

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA ELÉTRICA
– PPGPEE

ANTONIO CARLOS WALT

AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS CC E REFLEX APLICADOS A
CARGA E DESCARGA DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

JOINVILLE

2024

ANTONIO CARLOS WALT

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS CC E REFLEX APLICADOS A
CARGA E DESCARGA DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Joselito Anastácio Heerdt

JOINVILLE

2024

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Universitária Udesc,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Walt, Antonio Carlos

Avaliação comparativa entre os métodos CC e Reflex
aplicados a carga e descarga de baterias de íons de lítio /
Antonio Carlos Walt. -- 2024.

183 p.

Orientador: Joselito Anastácio Heerdt

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa
de Pós-Graduação Profissional em Engenharia Elétrica,
Joinville, 2024.

1. Carga CC. 2. Reflex. 3. Baterias de lítio. 4. Conversor
Buck reversível em corrente. 5. Módulo BMS. I. Heerdt,
Joselito Anastácio. II. Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de
Pós-Graduação Profissional em Engenharia Elétrica. III.
Título.

ANTONIO CARLOS WALT

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS CC E REFLEX APLICADOS A
CARGA E DESCARGA DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Joselito Anastácio Heerd

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Joselito A Heerd
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membros:

Prof. Dr. Gierri Waltrich
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Dr. Sergio V. G. Oliveira
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Joinville, 29 de Julho de 2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, pelo apoio e compreensão em minha jornada acadêmica, principalmente durante o período de desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço ao meu orientador pela orientação prestada durante o desenvolvimento do trabalho, e também por ceder a placa para a construção do conversor eletrônico.

Ao nPEE, por disponibilizar toda a estrutura laboratorial, assim como parte dos componentes utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

A FAPESC por oferecer a bolsa de pesquisa que permitiu o início do desenvolvimento das atividades de pesquisa.

Aos companheiros e amigos do nPEE.

Ao Programa de Pós-Graduação Profissional da UDESC, pelo conhecimento.

A Deus.

"Não deixe que seus medos tomem o lugar dos
seus sonhos."(WALT DISNEY)

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo comparativo para carga e descarga de baterias de lítio pelo método convencional por corrente constante ou CC e o método não convencional Reflex. Estes métodos apresentam diferentes estratégias para o processo de carga, onde as abordagens mais comuns aplicam formas de onda de corrente contínua e permitem projetos de conversores mais simples e de menor custo, enquanto os métodos não convencionais, como o método Reflex, em que a corrente de carga apresenta ao menos três estágios de diferentes amplitudes, com uma etapa mais longa de transferência de energia para bateria, uma etapa com um pulso de descarga seguido por um pulso de relaxamento. Para aplicação desta técnica de carregamento, é desenvolvido um conversor Buck reversível em corrente, o qual permite o fluxo de potência fluir da fonte para as baterias e das baterias para a fonte com o método de carga e descarga Reflex. Para a aquisição dos dados, é utilizado um módulo BMS junto às baterias, conectado à saída do conversor, para aquisição dos dados de tensão, corrente e temperatura. O trabalho aborda o estudo de fatores como tempo de carregamento, energia armazenada, assim como avaliação de possíveis efeitos causados pelos métodos de carga CC e Reflex após ciclos de carga e descarga, analisando os efeitos de desequilíbrio e também possíveis limitações causadas a um conjunto de baterias pela não utilização de um sistema de equalização adequado durante o processo de carga. Os resultados apresentam um estudo comparativo para os experimentos práticos com o método Reflex aplicado à frequência de 1Hz e o método CC, assim como os resultados para avaliação comparativa com o método CC-CV. Com os testes práticos verifica-se que o método Reflex na frequência de 1Hz não apresenta melhorias a curto prazo quando comparado ao método de carregamento por corrente constante quando avaliados fatores como a relação entre energia armazenada durante a carga e fornecida durante a descarga das baterias e em efeitos de desequilíbrio entre as tensões no conjunto de baterias.

Palavras-chave: Carga CC; Reflex; Baterias de lítio; conversor Buck reversível em corrente; Módulo BMS.

ABSTRACT

This paper presents a comparative study for charging and discharging lithium batteries using the conventional constant current or CC method and the unconventional Reflex method. These methods present different strategies for the charging process, where the most common approaches apply direct current waveforms and allow for simpler and lower cost converter designs, while unconventional methods, such as the Reflex method, in which the charging current presents at least three stages of different amplitudes, with a longer stage of energy transfer to the battery, a stage with a discharge pulse followed by a relaxation pulse. To apply this charging technique, a reversible current Buck converter is developed, which allows the power flow to flow from the source to the batteries and from the batteries to the source with the Reflex charging and discharging method. For data acquisition, a BMS module is used next to the batteries, connected to the converter output, to acquire voltage, current and temperature data. The work addresses the study of factors such as charging time, stored energy, as well as the evaluation of possible effects caused by the CC and Reflex charging methods after charge and discharge cycles, analyzing the effects of imbalance and also possible limitations caused to a set of batteries by not using an adequate equalization system during the charging process. The results present a comparative study for practical experiments with the Reflex method applied at a frequency of 1 Hz and the CC method, as well as the results for a comparative evaluation with the CC-CV method. With the practical tests it is verified that the Reflex method at a frequency of 1 Hz does not present improvements in the short term when compared to the constant current charging method when evaluating factors such as the relationship between energy stored during charging and supplied during battery discharge and in the effects of imbalance between the voltages in the battery set.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Bateria estacionária chumbo-ácida.	34
Figura 2 – Modelo básico da estrutura de uma bateria de íons de sódio e seu funcionamento durante o processo de carga e descarga.	35
Figura 3 – Modelo para o funcionamento de uma bateria de íons de lítio. (a) Representação do modo de funcionamento para descarga. (b) Representação do modo de funcionamento para a carga.	36
Figura 4 – Comparativo de performance das baterias de íons de lítio.	38
Figura 5 – Modelo construtivo de uma bateria de estado sólido.	39
Figura 6 – Representação da bateria de íons de lítio modelada com a utilização de elementos passivos.	40
Figura 7 – Diagrama de Nyquist da relação impedância total pela frequência para baterias de íons de lítio.	41
Figura 8 – Representação da bateria chumbo-ácida modelada com a utilização de elementos passivos.	42
Figura 9 – Diagrama de Nyquist da relação impedância total pela frequência para baterias chumbo-ácidas.	42
Figura 10 – Ciclos de vida da bateria de LFP vs profundidade de descarga.	44
Figura 11 – Diagrama de Nyquist em função da temperatura ambiente da bateria: (a) Pontos das frequências para máxima e mínima reatância capacitiva e impedância puramente resistiva. (b) Variação das frequências para máxima e mínima reatância capacitiva e impedância puramente resistiva em função da temperatura. (c) Diagrama de Nyquist em função da temperatura.	45
Figura 12 – Efeitos da elevação de temperatura da bateria em função da temperatura ambiente e densidade de corrente. (a) Para o processo de carga. (b) Para o processo de descarga.	46
Figura 13 – Diagrama de Nyquist em função do estado de carga da bateria: (a) Pontos das frequências para a máxima e mínima reatância capacitiva e impedância puramente resistiva. (b) Variação das frequências para a máxima e mínima reatância capacitiva e impedância puramente resistiva em função do estado de carga. (c) Diagrama de Nyquist em função do estado de carga.	47
Figura 14 – Diagrama de Nyquist em função do estado de saúde da bateria: (a) Pontos das frequências para a máxima e mínima reatância capacitiva e impedância puramente resistiva. (b) Variação das frequências para máxima e mínima reatância capacitiva e impedância puramente resistiva em função do estado de saúde. (c) Diagrama de Nyquist em função do estado de saúde.	48
Figura 15 – Ciclos de vida da bateria chumbo-ácida vs profundidade de descarga.	49

Figura 16 – Comparação do efeito da temperatura de armazenamento para a vida útil da bateria chumbo-ácida, bateria de lítio e bateria de níquel-cádmio.	49
Figura 17 – Impedância espectroscópica da bateria chumbo-ácida com 100% de SOC :(a) Temperatura ambiente de 27 °C e taxa de carga de C/12. (b) Temperatura ambiente de 27 °C e taxa de carga de C/3. (c) Temperatura ambiente de 55 °C e taxa de carga de C/12. (d) Temperatura ambiente de 55 °C e taxa de carga de C/3.	50
Figura 18 – Impedância espectroscópica para o carregamento com temperatura de 25 °C e SOH 100% para diferentes SOC.(a) Diagrama de Nyquist (b) Diagrama de Nyquist ampliado.	51
Figura 19 – Carregamento por corrente constante.	52
Figura 20 – Carregamento por tensão constante.	53
Figura 21 – Carregamento por corrente constante e tensão constante.	54
Figura 22 – Carregamento por corrente pulsada com pulso positivo.	55
Figura 23 – Carregamento por corrente pulsada modulada: (a) Modulada em amplitude. (b) Modulada em largura. (c) Densidade total de corrente no período.	56
Figura 24 – Carregamento por corrente pulsada com amplitude modulada: (a) Corrente de carga em função do tempo para a primeira configuração do teste. (b) Densidade total de energia transferida em função do tempo para a primeira configuração do teste. (c) Corrente de carga em função do tempo para segunda configuração do teste. (d) Densidade total de energia transferida em função do tempo para a segunda configuração do teste.	57
Figura 25 – Carregamento por corrente pulsada com largura modulada: (a) Corrente de carga em função do tempo para primeira configuração do teste. (b) Densidade total de energia transferida em função do tempo para a primeira configuração do teste. (c) Corrente de carga em função do tempo para segunda configuração do teste. (d) Densidade total de energia transferida em função do tempo para a segunda configuração do teste.	58
Figura 26 – Módulo da impedância da bateria em função do espectro de frequência analisada até 10kHz.	59
Figura 27 – Carregamento por corrente pulsada com pulso negativo.	60
Figura 28 – Carregamento por corrente pulsada com pulso negativo sem período de relaxamento.	61
Figura 29 – Conversor Buck reversível em corrente.	62
Figura 30 – Modelo de operação do conversor BRC no plano tensão-corrente.	63
Figura 31 – Operação do conversor BRC no primeiro quadrante para o intervalo de tempo DTs.	63
Figura 32 – Operação do conversor BRC no primeiro quadrante para o intervalo de tempo (1-D)Ts.	64

Figura 33 – Operação do conversor BRC no segundo quadrante para o intervalo de tempo $(1-D)T_s$	64
Figura 34 – Operação do conversor BRC no segundo quadrante para o intervalo de tempo DT_s	64
Figura 35 – Formas de onda para operação no modo Buck com corrente positiva: (a) Comutação da chave S1. (b) Corrente na chave S1. (c) Corrente no indutor. (d) Corrente no diodo da chave S2. (e) Tensão no indutor. (f) Tensão no diodo da chave S2.	66
Figura 36 – Formas de onda para operação no modo Buck com corrente negativa: (a) Comutação da chave S2. (b) Corrente na chave S2. (c) Corrente no indutor. (d) Corrente no diodo da chave S1. (e) Tensão no indutor. (f) Tensão no diodo da chave S1.	68
Figura 37 – Diagrama do conversor BRC.	70
Figura 38 – Circuito eletrônico proposto do conversor BRC.	75
Figura 39 – Microcontrolador TMS320F28335.	76
Figura 40 – Circuito de potência do conversor.	76
Figura 41 – <i>Driver</i> SKHI20opa da SEMIKRON.	77
Figura 42 – Circuito de <i>driver</i> para o acionamento das chaves.	78
Figura 43 – Sensor de efeito <i>hall</i> LTSP25NP.	79
Figura 44 – Circuito de condicionamento de corrente.	79
Figura 45 – Circuito de condicionamento de tensão do barramento de entrada.	80
Figura 46 – Diagrama de blocos do controle de corrente.	80
Figura 47 – Modelo considerado para operação no modo Buck com corrente positiva.	81
Figura 48 – Modelo considerado para operação no modo Buck com corrente positiva: (a) Chave fechada. (b) Chave aberta.	82
Figura 49 – Modelo considerado para retida da planta de corrente.	83
Figura 50 – Diagrama de Bode da FTMA do conversor.	86
Figura 51 – Diagrama de Bode do controlador de corrente do conversor.	87
Figura 52 – Diagrama de Bode da FTMF do conversor.	87
Figura 53 – Circuito simulado do conversor BRC com a ferramenta PSIM®.	88
Figura 54 – Resultado de simulação da corrente do indutor de saída.	88
Figura 55 – Resultados de simulação da corrente no indutor e da tensão no capacitor do barramento de entrada.	89
Figura 56 – Placa de BMS para aquisição de dados das baterias.	90
Figura 57 – Diagrama de representação do BMS.	90
Figura 58 – Interface homem máquina para o <i>software</i> BqStudio®.	92
Figura 59 – Circuito eletrônico utilizado para o desenvolvimento da carga eletrônica.	94
Figura 60 – Bancada com o <i>setup</i> para os testes de carga com corrente constante utilizando o BMS.	95

Figura 61 – Bancada com o <i>setup</i> para os testes de descarga com corrente constante utilizando o BMS e carga eletrônica.	96
Figura 62 – Placa eletrônica do conversor T-NPC modificada para uso como carregador bidirecional.	98
Figura 63 – Corrente no indutor e tensão nas baterias na saída do conversor durante o processo de carga.	99
Figura 64 – Corrente no indutor e tensão nas baterias na saída do conversor durante o processo de descarga.	100
Figura 65 – Corrente no indutor na saída do conversor e tensão nos capacitores do barramento de entrada.	101
Figura 66 – Bancada para realização dos testes com o método Reflex.	101
Figura 67 – Carregamento do conjunto A de baterias para o método CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Tensão total do conjunto.	104
Figura 68 – Descarga do conjunto A de baterias para o método CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Tensão total do conjunto.	105
Figura 69 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo com o conjunto A de baterias para o método de carga CC: (a) Carga 1. (b) Carga 2. (c) Carga 3. (d) Carga 4. (e) Carga 5. (f) Carga 6. (g) Carga 7. (h) Carga 8. (i) Carga 9.	108
Figura 70 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo com o conjunto A de baterias para o método de descarga CC: (a) Descarga 1. (b) Descarga 2. (c) Descarga 3. (d) Descarga 4. (e) Descarga 5. (f) Descarga 6. (g) Descarga 7. (h) Descarga 8. (i) Descarga 9.	109
Figura 71 – Carregamento do conjunto A de baterias para o método Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Tensão total do conjunto.	111
Figura 72 – Descarga do conjunto A de baterias para o método Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Tensão total do conjunto.	112
Figura 73 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo com o conjunto A de baterias para o método Reflex: (a) Carga 1. (b) Carga 2. (c) Carga 3. (d) Carga 4. (e) Carga 5. (f) Carga 6. (g) Carga 7. (h) Carga 8. (i) Carga 9.	115
Figura 74 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo para o conjunto A de baterias com o método Reflex: (a) Descarga 1. (b) Descarga 2. (c) Descarga 3. (d) Descarga 4. (e) Descarga 5. (f) Descarga 6. (g) Descarga 7. (h) Descarga 8. (i) Descarga 9.	116

Figura 75 – Carregamento do conjunto A de baterias para o método CC-CV sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Corrente de carga. (c) Tensão total no conjunto.	118
Figura 76 – Descarga CC do conjunto A de baterias para o método de carregamento CC-CV sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Tensão total do conjunto.	119
Figura 77 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo com o conjunto A de baterias para o método CC-CV: (a) Carga 1 (b) Carga 2 . . .	120
Figura 78 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo com o conjunto A de baterias para o método de descarga CC: (a) Descarga 1 (b) Descarga 2	121
Figura 79 – Carregamento do conjunto B de baterias para o método CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Tensão total do conjunto	125
Figura 80 – Descarga CC do conjunto B de baterias para o método de carregamento CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Tensão total do conjunto.	126
Figura 81 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo com o conjunto B de baterias para o método CC: (a) Carga 1. (b) Carga 2. (c) Carga 3.	127
Figura 82 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo com o conjunto B de baterias para o método CC: (a) Descarga 1. (b) Descarga 2. (c) Descarga 3.	128
Figura 83 – Carregamento do conjunto B de baterias para o método Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Tensão total do conjunto.	129
Figura 84 – Descarga do conjunto B de baterias para o método Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Tensão total do conjunto.	130
Figura 85 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo com o conjunto B de baterias com o método Reflex: (a) Carga 1. (b) Carga 2. (c) Carga 3.	132
Figura 86 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo com o conjunto B de baterias com o método Reflex: (a) Descarga 1. (b) Descarga 2. (c) Descarga 3.	132
Figura 87 – Aproximação das curvas de descarga para cada bateria até a mínima tensão com o método de descarga CC para o teste de carregamento CC com o conjunto A de baterias.	134
Figura 88 – Aproximação das curvas de descarga para cada bateria até a mínima tensão com o método de descarga Reflex para o teste de carregamento Reflex com o conjunto A de baterias.	134

Figura 89 – Aproximação das curvas de descarga para cada bateria até a mínima tensão com o método de descarga CC para o teste de carregamento CC-CV com o conjunto A de baterias.	135
Figura 90 – Aproximação das curvas de descarga para cada bateria até a mínima tensão com o método de descarga CC para o teste de carregamento CC com o conjunto B de baterias.	136
Figura 91 – Aproximação das curvas de descarga para cada bateria até a mínima tensão com o método de descarga Reflex para o teste de carregamento Reflex com o conjunto B de baterias.	137
Figura 92 – Circuito completo com os blocos utilizados para geração do código com o <i>software</i> PSIM®.	147
Figura 93 – Circuito com os blocos utilizados para leitura da corrente no indutor vinda do sensor <i>hall</i> e da tensão no barramento.	148
Figura 94 – Bloco utilizado para configurar o conversor A/D: (a) Bloco do conversor A/D. (b) Janela de configuração do conversor A/D.	149
Figura 95 – Blocos para compensação do <i>offset</i> dos circuitos de condicionamento após a leitura do conversor A/D.	149
Figura 96 – Bloco com código C para definição dos limites de proteção de máxima tensão do barramento e corrente no indutor.	150
Figura 97 – Circuito com o bloco de leitura das entradas digitais.	150
Figura 98 – Circuito com o bloco de código C utilizado para gerar a referência de corrente.	151
Figura 99 – Código do bloco para gerar a referência de corrente.	152
Figura 100 – Circuito com o bloco de controle discretizado no espaço de estados e o bloco para o PWM complementar das chaves.	153
Figura 101 – Primeiro ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto	154
Figura 102 – Segundo ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto	155
Figura 103 – Terceiro ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto	155
Figura 104 – Quarto ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto	156
Figura 105 – Quinto ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto	156
Figura 106 – Sexto ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto	157
Figura 107 – Sétimo ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto	157

Figura 108–Oitavo ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	158
Figura 109–Nono ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	158
Figura 110–Primeiro ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	159
Figura 111–Segundo ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	159
Figura 112–Terceiro ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	160
Figura 113–Quarto ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	160
Figura 114–Quinto ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	161
Figura 115–Sexto ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	162
Figura 116–Sétimo ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	162
Figura 117–Oitavo ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	163
Figura 118–Nono ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	163
Figura 119–Primeiro ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	164
Figura 120–Segundo ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	165
Figura 121–Terceiro ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	165
Figura 122–Quarto ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	166
Figura 123–Quinto ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	166
Figura 124–Sexto ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	167
Figura 125–Sétimo ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	167
Figura 126–Oitavo ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	168

Figura 127–Nono ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	168
Figura 128–Primeiro ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	169
Figura 129–Segundo ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	169
Figura 130–Terceiro ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	170
Figura 131–Quarto ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	170
Figura 132–Quinto ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	171
Figura 133–Sexto ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	171
Figura 134–Sétimo ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	172
Figura 135–Oitavo ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	172
Figura 136–Nono ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	173
Figura 137–Primeiro ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	174
Figura 138–Segundo ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	175
Figura 139–Terceiro ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	175
Figura 140–Primeiro ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	176
Figura 141–Segundo ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	177
Figura 142–Terceiro ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	177
Figura 143–Primeiro ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	178
Figura 144–Segundo ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	179
Figura 145–Terceiro ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	179

Figura 146–Primeiro ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	180
Figura 147–Segundo ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	180
Figura 148–Terceiro ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a)Tensão individual nas baterias. (b)Tensão total no conjunto	181
Figura 149–Aplicação do degrau para validação do controle para operação com o método Reflex de carregamento.	182
Figura 150–Tabela de perdas no núcleo pela densidade de fluxo magnético CA.	183

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre baterias chumbo-ácidas e Lítio para sistemas UPS mono-fásicos para um período de 10 anos.	32
Tabela 2 – Comparação entre o carregamento CC-CV e o carregamento com corrente pulsada em $f_{zmin}=998\text{Hz}$	60
Tabela 3 – Comparação entre os métodos Reflex, CC-CV e CC a 1C e temperatura de 25°C	61
Tabela 4 – Esforços nos componentes para operação no modo Buck com corrente positiva.	67
Tabela 5 – Esforços nos componentes para a operação no modo Buck com corrente negativa.	69
Tabela 6 – Especificações para o projeto do conversor.	70
Tabela 7 – Elementos calculados para o projeto do conversor de potência.	71
Tabela 8 – Especificações do MOSFET IRFP4127 para junção a 75°C	71
Tabela 9 – Especificações do diodo SCS240KE2 para junção a 75°C	71
Tabela 10 – Esforços nos componentes calculados para o conversor Buck reversível em corrente.	72
Tabela 11 – Valores calculados para o projeto do conversor BRC.	72
Tabela 12 – Especificações técnicas do núcleo MMTS75T4015 Sendust.	73
Tabela 13 – Projeto do indutor.	74
Tabela 14 – Características das baterias de íons de lítio ICR18650 22P.	102
Tabela 15 – Conjuntos de baterias utilizados para os testes.	103
Tabela 16 – Resultados para o método de carregamento CC com as baterias do conjunto A.	106
Tabela 17 – Resultados para o método de descarga CC com as baterias do conjunto A . .	107
Tabela 18 – Períodos do sinal para os testes de carga Reflex para as baterias do conjunto A.	110
Tabela 19 – Resultados para o método de carregamento Reflex com as baterias do conjunto A.	113
Tabela 20 – Resultados para o método de descarga Reflex com as baterias do conjunto A.	114
Tabela 21 – Resultados para o método carga CC-CV com as baterias do conjunto A . . .	119
Tabela 22 – Resultados para o método de descarga CC com as baterias do conjunto A. .	120
Tabela 23 – Resultados para o método de carregamento CC com as baterias do conjunto A.	122
Tabela 24 – Resultados para o método de carregamento Reflex com as baterias do conjunto A.	123
Tabela 25 – Resultados para o método CC-CV com as baterias do conjunto A.	124
Tabela 26 – Características para as baterias do conjunto B	125
Tabela 27 – Resultados para o método de carregamento CC com o conjunto B de baterias.	126
Tabela 28 – Resultados para o método de descarga CC com o conjunto B de baterias. . .	127
Tabela 29 – Resultados para o método CC com as baterias do conjunto B	128
Tabela 30 – Resultados para o método de carregamento Reflex com o conjunto B de baterias	131

Tabela 31 – Resultados para o método de descarga Reflex com o conjunto B de baterias .	131
Tabela 32 – Resultados para o método Reflex com o conjunto de baterias B	133
Tabela 33 – Resultados para a predição da energia remanescente nas baterias 2 e 3 do conjunto A.	135
Tabela 34 – Resultados para predição da energia remanescente nas baterias 1 e 3 do conjunto B.	137

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	<i>Constant Current</i>
CC- CV	<i>Constant Current - Constant Voltage</i>
UPS	<i>Uninterrupted Power System</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
VRLA	<i>Valve Regulated Lead Acid</i>
SOC	<i>State of Charge</i>
SOH	<i>State of Health</i>
LLI	<i>Losing Litio Inventory</i>
LAM	<i>Losing of Active Material</i>
SEI	<i>Solid Electrolyte Interface</i>
ETC	Eletrotérmico
PAM	<i>Pulse Amplitude Modulation</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
NPC	<i>Negative Pulse Current</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
ADC	<i>Analogic Digital Converter</i>
SSE	<i>Solid State Electrolyte</i>
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
FTMA	Função de transferência em malha aberta
FTMF	Função de transferência em malha fechada
BRC	Buck reversível em corrente
CI	Circuito integrado
EIS	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

V_i	Tensão de entrada
V_o	Tensão de saída
R_o	Resistor no modelo da bateria com elementos passivos
R_{SEI}	Resistor da camada de eletrólito sólido no modelo da bateria com elementos passivos
C_{SEI}	Capacitor da camada de eletrólito sólido no modelo da bateria com elementos passivos
R_{ct}	Resistor de transferência de carga no modelo da bateria com elementos passivos
C_{ct}	Capacitor de transferência de carga no modelo da bateria com elementos passivos
Z_W	Impedância de Warbug no modelo da bateria com elementos passivos
I_m	Impedância reativa
T	Período entre os pulso de corrente
I_p	Amplitude do pulso positivo de corrente
I_n	Amplitude do pulso negativo de corrente
t_p	Duração do pulso positivo de corrente
t_n	Duração do pulso negativo de corrente
t_r	Duração do período de relaxamento
i_c	Densidade de corrente aplicada
t_o	Tempo total para que a densidade de corrente se torne nula.
f_{Zmin}	Frequência de mínima impedância
T_s	Período de comutação da chave
D_{int}	Diâmetro interno do núcleo
D_{ext}	Diâmetro externo do núcleo
A_e	Área transversal do núcleo
A_W	Área da janela do núcleo
V_e	Volume total do núcleo
H_n	Altura do núcleo
B	Permeabilidade magnética máxima permitida no núcleo
A_e	Área transversal do núcleo

IL	Valor médio da corrente no indutor
IL_{pos}	Valor médio da corrente positiva no indutor
ΔIL	Valor médio da ondulação de corrente no indutor
ΔIL_{pos}	Valor médio da ondulação de corrente positiva no indutor
ΔV_C	Valor médio da ondulação de tensão no capacitor
f_s	Frequência de comutação da chave
D	Razão cíclica
IL_{neg}	Valor médio da corrente negativa no indutor
IL_{med}	Valor médio da corrente no indutor
I_M	Valor máximo da corrente no indutor
I_m	Valor mínimo da corrente no indutor
IS_{med}	Valor médio da corrente na chave
IS_{ef}	Valor eficaz da corrente na chave
ID_{med}	Valor médio da corrente no diodo
VD_{med}	Valor médio da tensão no diodo
ID_{ef}	Valor eficaz da corrente no diodo
ID_{max}	Valor máximo da corrente no diodo
IL_{max}	Valor máximo da corrente de carga
P_o	Potência de saída
P_{in}	Potência de entrada
ΔIL_{max}	Valor máximo da ondulação de corrente no indutor
Vo_{max}	Valor máximo da tensão na carga
Vo_{min}	Valor mínimo da tensão na carga
D_{pos}	Razão cíclica máxima do conversor com corrente positiva
D_{neg}	Razão cíclica máxima do conversor com corrente negativa
C_{inmin}	Capacitância mínima de entrada
V_{DS}	Máxima tensão dreno-source no MOSFET
I_{Dmax}	Máxima corrente de dreno no MOSFET
R_{DSon}	Resistência em condução no MOSFET
V_{th}	Tensão de <i>threshold</i> no MOSFET
V_R	Máxima tensão reversa no diodo de entrada

t_{rr}	Tempo de recuperação reversa no diodo
V_F	Tensão direta no diodo
I_F	Máxima corrente direta no diodo
t_{cd}	Tempo de comutação no diodo
R_{jc}	Resistência térmica da junção-cápsula
A_e	Área da perna central do núcleo
A_w	Área da janela do núcleo
I_{pico}	Máxima corrente direta no diodo
L	Indutância
lm	comprimento do cabo
ρ_{pho}	Resistividade elétrica do cobre
S	Área do condutor de cobre
N_t	Número de espiras no indutor
P_w	Perdas no cobre
P_v	Perdas no núcleo
P_{uv}	Perdas por unidade de volume do núcleo
V_e	Volume do núcleo
S_{min}	Área mínima do condutor
D_{max}	Diâmetro máximo do condutor
S_{awg}	Diâmetro do condutor AWG
k	Fator de ocupação
μ_o	Permeabilidade magnética do ar
J_{max}	Densidade de corrente
AL	Indutância por espira ao quadrado
B_{max}	Máxima densidade magnética no núcleo do indutor
V_{Ref}	Tensão de referência para o controle de corrente
$I_{d(s)}$	Planta de corrente do conversor
$C(s)$	Controlador de corrente
$G_{PWM(s)}$	Ganho do PWM
G_{AD}	Ganho do conversor analógico digital
G_z	função de transferência em malha fechada discretizada.

