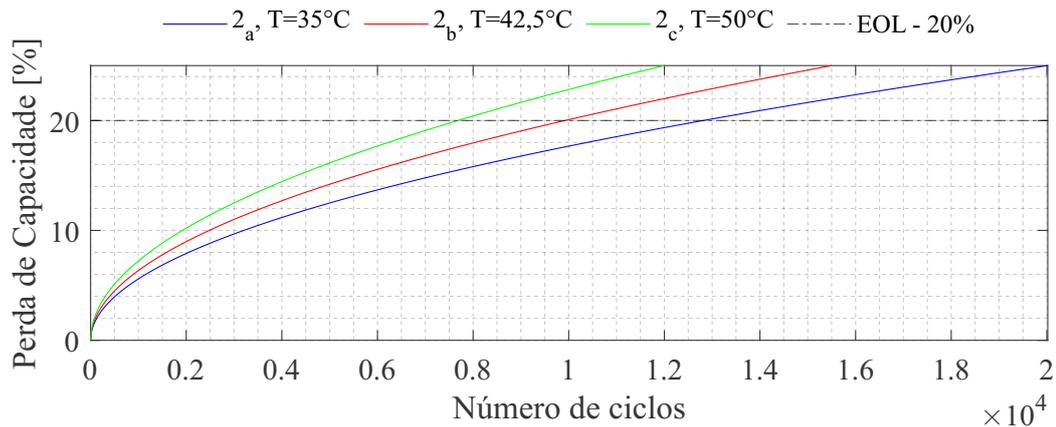


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nos três cenários de teste subsequentes, adotou-se os valores de $cd = 60\%$ e

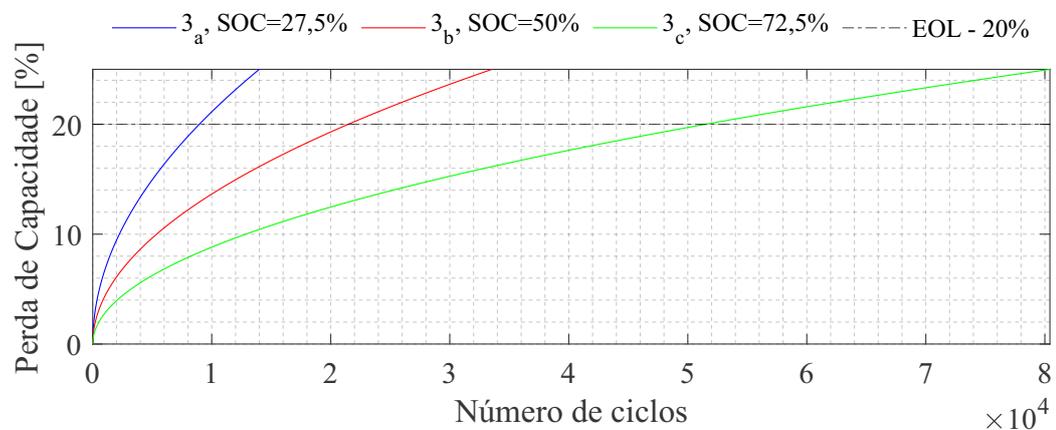
$\overline{SOC} = 50\%$. Nessa condição, ocorreu a mudança das temperaturas de simulação. Em 2_a adotou-se $T = 35^\circ\text{C}$, em 2_b adotou-se $T = 42,5^\circ\text{C}$ e em 2_c adotou-se $T = 50^\circ\text{C}$. O comportamento do número de ciclos da bateria com relação a sua temperatura de operação é apresentado na Fig. 20. Esse comportamento é semelhante ao discutido na literatura, onde a degradação é maior para temperaturas mais altas.

Figura 20 – Resultados das simulações para os cenários 2_a , 2_b e 2_c .



Nos três últimos cenários, os valores foram definidos em $T = 42,5^\circ\text{C}$ e $cd = 35\%$. Nesses últimos cenários de teste, o valor de \overline{SOC} foi ajustado em $\overline{SOC} = 27,5\%$, $\overline{SOC} = 50\%$ e $\overline{SOC} = 72,5\%$. O resultado das simulações então é apresentado na Fig. 21. O coeficiente negativo na parcela exponencial de (3.1) que está relacionado ao \overline{SOC} indica que, quanto menor este valor, maior será a degradação na bateria. Em outras palavras, para valores fixos de cd e T , a bateria terá maior vida útil se operar em condições de \overline{SOC} mais elevado.

Figura 21 – Resultados das simulações para os cenários 3_a , 3_b e 3_c .



A Tabela 2 exibe uma análise comparativa entre os valores derivados da equação (3.1) e os resultados obtidos por meio de simulações no PLECS. O erro absoluto máximo

observado foi de vinte e um ciclos, e o erro relativo máximo foi de 0,03%. Destaca-se que o modelo implementado no PLECS demonstrou desempenho satisfatório ao ser contrastado com a solução da equação (3.1). Portanto, ao longo deste trabalho, este modelo será empregado como referência para validar as técnicas de balanceamento de estado de carga e estado de saúde.

Tabela 2 – Número de ciclos necessários para degradar 20% da capacidade nominal, em comparação com o resultado da equação (3.1).

Sequência da Simulação	Números de ciclo para atingir EOL			
	Equação(3.1)	Simulação	Erro absoluto	Erro relativo
1 _a	100021	100000	21	0,02%
1 _b	16625	16620	5	0,03%
1 _c	7682	7679	3	0,03%
2 _a	12812	12810	2	0,01%
2 _b	9921	9922	1	0,01%
2 _c	7682	7684	2	0,02%
3 _a	8956	8956	0	0%
3 _b	21470	21470	0	0%
3 _c	51471	51490	19	0,02%

3.5 Conclusões do capítulo

Neste capítulo, foram exploradas diversas abordagens para representar uma bateria. Entre as várias técnicas discutidas, o ECM destaca-se como a escolha mais equilibrada, oferecendo uma combinação otimizada entre simplicidade de desenvolvimento e precisão nos resultados. Adicionalmente, integrado ao ECM, foi concebido um modelo de degradação *quasi-real time* da bateria. A validação desse modelo de degradação foi conduzida por meio das equações propostas na literatura, respaldada por nove testes comparativos. Além de confirmar a validade do modelo proposto, os testes realizados proporcionam insights sobre o comportamento da bateria frente a distintos valores de temperatura, profundidade de ciclo e \overline{SOC} . Esses resultados contribuem significativamente para uma compreensão mais profunda do desempenho da bateria em condições variadas.

4 Estratégias de Balanceamento de Estado de Carga

O capítulo 4 será dedicado ao estudo do balanceamento de estado de carga em baterias. Uma breve revisão de literatura dos métodos de balanceamento de estado de carga é apresentada no decorrer do capítulo. Uma modelagem matemática é realizada para melhor entendimento do comportamento do balanceamento de estado de carga em baterias. Um controlador com ganho variável para o balanceamento de estado de carga é proposto. Um estudo de caso comparando a técnica encontrada na literatura com a técnica proposta é realizado para o balanceamento de estado de carga em baterias inteligentes.

4.1 Estado da arte de técnicas de balanceamento de estado de carga

A incompatibilidade de químicas e capacidades de baterias é um fator presente no BESS, isso trará maior probabilidade de ocorrer sobrecargas e descarregamentos profundos nas baterias, devido à corrente única da associação série. Esse fator poderá trazer maior insegurança e redução da vida útil das baterias presentes em um EV. Como forma de minimizar a ocorrência de sobrecargas e descargas profundas, o BESS deverá ser utilizado com limitações para as células com piores capacidades disponíveis. Outra possibilidade seria a implantação de um sistema de equalização eficaz de estado de carga (Wu et al., 2022a). Em (Xia; Abu Qahouq, 2021) são apresentados alguns métodos de balanceamento de estado de carga, onde são separados em duas categorias principais: o balanceamento passivo e o balanceamento ativo. Os métodos de balanceamento passivo são de fácil implementação, porém possuem baixa eficiência energética, devido ao desperdício de energia elétrica dissipada. Já os métodos de balanceamento ativo são caracterizados por serem métodos mais eficientes de gerenciamento de energia e implementação mais complexa.

Na literatura são abordados dois métodos de balanceamento passivo em baterias. Nestes métodos o balanceamento ocorre pelo nivelamento das tensões no mínimo existente entre as células do BESS, i.e, o excesso de energia é eliminado através de resistores associados. Dentre os métodos encontrados na literatura, tem-se: o uso de um resistor paralelo fixo ou um resistor paralelo comutado. O uso do resistor paralelo fixo é geralmente utilizado para baterias de chumbo-ácido e níquel. Neste método passivo o resistor continuamente dissipa energia no banco, garantindo uma tensão fixa de carregamento devido a associação com os resistores, contudo a dissipação de calor é constante em todas

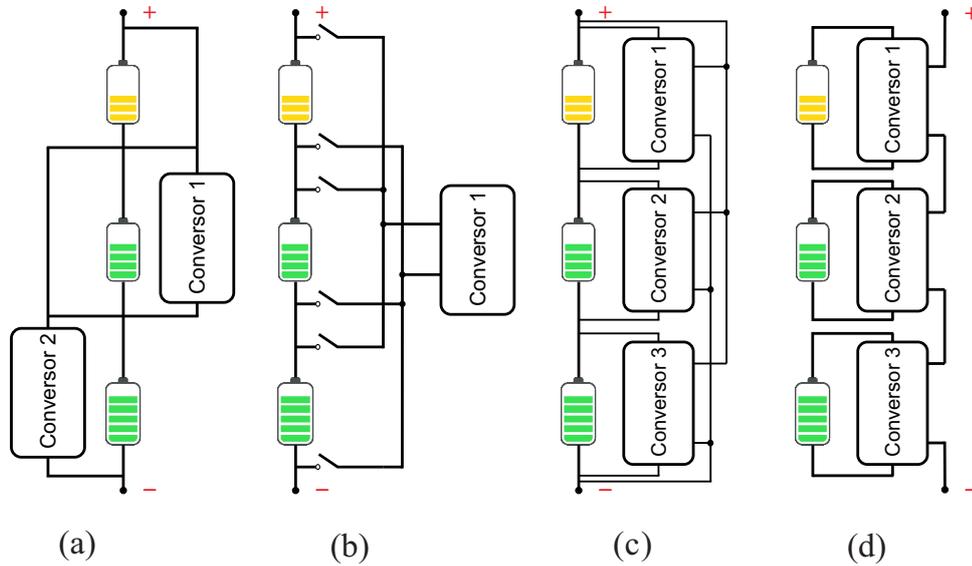
as células. Já o resistor paralelo comutado possui um controlador que decidirá a hora de ligar ou desligar a chave que interliga a célula ao resistor. Neste método, o resistor será ligado quando surgir um desequilíbrio de estado de carga entre as células do BESS. Além disso, os resistores poderão ser ligados individualmente, independente dos demais resistores associados ao banco (Babu; Ilango, 2022; Paidi; Gudey, 2022).

Em geral, na literatura, a realocação de energia e a variação da corrente de carga/descarga são as técnicas encontradas para o balanceamento ativo de baterias. A transferência de energia de uma célula mais carregada para uma célula menos carregada ou ainda para um conjunto de células menos carregadas, são geralmente as estratégias aplicadas ao método de realocação de energia. Uma alternativa utiliza da aplicação de diferentes perfis de carga/descarga para cada bateria do BESS, em que o ajuste de corrente é definido a partir do estado de carga de cada célula. A seguir algumas estratégias encontradas na literatura serão apresentadas de forma a trazer uma visão geral sobre balanceamento de estado de carga para o leitor (Abareshi et al., 2023).

Em (Corrêa; Maia; Cardoso Filho, 2023) são apresentados quatro técnicas de balanceamento de estado de carga. As técnicas são classificadas como: célula para célula adjacente (*adjacent C2C*, do inglês *adjacent cell-to-cell*), célula para célula direta (*direct C2C*, do inglês *direct cell-to-cell*), célula para pacote de células paralelo (*parallel C2P*, do inglês, *parallel cell-to-pack*) e célula para pacote de células série (*series C2P*, do inglês *series cell-to-pack*). No *adjacent C2C* a transferência de energia somente é feita para as células que estão próximas, apresentado na Fig. 22(a), sendo necessário a passagem por muitos conversores quando as células desequilibradas estão distantes. Na técnica *direct C2C* a transferência de energia pode ser feita de qualquer célula para qualquer célula do BESS de forma direta, como apresentado na Fig. 22(b), sem a necessidade de passagem por outros conversores a não ser das células que irão balancear. O balanceamento *parallel C2P* é a técnica em que a energia é transferida individualmente de uma célula para o pacote, como apresentado na Fig. 22(c). A topologia *series C2P* é caracterizada por sua distribuição eficiente de energia. No contexto desta técnica, a transferência de energia ocorre entre os módulos individuais, compostos pela célula e seu conversor associado, e o agrupamento de células como exemplificado na Fig. 22(d). Essa abordagem distribuída destaca-se por otimizar a gestão energética, promovendo uma operação mais eficaz e coordenada entre os diversos elementos do sistema.

Em (Zhang et al., 2020) é apresentado um método de balanceamento ativo de dois estágios. O método implementado compara em tempo real o estado de carga da i -ésima bateria (SOC_i) com o estado de carga médio instantâneo do BESS (SOC_{avg}). Durante o carregamento ocorre um balanceamento com as células que estão com estado de carga acima de SOC_{avg} , sendo a célula que possui a maior diferença da média equalizada com as demais, para manter a máxima capacidade disponível do BESS. Durante o descarregamento

Figura 22 – Arquiteturas de balanceamento de estado de carga em baterias pelo método de redistribuição de energia: (a) *adjacent C2C*; (b) *direct C2C*; (c) *parallel C2P*; (d) *series C2P*.



Fonte: Adaptado de (Corrêa; Maia; Cardoso Filho, 2023).

o balanceamento ocorre com as células que estão abaixo de SOC_{avg} , e essas células são balanceadas de forma a manter maior disponibilidade de energia no BESS.

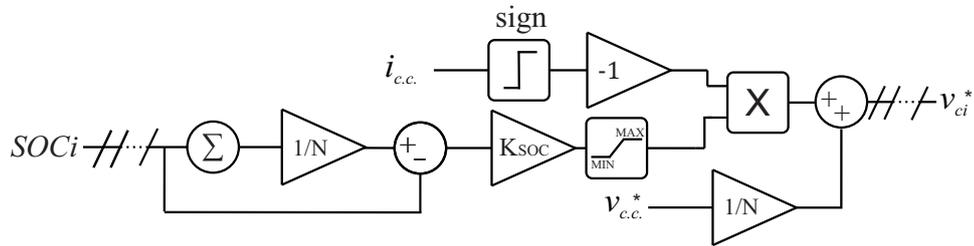
4.2 Uso de baterias inteligentes

A possibilidade de balanceamento de forma distribuída utiliza da topologia de baterias inteligentes. Nesse contexto, o BMS é empregado ao nível da célula, com um conversor integrado, de maneira análoga ao ilustrado na Fig. 22(d). Nesse modelo as células não são conectadas em série uma com a outra, mas sim aos conversores modulares. O balanceamento do BESS não dependerá de alocação de energia entre células. O balanceamento ocorre durante o carregamento e descarregamento do BESS, onde durante o carregamento as células que possuem menor estado de carga possuem maior tensão na saída do conversor, garantindo uma maior potência de entrada na célula. Já as células com maior estado de carga possuem menor tensão na saída do conversor, o que garante menor potência de entrada na célula. O processo ocorre de forma oposta durante o descarregamento, o que garante uma maior potência de saída na célula com maior estado de carga e menor potência de saída na célula com menor estado de carga. É desejável que o barramento c.c. tenha uma tensão constante. Essa premissa será discutida com mais detalhes adiante neste capítulo (Li; Han, 2015b).

Nota-se que o arranjo investigado neste trabalho é composto por um conversor bidirecional. A entrada do conversor está conectada a uma bateria. Já a saída pode ser

conectada diretamente a aplicação ou em série/paralelo com outros conversores, para aumentar a potência. O objetivo deste layout é o controle de fluxo de potência individual em cada bateria do sistema. O conversor c.c./c.c. será responsável por sintetizar uma tensão específica na sua saída de acordo com o que foi definido pelo controlador. A potência de um pacote, conjunto de uma bateria e um conversor, é definida de acordo com SOC_{avg} e SOC_i da bateria a ser controlada. A fim de alterar essa potência de saída, é feita a sintetização de um valor de tensão diferente em cada pacote. Em (Li; Han, 2016) e (Dehghani; Hamzeh; Afjei, 2022) os autores usam uma técnica de balanceamento ativo para equalizar o estado de carga na bateria inteligente durante o carregamento/descarregamento, ilustrado na Fig. 23.

Figura 23 – Diagrama de blocos do controlador de balanceamento de estado de carga.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A tensão de saída de cada conversor $v_{c,i}$ é calculada por:

$$v_{c,i}^* \approx \frac{v_{c.c.}^*}{N} \pm \Delta v_i, \quad (4.1)$$

em que N é o número de baterias e $v_{c.c.}^*$ é a tensão necessária para o barramento c.c. (considerada constante), Δv_i denota um incremento de tensão utilizado para balancear a bateria, sendo calculado de maneira proporcional.

A tensão de saída do conversor é incrementada por Δv_i que é calculada por:

$$\Delta v_i = K_{SOC} \Delta SOC_i, \quad (4.2)$$

em que o valor de Δv_i pode ser positivo ou negativo, dependendo da diferença entre SOC_i e SOC_{avg} . O ganho K_{SOC} aplicado ao controlador mestre, é o que definirá o quão rápido o balanceamento de estado de carga ocorrerá, e é calculado por:

$$K_{SOC} = -\frac{\Delta v_{c,i}}{\Delta SOC}, \quad (4.3)$$

e seu valor dependerá do limite de tensão do conversor e da diferença máxima de estado de carga no BESS (ΔSOC).

Com o aumento do ganho K_{SOC} ocorre a redução do tempo necessário para realizar o balanceamento. Contudo existe um limite na variação de tensão aceita pelo conversor.

Quando o limite de um conversor é atingido, pode haver uma saturação da ação de controle aplicada. Essa saturação pode causar variações significativas ao barramento c.c. do BESS (NADA, a). A variação da tensão do barramento c.c. pode aumentar o estresse em componentes essenciais levando ao aumento de temperatura e, conseqüentemente, redução da confiabilidade do sistema (Callegari et al., 2021). Em (Mallik; Khaligh, 2018) os autores apresentam uma abordagem para maximizar a eficiência do conversor c.c./c.a. com o ajuste da tensão do barramento c.c., garantindo uma tensão ideal de operação para cada carga. Em (Pinto et al., 2021) os autores apresentam a importância da tensão do barramento c.c. para otimização do conversor. Além da perda de eficiência, em (Sangwongwanich et al., 2018) é apresentado o impacto da variação da tensão do barramento c.c. na qualidade da energia. Em linhas gerais, o projeto do PCS torna-se mais simples e otimizado em termos de rendimento e volume se a tensão do barramento c.c. é mantida constante. Esta filosofia será adotada no controle do arranjo de baterias inteligentes investigado neste trabalho.