LISTA DE SÍMBOLOS DE UNIDADES DE GRANDEZAS FÍSICAS

°C	Graus Celsius
%	Porcento
KWh	Kilowatt-hora
V	Volts
mV	milivolts
A	Ampère
mA	miliampère
W/Kg	Watt por Kilograma
Wh/Kg	Watt-hora por Kilograma
A/D	Analógico para digital
C	C Rate
ns	Nanosegundos
W	Watts
T	Tesla
H/m	Henry por metro
A/cm ²	Ampère por centímetro quadrado
mH	mili-henry
A/h	Ampère por hora
s	Segundos
min	Minutos
Z	Impedância
ω	Frequência em radianos
f	Frequência em Hertz
Ω	Resistência em ohms

LISTA DE SÍMBOLOS PARA REFERENCIAR ELEMENTOS DE CIRCUITO

S1	Chave 1 do modelo do conversor
D1	Diodo 1 do modelo do conversor
S2	Chave 2 do modelo do conversor
D2	Diodo 2 do modelo do conversor
L	Indutor
Din	Diodo na entrada do conversor
Rin	Resistor em paralelo na entrada do conversor
Cin	Capacitor em paralelo na entrada do conversor
Cout	Capacitor do filtro de saída do conversor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
2	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	31
2.1	BATERIAS	31
2.2	APLICAÇÕES DE BATERIAS	31
2.3	BATERIAS CHUMBO-ÁCIDAS	33
2.4	BATERIAS DE NÍQUEL CÁDMIO	34
2.5	BATERIAS DE NÍQUEL HIDRETO METÁLICO	34
2.6	BATERIAS DE ÍONS DE SÓDIO	35
2.7	BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO	35
2.8	BATERIAS DE ESTADO SÓLIDO	38
2.9	MODELAGEM DA BATERIA POR ELEMENTOS PASSIVOS	39
2.9.1	Bateria de íons de lítio	40
2.9.2	Bateria chumbo-ácida	41
2.10	ESTADO DE CARGA	42
2.11	ESTADO DE SAÚDE	43
3	EFEITOS DE FATORES EXTERNOS SOBRE AS BATERIAS	44
3.1	EFEITOS DE FATORES EXTERNOS SOBRE AS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO	44
3.1.1	Profundidade de descarga	44
3.1.2	Temperatura	44
3.1.3	Elevações de temperatura	46
3.1.4	Impedância em função do estado de carga	46
3.1.5	Impedância em função do estado de saúde	47
3.2	EFEITOS DE FATORES EXTERNOS SOBRE AS BATERIAS CHUMBO- ÁCIDAS	48
3.2.1	Profundidade de descarga	48
3.2.2	Temperatura	49
3.2.3	Impedância em função do estado de carga	51
4	MÉTODOS DE CARREGAMENTO DE BATERIAS	52
4.1	CORRENTE CONSTANTE	52
4.2	TENSÃO CONSTANTE	52
4.3	CORRENTE CONSTANTE E TENSÃO CONSTANTE	53
4.4	CORRENTE PULSADA	54
4.5	CARREGAMENTO COM CORRENTE PULSADA NA FREQUÊNCIA DE MENOR IMPEDÂNCIA	59

4.6	CORRENTE PULSADA COM PULSO NEGATIVO	60
5	CONVERSOR BIDIRECIONAL EM CORRENTE	62
5.1	CONVERSOR BUCK REVERSÍVEL EM CORRENTE	62
5.1.1	Equacionamento para operação no modo Buck com corrente positiva . .	65
5.1.2	Equacionamento para operação no modo Buck com corrente negativa .	67
5.2	PROJETO DO CONVERSOR BRC	69
5.2.1	Projeto do indutor	73
5.2.2	Circuito eletrônico do conversor	75
5.2.3	Microcontrolador TMS320F28335	75
5.2.4	Circuito de potência do conversor	76
5.2.5	Drivers	77
5.2.6	Condicionamento de corrente	79
5.2.7	Condicionamento de tensão	80
5.3	CONTROLE DE CORRENTE DO CONVERSOR BRC	80
5.3.1	Dedução da planta de corrente	81
5.3.2	Controle de corrente do conversor	84
5.3.2.1	<i>Requisitos para projeto do controle de corrente</i>	<i>84</i>
5.3.3	Modulador PWM e sensor de corrente	85
5.3.4	Controlador de corrente	85
5.3.5	Discretização do controle	87
5.4	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	88
5.5	SISTEMA BMS DE GERENCIAMENTO DE BATERIAS DE LÍTIO . . .	89
6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	94
6.1	BANCADA PARA OS TESTES COM O MÉTODO POR CORRENTE CONSTANTE	94
6.2	CONVERSOR ELETRÔNICO BRC	96
6.3	FORMAS DE ONDA DO CONVERSOR	99
6.4	BANCADA PARA OS TESTES COM O MÉTODO REFLEX	101
6.5	BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO PARA OS ENSAIOS DE CARGA E DESCARGA	102
6.6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA OS PROCESSOS DE CARGA E DESCARGA DAS BATERIAS	102
6.6.1	Carregamento CC para as baterias do conjunto A	103
6.6.2	Carregamento Reflex para as baterias do conjunto A	110
6.6.3	Carregamento CC-CV para as baterias do conjunto A	117
6.6.4	Avaliação comparativa entre os métodos CC, Reflex e CC-CV para as baterias do conjunto A	121

6.6.5	Estudo dos efeitos de baterias degradadas associadas em um conjunto .	124
6.6.6	Avaliação quantitativa da energia remanescente armazenada nas baterias com descarga incompleta	133
6.6.6.1	Estimativa da energia remanescente nas baterias durante o processo de descarga para os métodos de carregamento CC, Reflex e CC-CV para o conjunto A	133
6.6.6.2	Estimativa da energia remanescente nas baterias durante o processo de descarga para os métodos de carregamento CC e Reflex com o conjunto B .	136
7	CONCLUSÕES	138
7.1	TRABALHOS FUTUROS	139
	REFERÊNCIAS	141
	APÊNDICES	146
	APÊNDICE A – DIAGRAMA DE BLOCOS PARA O PROJETO DO CÓDIGO COM O SOFTWARE PSIM®	147
	APÊNDICE B – FORMAS DE ONDA PARA O MÉTODO DE CARGA E DESCARGA CC COM AS BATERIAS NOVAS DO CONJUNTO A.	154
	APÊNDICE C – FORMAS DE ONDA PARA MÉTODO DE CARGA E DESCARGA REFLEX COM AS BATERIAS NOVAS DO CONJUNTO A.	164
	APÊNDICE D – FORMAS DE ONDA PARA MÉTODO DE CARGA E DESCARGA CC COM AS BATERIAS DO CONJUNTO B.	174
	APÊNDICE E – FORMAS DE ONDA PARA MÉTODO DE CARGA E DESCARGA REFLEX COM AS BATERIAS DO CONJUNTO B.	178
	APÊNDICE F – AVALIAÇÃO DA RESPOSTA DO CONTROLE À APLICAÇÃO DO DEGRAU	182
	ANEXO A – TABELA PARA O CÁLCULO DAS PERDAS NO NÚCLEO MMTS75T4015 SENDUST	183

1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda energética vem se tornando cada vez maior, acompanhado por um crescimento industrial, além do desenvolvimento de novas tecnologias sendo inseridas no mercado no decorrer dos últimos anos. Por este motivo seja em busca de um desenvolvimento mais sustentável com uso de tecnologias que não gerem níveis consideráveis de poluição, como os veículos elétricos, ou demandas por aplicações de sistemas confiáveis para fornecimento de energia, permitindo um funcionamento ininterrupto e seguro de sistemas considerados cruciais com utilização de sistemas UPS (*Uninterrupted power systems*), as baterias tornam-se elementos de grande valor para que isso se torne possível.

Na indústria automotiva, para utilização em tração veicular, normalmente sua aplicação está vinculada a dois principais modelos, os veículos híbridos, onde há um sistema de tração elétrica e um sistema de tração com um motor a combustão, ou também veículos totalmente elétricos, onde apenas um sistema de tração elétrico esta presente. Este último se trata de um sistema mais eficiente e simples que um veículo a combustão, contudo toda sua energia é armazenada em um banco de baterias recarregáveis, normalmente de lítio, por suas maiores densidades de energia e de potência. Assim a bateria é um elemento de crucial importância para esta tecnologia, e considerando que a troca do conjunto pode ter um custo elevado para um veículo elétrico, a busca por melhores modelos de baterias e métodos de carga e descarga que possam prolongar sua vida útil se tornam de grande importância para este setor.

Os sistemas UPS também apresentam destaque por suas aplicações em diversas áreas e por diversos motivos, podendo ser citados a segurança humana, para alimentação de eletrodomésticos, sistemas de controladores de voo e usinas nucleares, segurança nacional sendo utilizado em instalações militares e sistemas de comunicação, proteção contra perda de dados como utilização em *datacenters*, perdas financeiras evitando paradas em instalações industriais e instalações bancárias, além da área da saúde com aplicações hospitalares em equipamentos médicos. Estes equipamentos também apresentam efeitos de correção de fenômenos como oscilações de tensão e sobretensões, distorções harmônicas e ruídos, fatores estes responsáveis por prejudicar a qualidade de energia elétrica da instalação (SCHIMITT, 2021; STEVANATTO; BRUSAMARELLO; TAIROV, 2012).

Entre os componentes que compõem um sistema UPS, a bateria é de suma importância para o processo, uma vez que se trata da parte responsável pelo armazenamento da energia a ser utilizada no caso de falta. Estes sistemas normalmente utilizam dois principais modelos de bateria, sendo elas, as baterias compostas de lítio, geralmente resultando em um sistema com maior durabilidade e mais compacto, porém com um maior investimento inicial, e baterias chumbo-ácidas também acabam por ser utilizadas por possuírem custo inicial menor.

O método de carregamento possui grande importância no resultado do desempenho da bateria, considerando parâmetros como profundidade de carga, duração da vida útil e duração do carregamento. Desta maneira, alguns métodos são sugeridos como possíveis alternativas para o

processo de carga destes sistemas de armazenamento de energia.

Entre os métodos de carregamento estudados neste trabalho temos o método de carregamento por corrente constante, ou CC, e o método de carregamento por corrente constante e tensão constante, ou CC-CV, este último apesar de apresentar um tempo de carregamento maior, permite uma maior densidade de energia armazenada na bateria e o método Reflex, o qual apresenta pulsos de carga, descarga e relaxamento na bateria, e em frequências específicas consegue operar em regiões de menor impedância, trazendo melhorias em fatores como densidade de energia armazenada, elevação de temperatura e duração da vida útil da bateria.

Assim, este trabalho visa à comparação da utilização dos métodos CC e Reflex na frequência de 1Hz, avaliando estas técnicas em ciclos de carga e descarga e visando entender seus efeitos sobre sistemas de baterias de lítio.

2 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Os sistemas de armazenamento de energia são um fator-chave para o aprimoramento de diversas tecnologias, uma vez que permitem a retenção de energia para a utilização em necessidades futuras. O armazenamento de energia pode ser realizado de várias maneiras, sendo apenas necessária sua conversão para utilização em seus devidos processos. Podem ser citados alguns métodos mais comuns como armazenamento hídrico realizado em hidrelétricas, térmicos onde se utiliza do aproveitamento da energia térmica recuperada para outros processos, elétricos pelo armazenamento eletromagnético em capacitores e supercapacitores, por exemplo, e armazenamento químico de energia que pode ser dividido em termoquímico e eletroquímico (TAVARES, 2021). O armazenamento eletroquímico de energia refere-se principalmente a células de combustíveis, podendo ser citadas as mais utilizadas, as de hidrogênio, e também as baterias (EVANS; STREZOV; EVANS, 2012).

2.1 BATERIAS

As baterias primárias, apesar de não possuírem a capacidade de serem recarregadas após o esgotamento de seu processo químico, possuem a característica de serem mais baratas, tornando sua aplicação vantajosa para algumas aplicações a curto prazo. Baterias secundárias são o modelo mais adequado para aplicação em veículos elétricos, uma vez que possuem a capacidade de receber vários ciclos de carga e descarga durante sua vida (FILHO, 2007).

A construção básica de uma bateria, seja ela primária ou secundária, é feita com um eletrodo negativo conhecido como anodo, um eletrodo positivo, conhecido como cátodo, submersos em um eletrólito. Durante o processo de fornecimento de energia a uma carga, o anodo, constituído de um material metálico, doa elétrons para a carga se dissolvendo no eletrólito, e o cátodo é o eletrodo que oxida o anodo ao receber elétrons. O eletrólito é normalmente composto por sais dissolvidos em um solvente, permitindo a condução iônica (FILHO, 2007).

2.2 APLICAÇÕES DE BATERIAS

As baterias em seus vários modelos possuem uma vasta gama de aplicações, sendo de grande uso para aplicações veiculares em veículos elétricos e sistemas de UPS.

A aplicação em veículos elétricos é quase que em sua totalidade feita por uma união de inúmeras células de lítio em série. Este conjunto de baterias é composto por um sistema BMS para controle e proteção das baterias, e o conversor eletrônico faz o processo de transferência de energia da bateria para o motor, que atua no sistema de tração do veículo. Além da aplicação em veículos totalmente elétricos, também são encontrados em veículos híbridos, os quais dispõem de um sistema de tração elétrica e outro a combustão. Os sistemas de tração elétrica apresentam normalmente o uso das células com ligas de $LiMn_2O_4$ (LMO), $LiFePO_4$ (LFP), $LiNiMnCoO_2$ (NMC) e $LiNiCoAlO_2$ (NCA). Estes sistemas ainda sofrem com o custo elevado das baterias, as

quais devem ser de primeira vida, devido ao custo inicial e trocas, contudo, a maior aplicação e abrangência do uso gera a expectativa de uma redução do custo e maior viabilidade em um mercado futuro (HANNAN et al., 2018).

Para aplicação em sistemas ininterruptos de energia, são geralmente utilizadas as baterias chumbo-ácidas VRLA e as baterias de íons de lítio. Sistemas com a utilização de baterias VRLA chumbo-ácidas são frequentemente usadas em função de seu custo inicial reduzido, além de possuir confiabilidade para aplicação e de serem até 98% recicláveis.

Outra opção para aplicação em UPS são as baterias de íons de lítio, que normalmente implicam em um investimento inicial mais elevado em função do preço da bateria, contudo, a maior durabilidade deste modelo permite sua utilização por pelo menos 10 anos, o mesmo tempo de duração de um UPS monofásico, ao contrário das baterias VRLA chumbo-ácidas que possuem uma vida útil de 3 a 5 anos, necessitando de 2 a 3 substituições no mesmo período, além de permitirem um range de temperatura de operação mais elevado e ocuparem menos espaço físico e tempo de recarga inferior. Os modelos de baterias lítio normalmente utilizados para esta aplicação são LFP, NMC e LMO sendo em alguns casos utilizados a mistura dos materiais NMC (AVELAR, 2017; VERTIV, 2023).

A Tabela 1 apresenta uma comparação do uso de baterias de íons de lítio e bateria chumbo-ácidas VRLA para um UPS monofásico em um período de 10 anos.

Tabela 1 – Comparação entre baterias chumbo-ácidas e Lítio para sistemas UPS monofásicos para um período de 10 anos.

Material	Chumbo-ácido	Lítio (LFP,NMC,LMO)
Vida em flutuação	3-5 anos	10 anos
Investimento em mão de obra para troca	Sim	Não
Temperatura de operação nominal	20 °C	30 °C
Tempo de carregamento (90% do SOC)	6h	2h
Investimento em novas baterias	Sim	Não

Fonte:(AVELAR, 2017; VERTIV, 2023)

Segundo (AVELAR, 2017) e (VERTIV, 2023), a utilização de baterias de íons de lítio pode gerar um custo até 41% menor ao fim do período analisado, mostrando que, apesar de possuir um custo mais elevado inicialmente, tornam-se opções viáveis a longo prazo.

Outra opção para economia em sistemas UPS é a utilização de baterias de segunda vida. Estas são baterias normalmente retiradas de sistemas de tração veicular, as quais são esgotadas quando sua capacidade primária atinge 80% de utilização, ou seja, a bateria tem sua capacidade de energia armazenada reduzida a 80% do valor original. Outro fator a ser levado em conta é que a bateria pode ser considerada descarregada ao atingir 80% da profundidade de descarga

total, assim sendo uma bateria veicular em primeira vida com potencial de 24 kWh, quando utilizada como uma bateria de segunda vida, ainda poderia fornecer 15 kWh. Conclui-se então que, embora desgastada para utilização em veículos elétricos, estas células ainda possuem uma vida útil considerável e podem ser aplicadas em sistemas que apresentem uma menor necessidade de esforço (HOSSAIN et al., 2019).

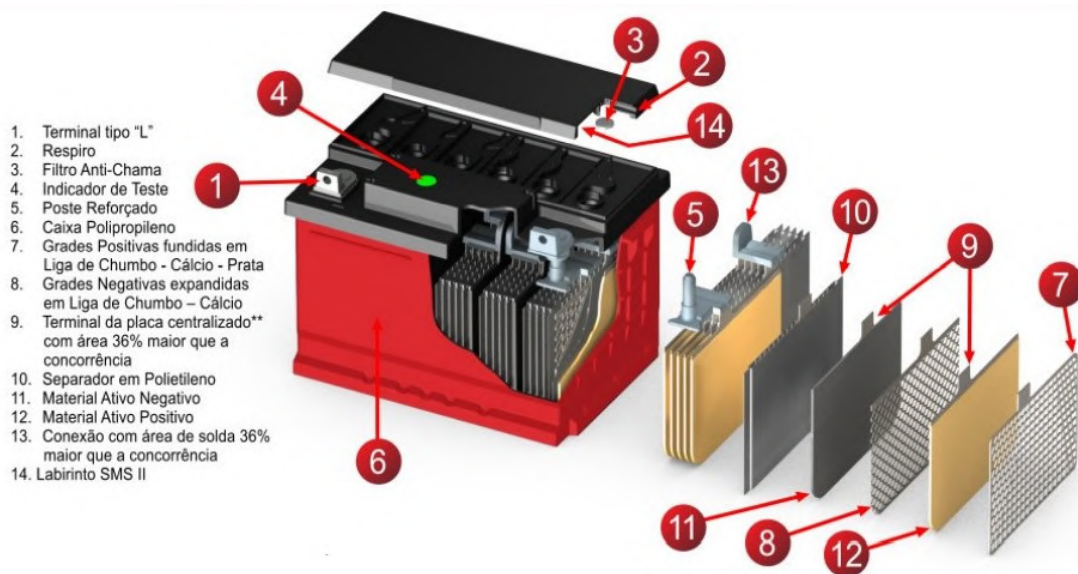
2.3 BATERIAS CHUMBO-ÁCIDAS

A construção de uma célula destas baterias é feita basicamente por um eletrodo negativo de chumbo (Pb) e outro positivo de óxido de chumbo (PbO₂) imersos em ácido sulfúrico (H₂SO₄), divididos por um separador poroso que permite a reação entre os eletrodos de chumbo. As baterias chumbo-ácidas comercializadas são geralmente constituídas de 3 ou 6 células em série, que resultam em tensões nominais de 6V e 12V respectivamente. Para preservar a vida útil da bateria, em sua temperatura normal de operação, cada célula pode carregar até uma tensão de flutuação de 2,25V e não deve ficar abaixo 1,75V. Assim, uma bateria de 12V de tensão nominal pode carregar até uma tensão de flutuação de 13,5V e deve ser considerada descarregada quando atingir 10,5V (MICHELINI, 2017). Atualmente, os modelos utilizados são os selados regulados por válvulas (VRLA), que não necessitam de manutenção.

As baterias chumbo-ácidas são muito populares e amplamente utilizadas em vários setores, como em aplicações industriais e automotivas. Estas baterias são de mais simples construção, e apesar de serem tipicamente mais pesadas, possuem o atrativo de serem mais baratas, resultando em maior economia quando estes fatores não são prejudiciais à sua aplicação (MICHELINI, 2017). Entre as diversas aplicações podemos considerar como principais a veicular onde a bateria é utilizada para funções básicas de veículos a combustão interna como a partida, a iluminação, e a centelha de ignição, onde operando durante curtos períodos é capaz de fornecer grande densidade de potência, a estacionária, utilizada em sistemas ininterruptos de energia capazes de operar por grandes regimes de tempo com descarga constante e a tracionária, capaz de fornecer alta corrente e permite descargas mais profundas geralmente utilizada quando aplicadas a veículos elétricos (TAVARES, 2021).

Estas baterias possuem densidade energética com valores que ficam em torno de 50Wh/kg e uma densidade de potência de 180 W/kg além de um ciclo de vida de 200 a 300 ciclos de carga (CHEN et al., 2012), e por serem mais comuns e baratas que outros materiais, além de serem recicláveis, normalmente apresentam um custo inicial menor para aplicações em UPS. (AVELAR, 2017; VERTIV, 2023).

Figura 1 – Bateria estacionária chumbo-ácida.



Fonte: (FREEDOM, 2008)

2.4 BATERIAS DE NÍQUEL CÁDMIO

São baterias compostas por um cátodo de oxi-hidróxido de níquel e um anodo de cádmio, que em comparação com as chumbo-ácidas, apresentam maior densidade de energia atingindo valores de 80 Wh/kg e densidade de potência de 150W/kg, além de uma vida útil mais longa com até 1500 ciclos de carga e descarga, e são consideradas baterias mais baratas de serem produzidas, resultando em um bom custo benefício, além de serem menos sensíveis em temperaturas baixas. Contudo, existem alguns pontos negativos, pois são baterias com tensão nominal baixa por célula, de apenas 1,25V, sendo necessário a utilização de maior número de células e possuem menor tolerância a sobrecargas quando comparadas com as chumbo-ácidas. Também se caracterizam por possuírem elevada autodescarga, além de o cádmio ser considerado prejudicial ao meio ambiente (CHEN et al., 2012; MICHELINI, 2017).

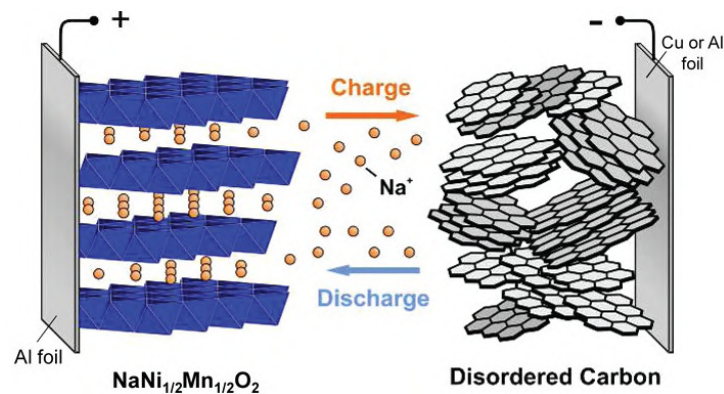
2.5 BATERIAS DE NÍQUEL HIDRETO METÁLICO

Estas baterias substituem o anodo de Cádmio das baterias de Ni-Cd por um anodo formado por uma liga de hidreto com hidrogênio, apresentando uma característica mais nociva ao meio ambiente. Assim como as baterias de níquel-cádmio, possuem uma tensão nominal baixa de 1,25 V por célula, mas possuem vantagens em relação à densidade de energia com valores de até 120 Wh/kg e de potência chegando a 1000W/kg. Embora apresente maior vida útil que as baterias chumbo-ácidas, esta característica é inferior às com anodo de cádmio, uma vez que atingem em média 500 ciclos de carga, e apresentam também uma autodescarga superior às anteriores, tornando necessária sua recarga em períodos mais curtos de tempo (CHEN et al., 2012).

2.6 BATERIAS DE ÍONS DE SÓDIO

As baterias de íons de sódio são baterias construídas com uma estrutura similar aos outros modelos, com um anodo de grafite, eletrólito, um cátodo construído com uma mistura de sódio e um separador poroso. A Figura 2 apresenta um modelo básico da estrutura de uma bateria de íons de sódio.

Figura 2 – Modelo básico da estrutura de uma bateria de íons de sódio e seu funcionamento durante o processo de carga e descarga.



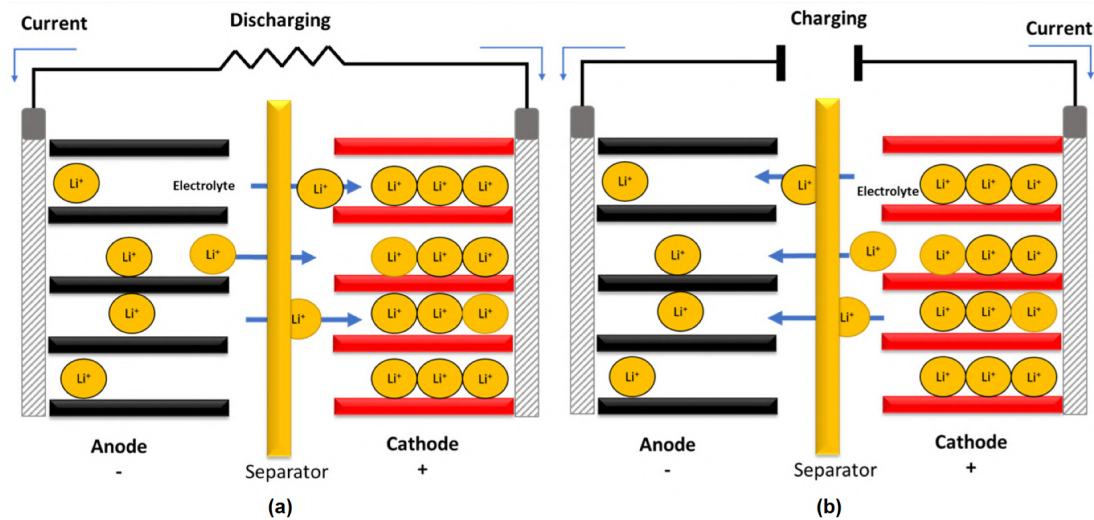
Fonte: (KOMABA et al., 2011)

Estas baterias possuem como pontos positivos a abundância de sua matéria-prima principal, o sódio, além de não possuir um processo de construção e manufatura mais complexo que os modelos de íons de lítio. Estes fatores permitem que estas baterias possuam um custo menor quando comparado às baterias de íons de lítio (SAWICKI; LEON, 2015). Porém, estas baterias possuem uma menor densidade de energia, atingindo valores de 120Wh/kg e densidade de potência de 200W/kg, resultando em uma bateria maior e mais pesada quando comparada às baterias de íons de lítio (ARGYROU; CHRISTODOULIDES; KALOGIROU, 2018).

2.7 BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

As baterias de íons de lítio são baterias construídas por um cátodo com mistura de lítio e um anodo normalmente de grafite, submersos em uma solução composta por sais de lítio (MICHELINI, 2017). Apresenta-se como o modelo mais tecnológico e promissor, principalmente por ser mais leve que os outros modelos, permitindo construções mais compactas. A Figura 3 mostra a representação do funcionamento para o modelo de uma bateria de íons de lítio.

Figura 3 – Modelo para o funcionamento de uma bateria de íons de lítio. (a) Representação do modo de funcionamento para descarga. (b) Representação do modo de funcionamento para a carga.



Fonte: (CAMAS et al., 2022)

Elas se caracterizam por possuírem uma alta densidade de energia em relação a outros modelos, podendo atingir 160 Wh/kg e densidade de potência até 1800 W/kg (CHEN et al., 2012). Também apresentam vantagem por possuírem uma tensão nominal mais elevada por célula, de 3,6V, quase o dobro de uma célula chumbo-ácida e o triplo de uma de níquel-cádmio, além de possuir uma baixa autodescarga e ciclos de vida de 500 a 2000 ciclos de carga e descarga. Estas baterias apresentam como característica uma baixa tolerância à sobrecarga, sendo necessária a aplicação de um circuito de proteção contra sobrecarga junto ao conjunto de baterias, porém podendo ser compensadas por seu menor volume. Os modelos de baterias de íons de lítio mais utilizadas são:

- Óxido de Lítio Cobalto (LiCoO_2 , LCO): Construída primeiramente com um cátodo de óxido de lítio cobalto. Possuem uma alta densidade de energia de até 240Wh/kg, no entanto, sofrem com estabilidade térmica e uma vida útil reduzida de 500 a 1000 ciclos, apresentado resultados não muito satisfatórios para aplicação com inúmeros ciclos de carga e descarga sucessivos, mesmo quando aplicado aos limites fornecidos pelos fabricantes. Também apresenta uma capacidade de corrente de carga limitada, onde aplicações que exijam correntes de carga superiores a 2C da bateria causam um aquecimento elevado e possíveis riscos à segurança da bateria, sendo normalmente indicado pelos fabricantes valores de carga de 0,8 C e devendo limitar-se a 1C (MICHELINI, 2017; TREDEAU; KIM; SALAMEH, 2008).
- Óxido de Lítio Manganês (LiMn_2O_4 , LMO): Este modelo de bateria possui a vantagem de permitir valores mais elevados de corrente, uma vez que sua estrutura interna permite que os íons fluam do cátodo para o ânodo com mais facilidade, resultando em uma menor

resistência interna, além de proporcionar maior estabilidade térmica e maior segurança da bateria além de ser menos agressiva ao ambiente. No entanto, as baterias de LMO sofrem com uma vida útil reduzida, cerca de 33% de uma bateria de LCO (MICHELINI, 2017; KIM et al., 2018). Sua capacidade também sofre com os efeitos da elevação de temperatura, onde temperaturas superiores a 60 °C geram dissolução do manganês no eletrólito (TRAN et al., 2021). Um aprimoramento destas baterias ocorre com a mistura de aproximadamente 30% de óxido de lítio níquel manganês conhecidas como NMC (LiNiMnCoO_2), assim é possível obter-se um equilíbrio com maior densidade de potência, por alguns períodos e maior densidade de energia de até 220 Wh/kg gerado pela bateria de NMC, além de uma vida útil que pode atingir 2000 ciclos de carga (MICHELINI, 2017).

- Fosfato de Ferro de Lítio (LiFePO_4 , LFP): Construída com um cátodo de lítio-fosfato, sua estrutura permite menor resistência interna e elevada corrente nominal. Apresenta uma maior vida útil e melhor estabilidade térmica. Apesar de sofrerem mais com um efeito de autodescarga, e possuírem uma tensão menor por célula, de 3,2V, elas são consideradas mais seguras, apresentando maior resistência a tensões elevadas por um maior período, além de uma fuga térmica de 270 °C (MICHELINI, 2017). Esta bateria possui a peculiaridade, quando comparada com as de lítio-manganês, de sua capacidade de energia não variar expressivamente com o estado de carga, e sim ser predominantemente afetado quando taxas mais elevadas de corrente de descargas são exigidas (WANG; SUN; WEI, 2009). Isso resulta em uma menor capacidade de energia. Sua densidade de energia atinge valores de 120Wh/kg, e como sofre com desgaste, é mais propensa a apresentar desequilíbrio de tensão. Com tudo, pode apresentar uma vida de até 2000 ciclos de carga e descarga.

- Óxido De Lítio Níquel Manganês Cobalto (LiNiMnCoO_2 , NMC): Estas baterias são caracterizadas por possuírem boa densidade de corrente e uma elevada eficiência que pode atingir valores superiores a 90%. Caracterizada por uma baixa impedância interna, pode fornecer uma elevada densidade de potência sem uma queda muito expressiva de eficiência quando em temperaturas nominais de operação e tensão limitada, estudos experimentais apontam ser possível uma carga de até 3C com o método por corrente constante - tensão constante com carga de até 88% do total da bateria (OMAR et al., 2010). São baterias de um custo menos expressivo, por possuir menos cobalto, e possuem uma vida útil que pode atingir 2000 ciclos de carga e descarga.

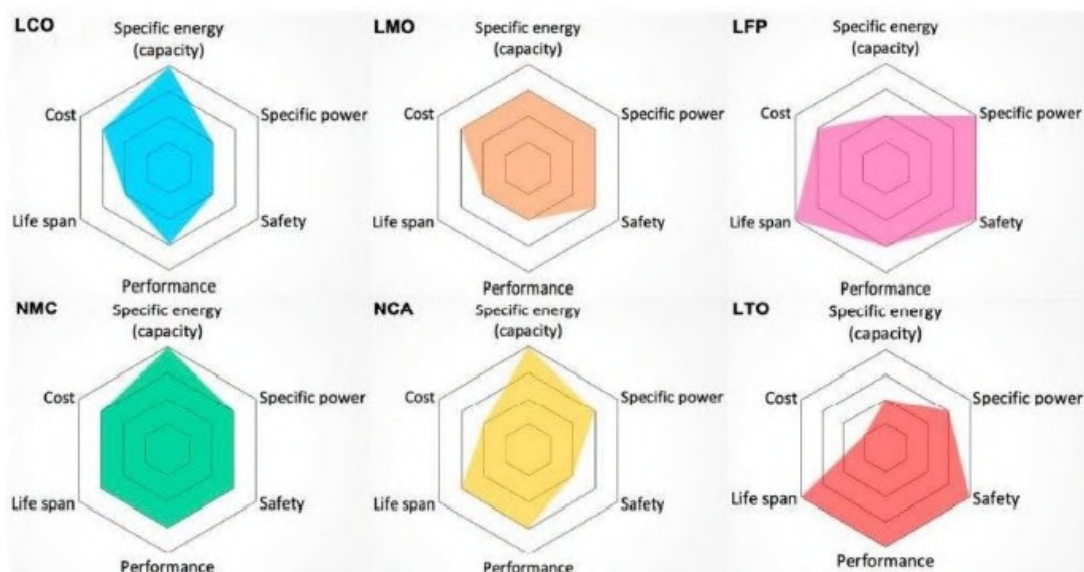
- Óxido De Lítio Níquel Cobalto Alumínio (LiNiCoAlO_2 , NCA): Possuem características similares as NMC, com eficiência atingindo valores de 90%, baixa resistência interna e vida útil elevada, no entanto, estas baterias possuem maior densidade de energia atingindo

valores de até 260Wh/kg contra apenas 150 Wh/kg das NMC. Em contrapartida, são mais caras e têm sua vida útil muito reduzida, atingindo 500 ciclos de carga (MICHELINI, 2017; OMAR et al., 2010).

- Titanato de Lítio ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, LTO): Possuem como qualidade fornecer uma alta densidade de potência, a uma temperatura relativamente baixa, além de possuírem uma vida útil longa de até 7000 ciclos, além de carregar a taxas de até 5C sem elevar em demasiado sua temperatura (MICHELINI, 2017). Embora seja possível o fornecimento de altas correntes, é aconselhável o controle da corrente de carga e descarga para que a bateria não trabalhe a temperaturas mais elevadas e assim reduza sua vida útil. No entanto, essas células possuem uma baixa tensão nominal de 2,4V e uma densidade de energia reduzida, atingindo valores de 65Wh/kg (MEI; CHENG; FONG, 2016).

A Figura 4 apresenta a comparação entre os diferentes modelos de baterias de íons de lítio.

Figura 4 – Comparativo de performance das baterias de íons de lítio.



Fonte: (MEI; CHENG; FONG, 2016).

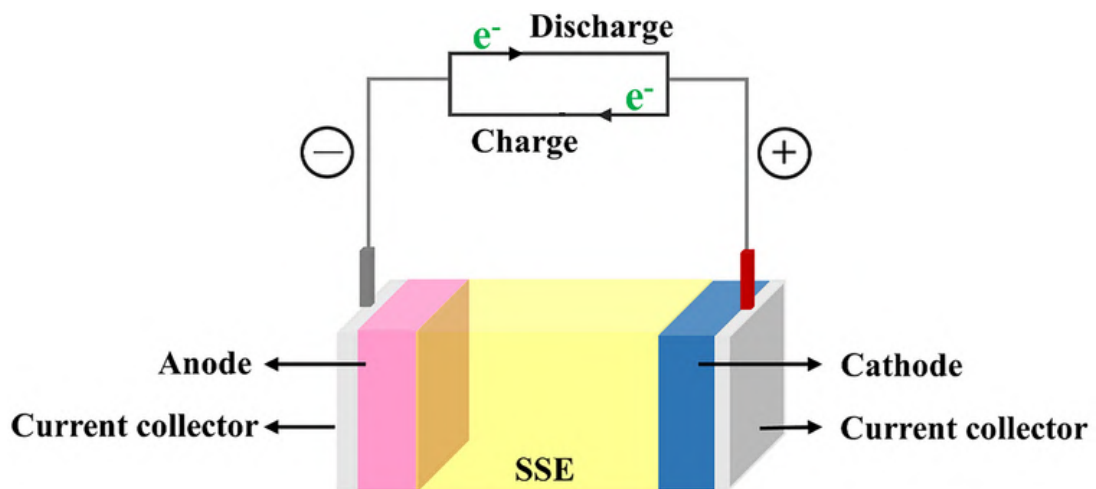
2.8 BATERIAS DE ESTADO SÓLIDO

As baterias de estado sólido possuem como diferencial um eletrólito de estado sólido ou SSE (*Solid – State Electrolyte*), ao contrário dos modelos convencionais que possuem um eletrólito líquido. Elas reduzem os riscos de fuga térmica e inflamabilidade, além de possuírem resistência à formação de dendritos a longo prazo. As baterias de estado sólido com avanços mais promissores são os modelos de lítio e os modelos de sódio. Os modelos com baterias de lítio são mais promissores, com maior densidade de energia e potência quando comparado às

baterias de sódio, porém, por serem um elemento menos abundante que o sódio, possuem a desvantagem do custo mais elevado (SHAH; MITTAL; PRECILLA, 2024).

Estas baterias não possuem a necessidade da utilização de um separador entre o cátodo e o anodo, uma vez que, por possuírem o eletrólito sólido, este já realiza esta função de separação. A Figura 5 apresenta a estrutura construtiva de uma bateria de estado sólido, onde é possível verificar que os outros elementos básicos da bateria continuam os mesmos de uma bateria com eletrólito líquido, construída por um anodo, um cátodo e os coletores de corrente.

Figura 5 – Modelo construtivo de uma bateria de estado sólido.



Fonte: (LI et al., 2023).

No entanto, estes modelos ainda apresentam grandes desafios a serem superados para sua aplicação comercial, por serem de produção mais complexa, o que gera um custo de produção mais elevado, além do desenvolvimento de um eletrólito sólido que possa manter suas características e desempenho para todas as diversas condições a que uma bateria pode ser submetida, como temperaturas muito elevadas ou muito baixas e estresse excessivo (SHAH; MITTAL; PRECILLA, 2024).

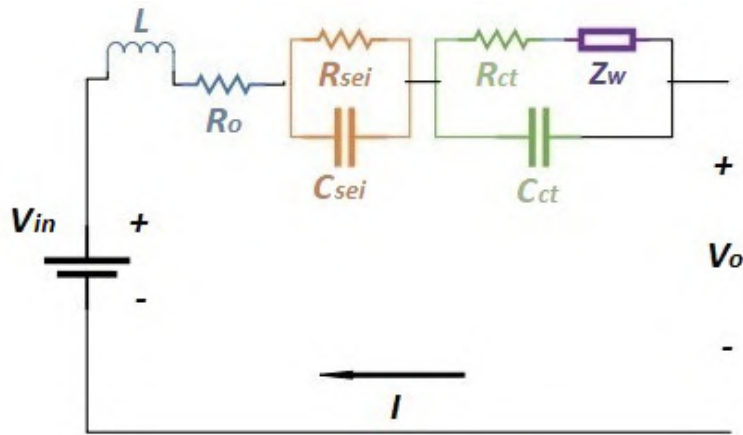
2.9 MODELAGEM DA BATERIA POR ELEMENTOS PASSIVOS

O modelo da bateria permite a compreensão de seu comportamento relativo a seus componentes internos, através da utilização de elementos passivos que permitem de maneira mais simples a descrição de seu comportamento.

2.9.1 Bateria de íons de lítio

Um modelo mais completo de uma bateria de íons de lítio é apresentado por (CHOI et al., 2020) na Figura 6.

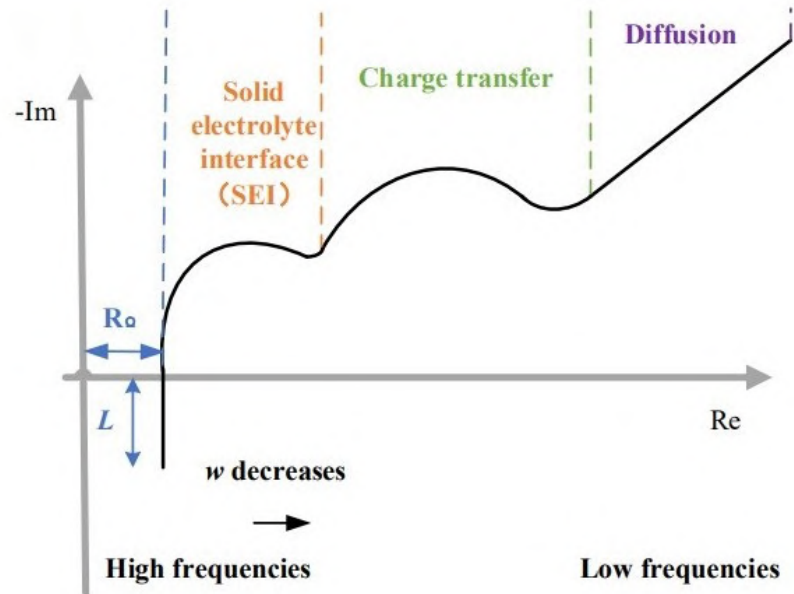
Figura 6 – Representação da bateria de íons de lítio modelada com a utilização de elementos passivos.



Fonte: (CHOI et al., 2020)

Vários fatores influenciam o comportamento da bateria em função de suas impedâncias, e a frequência dos sinais da corrente de carga é de influência direta para a impedância da bateria. Uma bateria de íons de lítio apresenta um comportamento característico quando analisado para todo seu espectro de frequência, que é característico da curva do diagrama de Nyquist apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Diagrama de Nyquist da relação impedância total pela frequência para baterias de íons de lítio.



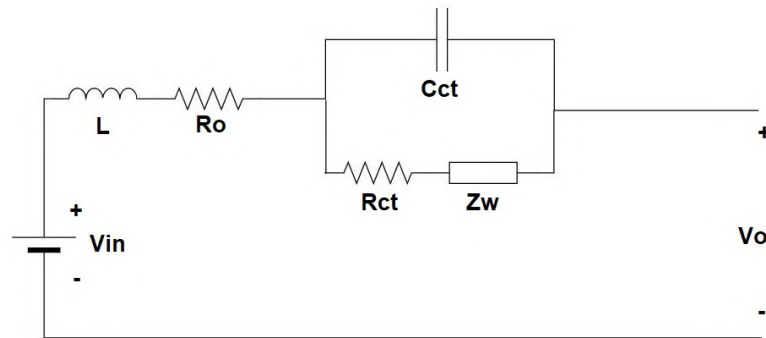
Fonte: (CHOI et al., 2020).

É possível perceber que para sinais de alta frequência a bateria apresenta uma característica indutiva, correspondente à geometria e porosidade das placas, quando em seu ponto de cruzamento sua impedância torna-se puramente resistiva, característica do eletrólito, coletor e separador (SUN et al., 2019). Esta resistência é muito afetada pela vida útil da bateria, assim sendo, quanto mais desgastada uma bateria se apresentar, maior será esta resistência. A curva subsequente, representada por uma circunferência parcial, é referente à interface de eletrólito sólido ou SEI (*Solid Electrolyte Interface*). Sabe-se que esta camada tende a aumentar com os processos eletroquímicos durante a descarga da bateria, tornando sua resistência mais elevada e sendo reduzida durante o carregamento. Pode-se dizer que a impedância da interface do eletrodo de estado sólido sofre variações com o estado de carga da bateria e com o estado de saúde, uma vez que a camada do eletrodo de estado sólido aumenta com a redução da vida da bateria. A terceira parte da curva é referente a impedância de carga, neste estágio esta impedância também está relacionada ao estado de carga (SOC), neste caso a resistência de polarização tende a se tronar mais significava e a impedância capacitiva menos significativa com a elevação do estado de carga da bateria. Sua resistência é mais sensível a variações de temperaturas, se tornando mais elevada principalmente para temperaturas mais baixas. E para frequências muito baixas, a curva pode ser caracterizada pela impedância de Warburg, resultado da difusão dos íons de lítio do eletrodo (CHOI et al., 2020).

2.9.2 Bateria chumbo-ácida

O modelo para a bateria chumbo-ácida está apresentado na Figura 8.

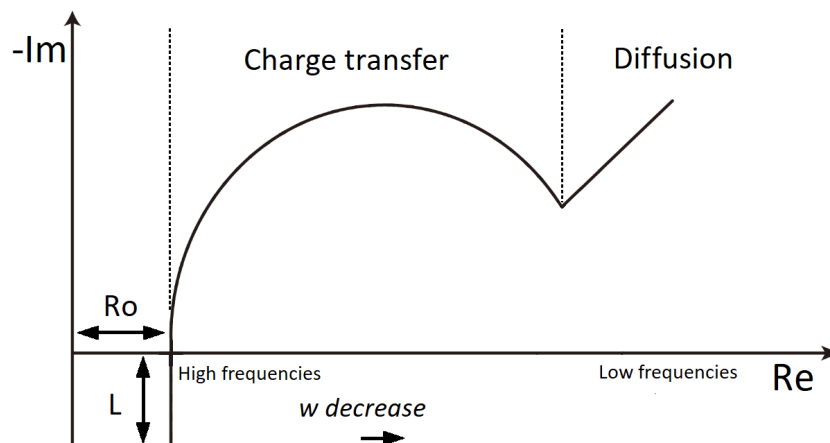
Figura 8 – Representação da bateria chumbo-ácida modelada com a utilização de elementos passivos.



Fonte: (STEVANATTO; BRUSAMARELLO; TAIROV, 2012).

O diagrama de Nyquist referente à variação do espectro da impedância da bateria está apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Diagrama de Nyquist da relação impedância total pela frequência para baterias chumbo-ácidas.



Fonte: (STEVANATTO; BRUSAMARELLO; TAIROV, 2012).

De maneira similar a apresentada anteriormente para a bateria de íons de lítio é verificado a existência de uma componente indutiva para altas frequências, característica de aspectos construtivos da bateria, a resistência série é característica da impedância dos conectores, eletrólito e separadores e também a interface referente a cristalização do sulfato de cobre, e o conjunto paralelo do capacitor e resistor referentes a curva de transferência de carga (STEVANATTO; BRUSAMARELLO; TAIROV, 2012).

2.10 ESTADO DE CARGA

O estado de carga ou SOC (*State of charge*) é denominado como a energia remanescente em relação à energia total de uma bateria. A equação 1 apresenta a relação para definição do

percentual do estado de carga.

$$SOC(\%) = \frac{SOC_{Atual}}{SOC_{Total}} \cdot 100\% \quad (1)$$

O acompanhamento do estado de carga de uma bateria é importante para que se tenha conhecimento de quanta energia uma bateria pode fornecer, uma vez que o seu armazenamento é prejudicado por efeitos como autodescarga e redução de vida útil, além de permitir que sejam evitados efeitos como descargas profundas prejudiciais à bateria (SABOO; MANGSULE; DESHPANDE, 2021). A faixa de operação de baterias de lítio e chumbo-ácidas deve ser limitada, não operando com valores muito baixos do estado de carga máximo, para permitir a sua maior durabilidade (MICHELINI, 2017).

2.11 ESTADO DE SAÚDE

O estado de saúde ou SOH (*State of Health*) é um fator que representa o quanto de desgaste a bateria já sofreu com relação ao seu estado inicial. A equação 2 apresenta a definição percentual para o estado de saúde da bateria.

$$SOH(\%) = \frac{SOH_{Envelhecida}}{SOH_{Nova}} \cdot 100\% \quad (2)$$

A redução do estado de saúde da bateria é resultado de seu envelhecimento pelos diversos ciclos de carga e descarga, e das condições do ambiente e de operação a que é submetida. Com a redução da vida de uma bateria, tem-se como consequência a redução de sua capacidade de armazenamento de energia e aumento da resistência interna da bateria, resultando no aumento das perdas.

Nas baterias de íons de lítio a perda de sua capacidade resulta da diminuição de seu inventário de lítio (LLI) que ocorre pela formação da camada de eletrólito sólido conhecido como SEI (*Solid Electrolyte Interface*) entre o eletrodo e o eletrólito, consumindo lítio ativo e impedindo o processo de redução, e pelas perdas de material ativo (LAM) causados principalmente pelo desgaste do eletrodo, estruturais e dissolução do material (SPITTHOFF; SHEARING; BURHEIM, 2021).

Para baterias chumbo-ácidas, o processo de envelhecimento ocorre pela perda do material ativo, corrosão anódica, perda de água e formação irreversível da camada de sulfato de chumbo cristalizado no eletrodo (SAMOLYK; SOBCZAK, 2013).

Fatores como temperatura, taxa de descarga e profundidade de descarga tornam mais acelerado o processo de envelhecimento da bateria (SAMOLYK; SOBCZAK, 2013; SCHIMITT, 2021).

3 EFEITOS DE FATORES EXTERNOS SOBRE AS BATERIAS

Este capítulo tratará dos efeitos que podem afetar diretamente o comportamento e desempenho das baterias de íons de lítio e chumbo-ácida.

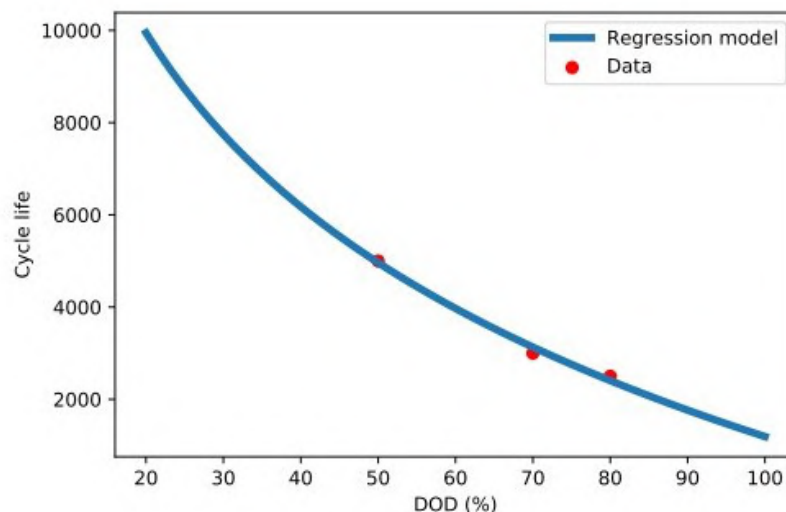
3.1 EFEITOS DE FATORES EXTERNOS SOBRE AS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

As baterias de íons de lítio são diretamente afetadas por fatores externos, como profundidade de descarga, temperatura ambiente, estado de carga e estado de saúde. Estes fatores influenciam a impedância interna da bateria, afetando seu comportamento.

3.1.1 Profundidade de descarga

A profundidade de descarga afeta diretamente a vida útil das baterias de íons de lítio, sabendo-se que uma descarga mais profunda gera um maior estresse na bateria e consequentemente gera uma redução no número de ciclos de trabalho (ZIA; ELBOUCHIKHI; BENBOUZID, 2019). A Figura 10 apresenta a curva relacionando os ciclos de trabalho em função da profundidade de descarga da bateria, neste caso o autor apresenta a curva para uma bateria de LFP, um modelo de uso comum para sistemas UPS.

Figura 10 – Ciclos de vida da bateria de LFP vs profundidade de descarga.



Fonte: (ZIA; ELBOUCHIKHI; BENBOUZID, 2019).

Percebe-se que, sem gerar uma descarga profunda da bateria, e limitando a 80%, é possível obter 2000 ciclos de trabalho e, quando utilizado 60%, esta expectativa dobra.

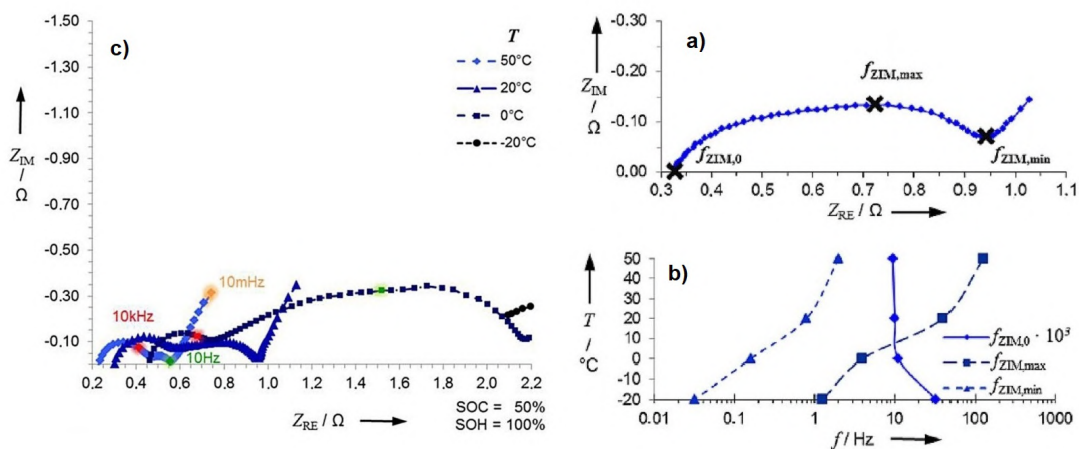
3.1.2 Temperatura

A temperatura interfere diretamente na capacidade da bateria, sendo necessário controlar a sua temperatura de operação. Para isso, cada fabricante delimita o range de melhor operação

para suas baterias. É necessário atentar-se que tanto temperaturas mais elevadas como muito reduzidas são prejudiciais ao desempenho da bateria.

Operações em temperaturas elevadas são prejudiciais, pois causam a formação mais rápida do eletrodo de estado sólido, decomposição dos eletrodos da bateria, gerando sua dissolução no eletrólito, limitando sua capacidade e acelerando o envelhecimento (PALACÍN, 2018). Quando submetida a temperaturas muito baixas as baterias de íons de lítio possuem sua capacidade de fornecimento reduzida, onde a queda para baixas temperaturas, em relação à temperatura ambiente, é acompanhada por uma elevação da resistência interna da bateria, gerada principalmente pela condutividade iônica reduzida (LYU et al., 2020). Os efeitos da temperatura são mais perceptíveis sobre a resistência de polarização de carga, isto pode ser visto na Figura 11 com os resultados obtidos por (WESTERHOFF et al., 2016) com SOC de 50% e SOH de 100%, usando uma bateria com uma mistura no cátodo de $\text{LiNi}(1/3)\text{Mn}(1/3)\text{Co}(1/3)\text{O}_2$. O item (a) apresenta os pontos de medição no diagrama de Nyquist onde as frequências apresentam a máxima e mínima reatância capacitiva e para o ponto onde a impedância é puramente resistiva, o item (b) apresenta a frequência para cada um dos pontos em função da variação de temperatura e o item (c) a variação da curva de Nyquist em função da temperatura. Percebe-se que para as temperaturas negativas há uma elevação na impedância da bateria. Como também verificado por (LYU et al., 2020) temperaturas negativas a partir de -20°C geram uma elevada impedância, e apenas a partir de 5°C e atingido valores de 20°C até 25°C são apresentados resultados satisfatórios capazes de permitir que seja fornecida toda capacidade da bateria.

Figura 11 – Diagrama de Nyquist em função da temperatura ambiente da bateria: (a) Pontos das frequências para máxima e mínima reatância capacitiva e impedância puramente resistiva. (b) Variação das frequências para máxima e mínima reatância capacitiva e impedância puramente resistiva em função da temperatura. (c) Diagrama de Nyquist em função da temperatura.



Fonte: (WESTERHOFF et al., 2016)

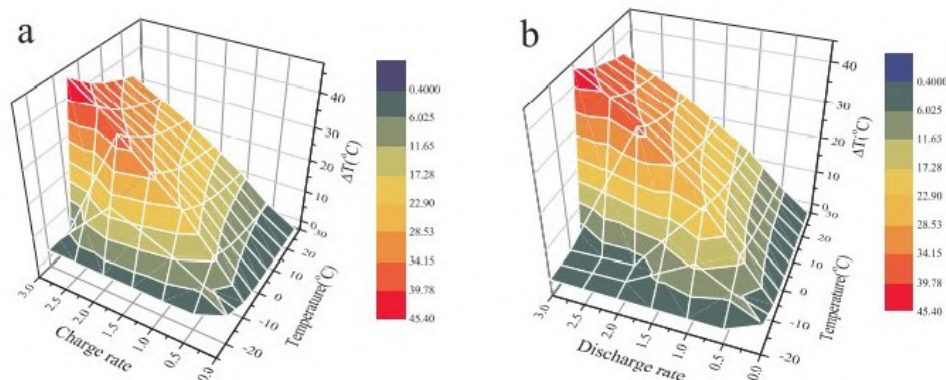
Temperaturas elevadas também interferem na impedância da bateria, assim como são prejudiciais à vida da bateria. Atuar em temperaturas adequadas é um fator importante, pois evitar

pontos de operação com resistência elevadas acaba gerando mais perdas, dissipação e elevação de temperatura durante o processo de carga e descarga da bateria.