4.3 Implementação do modelo do arranjo de baterias inteligentes

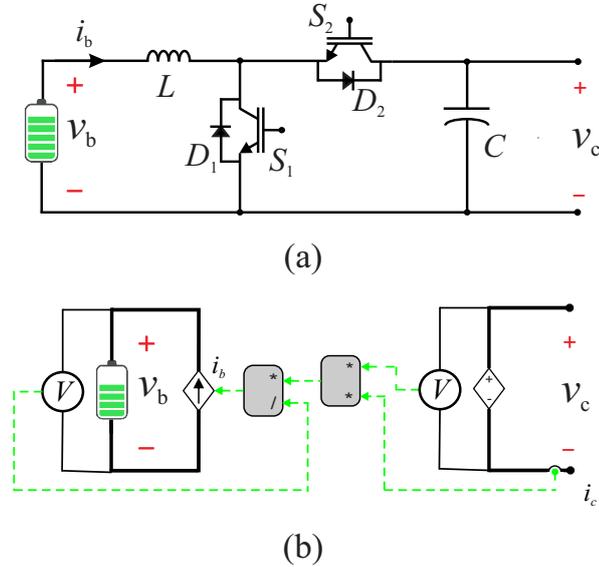
Dentre as topologias dos conversores c.c./c.c. empregados nas baterias inteligentes, o uso do conversor *boost* traz vantagens em termos de flexibilidade para balanceamento de estados. Esta topologia é amplamente aplicada nos conversores de fontes renováveis, devido a sua maior flexibilidade na tensão de entrada (Li; Han, 2015b). A topologia escolhida é ilustrada na Fig. 24(a). A fim de reduzir o tempo de passo da simulação, um modelo de balanço de potência do conversor foi implementado, como discutido em (Pereira, 2015). A Fig. 24(b) apresenta o circuito de balanço de potência aplicado a um conversor. Nesse circuito, a corrente da bateria é calculada considerando:

$$P_{b,i} = P_{c,i} \iff i_{b,i} = \frac{v_{c,i} i_c}{v_{b,i}}, \quad (4.4)$$

em que a tensão da bateria é definida pela *lookup table* apresentada na Fig. 14. Nessa condição de teste, as perdas de conversão são desconsideradas.

O esquema de controle da bateria é dividido em controle local e controle mestre. O controle local é responsável pela computação dos estados da bateria (estado de carga, estado de saúde, etc) e regula a tensão de saída do conversor ($v_{c,i}$), como apresentado na Fig. 7. Quanto maior essa tensão, maior a potência transferida para a bateria. A referência de tensão $v_{c,i}^*$, aplicada a fonte de tensão controlada na saída do conversor simplificado, é calculada pelo controle mestre da bateria inteligente, que recebe os estados da bateria do controle local. O cálculo desta tensão de referência será realizado pela técnica de balanceamento aplicada. A fonte de corrente controlada, ligada à bateria, tem como referência $i_{b,i}$ que é calculada pela equação (4.4). A corrente i_c é igual em todos os

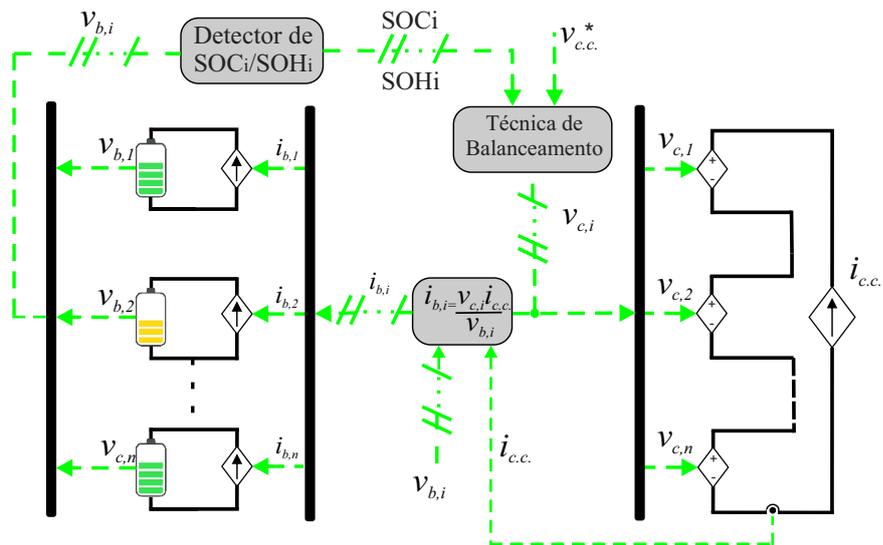
Figura 24 – Topologia do conversor c.c./c.c. *boost*: (a) empregado na bateria inteligente; (b) modelo de balanço de potência para simulação.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

conversores, devido às saídas estarem ligadas em série, esta corrente é imposta pelo PCS e tem seu valor igual $i_{c.c.}$. O esquema do controle do balanço de potência completo do BESS é apresentado na Fig. 25. Uma premissa utilizada nesse trabalho é que o controle local sempre irá sintetizar a tensão definida pelo controle mestre.

Figura 25 – Modelo completo do balanço de potência do conversor *boost*.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Deve-se notar que o modelo da Fig. 24 permite acelerar o tempo de simulação, uma vez que os controles locais e a comutação dos conversores não são representadas. Tais dinâmicas, em geral, na faixa de microssegundos a milissegundos não influenciam de forma significativa o controle de balanceamento de estado de carga, que envolve dinâmicas da

faixa de segundos a horas. Portanto, considera-se esta aproximação razoável para fins de validação dos algoritmos de balanceamento investigados.

4.4 Análise matemática do balanceamento de estado de carga com ganho fixo

Com o objetivo de encontrar o tempo que levará para que o estado de carga seja balanceado no circuito proposto na literatura, a seguinte análise é realizada. Essa análise tem como objetivo comparar diferentes técnicas de balanceamento em um BESS. A potência em uma bateria ($P_{b,i}$) é dada por:

$$P_{b,i} = v_{b,i}i_{b,i}, \quad (4.5)$$

onde $v_{b,i}$ e $i_{b,i}$ representam a tensão e corrente nos terminais da bateria, respectivamente.

Deve ser observado que a tensão $v_{b,i}$ depende do estado de carga, da temperatura e da corrente na bateria. Por sua vez, $i_{b,i}$ será definido pela potência de entrada/saída do conversor. Já a potência na saída do conversor da bateria inteligentes ($P_{c,i}$) é dada por:

$$P_{c,i} = v_{c,i}i_c, \quad (4.6)$$

em que i_c e $v_{c,i}$ são corrente e tensão de saída do conversor.

A tensão $v_{c,i}$ será a variável controlada desta aplicação, isto é, a partir do controle desta tensão será possível controlar a potência de entrada/saída na bateria. Tal tensão é definida pelo controle do balanceamento de estado de carga, ou seja, vai depender da relação entre SOC_{avg} e o SOC_i . Já a corrente i_c é um parâmetro comum a todos os conversores associados em série, essa corrente é imposta pela unidade de conversão de potência do BESS e é definida pela quantidade de potência que o sistema injeta/absorve da rede. Em condições reais de operação as potências definidas anteriormente são diferentes. Durante o carregamento a potência $P_{c,i}$ é maior que a potência $P_{b,i}$, já no descarregamento a potência $P_{b,i}$ é maior que a potência $P_{c,i}$. Essa diferença de potência se dá a partir das perdas referentes ao conversor. Contudo essa diferença será desconsiderada neste modelo analítico, ou seja:

$$P_{b,i} = P_{c,i} \iff v_{b,i}i_{b,i} = v_{c,i}i_c. \quad (4.7)$$

O termo $v_{c,i}$ como dito anteriormente é a variável controlada do sistema. Esse valor é uma fração da tensão do barramento c.c. ($v_{c.c.}$). De fato, se todas as baterias apresentam o mesmo estado de carga, $v_{c,i}$ será o resultado da divisão entre o valor da tensão do barramento c.c. e o número de baterias na série, denotado por N , entretanto seu valor pode ser dado pela equação (4.1). Empregando-se as relações (4.1) e (4.7), é possível obter:

$$i_{b,i} = \frac{v_{c.c.} \dot{i}_c}{N v_{b,i}} + \frac{\Delta v_i \dot{i}_c}{v_{b,i}} \iff i_{b,i} = i_{b,c.c.} \pm \Delta i_{b,i}, \quad (4.8)$$

onde o termo $i_{b,c.c.}$ é a corrente fornecida para carregar/descarregar o BESS (comum a todas as baterias do arranjo) e $\Delta i_{b,i}$ é a parcela utilizada para balanceamento.

Em condições reais de operação do BESS, o estado de carga de cada bateria, denotado por SOC_i , pode ser estimado por:

$$SOC_i = SOC_{0,i} + \frac{1}{3600 C_{n,i}} \int i_{b,i} dt, \quad (4.9)$$

onde seu valor dependerá de um valor de estado de carga inicial ($SOC_{0,i}$), somado a um produto da integral da corrente $i_{b,i}$, e o inverso da capacidade da bateria em segundos, onde $C_{n,i}$ é a capacidade da bateria em Ampere-hora (Ah) e o termo 3600 é a conversão de horas para segundos.

Substituindo o termo $i_{b,i}$ de (4.8) em (4.9) resulta em:

$$SOC_i = SOC_{0,i} + \frac{1}{3600 C_{n,i}} \int i_{b,c.c.} dt + \frac{1}{3600 C_{n,i}} \int \Delta i_{b,i} dt. \quad (4.10)$$

Por sua vez, a variação de estado de carga da i -ésima bateria é dada por:

$$\Delta SOC_i = SOC_{avg} - SOC_i, \quad (4.11)$$

onde SOC_{avg} é o valor médio do estado de carga das baterias do BESS. Este valor é dado pela equação (4.12) e apresenta três parcelas: o primeiro termo é uma média de todos os $SOC_{0,i}$; o segundo termo é uma média de X_i que é a integral da corrente comum a todas as baterias em segundos, apresentado na equação (4.13); e o terceiro termo é uma média do termo Y_i que é a integral da variação de corrente de cada bateria, termo esse que dependerá do SOC_i , apresentado na equação (4.14).

$$SOC_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^N SOC_{0,i}}{N} + \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} + \frac{\sum_{i=1}^N Y_i}{N}, \quad (4.12)$$

$$X_i = \frac{1}{3600 C_{n,i}} \int i_{b,c.c.} dt, \quad (4.13)$$

$$Y_i = \frac{1}{3600 C_{n,i}} \int \Delta i_{b,i} dt. \quad (4.14)$$

Substituindo os valores de SOC_i , apresentados na equação (4.10), e SOC_{avg} , apresentados na equação (4.12), em (4.11), obtém-se:

$$\begin{aligned} \Delta SOC_i &= \frac{\sum_{i=1}^N SOC_{0,i}}{N} + \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} + \frac{\sum_{i=1}^N Y_i}{N} \\ &\quad - SOC_0 - \frac{1}{3600C_{n,i}} \int i_{b,c.c.} dt - \frac{1}{3600C_{n,i}} \int \Delta i_{b,i} dt. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Assumindo que nenhum dos conversores atinge seu limite físico de tensão de saída, a soma de todas as variações de corrente $\Delta i_{b,i}$ resultará em um valor nulo, portanto:

$$\frac{\sum_{i=1}^N Y_i}{N} = \frac{1}{3600C_{n,i}} \underbrace{\int \sum_{i=1}^N \Delta i_{b,i} dt}_0 = 0. \quad (4.16)$$

Considerando uma única bateria, dois termos se equivalem na equação (4.15). A equivalência entre os termos ocorre devido à corrente comum a todas as baterias, como apresentado em:

$$\frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} = \frac{1}{3600C_{n,i}N} \int \sum_{i=1}^N i_{b,c.c.} dt = \frac{1}{3600C_{n,i}} \int i_{b,c.c.} dt. \quad (4.17)$$

A partir das igualdades apresentadas nas equações (4.16) e (4.17), a equação (4.15) pode ser simplificada para:

$$\Delta SOC_i = \frac{\sum_{i=1}^N SOC_{0,i}}{N} - SOC_{0,i} - \frac{1}{3600C_{n,i}} \int \frac{\Delta v_i i_c}{v_{b,i}} dt. \quad (4.18)$$

Ao realizar a análise matemática, parte-se da premissa de que $v_{b,i}$ e i_c são constantes, resultando em:

$$\Delta SOC_i = \frac{\sum_{i=1}^N SOC_{0,i}}{N} - SOC_{0,i} - \frac{i_c}{3600C_{n,i}v_{b,i}} \int \Delta v_i dt. \quad (4.19)$$

Substituindo a equação (4.2) na equação (4.19) resulta em:

$$\Delta SOC_i = \underbrace{\frac{\sum_{i=1}^N SOC_{0,i}}{N} - SOC_{0,i}}_A - \underbrace{\frac{K_{SOC} i_c}{3600C_{n,i}v_{b,i}}}_{B} \int \Delta SOC_i dt. \quad (4.20)$$

Para facilitar os termos constantes da equação são substituídos por termos genéricos, como apresentado, na equação (4.20), tem-se:

$$\Delta SOC_i = A + B \int \Delta SOC_i dt. \quad (4.21)$$

Como resultado da equação diferencial apresentada em (4.21) tem-se a seguinte expressão:

$$\Delta SOC_i = Ae^{-Bt}. \quad (4.22)$$

A partir da equação (4.22) constata-se que o balanceamento de estado de carga do BESS com ganho fixo é uma exponencial no tempo. A constante de tempo do balanceamento τ é dada por:

$$\tau = \frac{3600C_{n,i}v_{b,i}}{K_{SOC}i_c}. \quad (4.23)$$

Por se tratar de um comportamento exponencial, considera-se razoável que o tempo necessário para atingir o balanceamento ($T_{b,f}$) é dado por:

$$T_{b,f} \approx 5\tau \iff T_{b,f} \approx \frac{18000C_{n,i}v_{b,i} \Delta SOC_i}{i_c \Delta v_i}, \quad (4.24)$$

assim, tem-se que o tempo de balanceamento é proporcional à capacidade nominal da bateria, à tensão da bateria e à máxima variação de estado de carga. Esse tempo é inversamente proporcional a corrente do conversor e a máxima variação de tensão da saída dos conversores. Nota-se que o tempo de balanceamento é inversamente proporcional ao ganho K_{SOC} e que, a priori, não depende da diferença de estado de carga. Contudo, parte-se da premissa de que os conversores associados às baterias não atingirão seus limites máximos de tensão, ou seja, a saturação. Assim, a soma de todas as tensões permanecerá constantemente igual à referência de tensão estabelecida para o barramento c.c. do controle mestre. Isso resulta em um ganho máximo de $K_{SOC,max}$ estabelecido por:

$$K_{SOC,max} = -\frac{\Delta v_{max}}{\Delta SOC_{max}}. \quad (4.25)$$

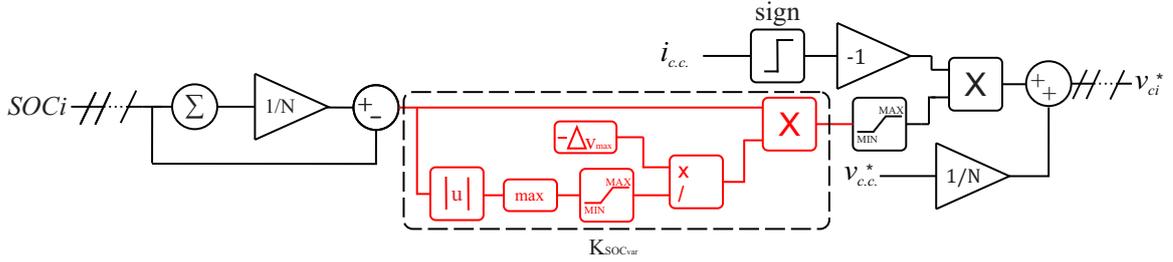
onde Δv_{max} é a máxima tensão de saída do conversor, definida no projeto, e ΔSOC_{max} é a máxima diferença inicial entre SOC_i e SOC_{avg} no BESS. Para acelerar o balanceamento, este trabalho propõe uma técnica de balanceamento com ganho variável, que será descrita na próxima seção.

4.5 Análise matemática do balanceamento de estado de carga com ganho variável

Nesta seção será abordada uma proposta de transformar o ganho fixo do controlador em variável. Essa mudança visa melhorar o desempenho do controlador do balanceamento de estado de carga. Na Fig. 26 é apresentada a mudança aplicada ao diagrama de blocos da Fig. 23, onde o bloco do ganho K_{SOC} é substituído por um conjunto de blocos denominados K_{SOCvar} .

Como apresentado na seção anterior, o valor de ΔSOC_i irá diminuir à medida que o BESS for balanceando. Já o valor de Δv_{max} é um valor fixo definido pelo projeto do conversor *boost*. Nesta metodologia o termo K_{SOCvar} é dado por:

Figura 26 – Diagrama de blocos do controlador de balanceamento de estado de carga com ganho variável.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

$$K_{SOCvar} = -\frac{\Delta v_{max}}{\Delta SOC_{i,max}}. \quad (4.26)$$

onde $\Delta SOC_{i,max}$ representa a máxima diferença instantânea entre SOC_i e SOC_{avg} no BESS.