3.1.3 Elevações de temperatura

As elevações de temperatura são causadas principalmente por fatores gerados pelas reações eletroquímicas da bateria, como polarização de ativação e de concentração, resistência de polarização e elevação ôhmica, estas últimas referentes às resistências internas da bateria (LYU et al., 2020). Segundo resultados obtidos por (LYU et al., 2020), onde o autor considera um modelo eletrotérmico (ETC) de uma bateria NMC, maiores elevações de temperatura interna na bateria são obtidas com baixas temperaturas e com a elevação da taxa de carga e descarga, isso se deve a influência da resistência da bateria, que como visto anteriormente é mais elevada a baixas temperaturas e gera mais perdas ôhmicas. A Figura 12 apresenta a característica deste fenômeno, obtidos para o processo de carga e descarga.

Figura 12 – Efeitos da elevação de temperatura da bateria em função da temperatura ambiente e densidade de corrente. (a) Para o processo de carga. (b) Para o processo de descarga.



Fonte: (LYU et al., 2020).

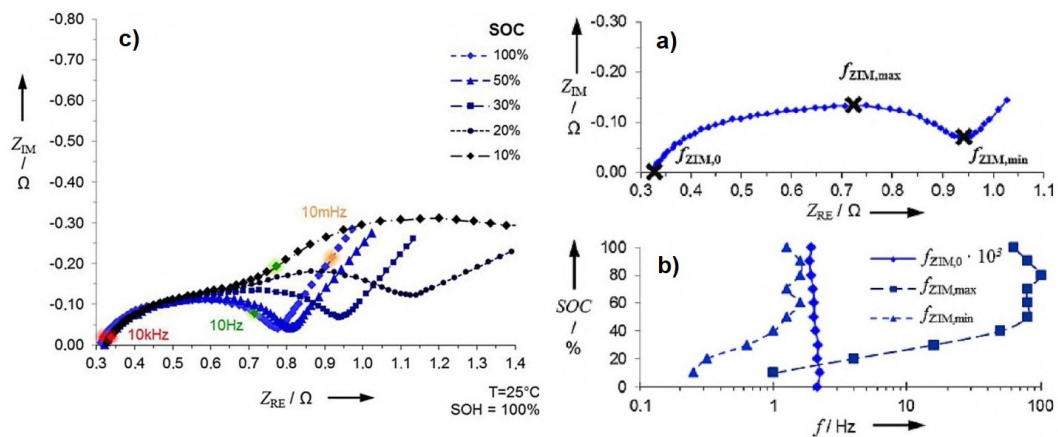
Embora as curvas obtidas pelo autor resultem em valores diferentes para carga e descarga, é evidente o melhor desempenho da bateria quando operando a temperaturas positivas próximas à ambiente e limitando sua taxa de corrente, uma vez que neste ponto a resistência interna torna-se menos influente.

3.1.4 Impedância em função do estado de carga

As baterias de íons de lítio apresentam como fator responsável pela variação interna de sua impedância não apenas fatores já apresentados, como a temperatura, mas também o estado de carga. Quando o estado de carga de uma bateria reduz, sua impedância aumenta como resultado da elevação da resistência interna das baterias. As curvas apresentadas na Figura 13 foram obtidas por (WESTERHOFF et al., 2016) e apresentam este comportamento das impedâncias da bateria. O item (a) apresenta os pontos de medição no diagrama de Nyquist

onde as frequências apresentam a máxima e mínima reatância capacitiva e para o ponto onde a impedância é puramente resistiva, o item (b) apresenta a frequência para cada um dos pontos em função do estado de carga da bateria e o item (c) a variação da curva de Nyquist em função do estado de carga da bateria.

Figura 13 – Diagrama de Nyquist em função do estado de carga da bateria: (a) Pontos das frequências para a máxima e mínima reatância capacitiva e impedância puramente resistiva. (b) Variação das frequências para a máxima e mínima reatância capacitiva e impedância puramente resistiva em função do estado de carga. (c) Diagrama de Nyquist em função do estado de carga.



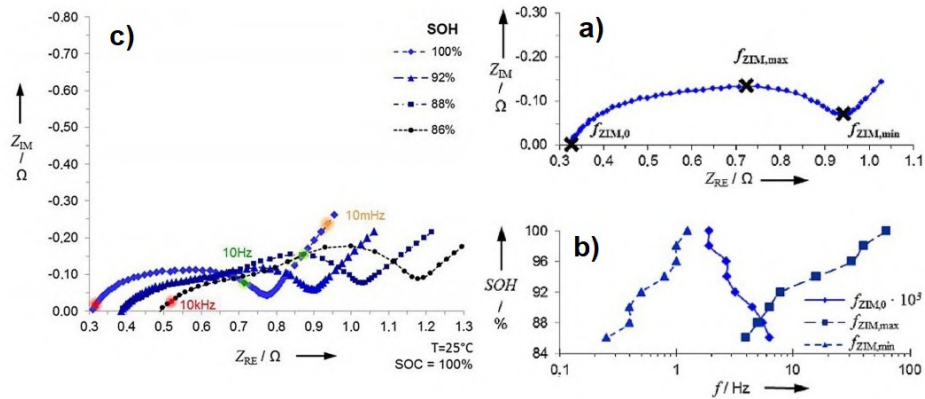
Fonte: (WESTERHOFF et al., 2016)

Percebe-se que o estado de carga pouco interfere sobre o valor e a frequência de cruzamento no eixo real, ou a resistência série do modelo, verificado no item (b) que o valor da frequência se torna quase constante com a variação do estado de carga da bateria, enquanto a frequência da máxima e mínima reatância capacitiva da curva da impedância de carga se deslocam para frequências mais altas, devido à elevação da impedância de carga e da resistência da camada SEI.

3.1.5 Impedância em função do estado de saúde

O estado de saúde de uma bateria afeta de forma irreversível a sua impedância interna, principalmente sua resistência série. A curva apresentada na Figura 14 representa o comportamento da impedância pelo espectro de frequência, onde o autor realiza a análise para valores entre 100% e 86% do estado de vida da bateria. No item (a) são apresentados os pontos de medição no diagrama de Nyquist onde as frequências apresentam a máxima e mínima reatância capacitiva e o ponto onde a impedância é puramente resistiva, o item (b) apresenta a frequência para cada um dos pontos em função da variação do estado de saúde e o item (c) a variação da curva de Nyquist em função do estado de saúde.

Figura 14 – Diagrama de Nyquist em função do estado de saúde da bateria: (a) Pontos das frequências para a máxima e mínima reatância capacitiva e impedância puramente resistiva. (b) Variação das frequências para máxima e mínima reatância capacitiva e impedância puramente resistiva em função do estado de saúde. (c) Diagrama de Nyquist em função do estado de saúde.



Fonte: (WESTERHOFF et al., 2016)

Como percebido, a impedância puramente resistiva se eleva com a redução do estado de saúde da bateria. Assim, o desgaste do estado de saúde da bateria afeta principalmente a resistência série, além de elevar as frequências da mínima e máxima parcela imaginária da impedância na bateria. Estes efeitos levam ao aumento das perdas, causando a elevação de temperatura.

3.2 EFEITOS DE FATORES EXTERNOS SOBRE AS BATERIAS CHUMBO-ÁCIDAS

As baterias chumbo-ácidas, assim como as baterias de íons de lítio, também possuem sua impedância interna diretamente afetada por fatores externos, o que acaba por afetar seu desempenho a curto e também a longo prazo.

3.2.1 Profundidade de descarga

Da mesma maneira que as baterias de íons de lítio, as baterias chumbo-ácidas também são prejudicadas pela profundidade da descarga. A Figura 15 apresenta estes efeitos.

Figura 15 – Ciclos de vida da bateria chumbo-ácida vs profundidade de descarga.



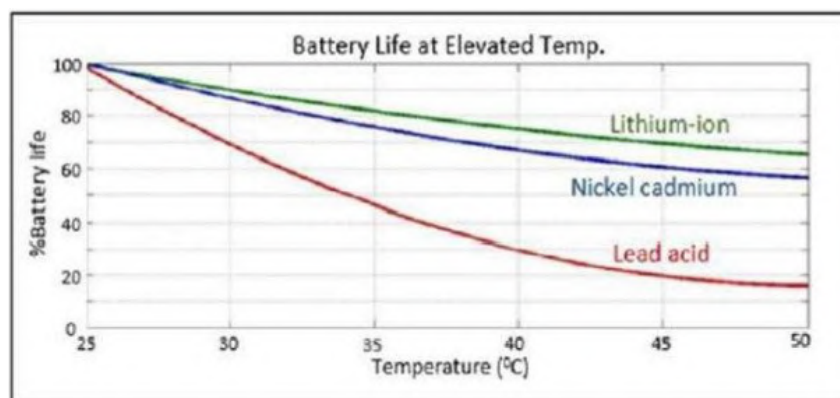
Fonte: (ZIA; ELBOUCHIKHI; BENBOUZID, 2019)

Para descargas mais profundas, próximas de 80%, sua vida útil se torna bastante reduzida, com aproximadamente 250 ciclos. E para valores de 55%, atingem os 500 ciclos de trabalho. Assim, percebe-se que evitando descargas profundas é possível prolongar de forma significativa a vida da bateria.

3.2.2 Temperatura

As baterias VRLA chumbo-ácidas são as mais sensíveis à variação de temperatura, sendo necessária a sua operação em temperaturas mais baixas para manter sua vida útil preservada. A Figura 16 apresenta este efeito, onde se pode verificar que o aumento da temperatura de operação tem influência direta sobre as baterias estudadas.

Figura 16 – Comparação do efeito da temperatura de armazenamento para a vida útil da bateria chumbo-ácida, bateria de lítio e bateria de níquel-cádmio.



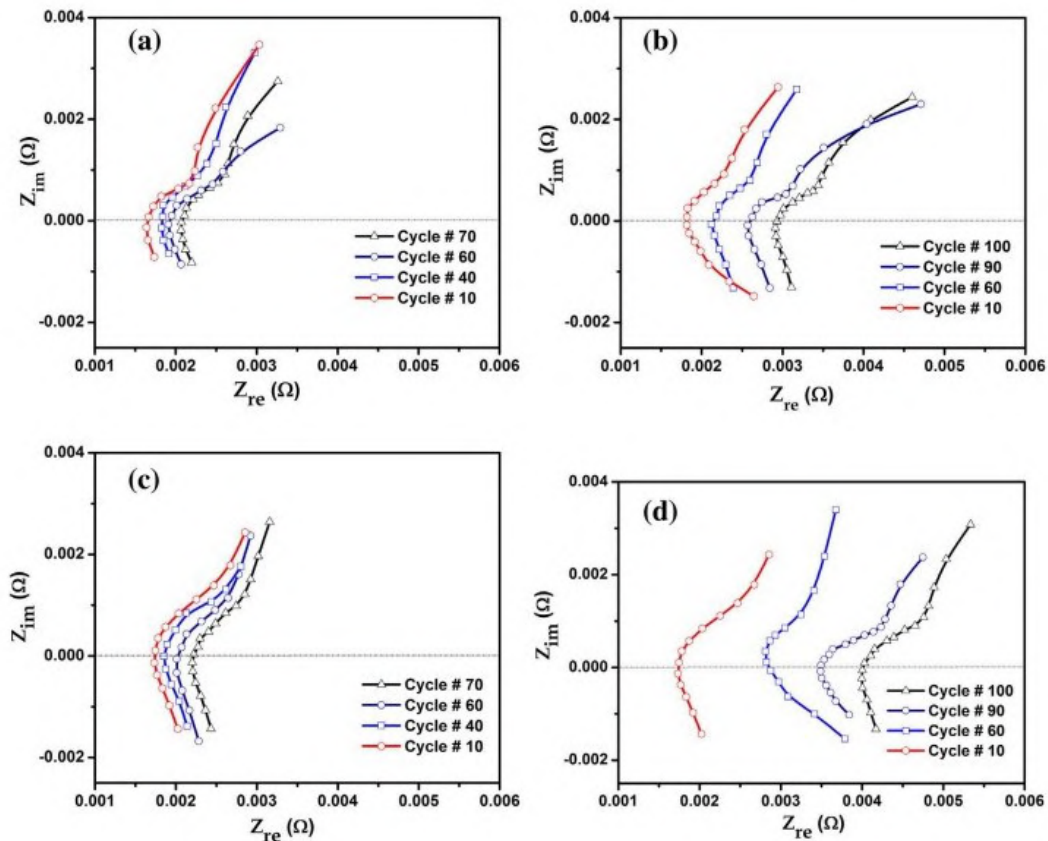
Fonte: (JAMPEETHONG; KHOMFOI, 2015)

Altas temperaturas geram aumento no efeito de autodescarga, perda de material do eletrólito, oxidação do material ativo, perda na resistência do eletrodo positivo, e efeitos mais

danosos como vaporização do eletrólito (VIGNAROOBAN et al., 2016). Assim, é perceptível que o controle da temperatura sobre a operação de uma bateria chumbo-ácida deve ser mais cauteloso para evitar seu desgaste excessivo.

(VIGNAROOBAN et al., 2016) realiza um estudo apresentando os efeitos de degradação da vida útil da bateria chumbo-ácida em função da temperatura e durante uma sequência de ciclos de carga e descarga, para diferentes temperaturas e taxas de carga. O estudo apresenta quatro casos, onde se consideram temperaturas de 27 °C e 55 °C com taxas de carga de C/3 e C/12 e para todos os casos é apresentada uma descarga com corrente constante de C/3. São apresentados os resultados através da leitura da impedância espectroscópica, onde é possível verificar os efeitos da temperatura assim como o da variação do estado de saúde para a impedância da bateria. A Figura 17 apresenta os resultados obtidos pelo autor.

Figura 17 – Impedância espectroscópica da bateria chumbo-ácida com 100% de SOC :(a) Temperatura ambiente de 27 °C e taxa de carga de C/12. (b) Temperatura ambiente de 27 °C e taxa de carga de C/3. (c) Temperatura ambiente de 55 °C e taxa de carga de C/12. (d) Temperatura ambiente de 55 °C e taxa de carga de C/3.



Fonte: (VIGNAROOBAN et al., 2016)

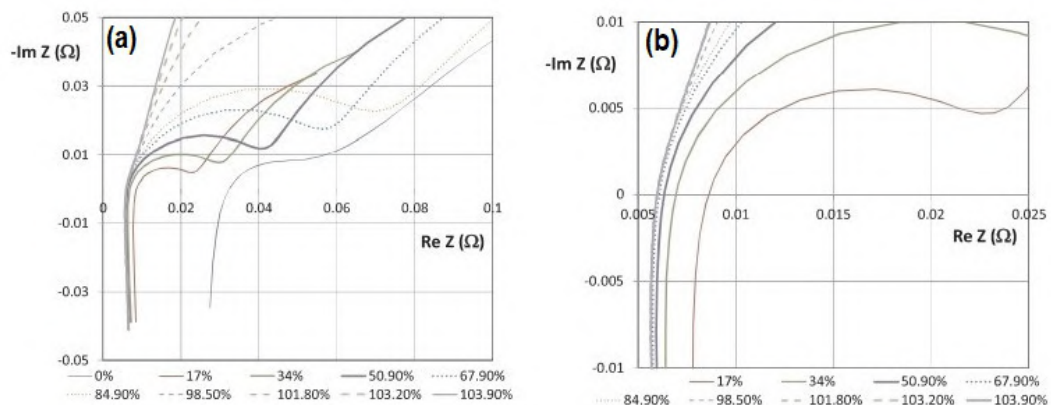
É perceptível a influência da temperatura para o desgaste da bateria, onde é verificado que o espectro da impedância apresenta principalmente um aumento da resistência série. O autor evidencia numericamente os melhores resultados para o primeiro caso, onde se obtém 0,087% de degradação por ciclo de carga, sendo elevado para 0,11% quando a taxa de carga é elevada

para C/3. Para os casos com temperatura de 55 °C a degradação do estado de saúde da bateria apresenta o valor de 0,097% para taxa de carga de C/12 e atinge 0,19% para C/3.

3.2.3 Impedância em função do estado de carga

Assim como as baterias de íons de lítio já apresentadas, a impedância da bateria chumbo-ácida também sofre impactos com seu estado de carga. (KRIVÍK et al., 2019) apresenta como resultado de seu estudo os efeitos do estado de carga para a impedância da bateria. Para esta verificação, a temperatura ambiente foi mantida em 25 °C e utilizou-se uma bateria chumbo-ácida com tensão nominal de 2V e capacidade de 2,5A/h. O autor realiza o carregamento da bateria e obtém sua impedância para diversos estados de carga. O resultado obtido está apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Impedância espectroscópica para o carregamento com temperatura de 25 °C e SOH 100% para diferentes SOC.(a) Diagrama de Nyquist (b) Diagrama de Nyquist ampliado.



Fonte: (KRIVÍK et al., 2019)

Como resultado, é observado inicialmente o incremento da resistência série do modelo, pelo esgotamento dos íons e pelo crescimento da camada de sulfato de chumbo cristalizado, onde seu crescimento torna-se mais elevado a partir de estados de carga inferiores a 32%. A parte seguinte da curva apresenta a impedância de carga referente à porosidade do eletrodo, que reduz com a descarga. Assim, esta resistência aumenta mais de forma mais significativa até o valor aproximado de 15%, e após esse valor não possui alterações muito relevantes.

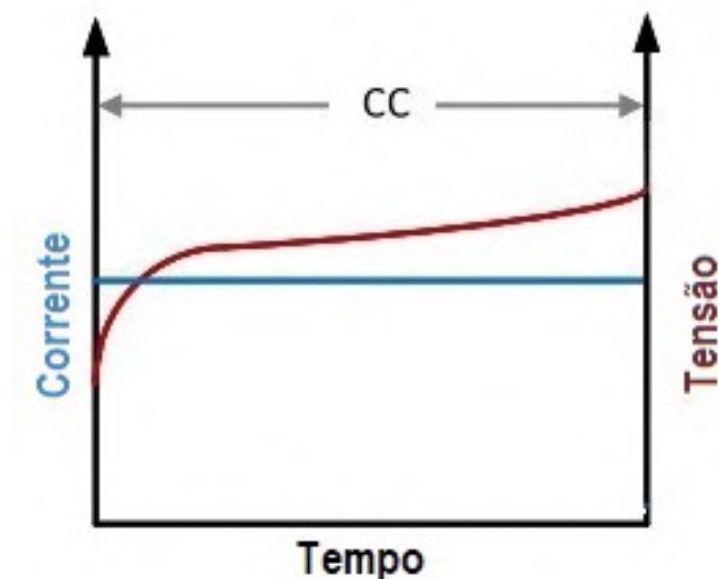
4 MÉTODOS DE CARREGAMENTO DE BATERIAS

Existem diversos métodos de carregamento estudados, cada um apresenta suas próprias vantagens, no entanto, é necessário atentar-se às limitações e propriedades das baterias a serem utilizadas no sistema, para não haver efeitos prejudiciais a suas características construtivas e riscos ao processo.

4.1 CORRENTE CONSTANTE

O método de carregamento por corrente constante, ou método CC (*Constant Current*), utiliza da aplicação de uma corrente constante durante todo o processo de carregamento da bateria, e sua tensão sobe gradativamente até atingir o estado completo de carga. A Figura 19 apresenta esta estratégia de carregamento.

Figura 19 – Carregamento por corrente constante.



Fonte: (HUANG et al., 2020).

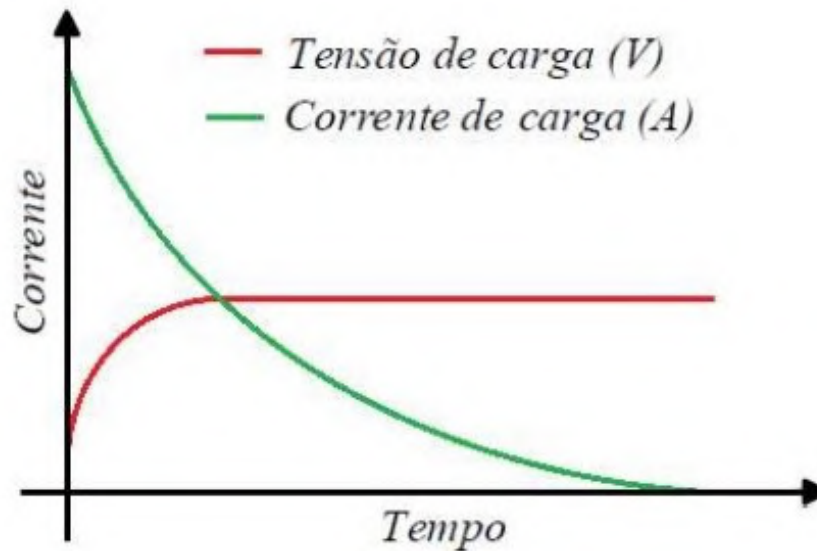
Este método é geralmente aplicado por ser considerado barato e de fácil implementação (SCHIMITT, 2021), sua aplicação pode gerar sobretensões na bateria, isso torna-se um problema uma vez que baterias de lítio são relativamente sensíveis à sobretensão, e (COLLIN et al., 2019) ressalta ainda que podem ocorrer reações eletroquímicas secundárias reduzindo permanentemente a vida útil da bateria. Assim sendo, para a aplicação deste método é necessário o monitoramento da bateria e encerramento do ciclo de carregamento assim que sua tensão atinja o valor máximo.

4.2 TENSÃO CONSTANTE

O método de carga por tensão constante, ou método CV (*Constant Voltage*), se realiza aplicando um valor constante de tensão na bateria durante todo o período de carregamento,

assim a corrente na bateria reduz com o aumento de seu estado de carga. Por não alterar o valor de tensão durante praticamente todo processo de carregamento, este método não apresenta problemas com sobretensão nos terminais da bateria. A Figura 20 apresenta a estratégia utilizada para aplicação deste método de carregamento.

Figura 20 – Carregamento por tensão constante.



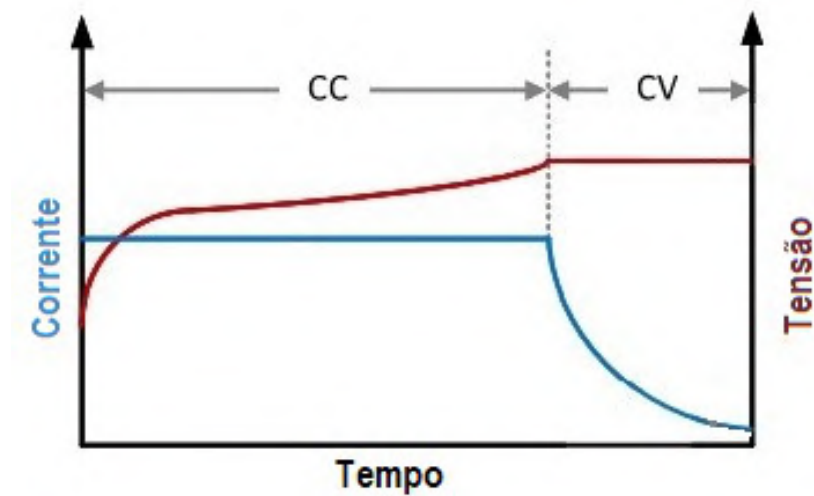
Fonte: (SCHIMITT, 2021).

No entanto, é necessário atentar-se, podendo haver níveis elevados de corrente no início do carregamento, acarretado pelo baixo estado de carga da bateria, podendo gerar elevações na temperatura, surgindo efeitos negativos sobre a vida útil da mesma e gerando danos permanentes à bateria (COLLIN et al., 2019).

4.3 CORRENTE CONSTANTE E TENSÃO CONSTANTE

Este método aplica uma combinação das duas estratégias, corrente constante e tensão constante. O processo se resume em duas etapas, na primeira é aplicada uma corrente constante sobre a bateria, este sistema perdura até que a bateria atinja um valor de 80% do seu estado de carga, e então aplica-se neste momento o método de carregamento por tensão constante até que a corrente de carga nas baterias se anule, onde neste momento terá atingido seu estado final de carregamento. O método, também chamado apenas de CC-CV apresenta melhores resultados que os dois anteriores, por evitar correntes elevadas durante o início do processo de carregamento e evitando sobretensão na bateria (SERHAN; AHMED, 2018). A Figura 21 apresenta esta estratégia de carregamento.

Figura 21 – Carregamento por corrente constante e tensão constante.



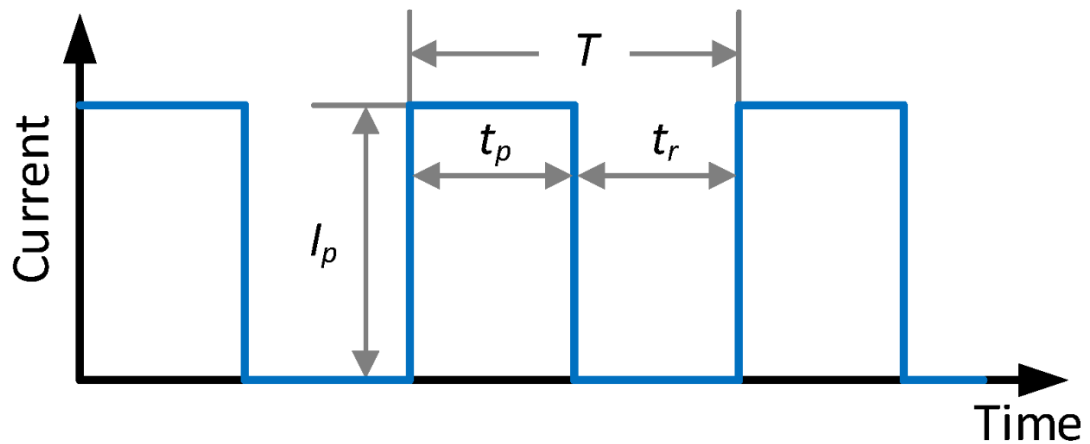
Fonte: (HUANG et al., 2020).

Segundo (SERÔDIO, 2018) apesar deste método ser muito utilizado para baterias de íons de lítio, tem a desvantagem de ser lento e apresentar um tempo relativamente elevado de carregamento para o estágio de tensão constante, responsável por um valor muito menor do percentual total da carga da bateria.

4.4 CORRENTE PULSADA

O método padrão de carga por corrente pulsada, apresentado na Figura 22, também conhecido por PPC (*Positive Pulse Current*), caracteriza-se por aplicações de pulsos periódicos positivos de corrente intercalados com períodos de descanso em frequências específicas. Esta característica de corrente pulsada pode apresentar melhores resultados, como menores elevações de temperatura, menor tempo de carregamento, maior densidade de carga e maior eficiência (HUANG et al., 2022). O nível de corrente para o carregamento é resultante do valor eficaz total dos pulsos em um período, porém picos elevados de corrente são prejudiciais à saúde da bateria, e apesar de o pulso de relaxamento permitir difusão uniforme do reagente, um período longo de relaxamento pode resultar em um tempo maior de carregamento, assim para obter os melhores resultados com este método, é preciso buscar a melhor relação entre o ciclo de carga e relaxamento (AMANOR-BOADU; GUISEPPI-ELIE; SANCHEZ-SINENCIO, 2018; YIN et al., 2015). Este método é geralmente aplicado com um ciclo de trabalho (*duty cycle*) de 0,5.