Na técnica de balanceamento proposta o ganho irá aumentando à medida que o estado de carga for balanceando. E isso ocorre sem que o barramento c.c. sofra uma variação de tensão. Já com o controlador de ganho fixo, caso ocorra um aumento no ganho visando aumentar a velocidade de balanceamento ocorrerá variação de tensão no barramento c.c. do BESS. Dessa forma, ao substituir (4.26) em (4.2) e, posteriormente, em (4.19), conforme analisado na seção anterior, obtém-se:

$$\Delta SOC_i = \frac{\sum_{i=1}^N SOC_{0,i}}{N} - SOC_{0,i} - \frac{i_c}{3600C_{n,i}v_{b,i}} \int \frac{\Delta v_{max}}{\Delta SOC_{i,max}} \Delta SOC_i dt. \quad (4.27)$$

Considerando a bateria que mais se afasta da média, temos que o termo ΔSOC_i aparece multiplicando e dividindo por Δv_{max} o que justifica sua anulação dentro da integral. Vale ressaltar que o valor de Δv_{max} é uma constante física do controle de estado de carga. A partir desta análise a solução da integral é:

$$\Delta SOC_i = \underbrace{\frac{\sum_{i=1}^N SOC_{0,i}}{N} - SOC_0}_C - \underbrace{\frac{i_c \Delta v_{max}}{3600C_{n,i}v_{b,i}}}_D t. \quad (4.28)$$

Substituindo os termos de (4.28) por termos genéricos obtém-se:

$$\Delta SOC_i = C - Dt, \quad (4.29)$$

assim tem-se, que o tempo de balanceamento, para um controle com ganho variável, é linear. Portanto, o tempo para alcançar o balanceamento é dado por:

$$T_{b,v} = \frac{3600C_{n,i}v_{b,i} \sum_{i=1}^N SOC_{0,i}}{Ni_c \Delta v_{max}} - \frac{3600SOC_0C_{n,i}v_{b,i}}{\Delta v_{max}i_c}. \quad (4.30)$$

A equação (4.30) pode ser rescrita como

$$T_{b,v} = \frac{3600C_{n,i}v_{b,i}}{i_c \Delta v_{max}} \left(\frac{\sum_{i=1}^N SOC_{0,i}}{N} - SOC_0 \right), \quad (4.31)$$

em que o termo entre parêntese pode ser substituído por:

$$\Delta SOC_{max} = \frac{\sum_{i=1}^N SOC_{0,i}}{N} - SOC_0. \quad (4.32)$$

Assim o tempo necessário para que a técnica com ganho variável alcance o balanceamento é calculado por:

$$T_{b,v} = \frac{3600C_{n,i}v_{b,i} \Delta SOC_{max}}{i_c \Delta v_{max}}. \quad (4.33)$$

Com objetivo de comparar as duas técnicas de balanceamento de estado de carga, uma razão entre a expressão (4.33) e a expressão (4.24) é realizada, denotada por α . O valor de α traz o quão mais rápido será o balanceamento da técnica variável. Essa razão é dada por:

$$\alpha \approx \frac{T_{b,v}}{T_{b,f}} \iff \alpha \approx \frac{\frac{3600C_{n,i}v_{b,i} \Delta SOC_{max}}{i_c \Delta v_{max}}}{\frac{18000C_{n,i}v_{b,i} \Delta SOC_{max}}{i_c \Delta v_{max}}} \iff \alpha \approx 5. \quad (4.34)$$

Portanto, o balanceamento com ganho variável é aproximadamente cinco vezes mais rápido que o balanceamento com ganho fixo, considerando que o barramento c.c. não poderá ter variação de tensão no regime transitório.

4.6 Estudo de caso

A simulação foi realizada utilizando uma bateria constituída de quatro células de $LiFePO_4$ conectadas em série. A bateria é então conectada ao conversor, representado pelo seu modelo de balanço de potência. As saídas dos conversores também são conectadas em série. Para demonstrar o resultado da técnica de balanceamento, dez baterias são utilizados na simulação, atingindo uma tensão nominal de barramento c.c. de 190 V. Os dados da bateria utilizada são apresentados na Tab. 3. Já os valores iniciais de estado de carga e $C_{a,i}$ são apresentados na Fig. 27.

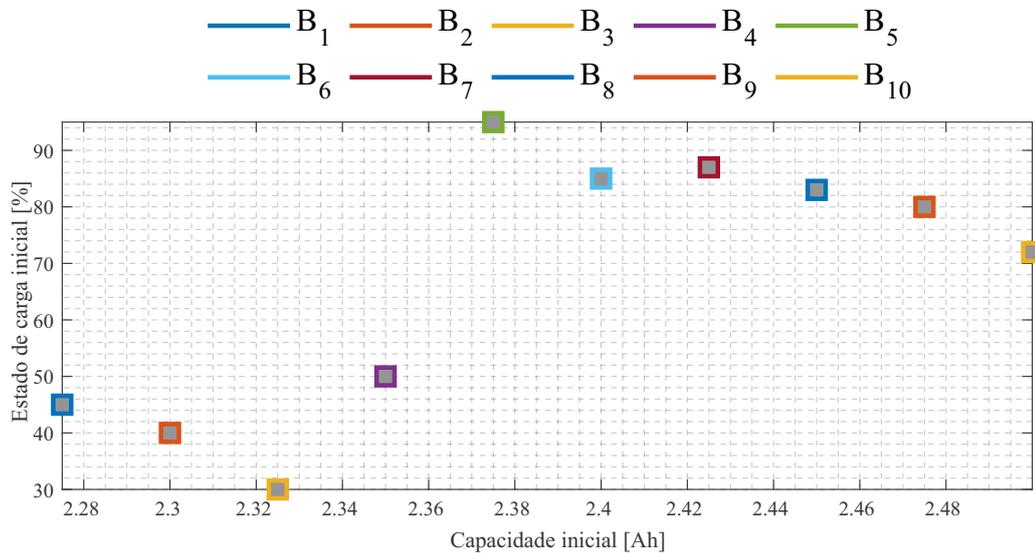
s

A priori, o uso de tempos de cargas/descargas iguais e o mesmo módulo de corrente garantiria que ao longo da simulação o valor de SOC_{avg} se manteria constante. Na prática, devido às perdas das baterias, o valor das correntes de carga e descarga devem ser ligeiramente diferentes. Com o objetivo de manter fixo o SOC_{avg} por ciclo, um controlador proporcional-integral será utilizado no controle da corrente $i_{c.c.}$ do PCS. Esse controlador

Tabela 3 – Parâmetros utilizados para simulação das baterias e dos conversores no BESS.

Parâmetros	Valor	Unidade
$C_{n,i}$	2.5	Ah
v_{cell}	3	V
$v_{b,i}$	12	V
$v_{c,i}$	19	V
Δv_c	± 5	V
$v_{c.c.}$	190	V
N	10	-

Figura 27 – Condições iniciais do estado de carga e do estado de saúde das baterias empregadas nas simulações.



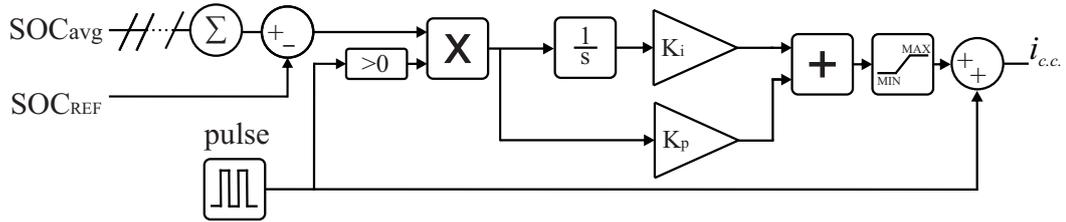
Fonte: Elaborado pelo Autor.

garante que mesmo na presença de perdas ôhmicas da bateria, o SOC_{avg} se manterá constante. Na Fig. 28 é apresentado o controlador implementado. Esse controlador tem como entrada o SOC_{avg} e a referência de SOC_{avg} do controlador (SOC_{REF}). Esta estrutura corrige a corrente de carga por um incremento suficiente para manter o balanço de energia do banco. Com o controlador utilizado foi possível definir um valor fixo para o SOC_{REF} em 60%. Os valores dos ganhos implementados no controlador estão apresentados na Tab. 4.

As baterias serão submetidas a um ciclo de carga/descarga de aproximadamente ± 3 A e período de 15 minutos, sendo o tempo total de simulação igual a quatro horas. O valor da corrente $i_{c.c.}$ é definido pelo controlador da Fig. 28, em que a Fig. 29 apresenta uma aproximação da corrente aplicada ao circuito.

Três cenários de balanceamento serão analisados. O primeiro cenário de simulação

Figura 28 – Diagrama de blocos do controle proporcional-integral utilizado para regular a corrente do PCS e assegurar que o SOC_{avg} seja igual a SOC_{REF} .

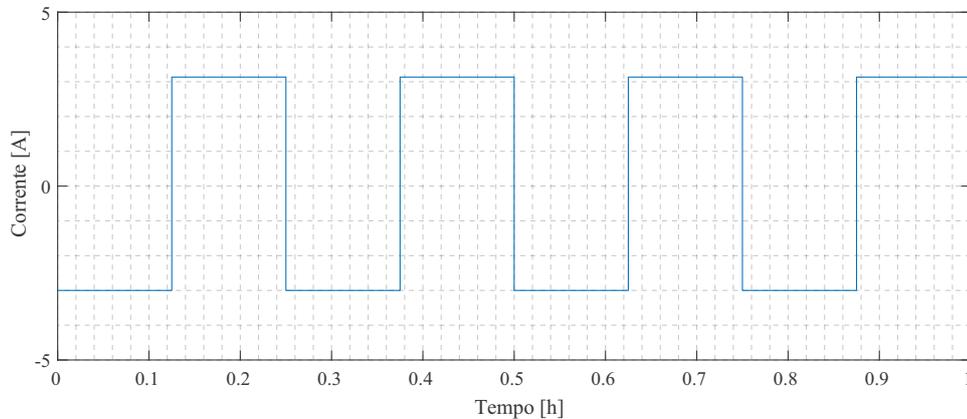


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 4 – Valores dos ganhos aplicados ao controlador proporcional-integral, conforme ilustrado na Fig. 28, para manter um SOC_{avg} constante.

Ganho	Valor
K_p	-10^{-1}
K_i	-10^{-7}

Figura 29 – Perfil aproximado da corrente do PCS fornecido pelo controlador apresentado na Fig. 28, com forma de onda retangular e frequência constante para carga/descarga do BESS.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

será realizado considerando o diagrama de blocos da Fig. 23 e um ganho K_{SOC} fixo, determinado por (4.3) e os dados da Fig. 27. O segundo cenário de simulação utiliza o mesmo diagrama de blocos e mesma equação para cálculo do ganho, contudo neste cenário será aplicado um ganho cinco vezes maior que o calculado pela (4.3), com o objetivo de acelerar o balanceamento. No terceiro cenário será utilizado o controlador apresentado pela Fig. 26. O ganho será variável, e o resultado da equação (4.26) irá mudar a medida que os valores de estado de carga, apresentados na Fig. 27 forem alterando. Com o objetivo de comparar as técnicas simuladas será considerado que o balanceamento ocorreu quando o erro de estado de carga máximo da simulação for inferior a 0,2%. A fim de facilitar a

leitura e entendimento dos resultados, os cenários de simulação citados serão referenciados como:

- 1° cenário: simulação em que é utilizado o balanceamento de estado de carga com ganho fixo calculado por (4.3);
- 2° cenário: simulação em que é utilizado o balanceamento de estado de carga com ganho fixo cinco vezes maior que o calculado por (4.3);
- 3° cenário: simulação em que é utilizado o balanceamento de estado de carga com ganho variável calculado por (4.26);

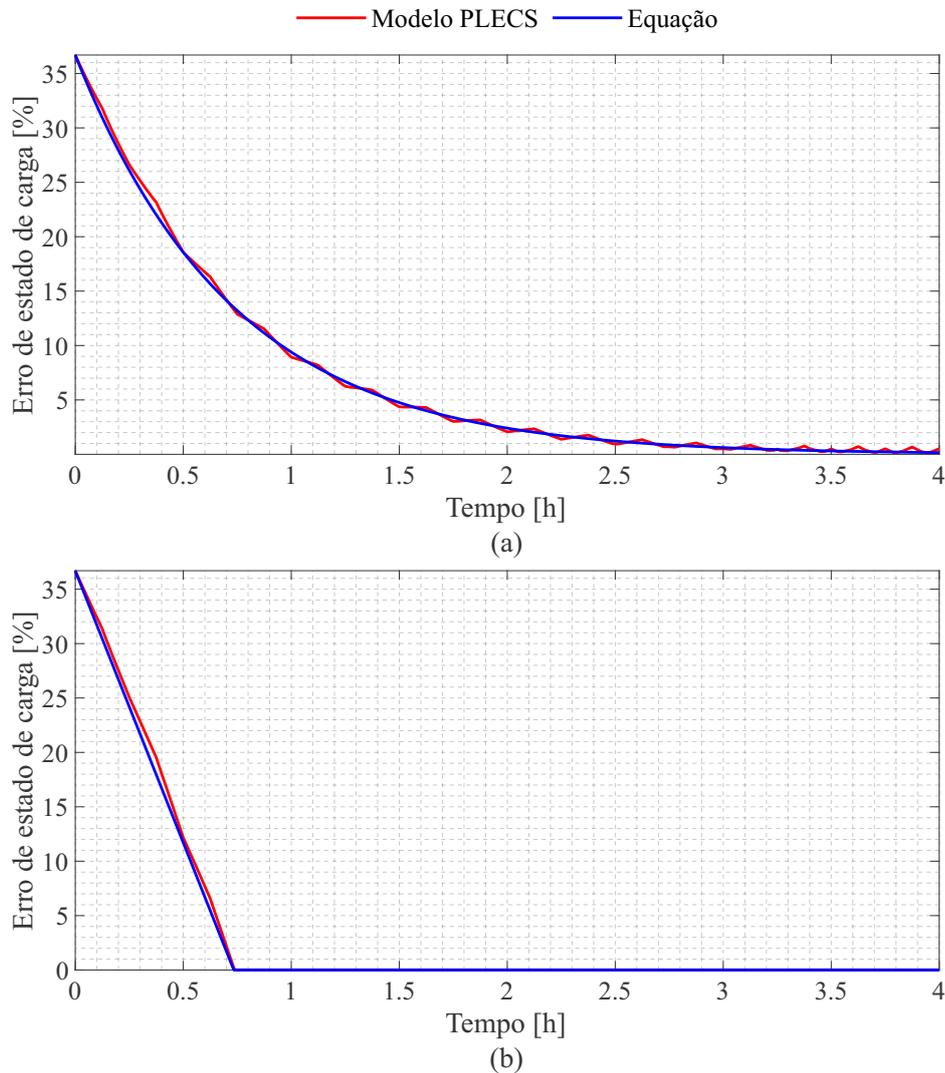
4.7 Resultados e discussões

Nesta seção serão apresentados os resultados do estudo de caso apresentado na seção anterior. Na Fig. 30(a) é apresentada a comparação entre o modelo desenvolvido e (4.22). Nesta comparação é possível verificar que ambos os resultados possuem comportamento exponencial com o erro de estado de carga. A Fig. 30(b) apresenta a comparação entre o desempenho do modelo desenvolvido e (4.29). Nesta, é possível verificar o comportamento linear comentado na análise realizada, tanto no modelo quanto na equação. As pequenas variações apresentadas pelo modelo devem-se ao fato de que no modelo simulado a tensão da bateria não é constante, diferente da premissa adotada para análise matemática realizada. Outro fato a se observar é que o balanceamento do modelo possui uma pequena ondulação no erro de estado de carga, que se dá devido ao modelo analítico não apresentar interferência com o estado de saúde da bateria.

O 1° cenário é apresentado na Fig. 31. A Fig. 31(a) mostra o resultado do balanceamento de estado de carga nas quatro horas de simulação. Neste resultado é possível verificar que o balanceamento ocorre em um período de aproximadamente três horas e quarenta minutos. Outro fato a ser observado é que, mesmo após o balanceamento, ocorre uma pequena variação nos estados de carga durante as mudanças de ciclos de carregamento. Já a Fig. 31(b) apresenta o comportamento das tensões na saída do conversor. No primeiro ciclo de carga/descarga, um dos conversores tem sua tensão de saída próxima a tensão de saturação definida. Contudo, não ocorre saturação do conversor. À medida que o estado de carga vai se equilibrando, as tensões aplicadas nos conversores vão se igualando. No entanto, devido à variação de estado de carga próxima à mudança de sentido da corrente, as tensões não se igualam nos conversores.

A Fig. 32 apresenta o resultado do 2° cenário. Na Fig. 32(a) é apresentado o resultado de balanceamento de estado de carga nas baterias. Nesse resultado é possível verificar que o balanceamento de estado de carga ocorre mais rápido que o apresentado na Fig. 31, em aproximadamente uma hora as baterias já estão balanceadas. Nesse cenário de

Figura 30 – Comparação do resultado do balanceamento de estado de carga do modelo e a análise matemática: (a) seção 4.3; (b) seção 4.4.

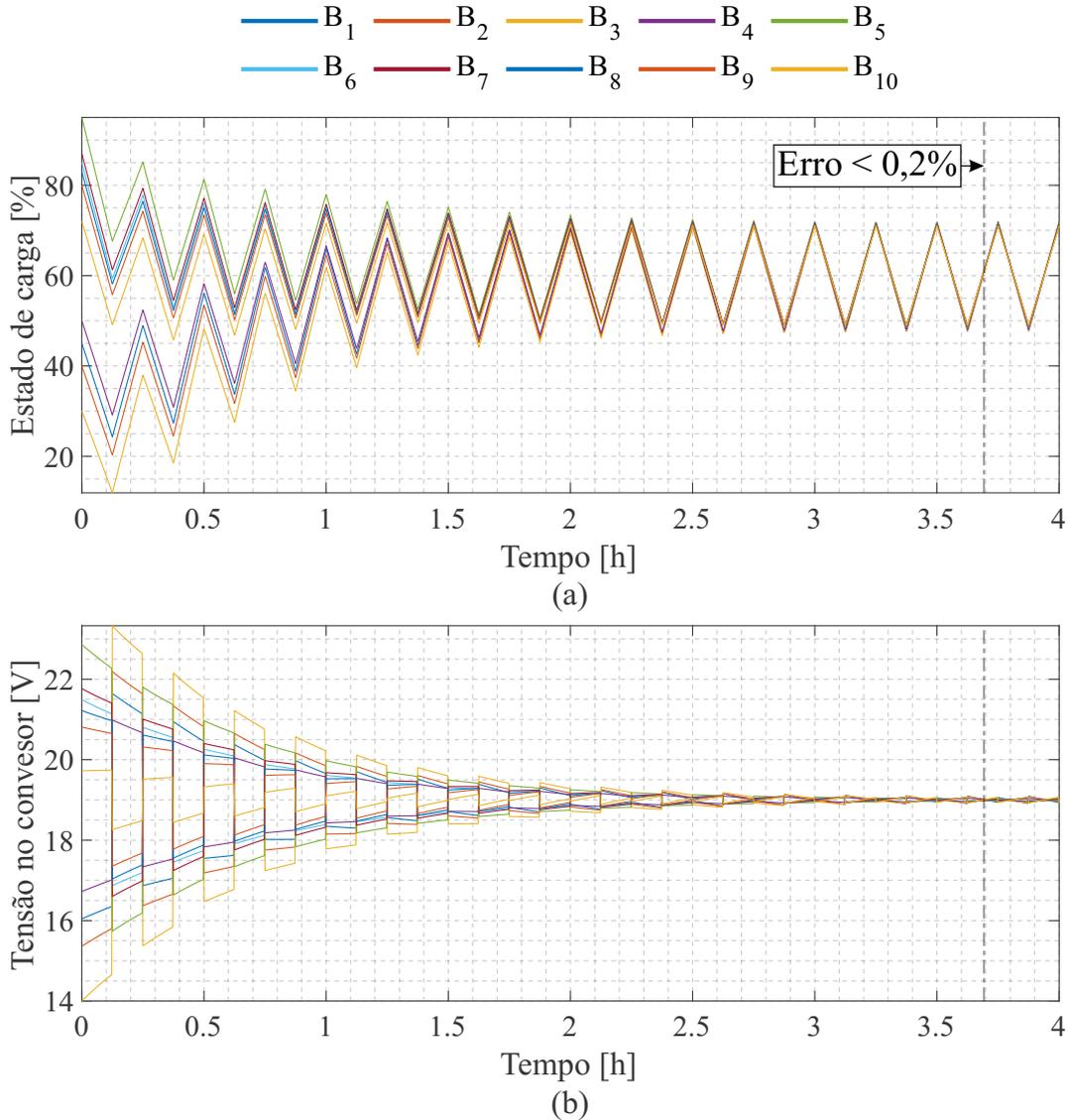


Fonte: Elaborado pelo Autor.

balanceamento, ainda ocorre uma pequena variação de estado de carga durante as mudanças de sentido da corrente, porém menor. Na Fig. 32(b) é apresentado o comportamento das tensões nas saídas dos conversores. Aqui é possível verificar que durante aproximadamente meia hora, tempo para o balanceamento, as tensões de alguns conversores estão saturadas no limite máximo e mínimo do projeto. Isso ocorre devido ao ganho ser maior que o limite apresentado pela equação (4.3). Após o balanceamento dos estados de carga a diferença das tensões de saída dos conversores é reduzida, deixando assim de ficarem saturadas.

O 3º cenário de simulação é apresentado na Fig. 33. A Fig. 33(a) apresenta o resultado do balanceamento de estado de carga da simulação. Neste cenário o balanceamento de estado de carga ocorre em aproximadamente quarenta e três minutos. O balanceamento de estado de carga com ganho variável quase não apresenta uma variação de estado de carga durante as mudanças de sentido de corrente. A Fig. 33(b) apresenta o comportamento

Figura 31 – 1° cenário de simulação (a) estado de carga e (b) tensão na saída dos conversores.

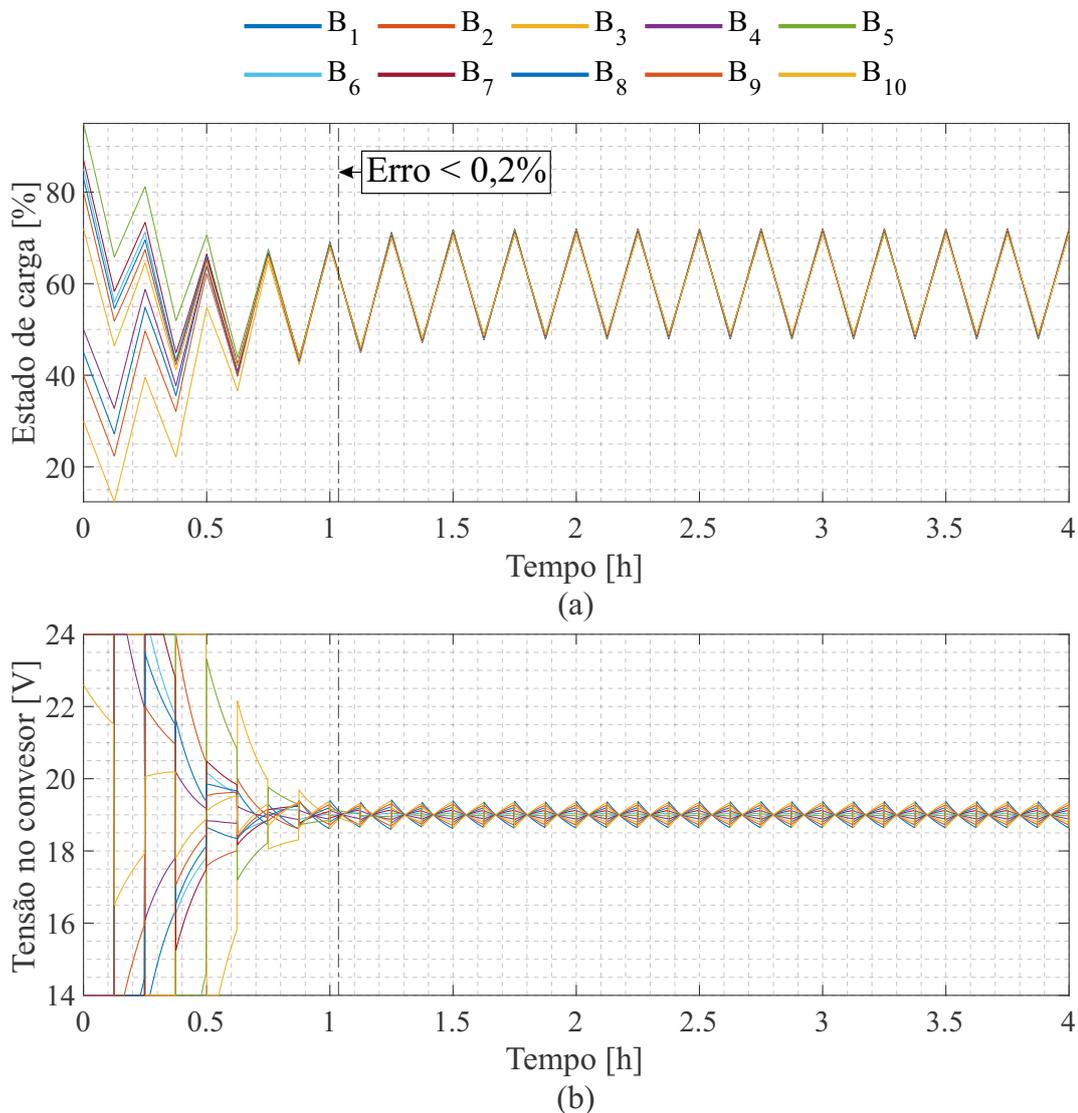


Fonte: Elaborado pelo Autor.

da tensão durante a simulação do 3° cenário. Neste cenário apenas a tensão de uma bateria está saturada nos instantes iniciais. Essa bateria é a que apresenta maior diferença com o SOC_{avg} . Ao fim do balanceamento ainda que as baterias estejam balanceadas, as tensões de saída nos conversores não ficam iguais. Esse comportamento ocorre devido a diferença de $C_{a,i}$ que existe entre as baterias do BESS. Desta forma o controlador garante que não ocorrerá uma variação de estado de carga nas baterias, mesmo que estejam com capacidades diferentes.

A Fig. 34(a) apresenta uma comparação de erro de estado de carga entre os três cenários de simulação. Esse erro é calculado a partir da diferença do SOC_i que mais se afasta de SOC_{avg} no BESS. Como apresentado anteriormente, é possível identificar o comportamento exponencial nas técnicas de balanceamento com ganho fixo. Já na técnica

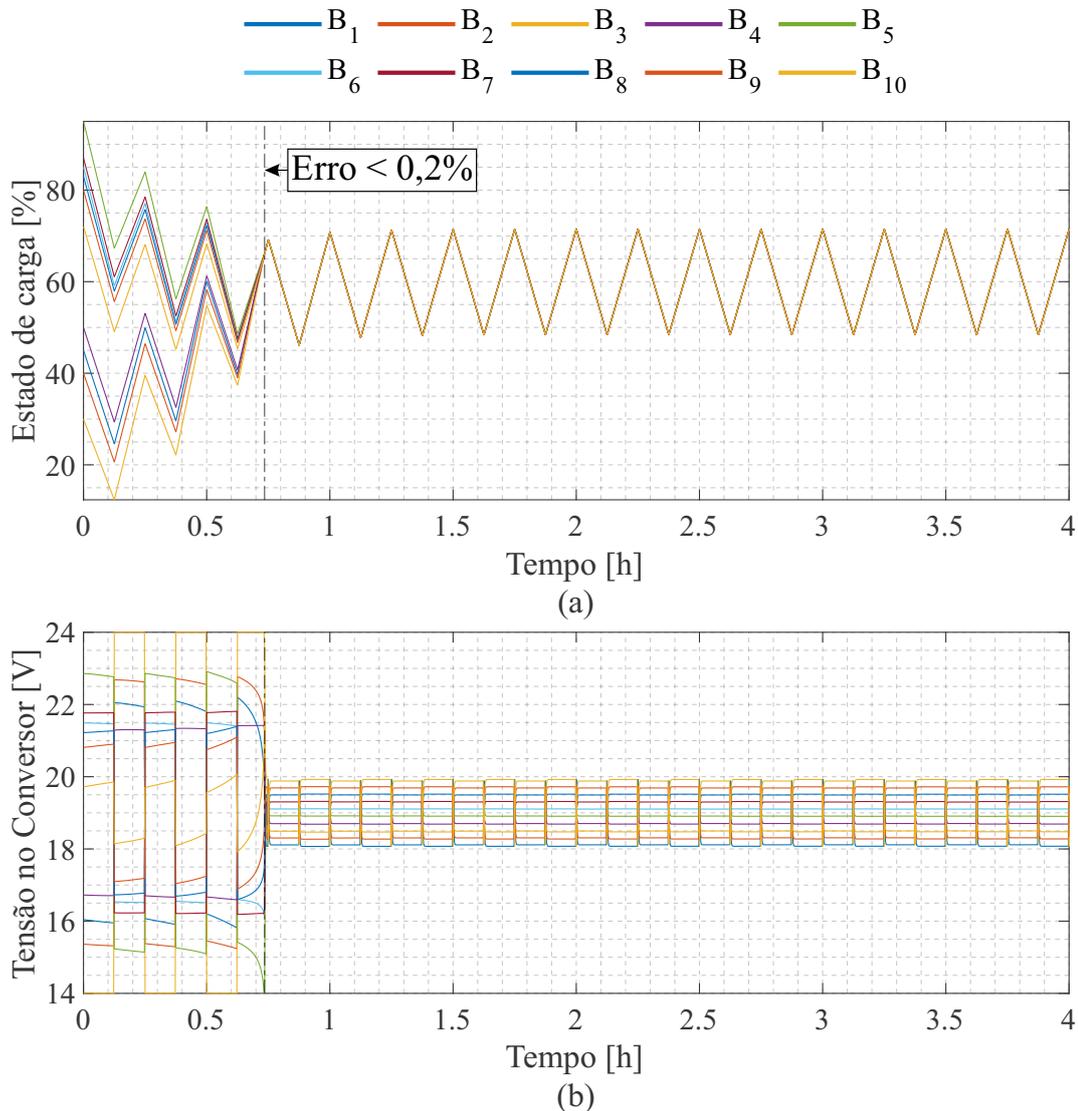
Figura 32 – 2º cenário de simulação (a) estado de carga e (b) tensão na saída dos conversores.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

de balanceamento com ganho variável é possível ver o comportamento linear da técnica. Inicialmente a técnica de balanceamento do 2º cenário apresenta melhor resultado que as demais, porém como a saturação da técnica acaba depois de algum tempo, a técnica apresentada no 3º cenário fica melhor, pois essa técnica garante saturação para aquela bateria em que seu SOC_i mais se afaste de SOC_{avg} durante todo o tempo de balanceamento. Outro fator que pode ser observado é que após o balanceamento as técnicas do 1º e 2º cenário, apresentam uma amplitude de erro com uma ondulação cuja frequência associada é semelhante à de carga/descarga da bateria. Isso se dá pela mudança no sentido da corrente que ocorre no PCS. Já a técnica do 3º não apresenta a ondulação em regime permanente, comparada com as demais técnicas. O comportamento proposto pela análise da equação (4.34) também é visualizado na Fig. 34, em que o tempo de balanceamento da técnica variável é de aproximadamente cinco vezes mais rápido que o da técnica fixa.

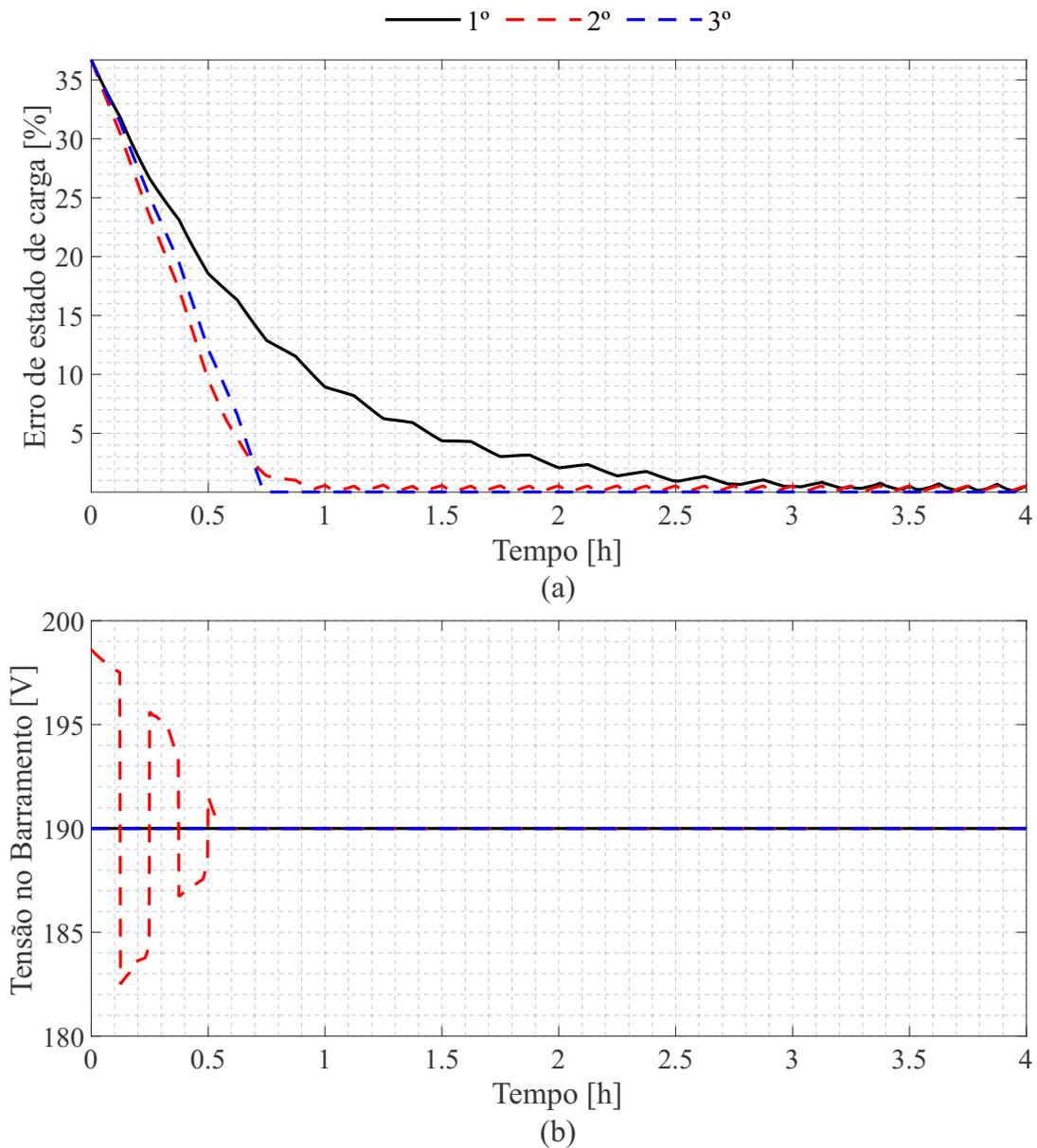
Figura 33 – 3º cenário de simulação (a) estado de carga e (b) tensão na saída dos conversores.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

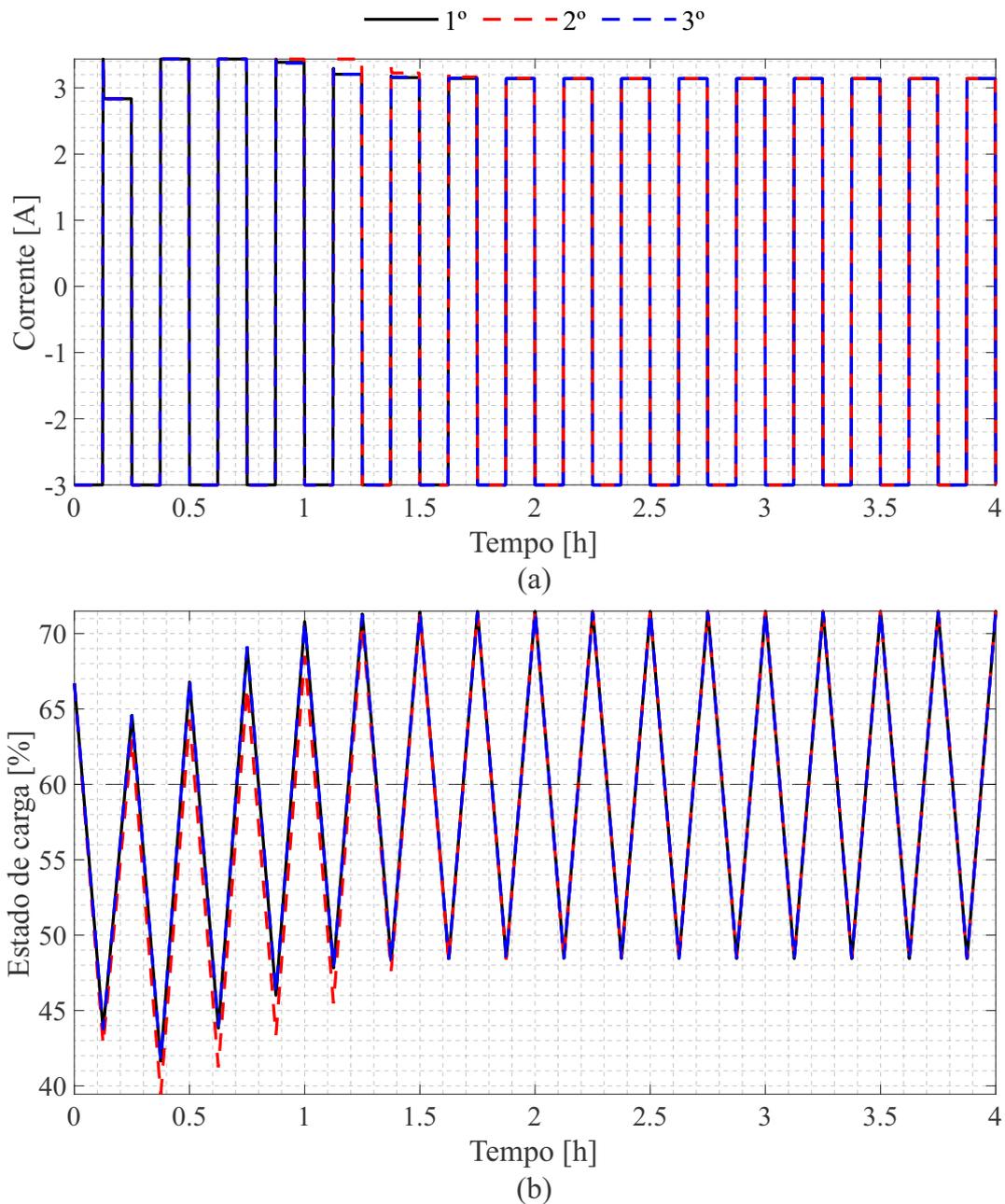
A Fig. 34(b) apresenta o comportamento da tensão no barramento c.c. do PCS. A tensão do barramento c.c. é constante durante o regime transitório e o regime permanente da técnica do 1º cenário. Isso se dá devido a equação utilizada para calcular o ganho garantir que a variação das tensões do conversor ficará dentro dos limites de saturação. No 2º cenário de simulação a técnica de balanceamento apresenta grande variação da tensão do barramento c.c. em regime transitório, contudo em regime permanente a tensão permanece constante. Essa variação de tensão em regime transitório se dá devido a saturação de diversas tensões, nos conversores, como apresentado na Fig. 33(b). Já no 3º cenário de simulação a tensão do barramento c.c. também permanece constante no regime transitório e permanente. Neste cenário, pode se imaginar que também ocorreria variação no barramento, devido a tensão que está saturada. Contudo apenas a tensão de um conversor está saturada, e essa tensão saturada é compensada pelas tensões dos demais conversores.