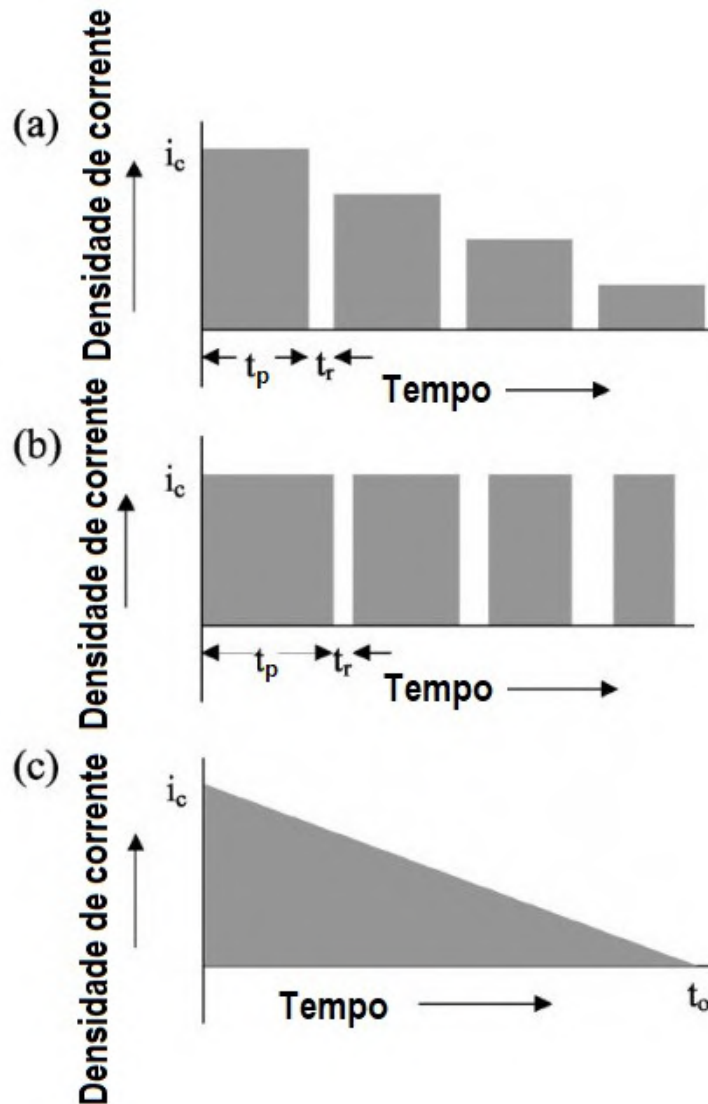
Figura 22 – Carregamento por corrente pulsada com pulso positivo.



Fonte: (HUANG et al., 2020)

O método mais convencional consiste na aplicação de pulsos constantes, no entanto, alterações neste método de carga também podem resultar melhorias em alguns aspectos, como a utilização de pulsos modulados. Este método se divide em duas estratégias, sendo a modulação de amplitude de pulso (PAM) e a modulação por largura de pulso (PWM) (HUANG et al., 2020). Contudo, ambas as estratégias consistem na aplicação inicial de uma densidade de corrente de carga mais elevada que tende a diminuir com o aumento do estado de carga da bateria. A Figura 23 ilustra este modelo de carregamento proposto por (PURUSHOTHAMAN; MORRISON; LANDAU, 2005).

Figura 23 – Carregamento por corrente pulsada modulada: (a) Modulada em amplitude. (b) Modulada em largura. (c) Densidade total de corrente no período.

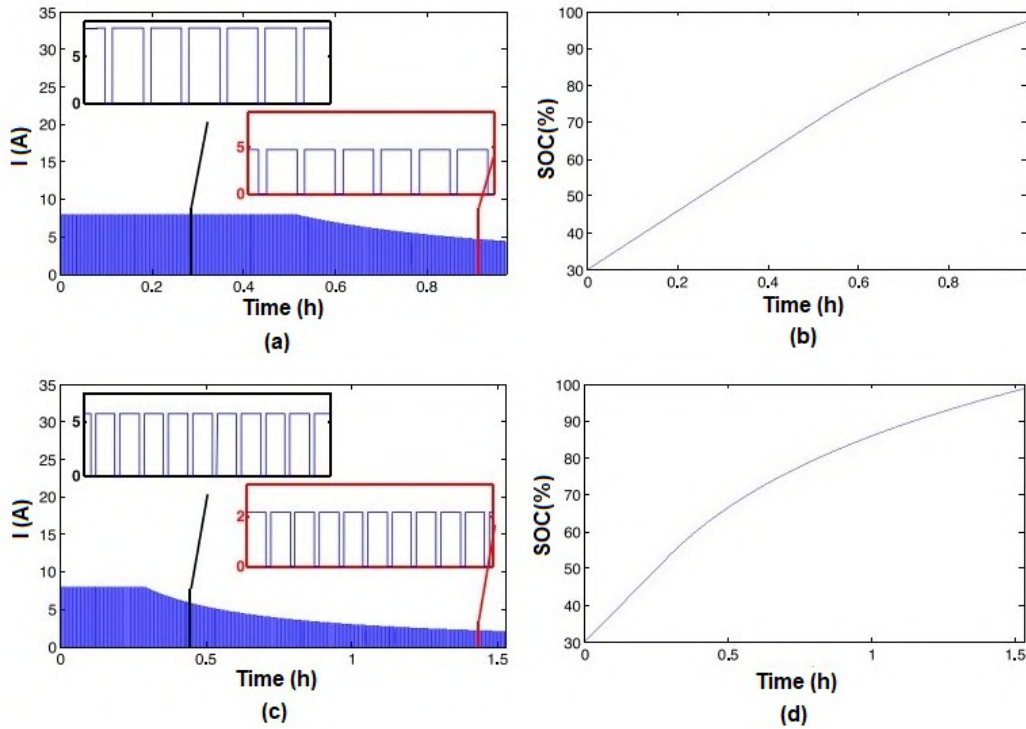


Fonte: (PURUSHOTHAMAN; MORRISON; LANDAU, 2005).

(FANG; DEPCIK; LVOVICH, 2018) apresentam uma explanação para estes métodos de carga, modelando uma bateria de íons de lítio de 8Ah, considerando as tensões de 3,85V para carga total e 3,50V para bateria totalmente descarregada. Os experimentos são utilizados com o estado de carga inicial da bateria em 30% do SOC e se encerram quando a bateria atinge a tensão máxima de 3,85V. Ambos os testes são realizados com uma corrente inicial máxima de 1C e aplicando uma frequência de 2Hz.

Para a aplicação do método PAM, o autor inicia o processo de carga da bateria com uma amplitude de corrente de 8A, um *duty cycle* de 0,4 para largura de pulso. O autor apresenta duas abordagens para otimização do processo de carga da bateria, onde inicia o estágio de redução de corrente para diferentes estados de carga da bateria em cada uma das abordagens e, a partir deste ponto, reduz a amplitude dos pulsos até o máximo estado de carga. A Figura 24 apresenta as abordagens realizadas pelos autores.

Figura 24 – Carregamento por corrente pulsada com amplitude modulada: (a) Corrente de carga em função do tempo para a primeira configuração do teste. (b) Densidade total de energia transferida em função do tempo para a primeira configuração do teste. (c) Corrente de carga em função do tempo para segunda configuração do teste. (d) Densidade total de energia transferida em função do tempo para a segunda configuração do teste.

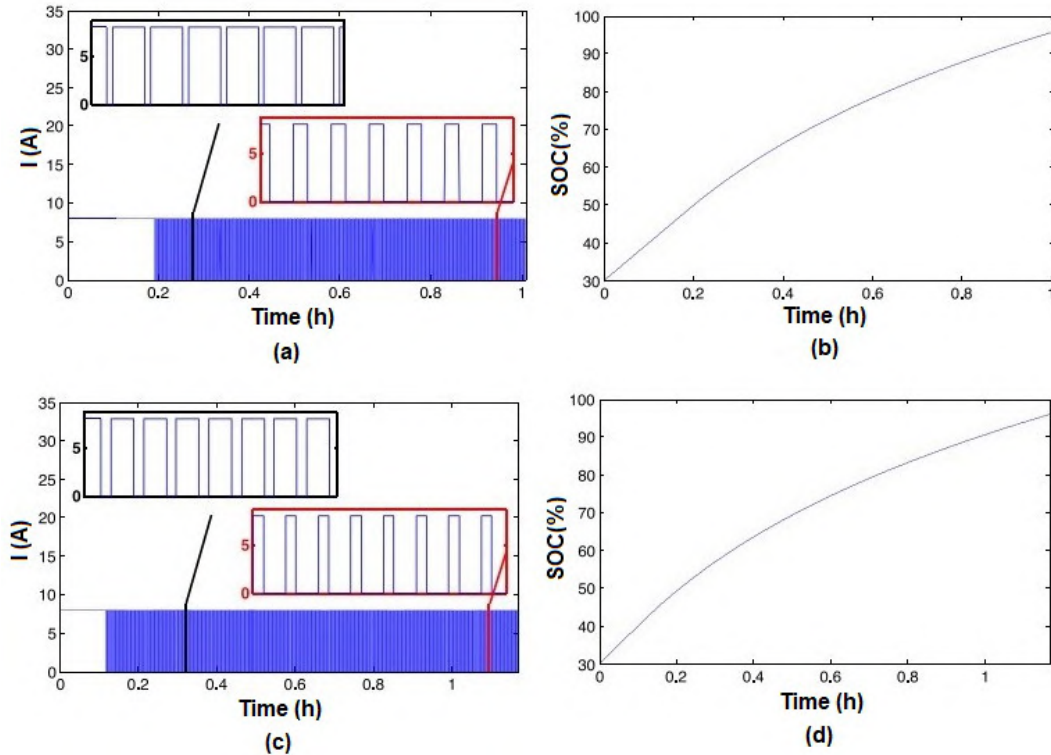


Fonte: (FANG; DEPCIK; LVOVICH, 2018).

Percebe-se que se obteve um estado de carga de 98,77% com a aplicação da segunda abordagem com o método PAM (item c), levemente superior aos 97,48% obtidos para a primeira abordagem. No entanto, apesar de nesta abordagem se obter uma carga mais profunda, um efeito da maior redução dos pulsos de corrente aplicados durante o estágio final de carregamento quando comparado ao primeiro modelo (item a), resulta no aumento considerável do tempo de carregamento total da bateria.

Para abordagem com o método PWM, o autor inicia o processo de carga das baterias com a aplicação de corrente constante, e ao atingir um estado de carga predefinido, inicia a redução constante do valor médio da corrente reduzindo a largura de pulso de forma constante até que a bateria atinja sua tensão de carga máxima. A Figura 25 apresenta a aplicação do método utilizado.

Figura 25 – Carregamento por corrente pulsada com largura modulada: (a) Corrente de carga em função do tempo para primeira configuração do teste. (b) Densidade total de energia transferida em função do tempo para a primeira configuração do teste. (c) Corrente de carga em função do tempo para segunda configuração do teste. (d) Densidade total de energia transferida em função do tempo para a segunda configuração do teste.



Fonte: (FANG; DEPCIK; LVOVICH, 2018).

Verifica-se em seus resultados que, para a estratégia apresentada para a segunda abordagem do método PWM (item c), inicia-se o processo de carga pulsada antes da primeira abordagem (item a), resultando em um estágio final com menores larguras de pulso, que apesar de tornar o processo de carga da bateria mais longo permitiu também uma carga levemente mais profunda obtendo-se um estado de carga ao fim do processo de carregamento de 95,98% para a segunda abordagem em comparação a 95,87% obtidos com a primeira abordagem.

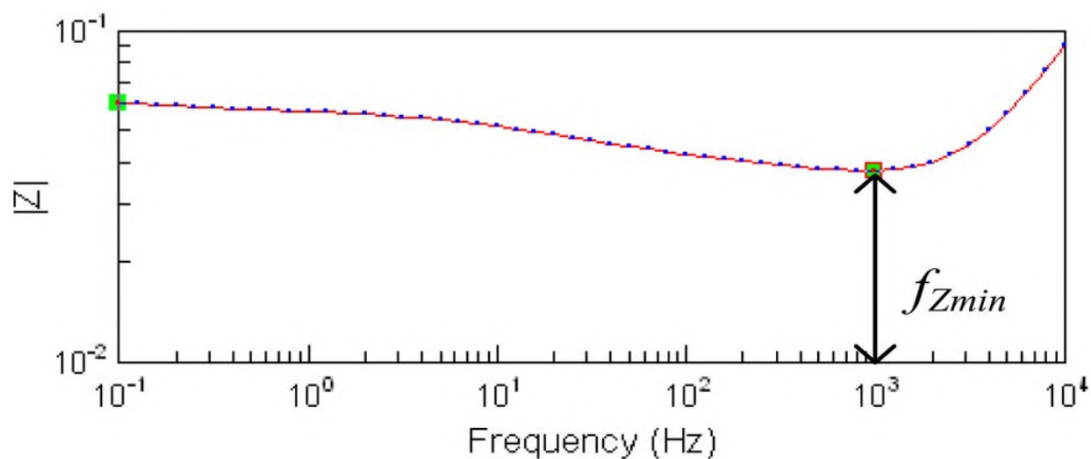
Embora ambos os testes tenham obtido estados de carga superiores a 95% após o fim do processo de carregamento com o método PWM, não foram capazes de apresentar uma profundidade de carga maior que o método PAM.

4.5 CARREGAMENTO COM CORRENTE PULSADA NA FREQUÊNCIA DE MENOR IMPEDÂNCIA

Métodos de carga por corrente pulsada em alta frequência podem operar em frequências mais elevadas, que permitem a utilização de pontos do espectro onde haja menor impedância na bateria, reduzindo perdas, gerando um menor aquecimento, e obtendo um tempo reduzido no processo de carga, o que resulta em um menor desgaste da bateria e consequentemente em uma maior vida útil da bateria.

(CHEN et al., 2013) realiza estudos com uma bateria de LFP, com corrente pulsada, utilizando os critérios de 50% do período com o pulso positivo, e corrente de carga de 1C. Seus resultados são obtidos para uma frequência de menor impedância interna da bateria e compara ao modelo de carga CC-CV. A Figura 26 apresenta o módulo da impedância da bateria para o espectro de frequência da bateria até 10kHz, onde se verifica a menor impedância da bateria em 998Hz.

Figura 26 – Módulo da impedância da bateria em função do espectro de frequência analisada até 10kHz.



Fonte: (CHEN et al., 2013).

A Tabela 2 a seguir apresenta um resumo dos resultados obtidos pelo autor para a frequência de operação de menor impedância, ressaltando a otimização com o uso da frequência de 998Hz.

Tabela 2 – Comparação entre o carregamento CC-CV e o carregamento com corrente pulsada em $f_{z_{min}}=998\text{Hz}$.

Grandeza	998Hz	CC-CV	Otimização (%)
Tempo de carregamento (s)	3637	4362	15,6
Capacidade de carga (Ah)	1,52	1,5	0,01
Capacidade de descarga (Ah)	1,49	1,45	2,7
Elevação de temperatura (°C)	2,9	4,7	61

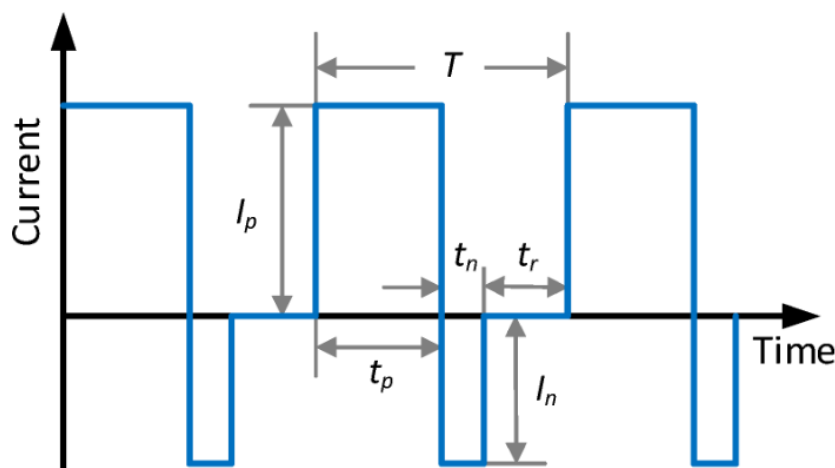
Fonte: (CHEN et al., 2013).

O carregamento realizado com corrente pulsada atingiu a carga final com um valor médio de aproximadamente 15% a menos de tempo, a capacidade de descarga foi levemente elevada, e o aumento de temperatura significativamente reduzida, obtendo para o melhor caso com impedância mínima uma diferença de 1,8 °C. Assim, com a utilização de corrente pulsada na frequência de menor impedância, é possível obter um melhor desempenho quando comparado ao carregamento CC-CV.

4.6 CORRENTE PULSADA COM PULSO NEGATIVO

O método de carregamento com pulso negativo ou NPC (*Negative Pulse Current*), também conhecido como Reflex, consiste na utilização de um pulso positivo constante para um período de carregamento e um pulso de descarga de densidade reduzida seguida por um pulso de relaxamento (HUANG et al., 2020). A estratégia de aplicação do método é apresentada na Figura 27.

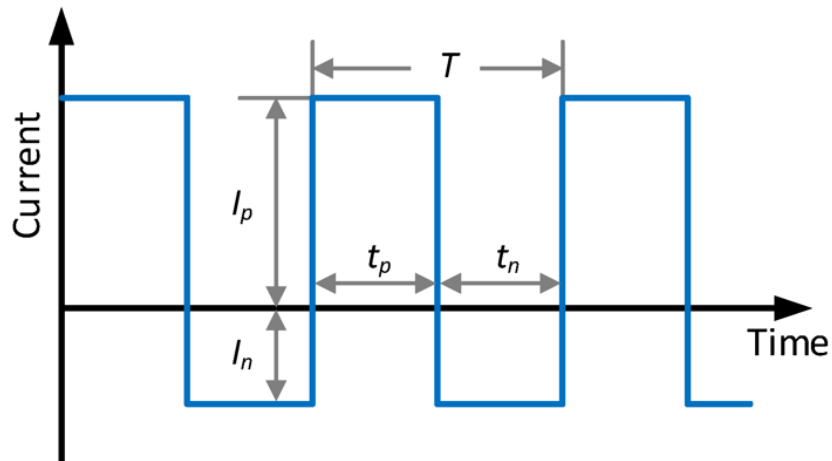
Figura 27 – Carregamento por corrente pulsada com pulso negativo.



Fonte: (HUANG et al., 2020).

Este método pode ser aplicado com algumas variações, como, por exemplo, a utilização do pulso positivo e negativo, sem o período de relaxamento, modificando a amplitude do pulso negativo e podendo tornar o processo mais rápido. Esta estratégia pode ser vista na Figura 28.

Figura 28 – Carregamento por corrente pulsada com pulso negativo sem período de relaxamento.



Fonte: (HUANG et al., 2020).

O carregamento Reflex permite a melhor utilização do material ativo da bateria e proporciona a elevação da sua vida útil (HUANG et al., 2020; HUANG et al., 2022). Estudos realizados por (Li et al., 2001) demonstraram que o carregamento com a utilização do método Reflex apresenta melhores resultados quando comparados ao CC à mesma taxa de carga e descarga, permitindo o prolongamento da vida útil em mais que o dobro de ciclos quando comparado ao modo de carregamento por corrente constante.

O estudo com baterias de NMC realizado por (HUANG et al., 2022) apresenta uma comparação para o método Reflex, onde utiliza os picos de corrente de 2C ou 4,4A, e os tempos de carga são definidos para o pulso positivo como 0,6s, para o pulso negativo como 0,1s e um tempo de relaxamento de 0,3s, onde o autor obtém o valor médio de carga de 1C. Realizando seus experimentos a uma temperatura ambiente, seu estudo compara o método ao método CC-CV e ao método Reflex com a aplicação de 1Hz. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos pelo autor aplicando o valor de descarga de 0,5C após cada teste.

Tabela 3 – Comparação entre os métodos Reflex, CC-CV e CC a 1C e temperatura de 25°C.

Método	CC-CV	Reflex	CC
Tempo de carga (min)	82,5	56,3	54,4
Valor médio da corrente (A)	2,2	2,2	2,2
Capacidade de descarga (mAh)	2208	2075	1986
Elevação de temperatura (°C)	2,9	4,2	2,8

Fonte: (HUANG et al., 2022).

Embora a inclusão do pulso negativo possa em alguns casos beneficiar a bateria, em questões de temperatura e capacidade de descarga, é necessário seu ajuste, uma vez que um período mais longo de descarga pode influenciar em um período de carregamento mais elevado além de maiores elevações de temperatura (JI et al., 2019).

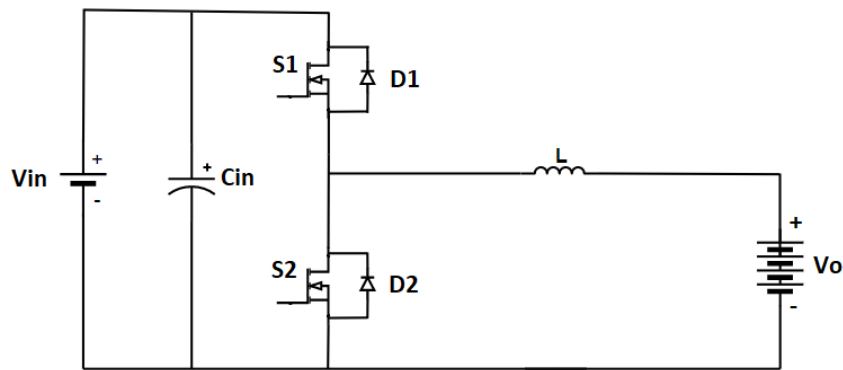
5 CONVERSOR BIDIRECIONAL EM CORRENTE

O carregamento de baterias pelos métodos tradicionais, CC e CC-CV requerem um conversor abaixador que opere em apenas um quadrante, o de tensão e corrente positivas. No entanto, para efetuar o carregamento pelo método Reflex é necessário a utilização de um conversor reversível em corrente. O conversor abaixador e reversível em corrente mais amplamente utilizado é o conversor Buck de duas chaves, como será apresentado neste capítulo.

5.1 CONVERSOR BUCK REVERSÍVEL EM CORRENTE

O conversor Buck reversível em corrente (BRC) será utilizado para realização dos estudos com o método de carregamento não convencional Reflex, por sua característica bidirecional de corrente, permitindo a transferência de potência da fonte para a carga e também no sentido da carga para a fonte. Uma topologia básica do conversor BRC pode ser vista na Figura 29.

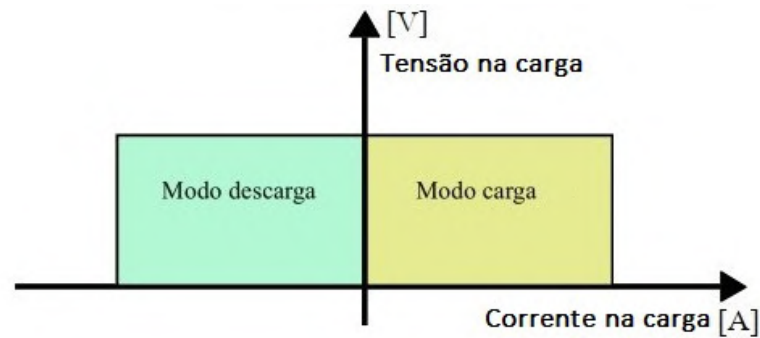
Figura 29 – Conversor Buck reversível em corrente.



Fonte: (LORENCETTI, 2018)

Na figura V_{in} é a fonte de alimentação e V_o a tensão no conjunto de baterias na saída do conversor BRC. Este conversor opera nos dois primeiros quadrantes, onde a tensão se mantém com valor médio positivo e a corrente pode ser positiva ou negativa, isto pode ser visto na Figura 30.

Figura 30 – Modelo de operação do conversor BRC no plano tensão-corrente.

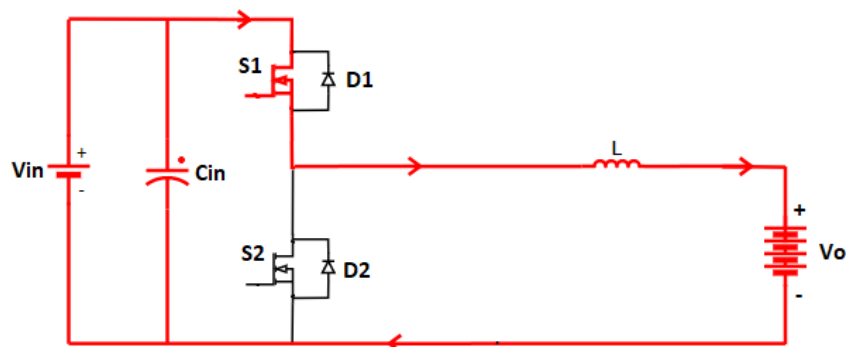


Fonte: Adaptado de (MAYER, 2014)

No conversor BRC as chaves S1 e S2 operam de forma complementar, assim, quando o valor médio da tensão gerada entre as chaves apresentar um valor maior que a tensão nas baterias, a corrente passará a fluir para as baterias. Da mesma forma, quando a tensão média gerada pelas chaves for menor que a tensão das baterias, a corrente fluirá para a fonte de entrada do conversor.

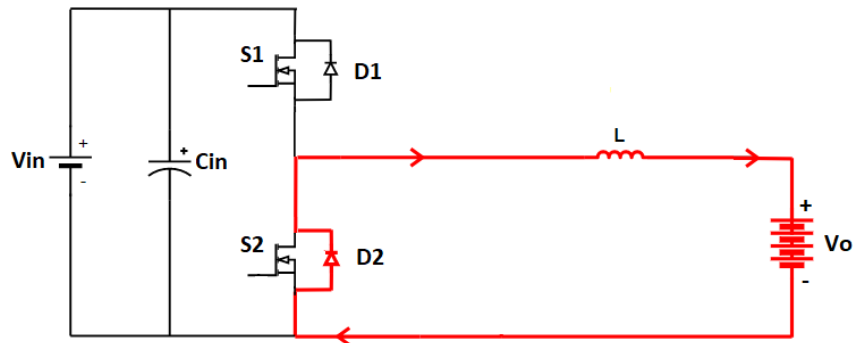
No primeiro modo de operação do conversor a corrente flui no sentido positivo com a comutação da chave S1, neste estágio há a transferência de potência da fonte para a carga, com a aplicação de uma tensão positiva e corrente positiva no indutor em sentido às baterias. Na segunda etapa, com abertura de S1 a energia armazenada no indutor flui para as baterias através do diodo da chave S2. A Figura 31 e Figura 32 apresentam estas etapas de operação.

Figura 31 – Operação do conversor BRC no primeiro quadrante para o intervalo de tempo DTs.



Fonte: (LORENCETTI, 2018)

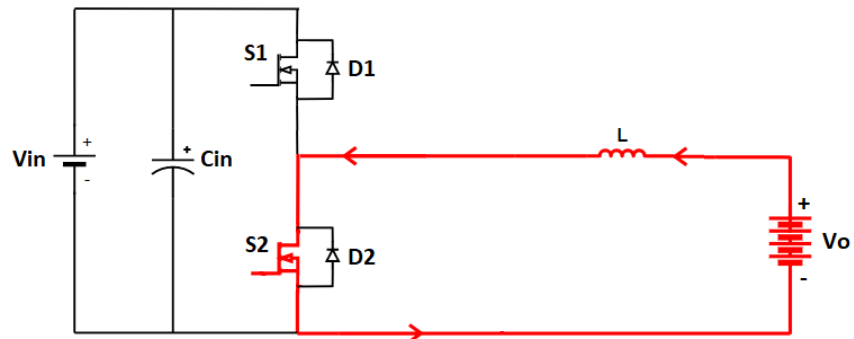
Figura 32 – Operação do conversor BRC no primeiro quadrante para o intervalo de tempo $(1-D)T_s$.



Fonte: (LORENCETTI, 2018)

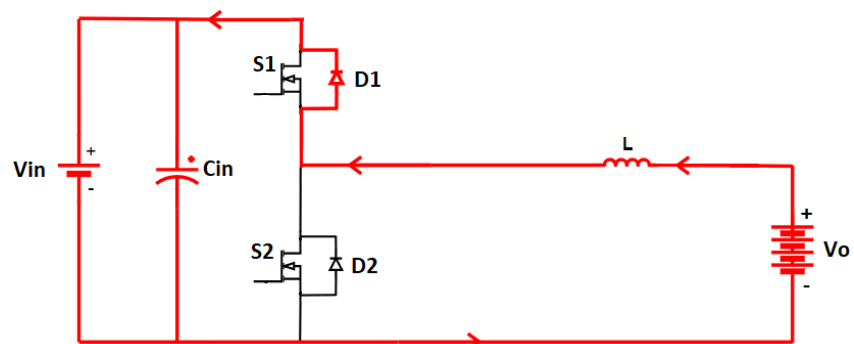
Na etapa seguinte, o conversor comuta a chave S2, e a corrente possui sentido negativo. Com o fechamento da chave S2 a corrente pode fluir das baterias carregando o indutor. Durante a abertura da chave, o diodo da chave S1 conduz de forma complementar, assim sendo, a tensão se mantém positiva, permitindo à corrente operar no sentido inverso no indutor, transferindo energia das baterias para a fonte. Estas etapas são apresentadas na Figura 33 e Figura 34.

Figura 33 – Operação do conversor BRC no segundo quadrante para o intervalo de tempo $(1-D)T_s$.