Figura 34 – (a) Máximo erro de estado de carga em cada cenário de simulação; (b) comportamento da tensão no barramento c.c. nos três cenários de simulação.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O comportamento da corrente do PCS é apresentado pela Fig. 35(a). A corrente no PCS nos três casos possui comportamento semelhante, sendo em regime permanente praticamente igual. O circuito apresentado pela Fig. 28 é o responsável por controlar a corrente no PCS. A corrente de descarga do PCS é constante, porém a corrente de carga é ligeiramente maior. O período transitório da corrente do PCS se dá pela necessidade de realizar o balanceamento do estado de carga nas baterias, além disso é necessário um pouco mais de potência no circuito para que todas as baterias tenham um SOC_{avg} igual à 60%. A Fig. 35(b) apresenta o comportamento do SOC_{avg} de cada simulação. A Fig. 35(b) também permite a visualização da convergência de SOC_{avg} para 60%.

Figura 35 – Comportamento: (a) do controle da corrente do PCS nos três cenários; (b) do estado de carga instantâneo nas dez baterias, convergindo para SOC_{REF} .

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.8 Conclusões do capítulo

Este capítulo teve como propósito fornecer uma revisão abrangente sobre o avanço atual no que diz respeito ao balanceamento do estado de carga em baterias. Uma atenção especial foi dada ao balanceamento de estado de carga em baterias inteligentes, por se tratar do método implementado neste trabalho. Duas análises matemáticas foram realizadas. Uma técnica, encontrada na literatura, utiliza um ganho fixo no controle do balanceamento de estado de carga. A segunda análise, é de uma proposta de ganho variável para o controlador

de balanceamento de estado de carga da bateria. Uma simplificação do conversor *boost* para um modelo de balanço de potência do conversor foi apresentada. Essa simplificação é utilizada com o intuito de reduzir o tempo de simulação das técnicas de balanceamento. Um estudo de caso para implementação das duas técnicas foi proposto, a fim de validar e comparar as técnicas de balanceamento. Três cenários distintos de simulação foram analisados neste capítulo. No 1º cenário a técnica apresentada na literatura é simulada. Esta técnica apresenta um resultado interessante para o balanceamento de estado de carga, porém demora aproximadamente três horas e quarenta minutos para balancear as baterias do estudo de caso apresentado. O 2º cenário apresenta uma variação do 1º, em que o ganho é cinco vezes maior que o calculado pela equação apresentada na literatura. Neste cenário o balanceamento é aproximadamente três vezes mais rápido que o anterior, contudo durante o regime transitório o barramento de tensão c.c. do PCS apresenta grande variação. O resultado do 3º cenário de simulação possui tempo de balanceamento menor que dos outros dois casos, sendo aproximadamente cinco vezes mais rápido que o tempo apresentado no 1º cenário de simulação. Outro aspecto a ser destacado é que os erros de estimativa do estado de carga das baterias não foram contemplados no estudo de caso. Isso se deve ao fato de uma das premissas adotadas neste trabalho ser que os estados das baterias já estão previamente estimados.

5 Estratégias de balanceamento de estado de saúde

Este capítulo propõe avaliar a perda de capacidade das baterias de um BESS, quando aplicadas técnicas de balanceamento de estado de carga e estado de saúde em simulações de longo prazo. Será proposto um método de balanceamento em cascata, onde a técnica de balanceamento do estado de saúde determina um *offset* para a estratégia de balanceamento do estado de carga.

5.1 Estado da arte de técnicas de balanceamento de estado de saúde

Um BESS pode ser construído a partir de células de baterias novas ou de segunda vida. As células deste sistema são agrupadas em pacotes, para aumentar a tensão e a corrente do BESS. Contudo, podem existir no BESS células com diferentes capacidades, fenômeno que ocorre devido ao processo de fabricação e a capacidade atual da bateria, e essa diferença pode ser potencializada com o envelhecimento das baterias. Como resultado da diferença de capacidade das células nos pacotes, tem-se que a capacidade disponível em um pacote de baterias é alterada, e normalmente limitada pela bateria com pior estado de saúde (Chatzinikolaou; Rogers, 2018). Portanto, o balanceamento do estado de saúde das baterias em um BESS é de grande importância, podendo estender o tempo de utilização das baterias e reduzir custos associados à manutenção e à substituições de baterias no BESS. Portanto, a falta de equilíbrio pode aumentar o custo operacional, ao mesmo tempo que poderá reduzir a vida útil de uma bateria (Wu et al., 2022b).

Em (Shi et al., 2017) os autores apresentam quatro métodos de balanceamento de estado de saúde, que provocam diferentes perfis de envelhecimento nos pacotes testados. O estudo publicado por (Shili et al., 2017) propõem a aplicação de diferentes tensões nas células, de forma a garantir diferentes taxas de degradação para equalizar o estado de saúde. O conversor modular multinível (MMC, do inglês *modular multilevel converter*) pode garantir uma melhor taxa de utilização da energia em baterias, e quando aprimorado pode ser utilizado para garantir um balanceamento de estado de saúde em células ou pacotes de baterias. Essa técnica é encontrada em (Yu et al., 2023; Ma et al., 2020; Ma et al., 2018). Já em (Wu et al., 2022b), é proposta uma técnica multiagente de balanceamento que utiliza um controlador central no balanceamento das células. Em (Fernandes, 2022; Fernandes et al., 2021) é realizado um comparativo entre técnicas de controle de carga/descarga e é discutido as implicações destas no tempo de vida do BESS. É apresentado ainda pelos

autores que dois grupos principais são encontrados na literatura para o controle de carga: estratégia de estado de carga adaptativo, que está ligado ao campo do gerenciamento de sobrecarga, e a estratégia de estado de saúde diretamente ligada ao campo de desgaste da bateria.

Em (Lazzarin; Barbi, 2012) os autores propõem um método *online* para diagnóstico do estado de saúde em baterias de chumbo ácido. O objetivo deste diagnóstico é obter análises periódicas da bateria, comparando com dados históricos de carregamento. O estudo realizado em (Fernandes, 2022; Araujo et al., 2019) apresenta um sistema de controle de carga/descarga de um BESS, onde é utilizado o conceito de baterias inteligentes. Nesta aplicação os autores apresentam um controlador central que verifica os estados das baterias, para garantir o máximo armazenamento de energia baseado na atual capacidade de cada bateria do BESS. Essa aplicação tem como vantagem a tomada de decisão baseada não somente no estado de carga, mas também no estado de saúde de cada bateria. Diferente das técnicas de balanceamento de estado de carga, que são amplamente apresentadas na literatura, o balanceamento de estado de saúde ainda carece de mais estudos focados no tema.

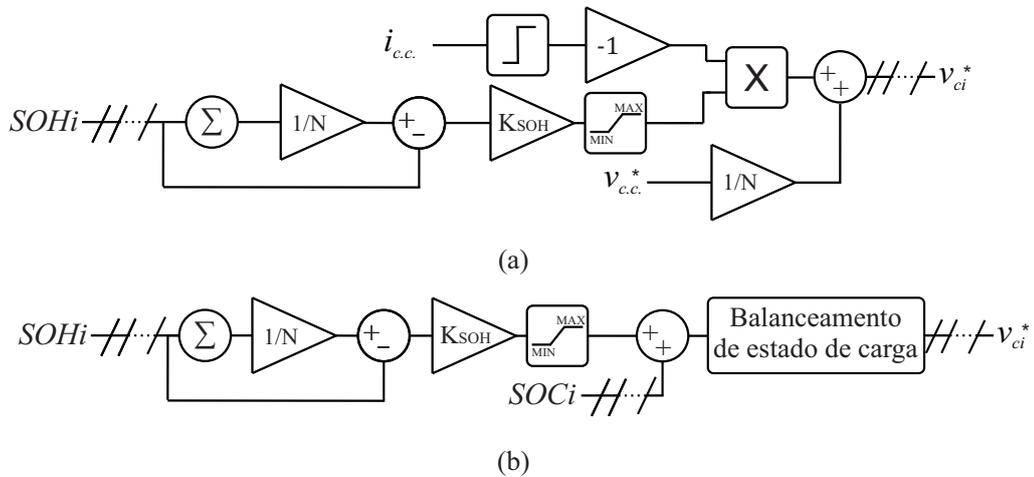
A técnica apresentada em (Dehghani; Hamzeh; Afjei, 2022) permite que o BESS equilibre o estado de carga, porém, é aplicado sem considerar o estado de saúde das baterias. Em baterias reais, realizar apenas o balanceamento do estado de carga garante um bom desempenho em condições em que os estados de saúde são iguais. Quando as baterias de segunda vida são consideradas, equilibrar o estado de carga ignorando o fator do envelhecimento é desvantajoso (Pant et al., 2023). Uma possibilidade para garantir a equalização de estado de saúde seria a simples troca de SOC_i pelo estado de saúde individual da bateria (SOH_i) no diagrama da Fig. 23, levando ao diagrama de blocos ilustrado na Fig. 36(a). No entanto, como o balanceamento estado de saúde é mais lento que o de estado de carga, levaria a uma alteração da tensão dos conversores por um período de operação muito longo. Tal abordagem, resulta que o estado de carga não será controlado, ou seja, nenhum mecanismo para limitar as excursões de estado de carga durante o tempo estará presente. Como resultado, esta abordagem revelou-se inadequada nas simulações. Esta característica faria com que as baterias do BESS atingissem níveis de estado de carga elevados ou baixos.

5.2 Técnica de balanceamento de estado de saúde em cascata

A fim de equilibrar o estado de saúde sem perder o controle do estado de carga, uma nova técnica de balanceamento de estado de saúde em cascata é apresentada neste trabalho. Nesta técnica, o SOH_i é subtraído do estado de saúde médio das baterias do

BESS (SOH_{avg}), como mostrado na figura 36(b). O resultado é usado como uma entrada de um controlador proporcional que calcula o desvio do estado de carga necessário para levar ao balanceamento de estado de saúde. Este método se fundamenta no modelo de vida útil mostrado na equação (3.1), em que o \overline{SOC} da bateria afeta sua degradação. Portanto, pode-se manter o estado de carga desbalanceado de forma controlada, garantindo assim no longo prazo o balanceamento de estado de saúde.

Figura 36 – Estratégias de balanceamento (a) de estado de saúde, análoga à apresentada em (Qahouq, 2016) para o balanceamento de estado de carga; e (b) de estado de saúde em cascata, proposta neste trabalho.



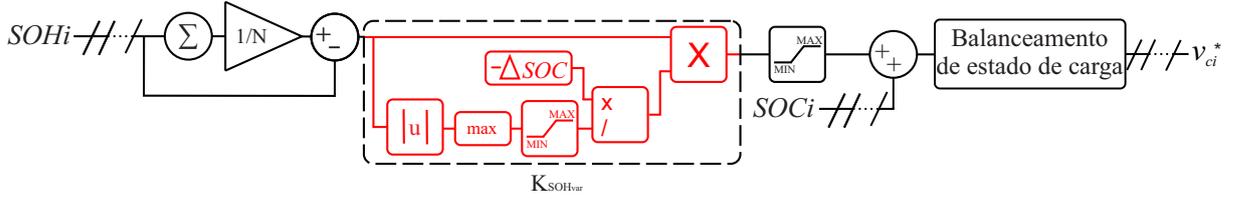
Fonte: Elaborado pelo Autor.

No bloco de balanceamento de estado de carga, ilustrado na Fig. 36(b), é possível empregar as técnicas discutidas no capítulo anterior. Neste caso, o desvio de estado de carga máximo pode ser definido e o balanceamento de estado de saúde pode ser alcançado sem atingir limites físicos (por exemplo, estado de carga máximo e mínimo para uma determinada bateria). Assim, as baterias mais degradadas permanecerão com SOC_i maior do que as baterias menos degradadas. Esta diferença será reduzida à medida que o SOH_i se aproxime de SOH_{avg} . O ganho do controlador de estado de saúde é calculado por:

$$K_{SOH} = -\frac{\Delta SOC}{\Delta SOH}, \quad (5.1)$$

em que seu valor dependerá de um limite de variação do estado de carga (ΔSOC), definido pelo projetista, e da diferença do estado de saúde inicial do BESS (ΔSOH). Na escolha do ganho pode-se empregar um ganho fixo ou variável, de forma análoga ao que foi discutido no Capítulo 4, entretanto não será realizada uma modelagem matemática. A Fig. 37 apresenta o controlador de estado de saúde com ganho variável que será implementado neste trabalho.

Figura 37 – Técnica de balanceamento de estado de saúde com ganho variável.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nesta condição de ganho variável, o ganho pode ser calculado por:

$$K_{SOHvar} = -\frac{\Delta SOC}{\Delta SOH_{i,max}}, \quad (5.2)$$

onde, $\Delta SOH_{i,max}$ é a máxima diferença instantânea entre SOH_i e SOH_{avg} no BESS. Assim, o valor de K_{SOHvar} irá aumentar a medida que essa diferença for diminuindo.

A temperatura é outro fator que pode contribuir para a degradação do estado de saúde das baterias do BESS, conforme abordado no Capítulo 3. Devido à técnica em cascata direcionar maior fluxo de potência ativa para as baterias menos degradadas, ocorre um aumento desigual de temperatura nessas células. Embora se possa inferir que esse efeito potencialize o equilíbrio do estado de saúde, destaca-se que esse impacto não será considerado no estudo de caso conduzido neste capítulo. Adicionalmente, assim como no Capítulo 4, os erros oriundos das estimativas dos estados da bateria não serão contemplados, uma vez que se pressupõe que essas estimativas já foram realizadas.

Para comparar diferentes técnicas de balanceamento, este trabalho emprega como figura de mérito a capacidade de armazenamento de energia $W_r(t)$ do banco de baterias. Tal métrica pode ser aproximada por:

$$W_r(t) = \sum_{i=0}^N v_{b,i} C_{n,i} (1 - C_{f,i,total}) \approx 12 \sum_{i=0}^N C_{n,i} (1 - C_{f,i,total}), \quad (5.3)$$

onde uma tensão constante da bateria de 12 V foi assumida.

5.3 Estudo de caso

Os dados das baterias utilizadas neste capítulo são os mesmos apresentados na seção 4.6, em que a Fig.27 representa os parâmetros iniciais das baterias. Os ganhos aplicados aos controladores serão calculados com base em (4.3), (4.26) e (5.2). O perfil de corrente a ser implementado também é o mesmo implementado na seção 4.6. Neste estudo de caso serão apresentados cinco cenários de simulação para o BESS. O tempo de simulação neste estudo de caso é de vinte mil horas, o que corresponde a uma operação de aproximadamente dois anos e três meses. O valor de ΔSOC adotado para todas as simulações é de 15%, esse valor foi implementado no cálculo do ganho. Dentre os cinco

cenários de simulação utilizados, o primeiro utiliza a técnica de balanceamento de estado de carga com ganho variável implementada no Capítulo 4. Já os demais cenários utilizam a técnica em cascata apresentada neste capítulo. Com o objetivo de facilitar o entendimento e escrita do trabalho, os cenários de simulação a serem utilizados serão chamados:

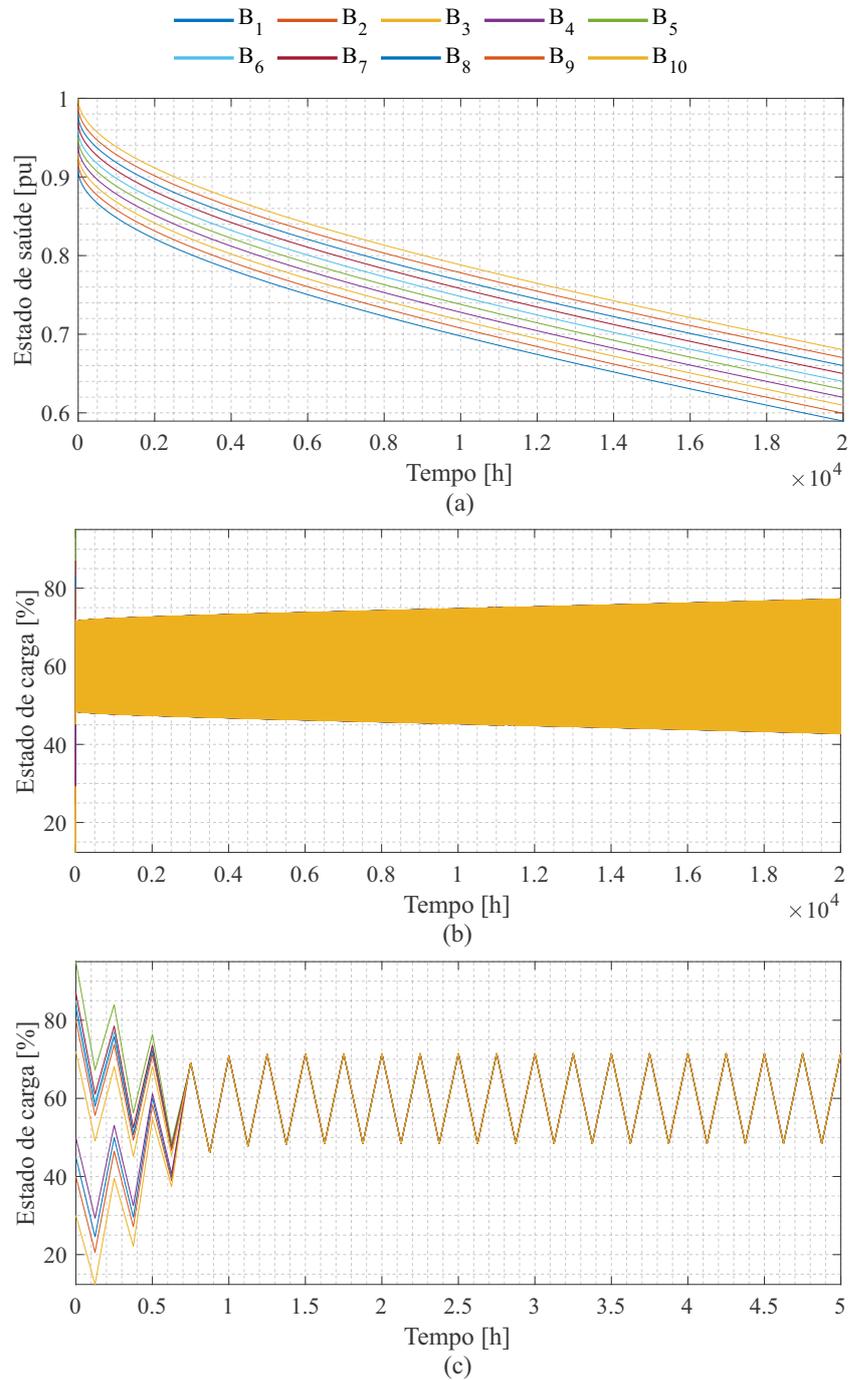
- 1° cenário: simulação em que é utilizado o balanceamento de estado de carga com ganho variável calculado por (4.26);
- 2° cenário: simulação em que é utilizado o balanceamento de estado de saúde com ganho do balanceamento calculado por (5.2) e ganho do controlador de estado de carga calculado por (4.3);
- 3° cenário: simulação em que é utilizado o balanceamento de estado de saúde com ganho dez vezes maior que o calculado por (5.2) e ganho do controlador de estado de carga calculado por (4.3);
- 4° cenário: simulação em que é utilizado o balanceamento de estado de saúde com ganho variável e ganho do controlador de estado de carga calculado por (4.3);
- 5° cenário: simulação em que é utilizado o balanceamento de estado de saúde com ganho variável e ganho do controlador de estado de carga calculado por (4.26);

5.4 Resultados e discussões

O 1° cenário de simulação é apresentado na Fig. 38. A Fig. 38(a) apresenta o comportamento do estado de saúde das dez baterias durante a simulação. Neste 1° cenário de balanceamento de estado de carga não ocorre balanceamento de estado de saúde nas baterias, permanecendo diferente em todo intervalo de simulação. Na Fig. 38(b) é apresentado o comportamento de estado de carga nas baterias neste cenário de simulação. Neste caso ocorre o balanceamento de estado de carga, e o cd do circuito vai aumentando à medida que a bateria vai degradando, isso se dá pelo fato de a capacidade das baterias estarem reduzindo. Já a Fig. 38(c) apresenta o comportamento deste cenário nas cinco primeiras horas de simulação.

A Fig. 39 apresenta o resultado do balanceamento de estado de saúde no 2° cenário de simulação. Na Fig. 39(a) é possível verificar que ocorre uma aproximação do estado de saúde das baterias do BESS. No entanto, por ser um sistema muito lento, o balanceamento do estado de saúde não ocorreu dentro do período de simulação. Na Fig. 39(b) é apresentado o comportamento do SOC_i das baterias. Nesta figura, é possível verificar o desbalanceamento do estado de carga, causado pelo controlador de estado de saúde. Ainda é possível verificar que o maior valor aplicado para balanceamento não excede o valor de ΔSOC definido para (5.2). Já a Fig. 39(c) apresenta um detalhe das primeiras

Figura 38 – 1º cenário de simulação: (a) estado de saúde, (b) estado de carga nas baterias e (c) visualização ampliada do estado de carga.

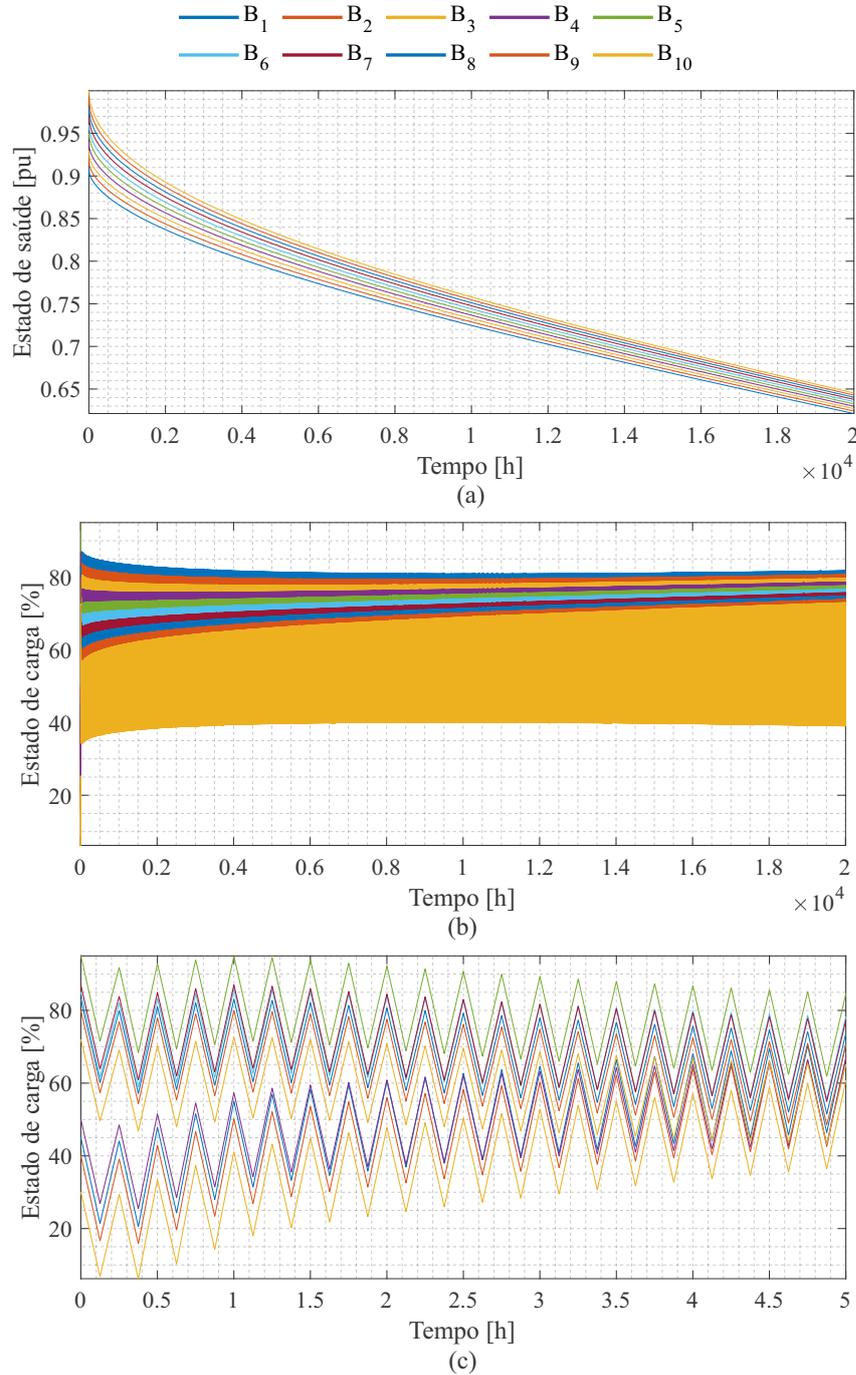


Fonte: Elaborado pelo Autor.

cinco horas de simulação, onde é possível verificar a mudança de estado de carga inicial, momento em que o controlador de estado de saúde começa a atuar no circuito.

Os resultados do 3º cenário de simulação são demonstrados na Fig. 40. A Fig. 40(a) apresenta o comportamento do estado de saúde no BESS. Nesta figura, é possível verificar o balanço do estado de saúde a partir de aproximadamente seis mil horas de simulação. O comportamento do estado de carga no 3º cenário é apresentado na Fig. 40(b), neste é

Figura 39 – 2º cenário de simulação: (a) estado de saúde, (b) estado de carga nas baterias e (c) visualização ampliada do estado de carga.

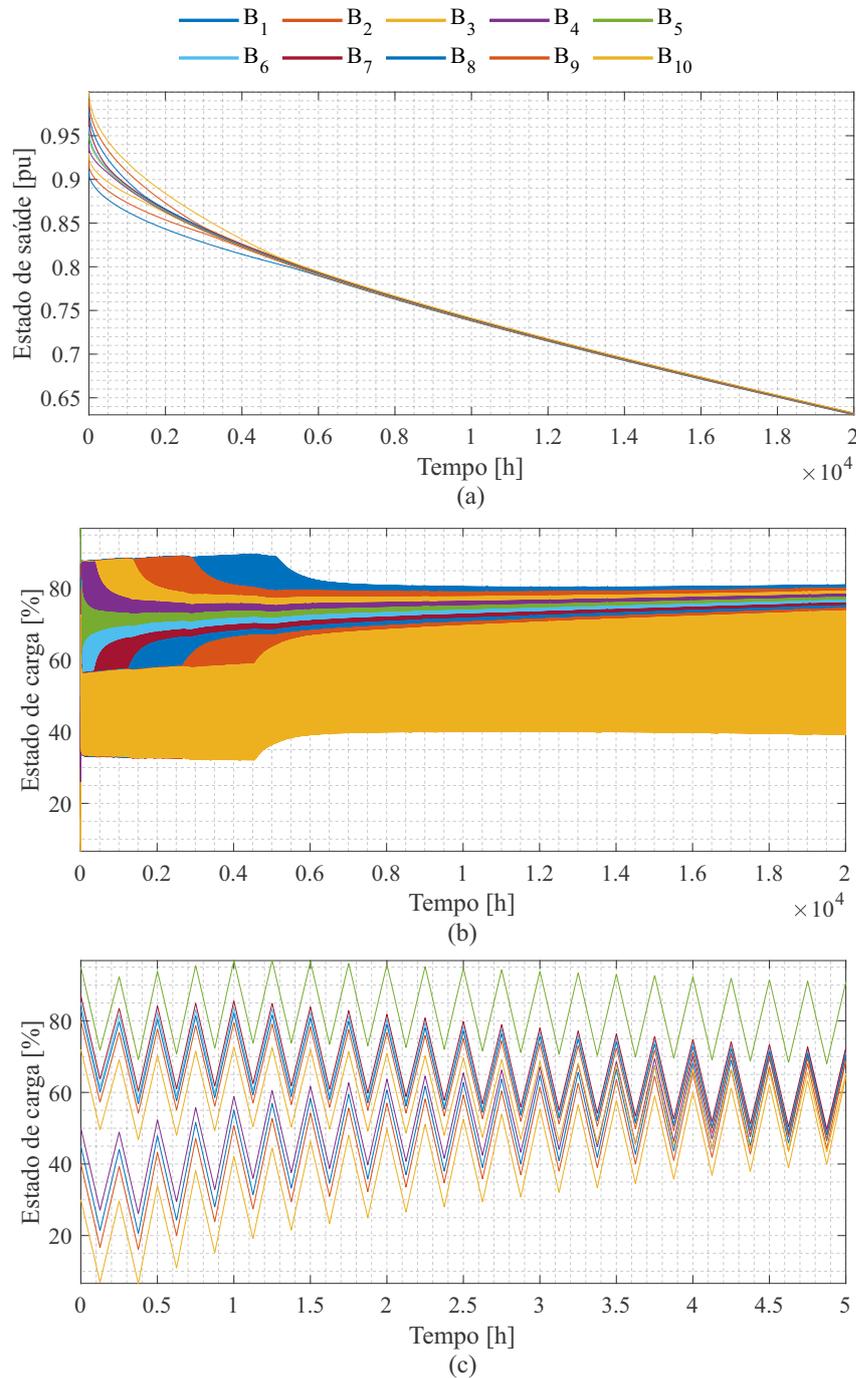


Fonte: Elaborado pelo Autor.

possível observar que o estado de carga máximo de desbalanceamento ocorre no BESS e esse desequilíbrio permanece até que o balanceamento do estado de saúde ocorra em seis mil horas. A partir deste ponto, os estados de carga das baterias tendem a se aproximar de SOC_{avg} . Para melhor visualizar o comportamento inicial da simulação é apresentado na Fig. 40(c) um detalhe das primeiras cinco horas de simulação.

A Fig. 41 apresenta o resultado do 4º cenário de simulação. A Fig. 41(a) exhibe o

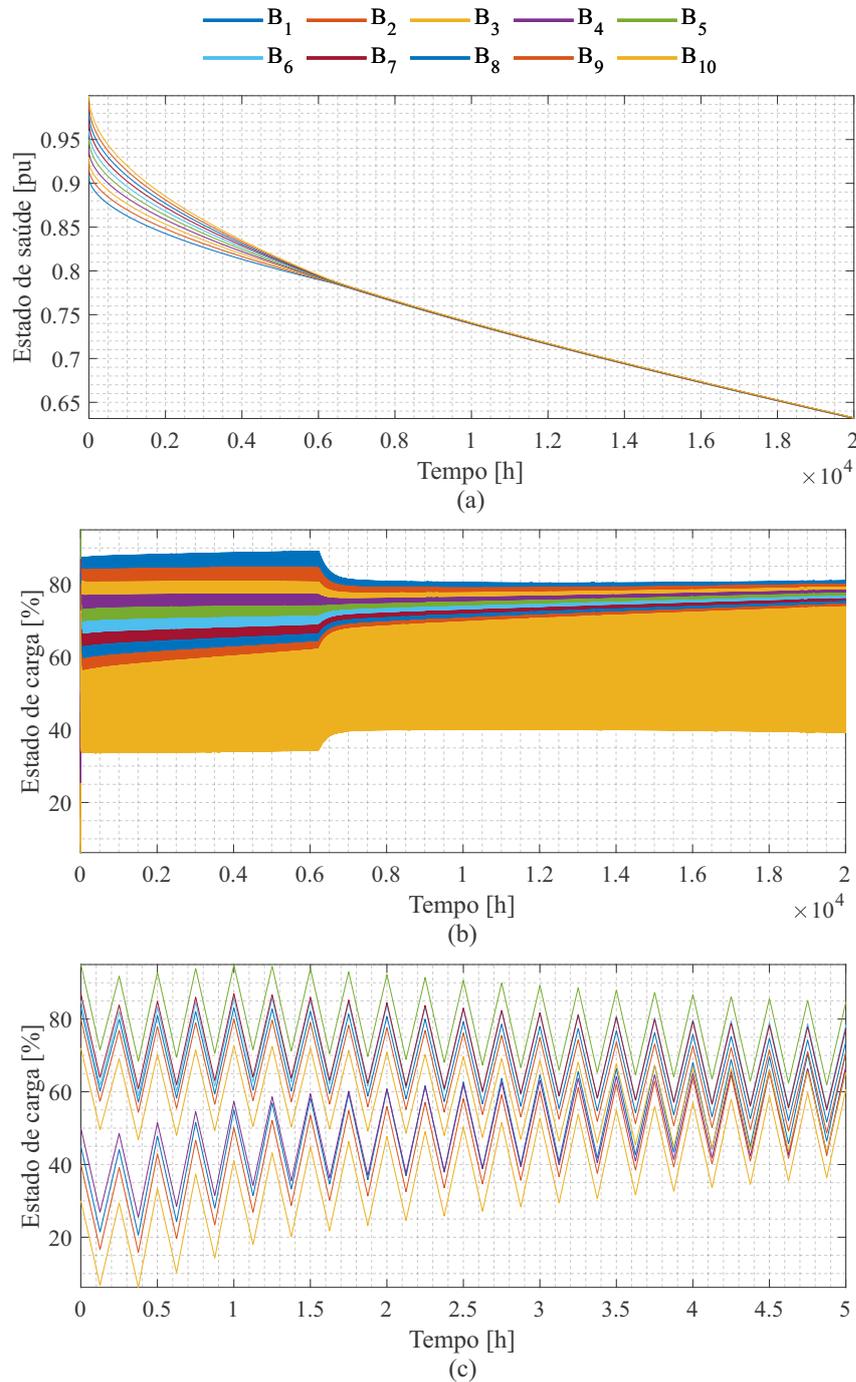
Figura 40 – 3º cenário de simulação: (a) estado de saúde, (b) estado de carga nas baterias e (c) visualização ampliada do estado de carga.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

comportamento do estado de saúde das baterias simuladas. Neste cenário de simulação o balanceamento de estado de saúde ocorre em aproximadamente seis mil e quinhentas horas de simulação. Na Fig. 41(b) é apresentado o comportamento de estado de carga nas baterias. O estado de carga de uma bateria permanece saturado pelo ganho do controlador enquanto o estado de saúde das baterias estiver desbalanceado. Já a Fig. 41(c) apresenta o comportamento das cinco primeiras horas de simulação.

Figura 41 – 4º cenário de simulação: (a) estado de saúde, (b) estado de carga nas baterias e (c) visualização ampliada do estado de carga.

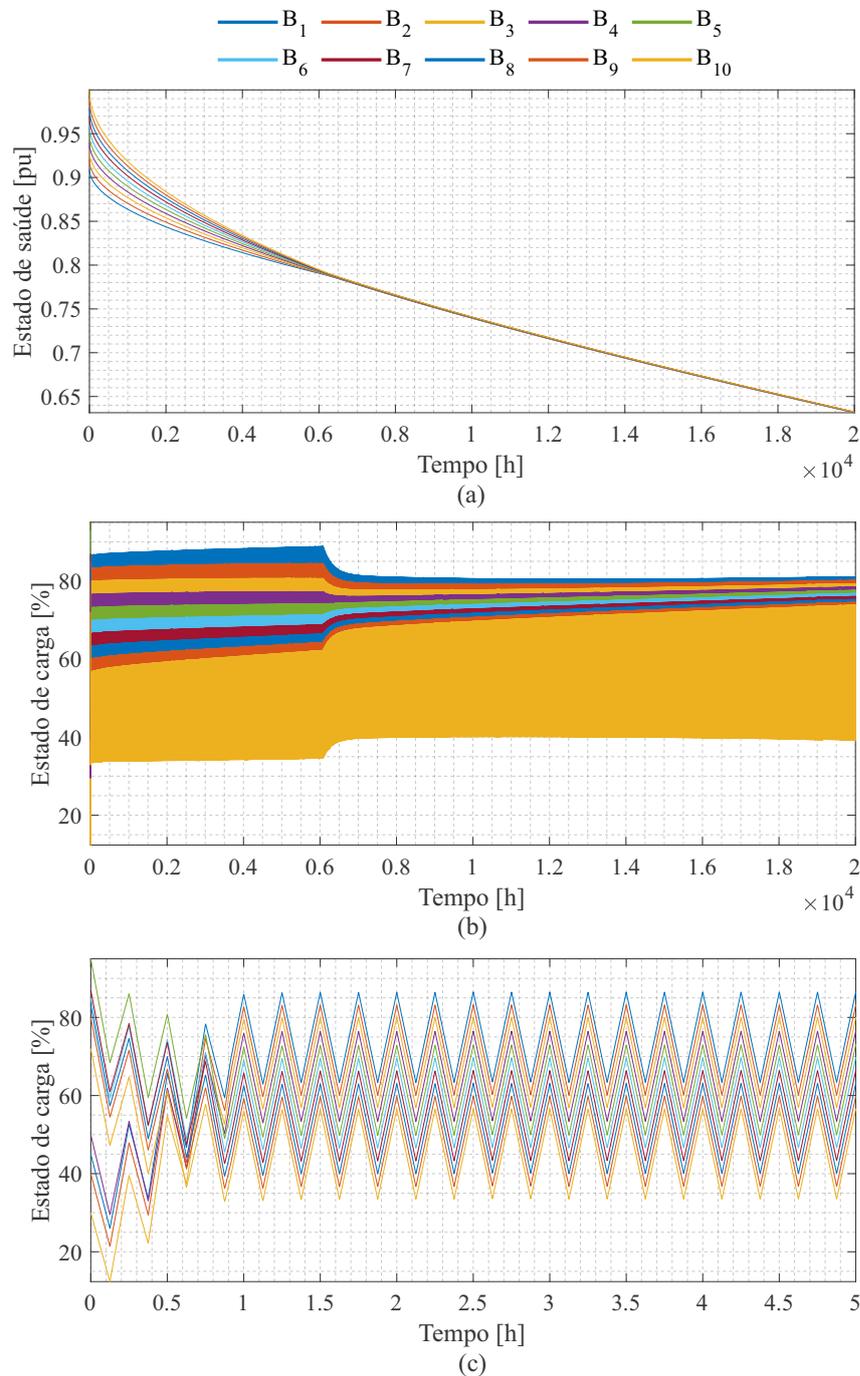


Fonte: Elaborado pelo Autor.