Fonte: (LORENCETTI, 2018)

Figura 34 – Operação do conversor BRC no segundo quadrante para o intervalo de tempo DT_s .



Fonte: (LORENCETTI, 2018)

Esta topologia será utilizada neste trabalho, uma vez que, embora se trate de uma topologia que possua limitações para níveis de potência altos, apresenta-se adequada para os estudos realizados. Esta topologia foi utilizada por (LORENCETTI, 2018) e (SCHIMITT, 2021) para carga de baterias chumbo-ácidas, e será utilizada para estudo de carga de baterias de lítio, apresentando funcionamento e resultados adequados.

5.1.1 Equacionamento para operação no modo Buck com corrente positiva

Como estudado anteriormente, durante a operação neste modo, a corrente na saída será a corrente no indutor e podemos tomar as considerações apresentadas nas equações 3 e 4.

$$IL = IL_{pos} \quad (3)$$

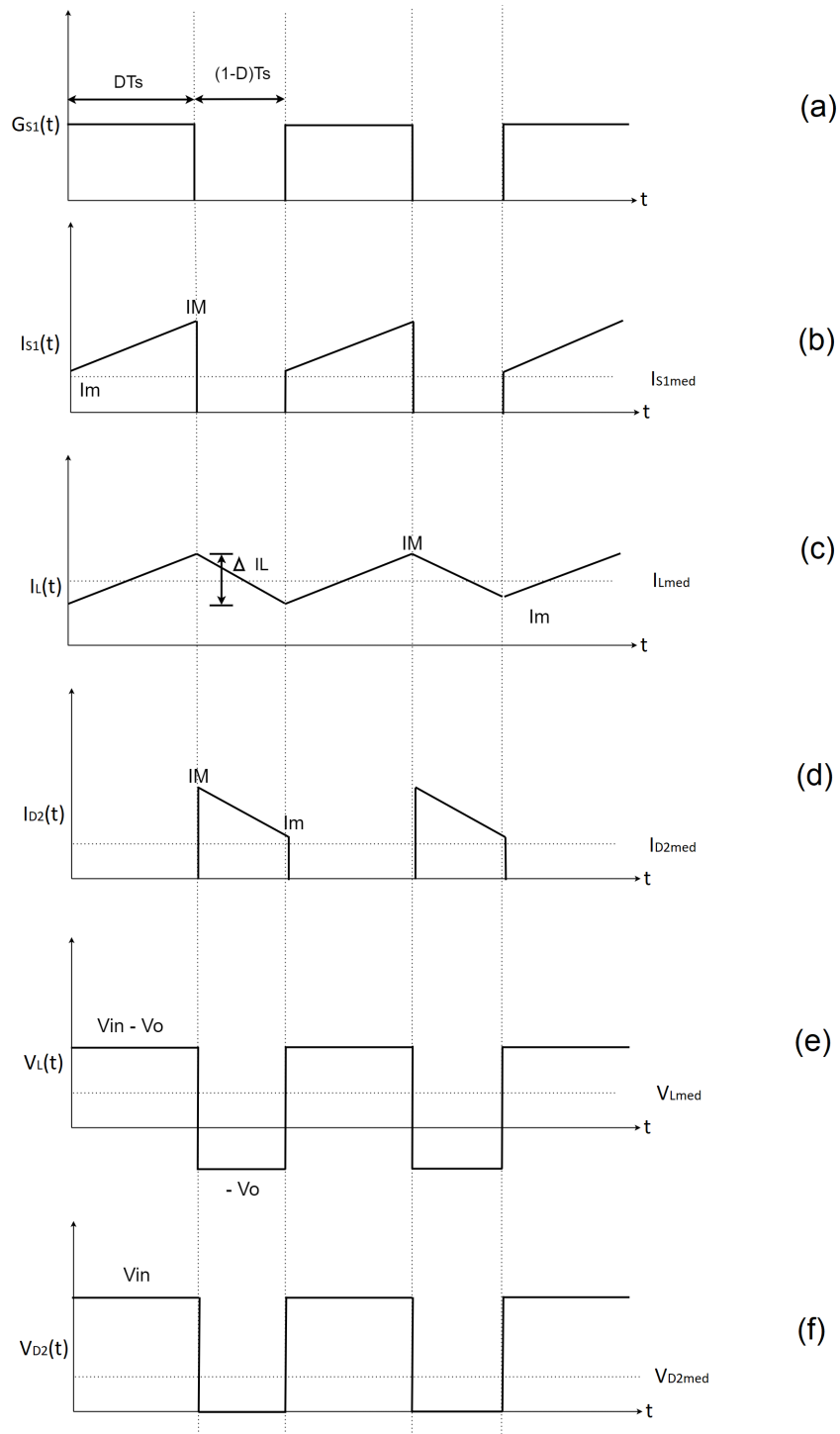
$$\Delta IL = \Delta IL_{pos} \quad (4)$$

Tendo esta consideração, e assumindo a tensão no banco de baterias como V_o , é possível obter a equação para o indutor na saída do conversor.

$$L = \frac{V_o(V_{in} - V_o)}{V_{in} \cdot \Delta IL_{pos} \cdot f_s} = \frac{D \cdot (V_{in} - V_o)}{\Delta IL_{pos} \cdot f_s} \quad (5)$$

As formas de onda para o acionamento das chaves, corrente e tensão no indutor e corrente e tensão no diodo são apresentadas na Figura 35.

Figura 35 – Formas de onda para operação no modo Buck com corrente positiva: (a) Comutação da chave S1. (b) Corrente na chave S1. (c) Corrente no indutor. (d) Corrente no diodo da chave S2. (e) Tensão no indutor. (f) Tensão no diodo da chave S2.



Fonte: Adaptado de (MAYER, 2014)

Considerando os dados anteriores obtidos, é possível obter o equacionamento dos esforços nos componentes para o conversor. Esta etapa foi baseada no trabalho de (MAYER, 2014) sendo adaptado o equacionamento para esta topologia que apresenta uma fase ao invés de três. A Tabela 4 apresenta o equacionamento para o cálculo dos esforços dos componentes.

Tabela 4 – Esforços nos componentes para operação no modo Buck com corrente positiva.

Variável	Simbolo	Equação
Valor médio da corrente no indutor	IL_{med}	IL_{pos}
Valor máximo da corrente no indutor	I_M	$IL_{pos} + \frac{\Delta IL_{pos}}{2}$
Valor mínimo da corrente no indutor	I_m	$IL_{pos} - \frac{\Delta IL_{pos}}{2}$
Valor eficaz da corrente no indutor	IL_{ef}	$[IL_{pos}^2 + (\frac{\Delta IL_{pos}}{2})^2]^{1/2}$
Valor médio da corrente na chave	IS_{med}	$D \frac{(I_M + I_m)}{2}$
Valor eficaz da corrente na chave	IS_{ef}	$[D \frac{(I_M^2 + I_m^2 + 2I_M I_m)}{4}]^{1/2}$
Valor médio da corrente no diodo	ID_{med}	$(1 - D) \frac{(I_M + I_m)}{2}$
Valor eficaz da corrente no diodo	ID_{ef}	$[(1 - D) \frac{(I_M^2 + I_m^2 + 2I_M I_m)}{4}]^{1/2}$

Fonte: Adaptado de (MAYER, 2014)

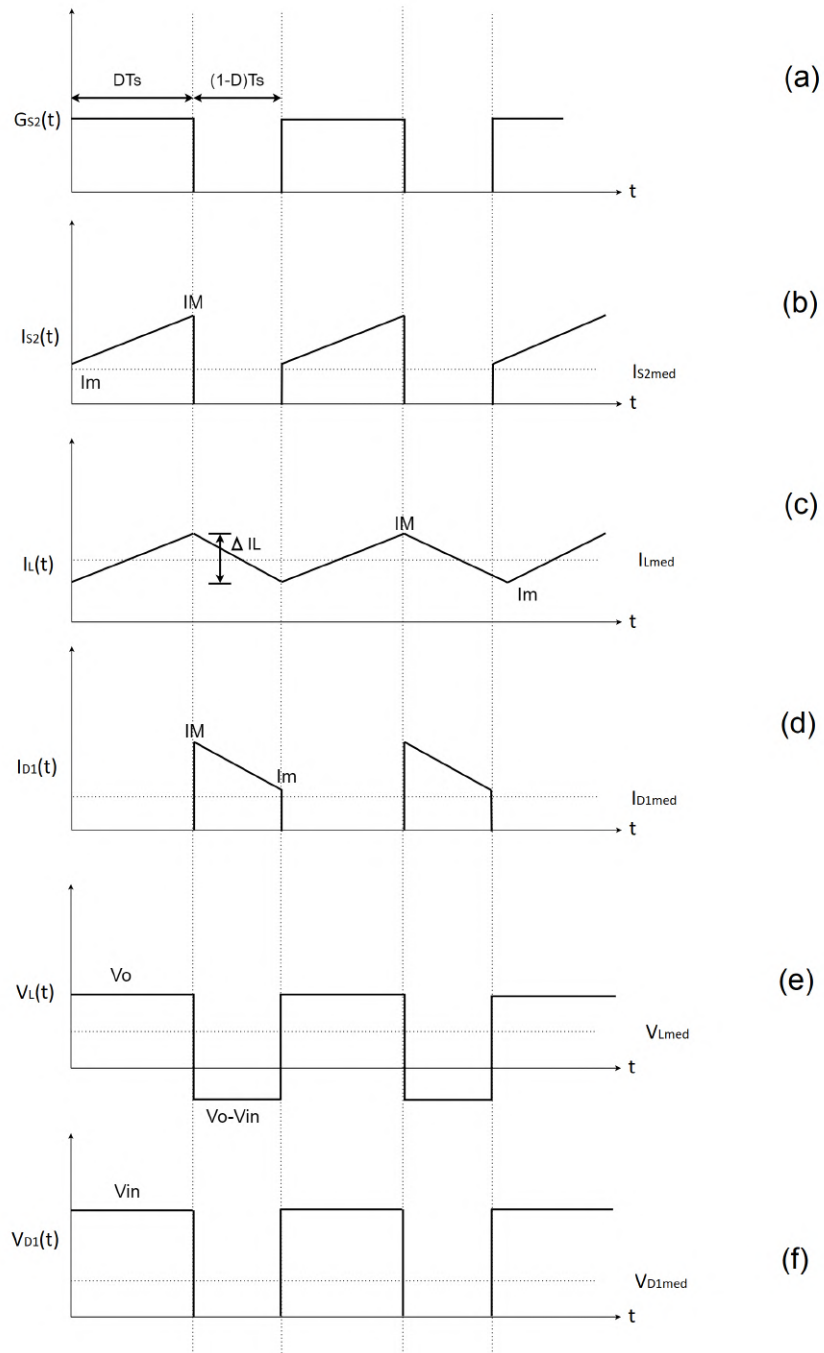
5.1.2 Equacionamento para operação no modo Buck com corrente negativa

Na etapa Buck com corrente negativa, o conversor opera de maneira oposta à apresentada anteriormente, de maneira que nesta etapa a chave S2 comuta e a corrente flui da bateria que, neste caso, representa a carga, para a fonte invertendo o fluxo de potência. Para este caso, é necessário considerar o rendimento do conversor para o projeto, sendo a relação entre a potência de entrada e saída do conversor apresentada na equação 6.

$$n = \frac{P_o}{P_{in}} \cdot 100\%. \quad (6)$$

As formas de onda para o conversor operando no modo Buck com corrente negativa estão apresentadas na Figura 36.

Figura 36 – Formas de onda para operação no modo Buck com corrente negativa: (a) Comutação da chave S2. (b) Corrente na chave S2. (c) Corrente no indutor. (d) Corrente no diodo da chave S1. (e) Tensão no indutor. (f) Tensão no diodo da chave S1.



Fonte: Adaptado de (MAYER, 2014)

As equações para os esforços dos componentes são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Esforços nos componentes para a operação no modo Buck com corrente negativa.

Variável	Simbolo	Equação
Valor médio da corrente no indutor	IL_{med}	IL_{neg}
Valor máximo da corrente no indutor	I_M	$IL_{neg} + \frac{\Delta IL_{neg}}{2}$
Valor mínimo da corrente no indutor	I_m	$IL_{neg} - \frac{\Delta IL_{neg}}{2}$
Valor eficaz da corrente no indutor	IL_{ef}	$[IL_{neg}^2 + (\frac{\Delta IL_{neg}}{2\sqrt{3}})^2]^{1/2}$
Valor médio da corrente na chave	IS_{med}	$D \frac{(I_M + I_m)}{2}$
Valor eficaz da corrente na chave	IS_{ef}	$[D \frac{(I_M^2 + I_m^2 + 2I_M I_m)}{4}]^{1/2}$
Valor médio da corrente no diodo	ID_{med}	$(1 - D) \frac{(I_M + I_m)}{2}$
Valor eficaz da corrente no diodo	ID_{ef}	$[(1 - D) \frac{(I_M^2 + I_m^2 + 2I_M I_m)}{4}]^{1/2}$

Fonte: Adaptado de (MAYER, 2014)

Para o caso do conversor operando com corrente negativa, o capacitor de saída é calculado pela equação 7.

$$C_{Bn} = \frac{I_{in_{neg}} \cdot D}{\Delta V_c \cdot f_s}. \quad (7)$$

Em que $I_{in_{neg}}$ é a corrente que flui para o capacitor de entrada.

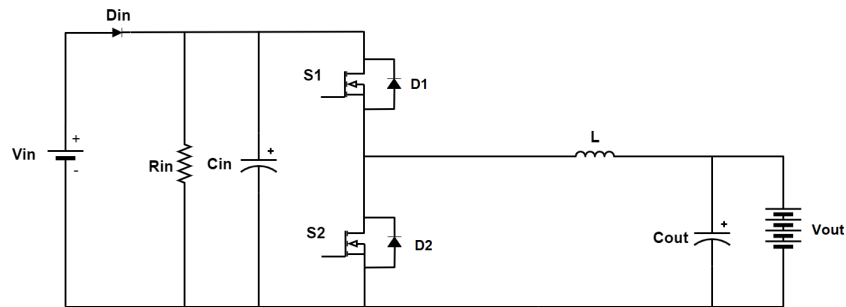
O valor máximo da resistência série permitida para o capacitor está apresentada na equação 8.

$$ESR_{C_{Bn}} = \frac{\Delta V_c}{ID_{max}}. \quad (8)$$

5.2 PROJETO DO CONVERSOR BRC

O projeto do conversor BRC será implementado como apresentado na Figura 37.

Figura 37 – Diagrama do conversor BRC.



Fonte: O autor

A fonte de entrada é V_{in} , proveniente de uma fonte de alimentação CC, as chaves S1 e S2, os diodos D1 e D2, intrínsecos as respectivas chaves do conversor, são conectados no filtro LC e V_{out} representa a tensão total no banco de baterias. No barramento de maior tensão são postos em paralelo o capacitor C_{in} e o resistor R_{in} , este último é utilizado para que a energia proveniente da bateria possa ser dissipada, sem a necessidade de o conversor principal estar conectado a um conversor reversível para devolver energia à rede. O diodo na entrada, representado por D_{in} , impede que a corrente flua para a fonte.

As especificações do conversor foram definidas considerando os limites máximos e mínimos da tensão de operação de um conjunto de três baterias de lítio arranjadas em série, da mesma forma que os valores de corrente foram definidos para que o pico de corrente fosse capaz de atingir valores superiores a $1C$, uma vez que a placa proporcionada para o desenvolvimento do projeto possui capacidade de operar com uma corrente de até 6A. Os valores definidos para o projeto do conversor BRC são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Especificações para o projeto do conversor.

Grandeza	Sigla	Valor
Valor máximo da corrente de carga	$I_{L_{max}}$	6 A
Valor máximo da tensão na carga	$V_{O_{max}}$	12,6 V
Valor mínimo da tensão na carga	$V_{O_{min}}$	9,0 V
Valor máximo da ondulação de corrente no indutor	$\Delta I_{L_{max}}$	100 mA
Valor máximo da ondulação de tensão no capacitor de entrada	$\Delta V_{C_{max}}$	120mV
Frequência de chaveamento do conversor	f_s	40 kHz

Fonte: O Autor

Seguindo estas especificações, é possível projetar os componentes do circuito de potência como visto nas seções anteriores. Os valores calculados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Elementos calculados para o projeto do conversor de potência.

Especificação	Sigla	Valor
Razão cíclica máxima no modo Buck com corrente positiva	D_{pos}	0,525
Razão cíclica máxima no modo Buck com corrente negativa	D_{neg}	0,625
Indutância	L	1,47mH
Capacitor de entrada mínimo	$C_{in_{min}}$	235 uF

Fonte: O Autor

As chaves selecionadas foram do tipo IRFP4127 MOSFET de potência com alta velocidade de chaveamento e rápida recuperação reversa do diodo intrínseco, e os diodos de entrada utilizados foram o SCS240KE2 diodo schottky. As características destes componentes são apresentadas na Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 8 – Especificações do MOSFET IRFP4127 para junção a 75°C.

Especificação	Sigla	Valor
Máxima tensão dreno-source	V_{DS}	200V
Máxima corrente de dreno	I_{Dmax}	76A
Resistência em condução	R_{DSon}	17mohms
Tensão de threshold	V_{th}	3V
Tempo de recuperação reversa no diodo	t_{rr}	136ns
Tensão direta no diodo	V_F	1,3V

Fonte: O Autor

O tempo de acionamento e desacionamento máximo para do MOSFET foi definido como $tr=tf=250ns$, ou seja, 1% do período de comutação das chaves.

Tabela 9 – Especificações do diodo SCS240KE2 para junção a 75°C.

Especificação	Sigla	Valor
Máxima tensão reversa	V_R	1200V
Tensão direta	V_F	1,5
Máxima corrente direta	I_F	40A
Tempo para comutação	t_c	18ns
Resistência térmica	R_{jc}	0,28°C

Fonte: O Autor

O conversor foi projetado considerando o pior caso de operação, ou seja, máxima corrente no indutor e máxima tensão na carga. O valor calculado para os esforços no componente estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Esforços nos componentes calculados para o conversor Buck reversível em corrente.

Variável	Símbolo	Operação com corrente positiva	Operação com corrente negativa
Valor médio da corrente no indutor	IL_{med}	6A	6 A
Valor máximo da corrente no indutor	I_M	6,05	6,05 A
Valor mínimo da corrente no indutor	I_m	5,95	5,95 A
Valor eficaz da corrente no indutor	IL_{ef}	6 A	6 A
Valor médio da corrente na chave	IS_{med}	3,15A	3,75 A
Valor eficaz da corrente na chave	IS_{ef}	4,34 A	4,74 A
Valor médio da corrente no diodo	ID_{med}	2,85	2,25
Valor eficaz da corrente no diodo	ID_{ef}	4,13	3,68 A

Fonte: Adaptado de (MAYER, 2014)

O valor para o cálculo das perdas nos componentes e o rendimento estimado do conversor são apresentados na Tabela 11, onde são considerados os valores máximos especificados no projeto.

Tabela 11 – Valores calculados para o projeto do conversor BRC.

Grandeza	Valor para corrente positiva	Valor para corrente negativa
Perdas de comutação na chave	1,44W	1,44W
Perdas de condução na chave	0,56W	0,67W
Perdas de condução no diodo	4,21W	3,34W
Perdas de recuperação reversa no diodo	0,44W	0,44W
Perdas totais na chave	6,65W	5,89W
Rendimento do conversor	89,46%	89,15%

Fonte: O Autor

5.2.1 Projeto do indutor

O indutor deve ser projetado de modo a garantir os valores especificados, sendo uma ondulação máxima de 100mA que opera na frequência de chaveamento do conversor, e uma frequência reduzida com o volume mais elevado de corrente referente a inversão causada sobre ele durante a aplicação dos testes com o modo de carregamento Reflex. Para a escolha do núcleo é necessário considerar os resultados quando referentes às perdas no cobre e perdas no núcleo. Assim optou-se pela escolha de um núcleo toroidal MMTS75T4015 Sendust. As informações do núcleo são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Especificações técnicas do núcleo MMTS75T4015 Sendust.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Diâmetro interno	D_{int}	24,1 mm
Diâmetro externo	D_{ext}	39,9 mm
Área transversal	A_e	1,072 cm ²
Área da janela	A_w	4,56 cm ²
Volume total	V_e	10,5 mm ³
Altura	H_n	14,5 mm
Permeabilidade magnética máxima permitida	B	1,05 T

Fonte: O Autor

As equações para o projeto do indutor são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Projeto do indutor.

Parâmetro	Equação	Valor	Grandeza
Produto entre a área da secção transversal do núcleo e da área da janela	$AeAw = \frac{I_{pico}^2 \cdot 10^4}{B_{max}^2 k J_{max}}$	9,78	cm ⁴
Al mínimo permitido	$AL_{min} = \frac{B_{max}^2 \cdot (Ae \cdot 10^{-4})^2}{\mu L_{max}^2 \cdot L}$	8,2	nH/esp ²
Número de espiras	$Nt = (\frac{L}{AL})^{1/2}$	88	espiras
Perdas no cobre	$P_w = \frac{I_{ef}^2 \cdot Nt \cdot lm \cdot pho}{S}$	1,99	W
Perdas no núcleo	$P_v = P_{uv} \cdot Ve$	0,32	W
Perdas totais	$P_t = P_w + P_v$	2,31	W
Área mínima do condutor	$S_{min} = \frac{100 \cdot I_{ef}}{J_{max}}$	1,34	mm ²
Diâmetro máximo (efeito pelicular)	$D_{max} = \frac{7,5}{f_s^{(1/2)}}$	2,50	mm
Número de fios em paralelo	$\frac{S_{min}}{S_{avg}}$	1	unidade

Fonte: O Autor

O projeto do indutor foi realizado considerando um valor de $B_{max}=1T$ permitido pelo núcleo Sendust, uma densidade de corrente $J_{max}=450 \text{ A/cm}^2$ e permeabilidade magnética do ar $\mu_o= 4,0.\pi.10^{-7} \text{ H/m}$. Para este projeto, utilizou-se um núcleo toroidal, o qual possui um entreferro distribuído, com um valor de $AL=101.10^{-9} \text{ nH/esp}^2$, onde se utilizaram dois núcleos em paralelo e foram necessárias 88 espiras.

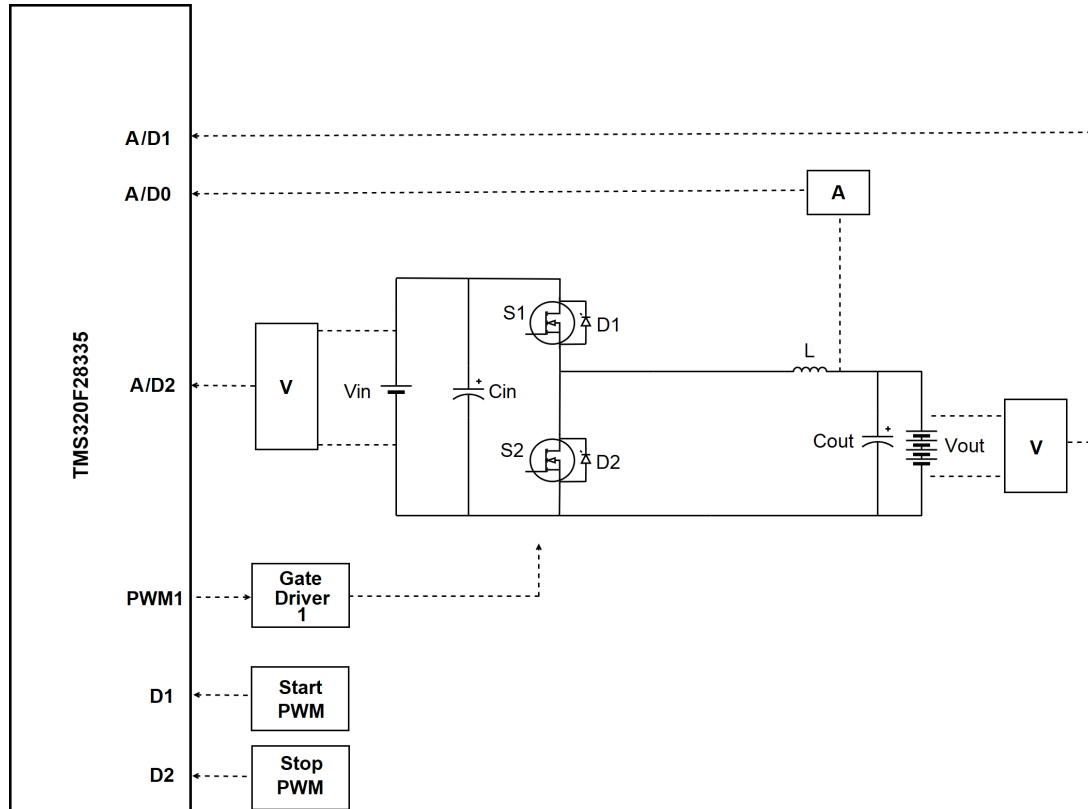
Para o cálculo das perdas no núcleo, são consideradas as perdas em alta frequência, para a frequência de chaveamento do conversor e as perdas em baixa frequência, sendo a frequência de ondulação da corrente utilizado no método Reflex. As perdas em baixa frequência foram calculadas utilizando a frequência de 60Hz, permitindo que o conversor opere em frequências maiores em trabalhos futuros. O Anexo A apresenta a tabela das perdas no núcleo pela frequência fornecida pelo fabricante. O cabo selecionado para o projeto foi o AWG13, permitindo a utilização de um condutor.

A indutância final resultou 1,55mH, e utilizando um fator de ocupação de $k=0,5$, foi possível garantir uma folga para o projeto físico do magnético. Devido a modificações no projeto e prevendo a possibilidade da utilização do conversor em trabalhos futuros com mais baterias, além da capacidade do conversor em alocar mais indutores, o projeto incluiu dois indutores em série. Isto será visto nas etapas seguintes com a apresentação do conversor.

5.2.2 Circuito eletrônico do conversor

O circuito eletrônico proposto está apresentado na Figura 38.

Figura 38 – Circuito eletrônico proposto do conversor BRC.



Fonte: O autor

No esquemático acima são apresentados os pontos de aquisição de dados no conversor, onde são medidas a corrente no indutor e a tensão total nas baterias. Estes sinais são condicionados por circuitos que possuem a redução dos níveis de tensão e corrente, os quais são conectados às entradas A/D do microcontrolador.

Os *drivers* são acionados pelas saídas do PWM 1 do DSP, o qual permite a atuação complementar das chaves, juntamente com a inclusão do tempo morto em seu acionamento, evitando assim um curto-circuito de braços entre as chaves.

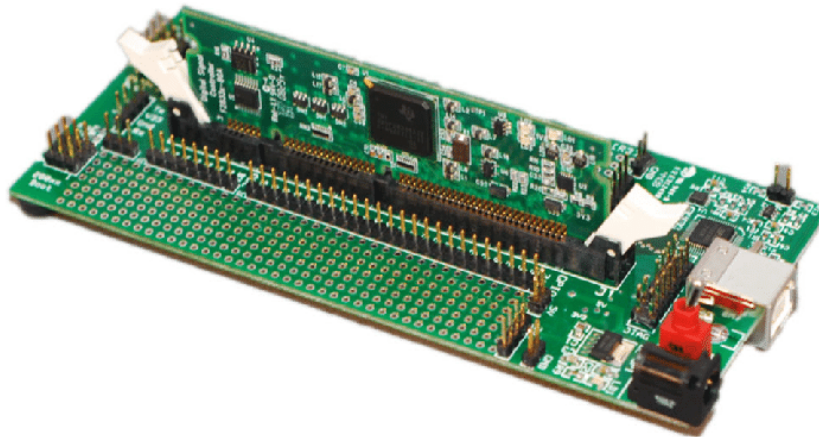
O circuito também utiliza duas entradas digitais, uma para permitir o início do PWM e outra para um botão de parada do PWM, para questões de segurança durante a partida do conversor.

5.2.3 Microcontrolador TMS320F28335

O microcontrolador TMS320F28335 da Texas Instruments® foi utilizado para leitura e processamento dos sinais vindos dos circuitos de condicionamento, que medem os valores de tensão nas baterias e de corrente no indutor, além de implementar os controles garantindo o acionamento das chaves do circuito de potência. Este DSP apresenta a vantagem de possuir

a configuração de tempo morto entre os PWMs que enviam o sinal de acionamento para as chaves, diretamente em sua programação, sem a necessidade da utilização de circuitos eletrônicos integrados para evitar um curto-circuito entre os braços conectados em série no conversor BRC, além de possuir um conversor ADC de 12 *bits*, com ponto flutuante. O kit didático com a placa do microcontrolador TMS320F28335 pode ser visto na Figura 39.