O 5º cenário de simulação é apresentado pela Fig. 42. Na Fig. 42(a) é apresentado o comportamento de estado de saúde nas baterias. Neste cenário o balanceamento ocorre em aproximadamente seis mil horas de simulação. A Fig. 42(b) apresenta o comportamento do estado de carga nas baterias, e da mesma forma que nas outras técnicas de balanceamento de estado de saúde ocorre um desbalanceamento de estado de carga, para que o estado de saúde venha a se balancear. Já a Fig. 42(c) apresenta um detalhe das cinco primeiras

horas de simulação. Nessa técnica o desbalanceamento de estado de carga ocorre mais rápido devido ao ganho variável aplicado ao controlador de estado de carga.

Figura 42 – 5º cenário de simulação: (a) estado de saúde, (b) estado de carga nas baterias e (c) visualização ampliada do estado de carga.

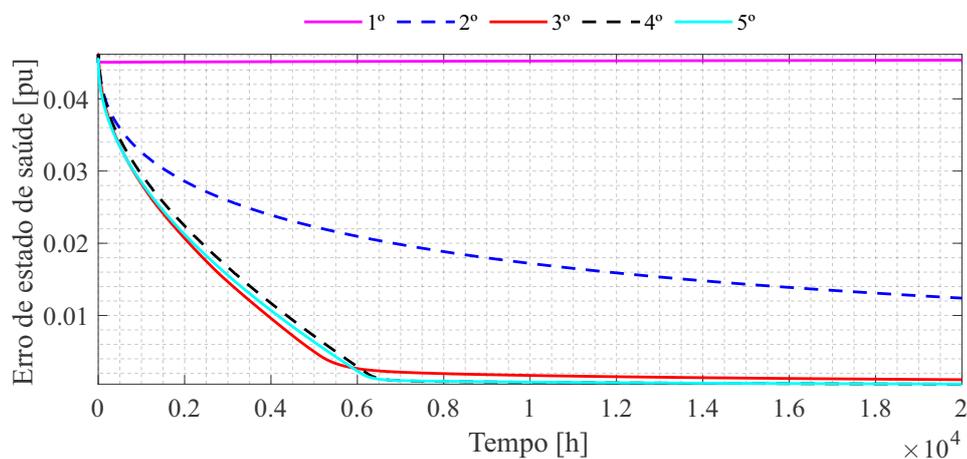


Fonte: Elaborado pelo Autor.

A partir dos resultados apresentados, para o estudo de caso apresentado, é possível observar que a técnica de balanceamento de estado de carga é mais rápida que as técnicas de balanceamento de estado de saúde. Entretanto, em uma aplicação sem balanceamento de estado de saúde o envelhecimento das baterias ocorre mais rapidamente, quando

comparado com uma aplicação com balanceamento de estado de saúde. A Fig. 43 apresenta o erro entre a bateria com o pior estado de saúde e o SOH_{avg} . Nesta figura é possível verificar que a diferença do estado de saúde no 1º cenário não é reduzido com o tempo de simulação. O comportamento do 2º cenário é de redução do erro de estado de saúde, contudo por se tratar de uma técnica mais lenta, o erro não chega a zero até o fim da simulação. Já os comportamentos nos três últimos cenários são parecidos, em que o 3º apresenta balanceamento mais rápido, porém um erro em regime permanente maior. O comportamento do 4º e 5º possuem erro em regime permanente próximos à zero. O erro em regime encontrado nos dois últimos cenários é menor que o erro em regime encontrado no 3º cenário. Contudo o 5º cenário apresenta um tempo de balanceamento ligeiramente menor.

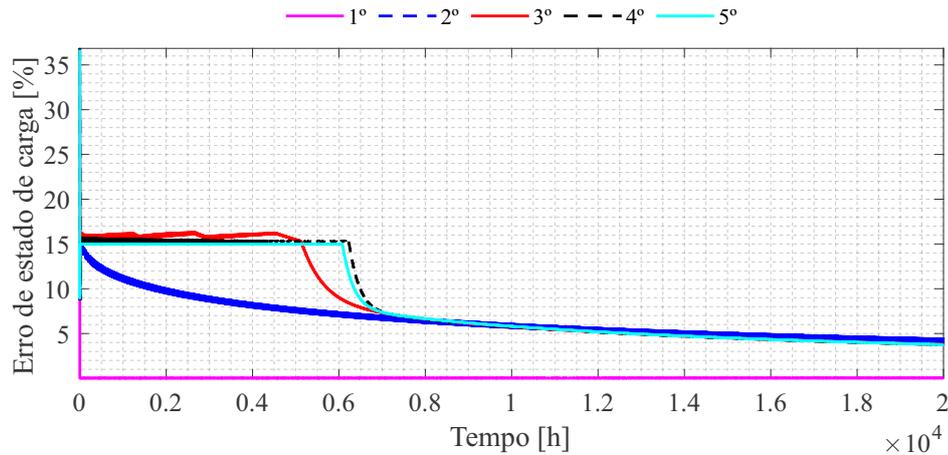
Figura 43 – Máximo erro de estado de saúde em cada técnica.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como esperado, o balanceamento do estado de saúde faz com que o BESS desequilibre o estado de carga, de modo que a degradação ocorre de forma diferente em cada bateria. A Fig. 44 apresenta o comportamento do erro de estado de carga máximo entre as baterias do BESS e o SOC_{avg} . Em oposição ao comportamento apresentado na Fig. 43, o 1º cenário apresenta um erro de estado de carga praticamente nulo em regime permanente. Já o 2º apresenta um comportamento exponencial do estado de carga, em que o estado de carga é forçado a um erro de 15%, que vai diminuindo a medida que o estado de saúde vai balanceando. Os três últimos cenários apresentam em seu gráfico de estado de carga um erro saturado até determinado tempo, depois, visto que não há mais saturação do ganho, o comportamento torna-se exponencial e os quatro últimos cenários tendem a se aproximar em regime permanente. Outro ponto a ser observado está relacionado ao erro de estado de carga permanecer diferente de zero mesmo após o balanceamento de estado de saúde. Isso ocorre devido ao pequeno erro de estado de saúde em regime permanente, e esse erro é suficiente para garantir a ação de controle do balanceamento de estado de saúde.

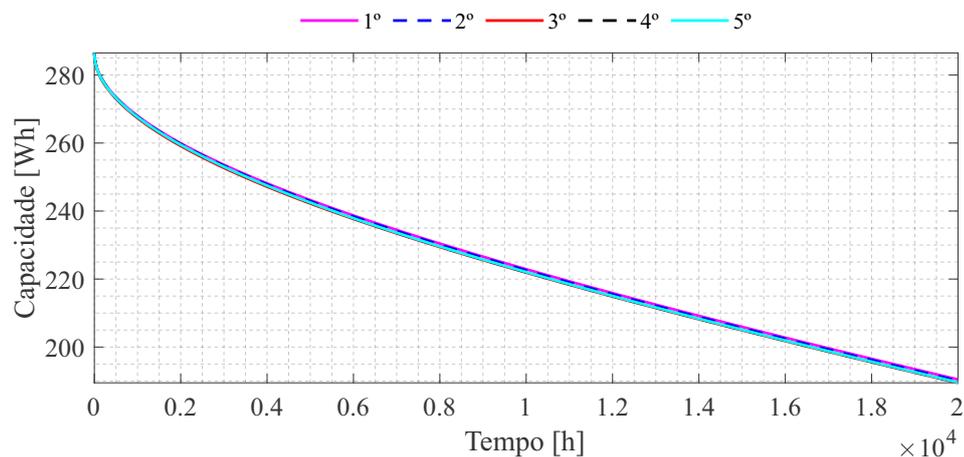
Figura 44 – Máximo erro de estado de carga em cada técnica.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Uma dúvida que pode surgir está relacionada a perda de capacidade global do BESS. De fato no balanceamento de estado de saúde algumas baterias são forçadas a se degradarem mais rápido que outras. Porém, como apresentado na Fig. 45 a perda global de capacidade no BESS é semelhante em todos os cenários simulados. Assim demonstra-se que as técnicas de balanceamento estado de saúde não causam impacto negativo na capacidade do BESS. E para fins de operação, o BESS com baterias com estado de saúde próximos possui maior segurança que baterias onde não se tem o controle do estado de saúde.

Figura 45 – Comparativo da perda de capacidade em cada técnica.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Finalmente, a Tabela 5 apresenta um comparativo entre os cinco cenários de teste. Esse comparativo leva em conta o número de horas necessárias em cada cenário para que a pior bateria atinja o EOL, definido em $SOH_i = 0.7pu$. A segunda coluna da tabela indica o tempo, em horas, necessário para que a bateria com o pior estado de carga inicial na simulação alcance o EOL. Esse valor é maior nas estratégias de balanceamento de estado de saúde. A terceira coluna destaca que, nas estratégias de balanceamento de estado de

saúde, a bateria pode ter uma duração até 36% maior do que na técnica que utiliza apenas o balanceamento de estado de carga.

Tabela 5 – O tempo necessário, em horas, e o percentual em relação ao pior caso, para que a bateria com a maior degradação inicial atinja o EOL.

Simulação	Tempo	Percentual
1° cenário	9.811,75	100%
2° cenário	12.233,12	124%
3° cenário	13.322,87	135%
4° cenário	13.436,62	135%
5° cenário	13.436,37	136%

5.5 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foi apresentada uma breve revisão de literatura das técnicas utilizadas para realizar o balanceamento de estado de saúde de uma bateria. Por se tratar de um tema com menor acervo bibliográfico, a revisão de literatura se limitou a algumas poucas técnicas. Uma nova técnica de balanceamento de estado de saúde em cascata é apresentada. Essa técnica garante um balanceamento de estado de saúde com um *offset* no balanceamento de estado de carga apresentado no capítulo anterior. Um estudo de caso é apresentado a fim de se verificar o comportamento do balanceamento de estado de saúde em comparação com o balanceamento de estado de carga. Dentre os cenários apresentados, um realiza apenas o balanceamento de estado de carga, já os demais são variações do balanceamento em cascata apresentado. O 5° cenário foi o que apresentou melhor resultado de erro em regime permanente e tempo de balanceamento. A técnica empregada neste cenário de simulação utiliza o controlador com ganho variável para o balanceamento do estado de carga e um controlador semelhante para o balanceamento do estado de saúde, também com ganho variável. Por fim, uma tabela é apresentada com os dados de horas de simulação do BESS para que a primeira bateria atinja o EOL em cada cenário.

6 Conclusões

O presente trabalho demonstrou através das simulações realizadas que o desenvolvimento de modelos de degradação para baterias possibilita o estudo de técnicas de balanceamento de estados em baterias. O modelo desenvolvido permitiu representar a degradação de acordo com outros estudos encontrados na literatura. Através do modelo foi possível realizar simulações com tempo de vinte mil horas, e esse tempo só foi possível devido a implementação de um modelo médio para os conversores eletrônicos utilizados nas baterias inteligentes. Esse modelo médio permitiu a utilização de passo de simulação muito maior do que o implementado em simulações onde o comportamento chaveado dos semicondutores é considerado. Assim esse modelo permitiu a validação das técnicas de balanceamento propostas pelo estudo. Entre as técnicas de balanceamento de estado de carga validadas com o modelo analítico, a abordagem com ganho variável demonstrou ser cinco vezes mais ágil do que a técnica de balanceamento com ganho fixo apresentada na literatura, considerando a condição restritiva de que o barramento de corrente contínua não pode variar. Nesse contexto, se a opção for aumentar o ganho fixo para reduzir o tempo de balanceamento, é importante notar que o barramento de corrente contínua será impactado por uma variação de tensão significativa. Portanto, a escolha entre as abordagens de ganho variável ou fixo deve ser cuidadosamente ponderada, considerando as implicações na estabilidade do sistema.

Apesar de ser mais lento que o balanceamento de estado de carga, o balanceamento de estado de saúde proposto demonstrou grande vantagem no que diz respeito a sua aplicação. Isso se dá pelo fato de que o balanceamento de estado de saúde permite postergar a substituição das baterias implementadas no BESS. Com a aplicação do balanceamento do estado de saúde foi possível aumentar o número de ciclos da pior bateria implementada no estudo de caso. A implementação da metodologia de um controlador com ganho variável também se demonstrou interessante quando aplicada ao balanceamento de estado de saúde. Esse balanceamento ficou mais rápido do que o implementado com o ganho fixo. Outro ponto que pode ser observado é que o balanceamento de estado de saúde não reduziu a capacidade do BESS.

6.1 Propostas de continuidade

Para continuidade destes estudos, propõem-se:

- o estudo de técnicas de estimação de estados em baterias, uma vez que, durante o desenvolvimento deste trabalho, partiu-se do pressuposto de que esses estados são

conhecidos.

- a validação das técnicas de balanceamento de estado de carga e estado de saúde em *hardware in the loop* e experimentos práticos.
- a implementação das técnicas apresentadas em baterias inteligentes.
- a investigação das técnicas de balanceamento para implementação em outras químicas de baterias, como por exemplo a química de chumbo carbono, devido às variações existentes na estimativa de estados.
- avaliar a operação do arranjo de baterias inteligentes quando conectado a um PCS comercial.

Referências

Pant, Prashant and Hesse, Holger and Tanjavoru, Vivek Teja and Cornejo, Martin and Hamacher, Thomas and Perić, Vedran S. 33

Abareshi, M.; Sadeghi, E.; Naghibzadeh, Y.; Hamzeh, M.; Saif, M. A fast active cell balancing strategy for lithium-ion battery packs. In: *2023 IEEE 14th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*. 2023. p. 1–5. 30

ABSOLAR, A. B. de E. S. F. *Desafios da inversão de fluxo de energia na geração distribuída de energia solar*. 2023. Available in: <<https://www.absolar.org.br/noticia/desafios-da-inversao-de-fluxo-de-energia-na-geracao-distribuida-de-energia-solar/>>. 2

Akinyele, D.; Belikov, J.; Levron, Y. Battery storage technologies for electrical applications: Impact in stand-alone photovoltaic systems. *Energies*, v. 10, n. 11, 2017. ISSN 1996-1073. Available in: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/10/11/1760>>. 8

Araujo, L. S.; Fernandes, N. T. D.; Brandao, D. I.; Cardoso Filho, B. J. Smartbattery: An active-battery solution for energy storage system. In: *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*. 2019. p. 1–6. 52

Argyrou, M. C.; Christodoulides, P.; Kalogirou, S. A. Energy storage for electricity generation and related processes: Technologies appraisal and grid scale applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 94, p. 804–821, 2018. ISSN 1364-0321. Available in: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118304817>>. 7

Ati, M.; Sougrati, M. T.; Recham, N.; Barpanda, P.; Leriche, J.-B.; Courty, M.; Armand, M.; Jumas, J.-C.; Tarascon, J.-M. Fluorosulfate positive electrodes for Li-Ion batteries made via a solid-state dry process. *Journal of The Electrochemical Society*, The Electrochemical Society, Inc., v. 157, n. 9, p. A1007, jul 2010. Available in: <<https://dx.doi.org/10.1149/1.3457435>>. 8

Azadnia, A. H.; Onofrei, G.; Ghadimi, P. Electric vehicles lithium-ion batteries reverse logistics implementation barriers analysis: A TISM-MICMAC approach. *Resources, Conservation and Recycling*, Elsevier BV, v. 174, p. 105751, nov 2021. 3

Babu, P. S.; Ilango, K. Comparative analysis of passive and active cell balancing of Li ion batteries. In: *2022 Third International Conference on Intelligent Computing Instrumentation and Control Technologies (ICICICT)*. 2022. p. 711–716. 30

Bae, K.-c.; Choi, S.-c.; Kim, J.-h.; Won, C.-y.; Jung, Y.-c. LiFePO₄ dynamic battery modeling for battery simulator. In: *2014 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. 2014. p. 354–358. 20

Bai, D.; Yu, X.; Zhou, L.; Xue, W.; Li, G. Research on the market transaction mechanism of orderly charging of electric vehicles based on blockchain to participate in demand response. In: *2022 9th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA)*. 2022. p. 221–225. 1

- Barreras, J. *Practical Methods in Li-ion Batteries: for Simplified Modeling, Battery Electric Vehicle Design, Battery Management System Testing and Balancing System Control*. : Aalborg Universitetsforlag, 2017. (PhD Series, Faculty of Engineering and Science, Aalborg University). PhD supervisor: Assoc. Prof. Erik Schaltz, Aalborg University Assistant PhD supervisor: Senior Systems Eng. Søren Juhl Andreasen, Serenergy A/S Assoc. Prof. Maciej Jozef Swierczynski, Aalborg University. 10, 11
- Bhat, C.; Channegowda, J. Investigating accurate electrochemical battery models for intermittent discharge applications. In: *2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE)*. 2022. p. 1–5. 19
- Bouchareb, H.; Saqli, K.; M'Sirdi, N. K.; Oudghiri, M. Observer design for SOC estimation of Li-ion batteries based on electro-thermal coupled model. In: *2021 9th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*. 2021. p. 1–6. 18
- Broussely, M.; Biensan, P.; Bonhomme, F.; Blanchard, P.; Herreyre, S.; Nechev, K.; Staniewicz, R. Main aging mechanisms in Li ion batteries. *Journal of Power Sources*, v. 146, n. 1, p. 90–96, 2005. ISSN 0378-7753. Selected papers presented at the 12th International Meeting on Lithium Batteries. Available in: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775305005082>>. 20
- Callegari, J. M. S.; Cupertino, A. F.; Ferreira, V. d. N.; Pereira, H. A. Minimum DC-link voltage control for efficiency and reliability improvement in PV inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 36, n. 5, p. 5512–5520, 2021. 33
- Chatrunga, N. Battery energy storage system (BESS) and development of grid scale BESS in EGAT. In: *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)*. 2019. p. 589–593. 7
- Chatzakis, J.; Kalaitzakis, K.; Voulgaris, N.; Manias, S. Designing a new generalized battery management system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 50, n. 5, p. 990–999, 2003. 12
- Chatzinikolaou, E.; Rogers, D. J. Performance evaluation of duty cycle balancing in power electronics enhanced battery packs compared to conventional energy redistribution balancing. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 33, n. 11, p. 9142–9153, 2018. 51
- Chen, C.; Liu, Y.; Usef, R. E.; Koenig, M.; Spanos, C. Allocation of battery energy storage systems (BESS) to mitigate FIDVR in the con edison transmission systems. In: *2023 IEEE PES GTD International Conference and Exposition (GTD)*. 2023. p. 44–49. 7
- Chen, G.; Liu, Z.; Su, H.; Zhang, Q. Electrochemical model based state of charge estimation for lithium batteries with backstepping techniques. In: *2019 Chinese Control Conference (CCC)*. 2019. p. 697–702. 19
- Chikezie, U.; Chen, Z. Literature review of energy storage for power system economics. In: *2020 IEEE 3rd International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE)*. 2020. p. 67–72. 8
- Chowdhury, S. M.; Haque, M. E.; Elrayyah, A.; Sozer, Y.; De Abreu-Garcia, J. A. An integrated control strategy for state of charge balancing with output voltage control of a series connected battery management system. In: *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2018. p. 6668–6673. 13