Figura 39 – Microcontrolador TMS320F28335.

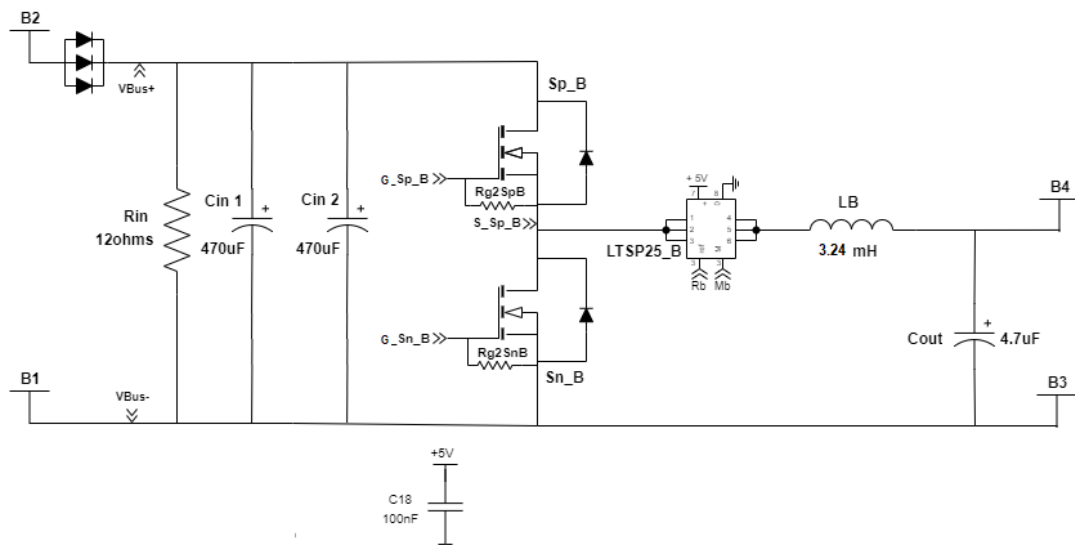


Fonte: (BONO-NUEZ et al., 2017)

5.2.4 Circuito de potência do conversor

O circuito de potência desenvolvido para o conversor está apresentado na Figura 40.

Figura 40 – Circuito de potência do conversor.



Fonte: Adaptado de (HEERDT, 2013)

O conversor apresenta um braço, com dois MOSFETs IRFP4127 conectados a seu indutor. Foram utilizados dois capacitores de 470uF em paralelo, com valor superior ao valor

calculado, uma vez que estavam disponíveis para uso na placa, visto que para esta aplicação estes capacitores de valor mais elevado não serão prejudiciais. Também é apresentado o sensor de corrente para medir a corrente que flui no indutor para a carga, uma vez que para esta aplicação será necessário para operação em malha fechada. Uma vez que esta topologia se trata de um conversor bidirecional, é necessário haver um caminho para circulação da energia que flui da carga para a entrada do conversor. Existem algumas possibilidades para o projeto, sendo a aplicação de um conversor bidirecional capaz de enviar a energia para a rede, ou a dissipação da mesma em um resistor para evitar sobretensão no capacitor. Para este caso, por se tratar de um conversor para aplicação de testes com métodos aprimorados de carregamento para baterias, optou-se pela inclusão do resistor, que apesar de tornar a aplicação menos eficiente não prejudica os resultados experimentais, tornando a construção do projeto mais simples. Para ser possível esta implementação, são adicionados os diodos na entrada do conversor, os quais impedem que a corrente flua para a fonte, garantindo que toda energia seja dissipada pelo resistor. A escolha dos três diodos na entrada se fez para ser possível uma menor dissipação de potência vinda da fonte na entrada do conversor, que será útil em projetos futuros com maiores níveis de potência.

5.2.5 Drivers

Para o acionamento do conversor foram utilizados os *drivers* industriais SKHI20opa da SEMIKRON, apresentado na Figura 41, os quais são circuitos de *drivers* isolados, com até dois sinais de saída para o acionamento das chaves, com uma tensão máxima de 1200V e corrente de saída de até 2,5A, requisitos mais que suficientes para esta aplicação.

Figura 41 – *Driver* SKHI20opa da SEMIKRON.



Fonte: (HEERDT, 2013)

O circuito é alimentado por uma tensão de 15V contínua vindo de uma fonte auxiliar, garantindo o acionamento com tensão adequada para as chaves. Os *drivers* possuem alimentação pela mesma fonte, porém são utilizados trafos para isolamento entre as alimentações. O circuito está apresentado na Figura 42.

5.2.6 Condicionamento de corrente

Para medição de corrente, foi utilizado um sensor de efeito *hall* do modelo LTSP25NP apresentado na Figura 43, o qual possui um sinal de saída em tensão com *offset* de 2,5V para ajustar a corrente negativa, e um ganho de 0,015625V/A.

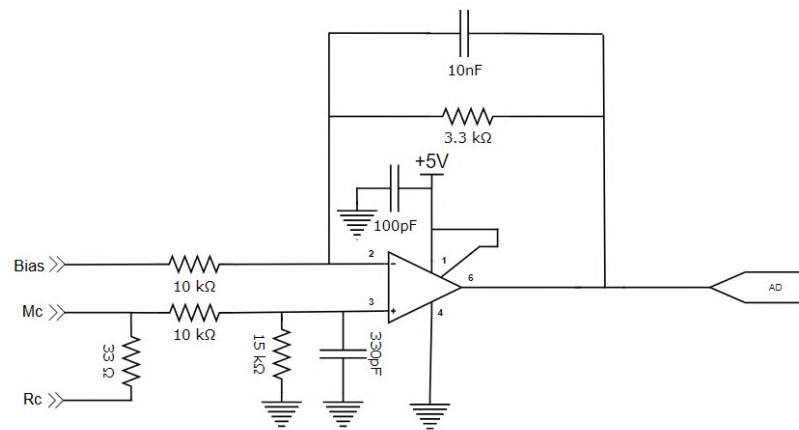
Figura 43 – Sensor de efeito *hall* LTSP25NP.



Fonte: (LEM, 2023)

O circuito de condicionamento de corrente é apresentado na Figura 44.

Figura 44 – Circuito de condicionamento de corrente.



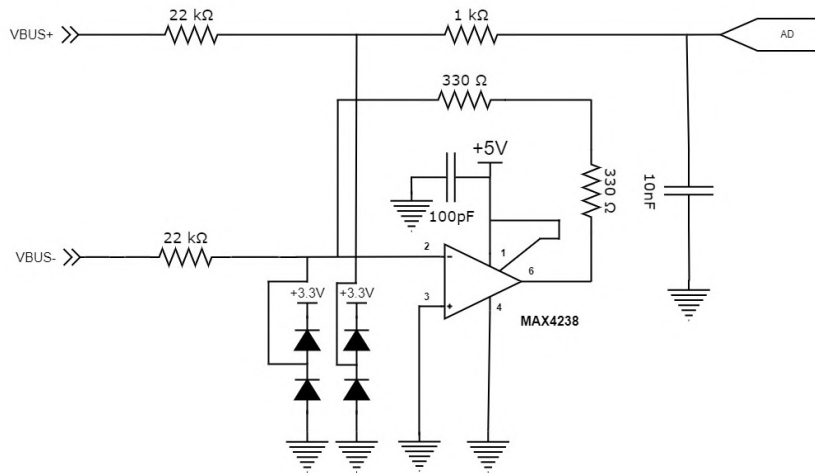
Fonte: adaptado de (HEERDT, 2013)

Estes circuito é constituído de um filtro analógico passa-baixa de primeira ordem com um ganho de tensão de aproximadamente 0,76 da tensão obtida no resistor, e um *offset* de 1,5V para reduzir o nível da tensão, garantindo valores adequados que não superem os 3,3V máximos permitido na entrada do conversor A/D do microcontrolador. Para este circuito foi utilizado o amplificador operacional MAX4238 o qual possui um *offset* máximo de tensão de 2,5uV. O circuito é composto por um filtro passa baixa com frequência de corte em aproximadamente 3200Hz para evitar o efeito de aliasing durante a amostragem dos sinais.

5.2.7 Condicionamento de tensão

Para medição de tensão no barramento de entrada se utiliza o circuito apresentado na Figura 45.

Figura 45 – Circuito de condicionamento de tensão do barramento de entrada.



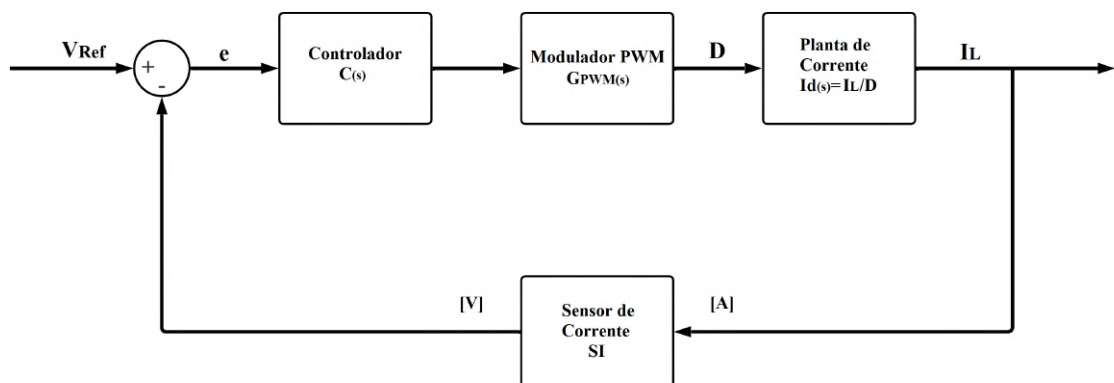
Fonte: adaptado de (HEERDT, 2013)

Este circuito servirá para medição da tensão máxima no barramento, o que permitirá que as proteções sejam atuadas caso o circuito responsável por queimar a energia gerada pela corrente de descarga da bateria não seja capaz de evitar a sobretensão nos capacitores do barramento de entrada.

5.3 CONTROLE DE CORRENTE DO CONVERSOR BRC

Para a aplicação do controle de corrente é necessário considerar os ganhos dos sensores. O diagrama do controle da malha de corrente aplicada pode ser visto na Figura 46.

Figura 46 – Diagrama de blocos do controle de corrente.



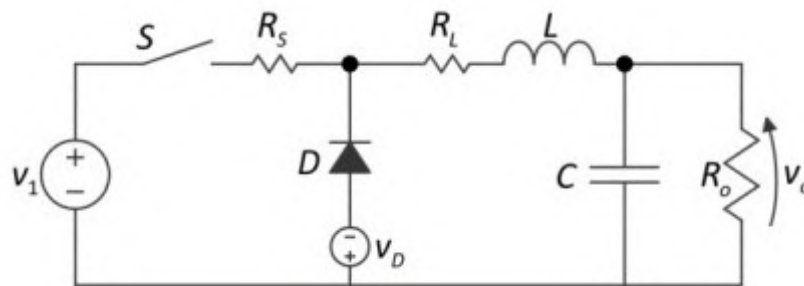
Fonte: O Autor

No diagrama $Id(s)$ é a função de transferência do conversor que relaciona a corrente de saída em função da razão cíclica do conversor, o sinal de saída é lido passando pelo ganho do sensor de corrente, o qual converte o sinal para um valor de tensão e em seguida é comparado com o valor da tensão de referência, onde se obtém o valor do erro. O bloco seguinte representa o ganho do modulador PWM. Alternando o valor da referência entre positivo e negativo, é possível obter a inversão da corrente no indutor.

5.3.1 Dedução da planta de corrente

A dedução do modelo da planta de corrente se dá como especificado por (BARBI, 2015) com a utilização do modelo médio em espaço de estados. O modelo considerado do conversor pode ser visto na Figura 47, tendo que podemos considerar o conversor operando com corrente positiva durante o período em que este transfere energia da fonte para a carga. No modelo utilizado, temos R_s como a resistência da chave, v_D a queda de tensão no diodo e R_L a resistência do indutor.

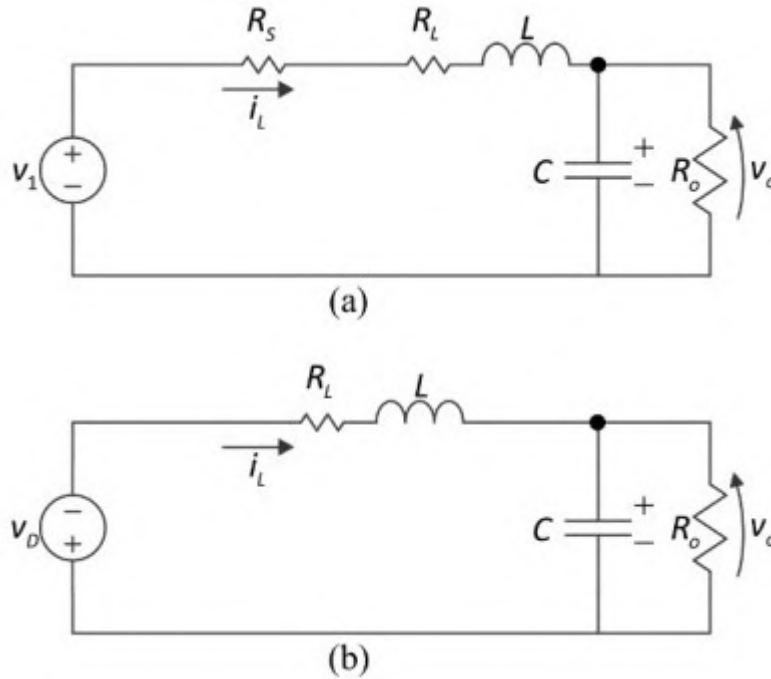
Figura 47 – Modelo considerado para operação no modo Buck com corrente positiva.



Fonte: (BARBI, 2015)

Para este caso pode ser considerado o conversor operando em condução contínua. Assim são considerados dois estados topológicos, o primeiro apresentado na Figura 48 (a) para o estado onde a chave está em condução, e o segundo na Figura 48 (b) em que a chave está aberta.

Figura 48 – Modelo considerado para operação no modo Buck com corrente positiva: (a) Chave fechada. (b) Chave aberta.



Fonte: (BARBI, 2015)

Para o primeiro estado topológico podemos retirar as equações 9 e 10.

$$L \frac{di_L}{dt} = -R_s \cdot i_L - R_L \cdot i_L - v_C + v_1 \quad (9)$$

$$C \frac{dv_C}{dt} = i_L - \frac{v_C}{R_o} \quad (10)$$

Obtendo a matriz de espaço de estados e realizando a multiplicação pela razão cíclica, obtém-se a matriz seguinte:

$$\begin{bmatrix} D \cdot L \frac{di_L}{dt} \\ D \cdot C \frac{dv_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D \cdot (-R_s - R_L) & -D \\ D & -\frac{D}{R_o} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D \cdot v_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

De maneira similar, é possível retirar as equações da segunda etapa de operação pelas equações 11 e 12.

$$L \frac{di_L}{dt} = -R_L \cdot i_L - R_L - v_C - v_D \quad (11)$$

$$C \frac{dv_C}{dt} = i_L - \frac{v_C}{R_o} \quad (12)$$

Escrevendo a matriz de espaço de estados, multiplicado pelo período $(1-D)$ do estado topológico, as somando e realizando algumas manipulações, obtemos a seguinte matriz.

$$\begin{bmatrix} L \frac{di_L}{dt} \\ C \frac{dv_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D.R_s - R_L & -1 \\ 1 & -\frac{1}{R_o} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Dv_1 - (1-D).v_D \\ 0 \end{bmatrix}$$

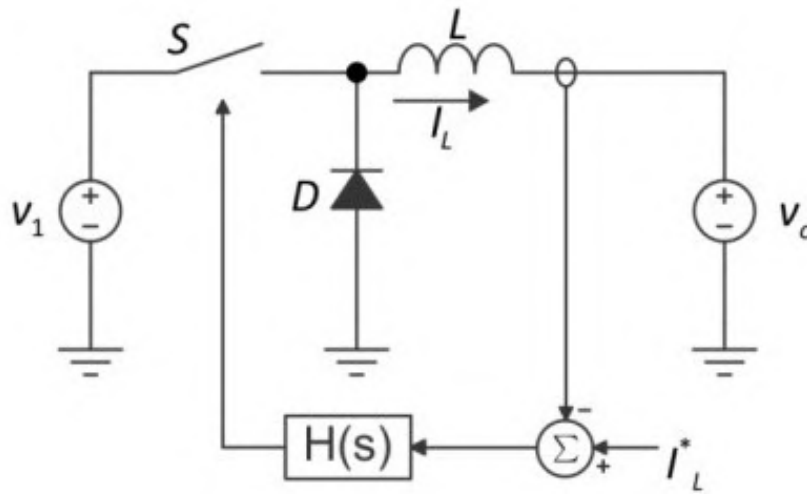
A representação do modelo pode ser dada pelas equações 13 e 14.

$$L \frac{di_L}{dt} = -(D.R_s + R_L).i_L - v_C + D.v_1 - (1-D).v_D \quad (13)$$

$$C \frac{dv_C(t)}{dt} = i_L - \frac{v_C}{R_o} \quad (14)$$

Para retirada da planta de corrente considera-se o capacitor C e o resistor R_o como uma fonte de tensão constante v_o , podemos apresentar o circuito para a análise como na Figura 49.

Figura 49 – Modelo considerado para retida da planta de corrente.



Fonte: (BARBI, 2015)

Como $v_c = v_o$ e $dv_c/dt = 0$, utilizando as equações 13 e 14, podemos obter a equação 15.

$$L \frac{di_L}{dt} = -(D.R_s + R_L).i_L - v_c + D.v_1 - (1 - D).v_D \quad (15)$$

Considerando o modelo para pequenos sinais, consideram-se as variáveis da razão cíclica e corrente no indutor, como visto nas equações 16 e 17.

$$i_L = i_{Lo} + \Delta i_L \quad (16)$$

$$D = D_o + \Delta D \quad (17)$$

Rescrevendo a equação 15 e considerando que $\Delta D.\Delta i_{Lo}=0$ se obtém a equação 18.

$$L \frac{d\Delta i_L}{dt} = -(D.R_s + R_L).\Delta i_L - \Delta D.R_s.i_o + \Delta D.(v_1 + v_D) \quad (18)$$

Aplicando a transformada de Laplace e com algumas manipulações consideradas por (BARBI, 2015), é possível obter a equação 19.

$$\frac{\Delta i_L(s)}{\Delta D(s)} = \frac{Vi}{sL + R_L} \quad (19)$$

5.3.2 Controle de corrente do conversor

Nesta seção é apresentado o projeto do controlador de corrente do conversor.

5.3.2.1 Requisitos para projeto do controle de corrente

Para o projeto do controlador de corrente foram adotados os seguintes requisitos:

1. Erro nulo em regime permanente: Para uma resposta transitória, é necessário se certificar de que o erro será nulo quando o sinal estiver em regime permanente.
2. Inclinação de -20dB/dec do ganho na passagem por 0dB: Com este critério, é possível garantir que a fase será no máximo -90 °.
3. Margem de fase entre 45° e 90°: Este critério impede que, na frequência de cruzamento, não se obtenha a fase de -180°.
4. Valor da frequência de cruzamento por 0dB no mínimo, uma década abaixo do valor da frequência de chaveamento: Com isto, é garantido que a frequência de chaveamento não irá interferir na dinâmica do controle.
5. Rejeição a ruídos em altas frequências: É necessário que para estes sinais obtenha-se um ganho bastante baixo, para não interferirem na dinâmica do controle.

5.3.3 Modulador PWM e sensor de corrente

O modulador PWM utiliza uma onda dente de serra com amplitude de 10V de pico. Para o projeto do controle também é considerado um atraso na amostragem de um pulso de chaveamento. A equação 20 apresenta o ganho.

$$G_{PWM(s)} = \frac{1}{10} e^{-s \frac{1}{40kHz}} \quad (20)$$

A medição da corrente no indutor é feita por um sensor de efeito *hall* com saída em corrente que passa por um resistor, o qual converte o sinal para um nível de tensão que pode ser lido pelo microcontrolador. O ganho gerado pelo sensor e o circuito de condicionamento é considerado $G_{si}=0.3914$.

A frequência de amostragem do circuito foi definida como $f_a= 80000\text{Hz}$, utilizando o critério de dupla amostragem.

5.3.4 Controlador de corrente

Para o projeto do controle de corrente, é necessário considerar a planta do conversor o qual será controlado, e está apresentado na equação 21.

$$Id(s) = \frac{7407,4}{s + 49,38} \quad (21)$$

A planta considerada em malha aberta utiliza também os ganhos do sensor de corrente, do PWM e do conversor A/D juntamente à planta. A equação 22 apresenta a planta em malha aberta onde o controlador é considerado unitário. O ganho do conversor A/D, G_{AD} , também é considerado unitário de maneira que a ferramenta de geração de código do *software* PSIM® realiza as considerações necessárias.

$$FTMA(s) = C(s) \cdot Id(s) \cdot G_{si} \cdot G_{PWM(s)} \cdot G_{AD} \quad (22)$$

Verificando a planta de corrente do conversor nota-se a existência de apenas um polo, assim sendo, é possível obter o controle do conversor com a utilização de um controlador PI com mais um polo, que permite anular o polo com a inclusão de um zero na mesma frequência e um integrador para garantir o erro nulo em regime permanente, e um segundo polo na frequência de 6838 Hz, para controlar a margem de fase para $76,9^\circ$ e obtendo uma frequência de corte de 1020 Hz. O controlador está apresentado na equação 23.

$$C(s) = \frac{k2(1 + \frac{s}{w_{z1}})}{s(1 + \frac{s}{w_{p1}})} \quad (23)$$

Onde para este caso obtém-se:

$$k2 = 396,8 \quad (24)$$

$$\omega_{z1} = 2.\pi.f_{z1} \quad (25)$$

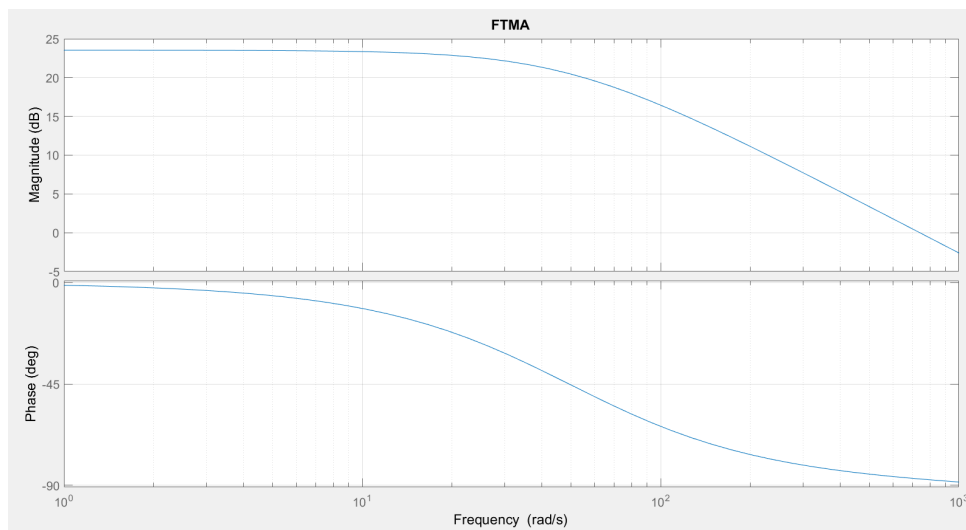
$$\omega_{p1} = 2.\pi.f_{p1} \quad (26)$$

$$\omega_{p2} = 2.\pi.f_{p2} \quad (27)$$

Tendo que $f_{z1} = 7,9Hz$, $f_{p1} = 6838Hz$ e f_{p2} sendo alocado na origem.

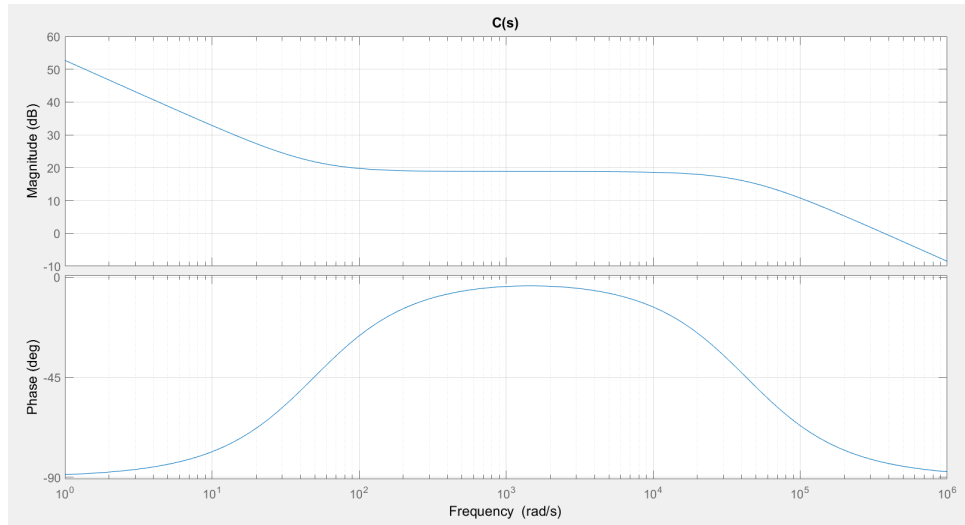
As Figura 50 e Figura 51 apresentam o diagrama de Bode do circuito em malha aberta e do controlador.

Figura 50 – Diagrama de Bode da FTMA do conversor.



Fonte: O autor

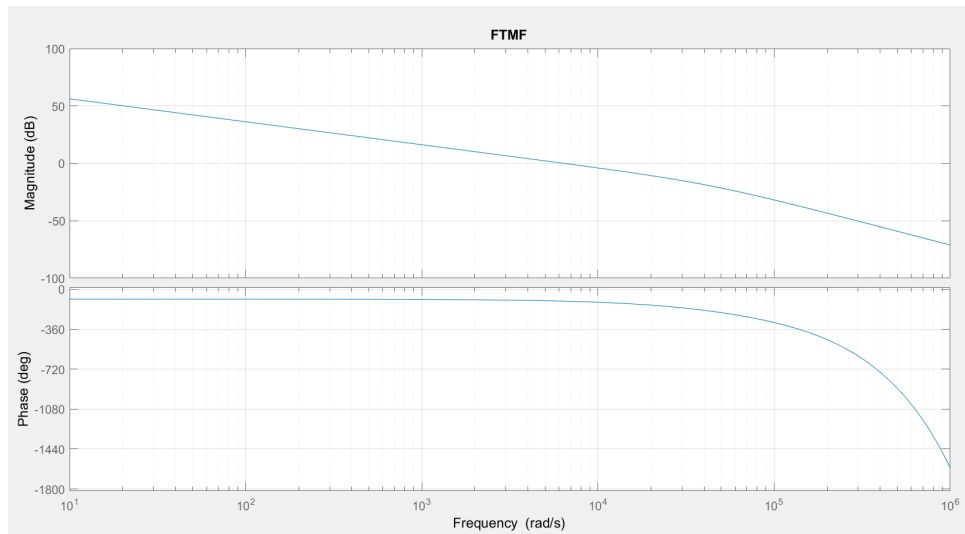
Figura 51 – Diagrama de Bode do controlador de corrente do conversor.



Fonte: O autor

O diagrama de Bode da função de transferência em malha fechada é visto na Figura 52.

Figura 52 – Diagrama de Bode da FTMF do conversor.