- Cifuentes, N.; Rahmann, C.; Valencia, F.; Alvarez, R. Network allocation of BESS with voltage support capability for improving the stability of power systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 13, n. 6, p. 939–949, 2019. Available in: <<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/iet-gtd.2018.6265>>. 7
- Corrêa, T. P.; Maia, T. A. C.; Cardoso Filho, B. J. High-performance power electronic battery pack based on a back-to-back converter. *Energies*, v. 16, n. 1, 2023. ISSN 1996-1073. Available in: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/1/375>>. 30, 31
- Coutinho, B. de A. *Implementação de uma bateria inteligente baseada no conversor c.c./c.c. boost*. Thesis (monography) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG, jun 2023. Trabalho de Conclusão de Curso, CEFET-MG. 5, 12, 14
- Dantas, N. K. L.; Souza, A. C. M.; Vasconcelos, A. S. M.; Junior, W. d. A. S.; Rissi, G.; Dall’Orto, C.; Maciel, A. M. A.; Castro, J. F. C.; Liu, Y.; Rosas, P. Impact analysis of a battery energy storage system connected in parallel to a wind farm. *Energies*, v. 15, n. 13, 2022. ISSN 1996-1073. Available in: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/13/4586>>. 7
- Dehghani, M.; Hamzeh, M.; Afjei, E. Decentralized battery charger with high precision active equalization capability. In: *2022 12th Smart Grid Conference (SGC)*. 2022. p. 1–6. 32, 52
- Devi, B.; Kumar, V. S. Lithium-ion battery management system: A review. In: *2022 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS)*. 2022. p. 1–6. 10
- EPE, E. de pesquisa E. *Balanco Energético Nacional 2023*. 2023. Available in: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>>. 2
- Faiz, M.; Lee, M.; Kang, E.; Choi, H.; Jonghoon, K. Integrating centralized and decentralized battery management systems using smart cell technology for enhanced battery safety. In: *2023 11th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2023 - ECCE Asia)*. 2023. p. 3126–3131. 10
- Faranda, R. S.; Fumagalli, K.; Bielli, M. Lithium-ion batteries for explosive atmosphere. In: *2019 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe (PCIC EUROPE)*. 2019. p. 1–7. 10
- Fernandes, N. T. D. *Estratégias de comando para o controle de carregadores modulares de baterias*. Thesis (Tese) — Universidade Federal de Minas Gerais - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, sep 2022. 2, 51, 52
- Fernandes, N. T. D.; Rocha, A.; Brandao, D.; Filho, B. C. Comparison of advanced charge strategies for modular cascaded battery chargers. *Energies*, v. 14, n. 12, 2021. ISSN 1996-1073. Available in: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/12/3361>>. 51
- Hemavathi, S. Modeling of analog battery management system for single cell lithium ion battery. *Energy Storage*, v. 3, n. 4, p. e208, 2021. Available in: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/est2.208>>. 11
- Hussein, A. A.-H.; Batarseh, I. An overview of generic battery models. In: *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. 2011. p. 1–6. 20

- IEA. *Global EV Outlook 2023*. 2023. IEA, Paris. Available in: <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>>. 1
- Inácio, G. A. *Sistema de armazenamento de energia baseado em baterias inteligentes e na utilização de um conversor buck-boost não-inversor*. Thesis (monography) — Universidade Federal de Viçosa - UFV, dec 2022. 5, 14
- Jung, S.; Jung, H.-Y. Charge/discharge characteristics of Li-ion batteries with two-phase active materials: a comparative study of LiFePO₄ and LiCoO₂ cells. *International Journal of Energy Research*, v. 40, n. 11, p. 1541–1555, 2016. Available in: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.3540>>. 9
- Kandarattil, V.; Nema, R. K.; Ojha, A. Various types of wireless battery management system in EV. In: *2020 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*. 2020. p. 1–5. 10
- Kulkarni, A.; Teodorescu, R. Closed-loop control of MOSFET gate voltage for charge balance in a smart Li-ion battery cell. In: *2023 11th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2023 - ECCE Asia)*. 2023. p. 1396–1402. 14
- Kumar, P.; Balasingam, B.; Rankin, G.; Pattipati, K. R. Battery thermal model identification and surface temperature prediction. In: *IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2021. p. 1–6. 18, 19
- Lawder, M. T.; Suthar, B.; Northrop, P. W. C.; De, S.; Hoff, C. M.; Leitermann, O.; Crow, M. L.; Santhanagopalan, S.; Subramanian, V. R. Battery energy storage system (BESS) and battery management system (BMS) for grid-scale applications. *Proceedings of the IEEE*, v. 102, n. 6, p. 1014–1030, 2014. 8
- Lazzarin, T. B.; Barbi, I. A system for state-of-health diagnosis of lead-acid batteries integrated with a battery charger. *Brazilian Journal of Power Electronics*, v. 17, n. 1, p. 401–408, feb 2012. 52
- Lee, Y.-S.; Cheng, M.-W.; Yang, S.-C.; Hsu, C.-L. Individual cell equalization for series connected lithium-ion batteries. *IEICE transactions on communications*, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, v. 89, n. 9, p. 2596–2607, 2006. 5
- Li, M.; Dong, C.; Mu, Y.; Dong, X.; Cao, J.; Jia, H. Parameter estimation of lithium battery thermal model based on two-stage forgetting factor least square method. In: *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2021. p. 1718–1723. 18
- Li, R.; Wang, Z.; Yu, J.; Lei, Y.; Zhang, Y.; He, J. Dynamic parameter identification of mathematical model of lithium-ion battery based on least square method. In: *2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*. 2018. p. 1–5. 20
- Li, Y.; Han, Y. Power electronics integration on battery cells. In: *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014*. 2014. p. 3318–3322. 13, 14
- Li, Y.; Han, Y. Control of input-series and output-independent power converter building block system based on buck converter topology. In: *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2015. p. 422–429. 13

- Li, Y.; Han, Y. Evaluation of a module-integrated distributed battery energy storage system. In: *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2015. p. 1351–1358. 4, 31, 33
- Li, Y.; Han, Y. Used-battery management with integrated battery building block system. In: *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2015. p. 3177–3182. 3, 4, 12
- Li, Y.; Han, Y. A module-integrated distributed battery energy storage and management system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 31, n. 12, p. 8260–8270, 2016. 14, 32
- Liu, S.; Forsyth, A.; Todd, R. Battery loss modelling using equivalent circuits. In: *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2019. p. 2478–2484. 17
- López-Granados, I.; Sosa, J. M.; Vázquez, G.; López, A. R.; Langarica, D. A brief review of battery model parameter identification methods. In: *2021 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*. 2021. v. 5, p. 1–6. 17
- Ma, Z.; Gao, F.; Gu, X.; Li, N.; Wu, Q.; Wang, X.; Wang, X. Multilayer SOH equalization scheme for MMC battery energy storage system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 35, n. 12, p. 13514–13527, 2020. 51
- Ma, Z.; Hao, T.; Gao, F.; Li, N.; Gu, X. Enhanced SOH balancing method of MMC battery energy storage system with cell equalization capability. In: *2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2018. p. 3591–3597. 51
- Maia, T. A. C.; Kattel, M. B. E.; Corrêa, T. P.; Rocha, A. V.; FILHO, B. J. C. Battery energy management proposition for energy storage using active dc–dc converter. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, v. 50, n. 12, p. 4325–4341, 2022. Available in: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cta.3397>>. 13, 15
- Mallik, A.; Khaligh, A. Maximum efficiency tracking of an integrated two-staged AC–DC converter using variable DC-link voltage. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 65, n. 11, p. 8408–8421, 2018. 33
- Mandal, S. K.; Bhojwani, P. S.; Mohanty, S. P.; Mahapatra, R. N. Intellbatt: Towards smarter battery design. In: *2008 45th ACM/IEEE Design Automation Conference*. 2008. p. 872–877. 12, 13
- Marin-Garcia, G.; Vazquez-Guzman, G.; Sosa, J.; Lopez, A. R.; Martinez-Rodriguez, P.; Langarica, D. Battery types and electrical models: A review. In: *2020 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*. 2020. v. 4, p. 1–6. 17
- Miguel, E.; Plett, G. L.; Trimboli, M. S.; Lopetegi, I.; Oca, L.; Iraola, U.; Bekaert, E. Electrochemical model and sigma point kalman filter based online oriented battery model. *IEEE Access*, v. 9, p. 98072–98090, 2021. 19
- Mishra, S.; Swain, S. C.; Samantaray, R. K. A review on battery management system and its application in electric vehicle. In: *2021 International Conference on Advances in Computing and Communications (ICACC)*. 2021. p. 1–6. 17
- Moussa, S.; Ben Ghorbal, M. J. Shepherd battery model parametrization for battery emulation in EV charging application. In: *2022 IEEE International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*. 2022. v. 4, p. 1–6. 20

- Muangjai, W.; Aroonchai, T.; Somsak, T.; Ngaodet, M.; Oranpiroj, K.; Thongpron, J. Analysis of the effect of charge and discharge LiFePO₄ batteries using BMS with and without active balancer. In: *2022 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*. 2022. p. 1–4. 8
- Nasr Esfahani, F.; Darwish, A.; Williams, B. W. Power converter topologies for grid-tied solar photovoltaic (PV) powered electric vehicles (EVs)—a comprehensive review. *Energies*, v. 15, n. 13, 2022. ISSN 1996-1073. Available in: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/13/4648>>. 2
- Nemes, R. O.; CIORNEI, S. M.; Ruba, M.; Martis, C. Parameters identification using experimental measurements for equivalent circuit lithium-ion cell models. In: *2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*. 2019. p. 1–6. 17
- Nizam, M.; Maghfiroh, H.; Rosadi, R. A.; Kusumaputri, K. D. U. Design of battery management system (BMS) for lithium iron phosphate (LFP) battery. In: *2019 6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*. 2019. p. 170–174. 10
- Paidi, R.; Gudey, S. K. Active and passive cell balancing techniques for Li-ion batteries used in EVs. In: *2022 IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON)*. 2022. p. 1–6. 30
- Pant, P.; Hesse, H.; Tanjavooru, V. T.; Cornejo, M.; Hamacher, T.; Perić, V. S. SoC-temperature based power sharing algorithm for battery racks in grid ancillary services. In: *2023 4th International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*. 2023. p. 422–427. 52
- Pereira, H. A. *Modeling of Full-converter Wind Turbine Generators for Power System Studies*. Thesis (Ph.D.) — UFMG, 2015. Available in: <<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1073D.PDF>>. 33
- Pinto, J. H. D. G. *Modeling design and performance evaluation of battery energy storage systems based on modular multilevel converter*. Thesis (Tese) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, jun 2022. 5, 8, 9, 15, 18, 22, 24
- Pinto, J. H. D. G.; Amorim, W. C. S.; Cupertino, A. F.; Pereira, H. A.; Junior, S. I. S.; Teodorescu, R. Optimum design of MMC-based ES-STATCOM systems: The role of the submodule reference voltage. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 57, n. 3, p. 3064–3076, 2021. 33
- Pushpalatha, N.; Banu, G.; JAGATAP, G. V.; Sivaranjani, S.; Shinde, Y.; UMA, J. A complete appraisal of various emerging battery technology along with its own attributes. In: *2023 9th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*. 2023. v. 1, p. 2072–2076. 8
- Qahouq, J. A. *Distributed Battery Power Electronics architecture and Control*. 2016. US Patent 9,368,991 B2. 10, 53
- Rath, S.; Hoedemaekers, E.; Wilkins, S. Core temperature estimation for a cylindrical cell battery module. In: *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. 2020. p. 1–10. 18

- Rybárik, M.; Bracinić, P.; Kajanová, M. Overview of the usability of second-life batteries in smart distribution grids. In: *2022 ELEKTRO (ELEKTRO)*. 2022. p. 1–4. 4
- Sangwongwanich, A.; Yang, Y.; Sera, D.; Soltani, H.; Blaabjerg, F. Analysis and modeling of interharmonics from grid-connected photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 33, n. 10, p. 8353–8364, 2018. 33
- Sarin, C. R.; Mani, G. An intelligent BMS with probabilistic MO-GSA based CDMAS integrating edge controller analytics. *IEEE Access*, v. 10, p. 115802–115814, 2022. 10
- Shi, Y.; Smith, K.; Zane, R.; Anderson, D. Life prediction of large lithium-ion battery packs with active and passive balancing. In: *2017 American Control Conference (ACC)*. 2017. p. 4704–4709. 51
- Shili, S.; Hijazi, A.; Sari, A.; Lin-Shi, X.; Venet, P. Balancing circuit new control for supercapacitor storage system lifetime maximization. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 32, n. 6, p. 4939–4948, 2017. 51
- Sihvo, J.; Roinila, T.; Messo, T.; Stroe, D.-I. Novel online fitting algorithm for impedance-based state estimation of Li-ion batteries. In: *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2019. v. 1, p. 4531–4536. 18
- Silveira, J. P. C.; dos Santos Neto, P. J.; MOURA, B. C.; Ruppert Filho, E.; BARROS, T. A. dos S. Power management with BMS to modified interlinking converter topology in hybrid AC/DC microgrid. *Energy Reports*, v. 9, p. 1743–1765, 2023. ISSN 2352-4847. Available in: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722026804>>. 11
- Silvestri, L.; Santis, M. D.; Bella, G. A preliminary techno-economic and environmental performance analysis of using second-life EV batteries in an industrial application. In: *2022 6th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA)*. 2022. p. 99–102. 4
- Stanciu, T.; Stroe, D.-I.; Teodorescu, R.; Swierczynski, M. Extensive EIS characterization of commercially available lithium polymer battery cell for performance modelling. In: *2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*. 2015. p. 1–10. 17
- Stroe, D.-I. *Lifetime Models for Lithium Ion Batteries used in Virtual Power Plants*. Thesis (Master) — Aalborg Universitet, 2014. 9, 20, 21
- Tran, N. T.; Vilathgamuwa, M.; Farrell, T.; Choi, S. S.; Li, Y.; Teague, J. A computationally-efficient electrochemical-thermal model for small-format cylindrical lithium ion batteries. In: *2018 IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC)*. 2018. p. 1–7. 19
- Viswanathan, V. V.; Kintner-Meyer, M. Second use of transportation batteries: Maximizing the value of batteries for transportation and grid services. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 60, n. 7, p. 2963–2970, 2011. 3
- Wey, C.-L.; Jui, P.-C. A unitized charging and discharging smart battery management system. In: *2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*. 2013. p. 903–909. 4

- Wu, L.; Pang, K.; Zheng, Y.; Huang, P.; Chen, Y. A multi-module equalization system for lithium-ion battery packs. *International Journal of Energy Research*, v. 46, n. 3, p. 2771–2782, 2022. Available in: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.7344>>. 29
- Wu, Q.; Zhu, X.; Liu, L.; Yu, S.; Chen, Y. SOH balancing scheme of distributed battery energy storage system in AC microgrid based on improved droop control. In: *2022 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA)*. 2022. p. 516–523. 51
- Xia, Z.; Abu Qahouq, J. A. Evaluation of parameter variations of equivalent circuit model of lithium-ion battery under different SOH conditions. In: *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2020. p. 1519–1523. 17
- Xia, Z.; Abu Qahouq, J. A. State-of-charge balancing of lithium-ion batteries with state-of-health awareness capability. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 57, n. 1, p. 673–684, 2021. 29
- Yu, H.; Xiao, Q.; Jin, Y.; Mu, Y.; Li, W.; Yan, F.; Guo, S.; Jia, H. A two-step modulated model predictive control scheme for the MMC-based battery energy storage system with SOH balancing ability. In: *2023 IEEE International Conference on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE)*. 2023. p. 1–6. 51
- Yu, L.-R.; Hsieh, Y.-C.; Liu, W.-C.; Moo, C.-S. Balanced discharging for serial battery power modules with boost converters. In: *2013 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*. 2013. p. 449–453. 14
- Zhang, X.; HOU, J.; WANG, Z.; Jiang, Y. Joint SOH-SOC estimation model for lithium-ion batteries based on GWO-BP neural network. *Energies*, v. 16, n. 1, 2023. ISSN 1996-1073. Available in: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/1/132>>. 5
- Zhang, Z.; Zhang, L.; Hu, L.; Huang, C. Active cell balancing of lithium-ion battery pack based on average state of charge. *International Journal of Energy Research*, v. 44, n. 4, p. 2535–2548, 2020. Available in: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.4876>>. 30
- Zhao, B.; Yang, W.; Jiang, H.; Xu, X.; Lyu, C. A temperature simulation model of battery thermal management system based on distributed parameters. In: *2022 Global Reliability and Prognostics and Health Management (PHM-Yantai)*. 2022. p. 1–5. 19

Biografia



Jonathan Silva de Oliveira recebeu seu Bacharelado de Engenheiro Eletricista pelo Centro Universitário do Leste de Minas Gerais (UNILESTE), em 2017. Especializou-se em Gestão da Automação Industrial pelo Centro Universitário Internacional (UNINTER), em 2019; em Indústria 4.0 pelo Centro Universitário Internacional (UNINTER), em 2020. Atua desde 2018 como Instrutor de Formação Profissional na instituição SENAI-MG (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial). Seus principais interesses de pesquisa incluem sistemas de armazenamento de energia em baterias, técnicas de balanceamento de estados em baterias, métodos inteligentes de otimização e fontes renováveis de energia.

E-mail: jonathan-silva-oliveira@hotmail.com

LinkedIn: <https://www.linkedin.com/in/jonathan-silva-de-oliveira-97249739>