Fonte: O autor

5.3.5 Discretização do controle

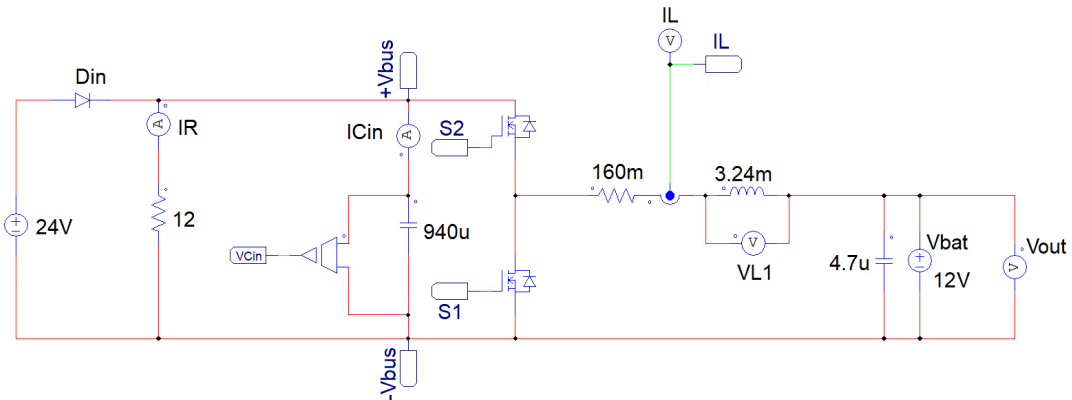
A discretização do controle foi realizada com a utilização da ferramenta de transformação bilinear no *software* Psim®. A equação discretizada está apresentada na equação 28.

$$G_{(z)} = \frac{1,85187210661 + 1,14271538727 \cdot 10^{-3} z^{-1} - 1,85072939123 z^{-2}}{1 - 1,57666535278 z^{-1} - 5,76665352779310^{-1} z^{-2}} \quad (28)$$

5.4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A simulação do conversor em malha fechada foi realizada com a utilização do *software* Psim®. Este permite a simulação e também possui uma ferramenta para a geração do código para utilização no DSP TMS320F28335. O circuito do conversor BRC utilizado para simulação encontra-se na Figura 53.

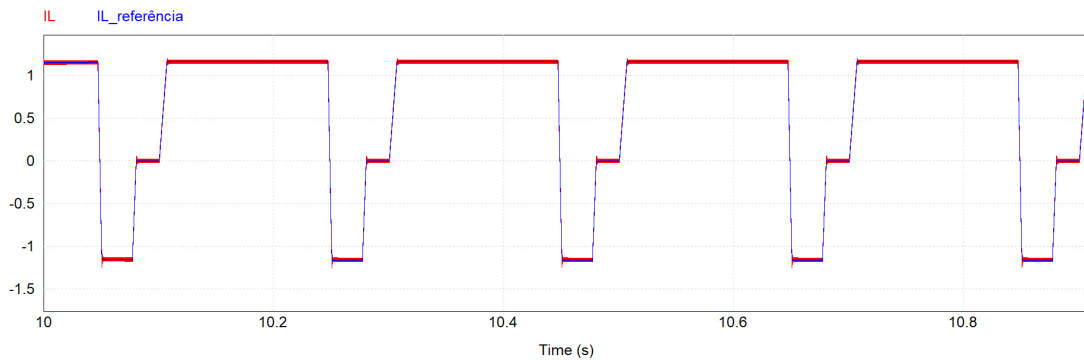
Figura 53 – Circuito simulado do conversor BRC com a ferramenta PSIM®.



Fonte: O autor

A Figura 54 apresenta o resultado da corrente do indutor na saída do circuito.

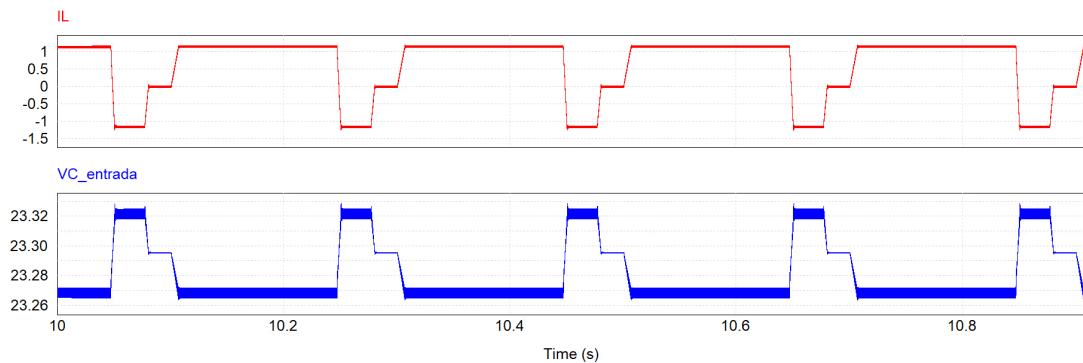
Figura 54 – Resultado de simulação da corrente do indutor de saída.



Fonte: O autor

Os resultados para a corrente no indutor e a tensão no capacitor no barramento de entrada estão apresentados na Figura 55.

Figura 55 – Resultados de simulação da corrente no indutor e da tensão no capacitor do barramento de entrada.



Fonte: O autor

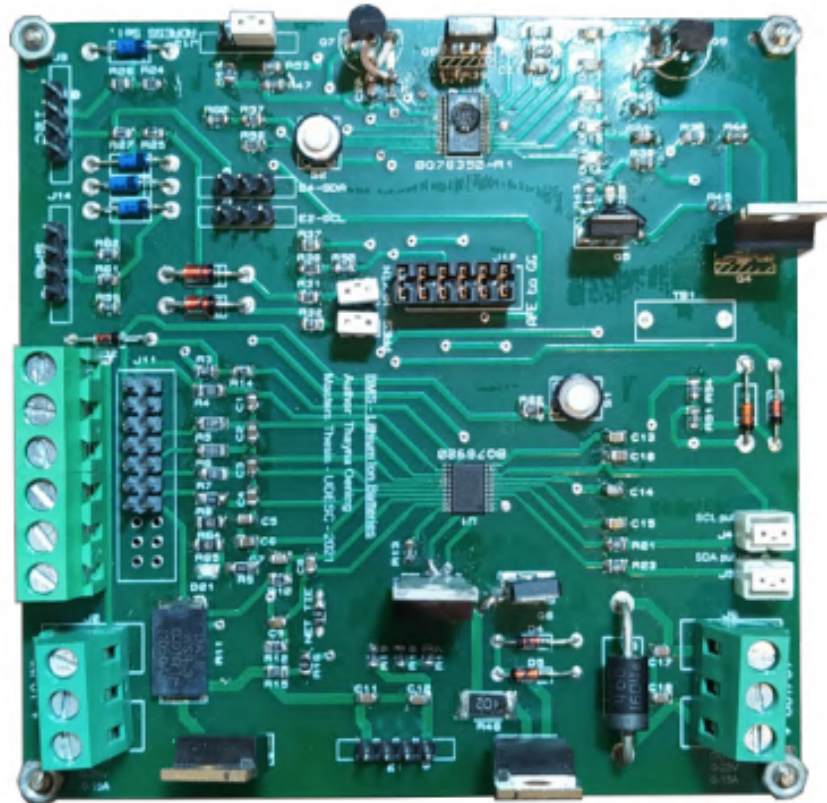
Utilizando-se um capacitor ideal para a aquisição dos resultados simulados, a variação de tensão atinge 0,25% do valor da tensão no capacitor. É visto pela forma de onda os ciclos de carga e descarga, onde é verificado que a energia está sendo dissipada adequadamente pelo resistor, evitando uma sobretensão.

No *software* PSIM® também é feito o desenvolvimento do código utilizado no DSP TMS320F28335, com o uso da ferramenta SIMCODER®, como apresentado por (IJUIN, 2014). O Apêndice A apresenta os blocos utilizados para geração do código.

5.5 SISTEMA BMS DE GERENCIAMENTO DE BATERIAS DE LÍTIO

Neste tópico será apresentado o sistema de gerenciamento de baterias de lítio, conhecido na literatura por *Battery Management System* (BMS), que foi construído por (OENING, 2022), mostrado na Figura 56, e foi utilizado para aquisição de dados das baterias durante os ensaios.

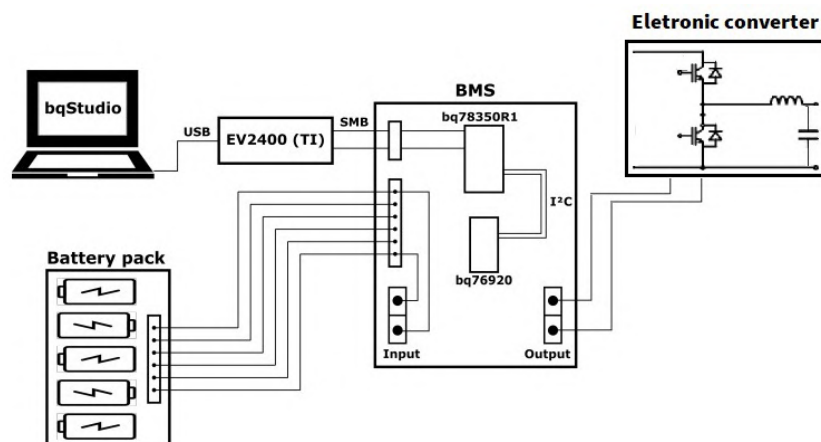
Figura 56 – Placa de BMS para aquisição de dados das baterias.



Fonte: (OENING, 2022)

A placa desenvolvida por (OENING, 2022) foi adaptada para operar na saída do conversor. O diagrama de montagem do BMS no conversor para os ensaios de carga e descarga Reflex está apresentado na Figura 57. Para os testes com a aplicação do processo de carga CC, o BMS foi conectado a uma fonte de tensão de bancada e para o processo de descarga à carga eletrônica.

Figura 57 – Diagrama de representação do BMS.



Fonte: (OENING, 2022)

A placa do BMS contém os circuitos integrados (CIs) bq7692000PWR e bq78350R1A,

que atuam juntamente para leitura, aquisição de dados e proteção das baterias. O CI bq7692000PWR atua com o monitoramento das tensões, da corrente e proteção das baterias, podendo aceitar suportar até cinco baterias ou 18V em sua saída. Já o CI bq78350R1A recebe as informações do CI de monitoramento e realiza funções como atuar proteções de sobretensão, sobrecorrente, sobreaquecimento na bateria e curto-circuito, assim como outras proteções secundárias como subtensão nas baterias e falhas de comunicação com o circuito de medições (OENING, 2022). A placa também possui circuitos eletrônicos de proteção, como a utilização de MOSFETs para realizar a interrupção do fornecimento de potência para bateria e um sistema de equalização passivo entre as baterias, com a dissipação de energia em um resistor. Contudo, a corrente de descarga da bateria durante o processo de equalização é limitada em no máximo 50mA, tornando este processo pouco eficiente para as aplicações deste estudo.

A interface é gerada pelo *software* Bqstudio® da Texas Instruments®. A Figura 58 apresenta a interface homem máquina do *software*.

Figura 58 – Interface homem máquina para o *software* BqStudio®.

The screenshot displays the BqStudio software interface, which is used for managing and monitoring battery systems. The interface is divided into several sections:

- Top Bar:** Shows the device name "EV2400" and version "Version 0.28". It also includes a status bar with "Auto Refresh On" and "Data Memory".
- Left Panel:** Contains a list of commands and registers. The "Commands" list includes:
 - DEVICE_NUMBER
 - HW_VERSION
 - FW_VERSION
 - FW_BUILD
 - CHEM_ID
 - SHUTDOWN
 - IATA_SHUTDOWN
 - CC_OFFSET
 - CHG_FET_TOGGLE
 - CHG_FET_TOGGLE
 - DSG_FET_TOGGLE
 - GAUGE_EN
 - FET_EN
 - LIFETIME_EN
 - LT_RESET
 - LT_FLUSH
 - LT_TEST
 - PF_EN
 - PF_CLEAR
 - BBR_EN
 - BBR_CLEAR
- Registers:** A large table displaying various battery parameters and their values. The table is organized into columns for Name, Value, Units, and Name. The registers include:
 - Cell 3 Voltage (mV)
 - Cell 4 Voltage (mV)
 - BAT pin voltage (mV)
 - Back pin voltage (mV)
 - Cell 2 Current (mA)
 - Cell 3 Current (mA)
 - Cell 4 Current (mA)
 - Cell 1 Voltage (mV)
 - Cell 2 Voltage (mV)
 - Cell 3 Voltage (mV)
 - Cell 4 Voltage (mV)
 - Cell 1 Current (mA)
 - Cell 2 Current (mA)
 - Cell 3 Current (mA)
 - Cell 4 Current (mA)
 - Cell 1 Power (mW)
 - Cell 2 Power (mW)
 - Cell 3 Power (mW)
 - Cell 4 Power (mW)
 - Average Power (mW)
 - Relative State of Charge (%)
 - Absolute State of Charge (%)
 - Remaining Capacity (mAh)
 - Full Charge Capacity (mAh)
 - Run Time To Empty (min)
 - Average Time To Empty (min)
- Bit Registers:** A table displaying bit-level registers and their values. The table is organized into columns for Name, Value, and Name. The bit registers include:
 - Battery Mode (high)
 - Battery Mode (low)
 - Battery Status (high)
 - Battery Status (low)
 - Operation Status A (high)
 - Operation Status A (low)
 - Operation Status B (high)
 - Operation Status B (low)
 - Temp Range (high)
 - Temp Range (low)
 - Charging Status (high)
 - Charging Status (low)
 - Gauging Status
 - IT Status (high)
 - IT Status (low)
 - Manufacturing Status (high)
 - Manufacturing Status (low)
 - Safety Alert A-B (high)
 - Safety Alert A-B (low)
 - Safety Status A-B (high)
 - Safety Status A-B (low)
- Bottom Panel:** Contains a dashboard with various battery management icons and a gauge. The icons include:
 - EV2400 Version 0.28
 - SMB
 - bq4050R2
 - 4500_2_08
 - Addr: 0x17
 - 24.0 degC
 - 8638 mV
 - 100%

Fonte: O autor

A janela 1 à esquerda, "*Dashboard*", apresenta o estado de comunicação e dois mostradores com a tensão total lida nas baterias e informação de corrente. Na janela 2 de "*Registers*" é possível definir quais grandezas serão monitoradas e salvas durante o processo de carga, e na janela 4, "*Bit Registers*", são apresentados o estado dos registradores. Na aba "*Registers*" é possível realizar as configurações dos registradores com informações como número de baterias, proteções de corrente, tensão e temperatura, além ativar a equalização. À direita podemos encontrar a janela 3, "*Comands*", sendo possível aplicar os comandos para ativar ou desativar o MOSFET, ativando ou bloqueando o carregamento. O *software* também permite outras configurações, como a seleção do "*Log*" onde os dados serão salvos e taxa de amostragem.

Para a interface entre a placa do BMS e o *software*, exige-se a utilização da interface EV2400, que realiza a comunicação com o CI bq78350R1. O circuito completo com o conversor será apresentado nas próximas sessões, onde se tratará da fonte de alimentação para carga das baterias e do método de descarga.

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

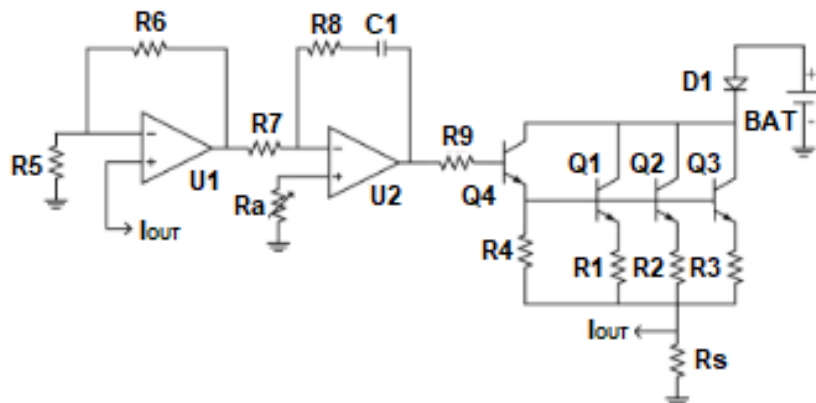
Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais do trabalho, incluindo o conversor utilizado e a bancada de testes, assim como os resultados experimentais para os métodos de carregamento propostos.

6.1 BANCADA PARA OS TESTES COM O MÉTODO POR CORRENTE CONSTANTE

Para a aplicação dos testes com corrente constante, foi utilizado o circuito com o BMS, conectado à fonte de tensão constante com limitação de corrente, configurada para o valor máximo de corrente para a etapa de carregamento com corrente constante. Para que a corrente se mantenha constante durante todo o processo de carga, a tensão na fonte é configurada para um valor superior ao valor de tensão máximo nas baterias. O BMS possui um sistema de proteção, o qual encerra o processo de carga quando a bateria atinge o valor de tensão previamente estipulado.

A descarga por corrente constante ocorre pela utilização de uma carga eletrônica desenvolvida por (OENING, 2022), a qual o circuito eletrônico está apresentado na Figura 59. Nesta etapa, a carga eletrônica é conectada na entrada da placa do BMS, substituindo a fonte de tensão, de maneira que o circuito do BMS é configurado para bloqueio no momento em que a condição de menor tensão na bateria é atingida.

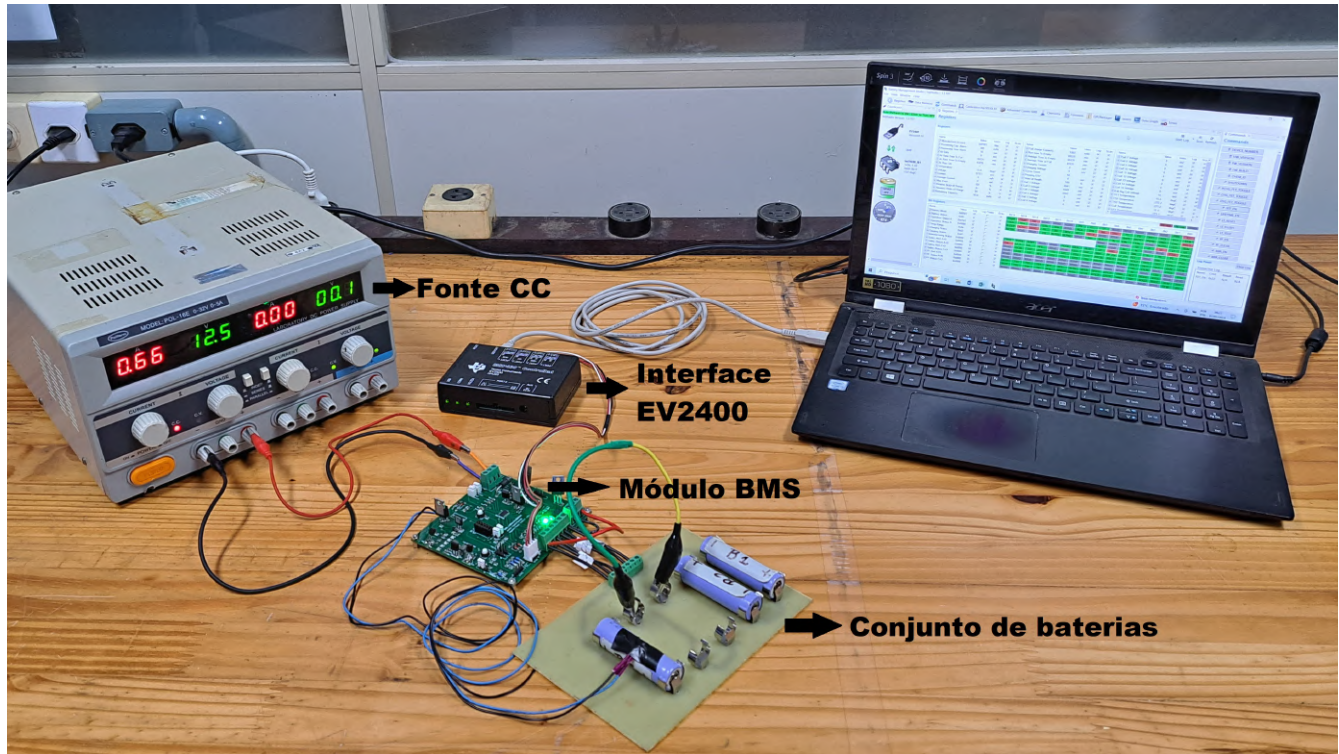
Figura 59 – Circuito eletrônico utilizado para o desenvolvimento da carga eletrônica.



Fonte: (OENING, 2022)

O *setup* para os testes em bancada é apresentado na Figura 60 onde pode ser vista a fonte de tensão utilizada para transferência de energia para as baterias, o módulo do sistema de gerenciamento de baterias (BMS), a placa com o conjunto de baterias de lítio conectadas a saída do módulo BMS e o computador mostrando a interface de configuração e monitoramento das baterias.

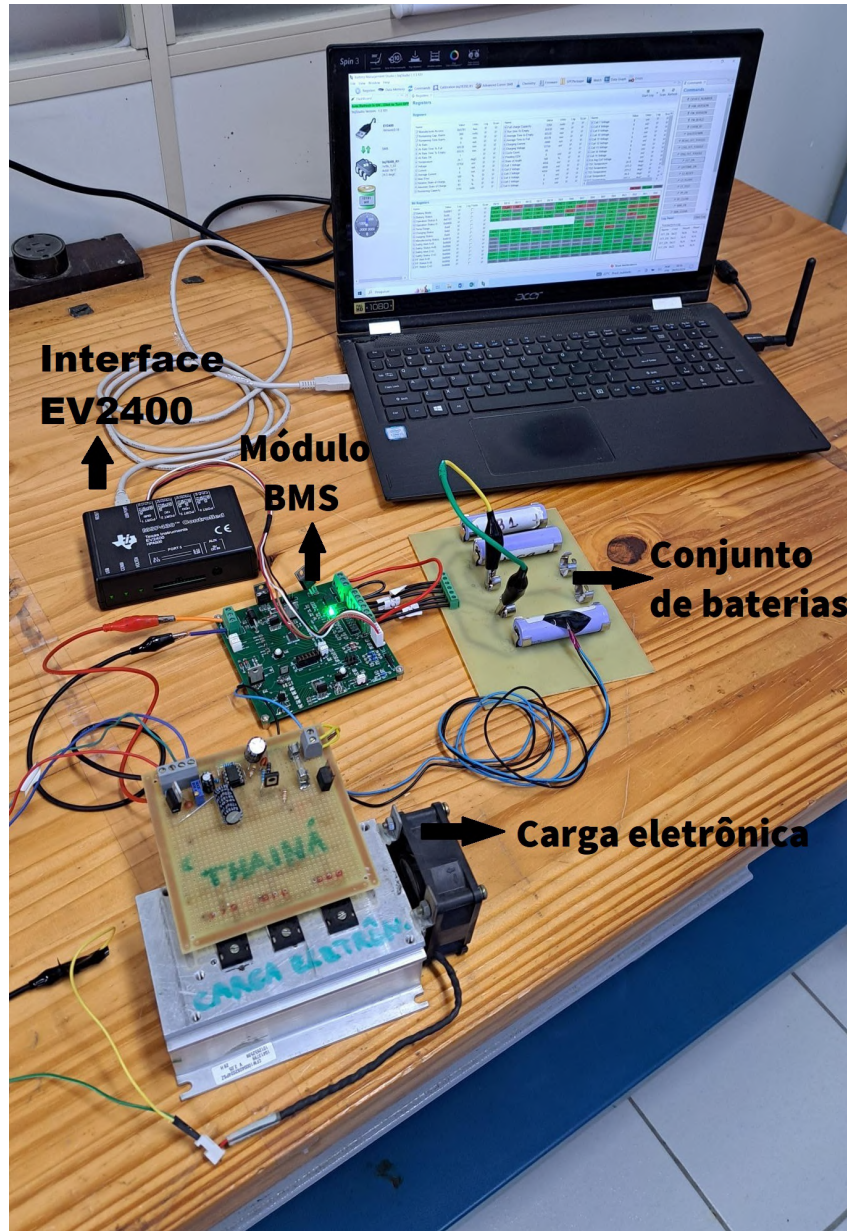
Figura 60 – Bancada com o *setup* para os testes de carga com corrente constante utilizando o BMS.



Fonte: O autor

O *setup* em bancada para o processo de descarga é apresentado na Figura 61. Nesta etapa é possível verificar, além do sistema de gerenciamento de carga (BMS) e do conjunto de baterias, a carga eletrônica conectada ao BMS.

Figura 61 – Bancada com o *setup* para os testes de descarga com corrente constante utilizando o BMS e carga eletrônica.



Fonte: O autor

6.2 CONVERSOR ELETRÔNICO BRC

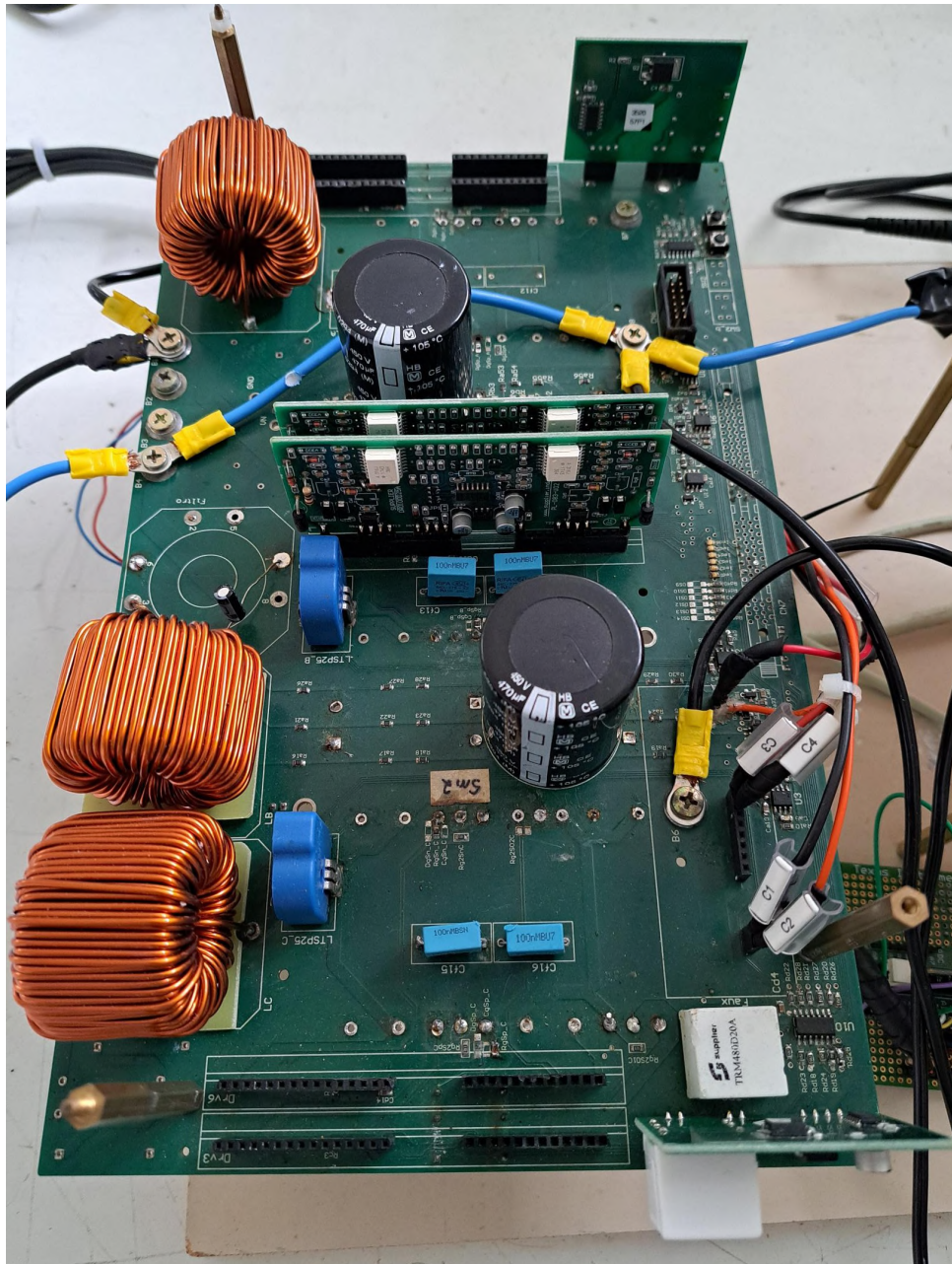
Nesta sessão será apresentado o conversor BRC utilizado para realização dos testes.

O protótipo do conversor eletrônico foi desenvolvido a partir do conversor utilizado por (HEERDT, 2013), o qual desenvolveu um conversor da topologia T-NPC trifásico.

O conversor BRC foi desenvolvido com a mesma placa eletrônica, aproveitando o *layout* e placa protótipo já manufaturada. Para isso removeu-se o filtro EMI, uma vez que a placa será alimentada por uma fonte de bancada CC, e utilizou-se apenas uma das fases do conversor, neste caso a fase B. O circuito foi modificado para acomodar os capacitores de entrada e saída da placa, assim como o projeto inicial previa a utilização de IGBTs, posteriormente substituídos por MOSFETs neste projeto. Além disso, os indutores previamente projetados e construídos foram utilizados no filtro LC do conversor.

A placa eletrônica original foi desenvolvida com quatro camadas, na inferior são postos os MOSFETs e na superior são vistos os *drivers* e capacitores de entrada. O conversor é apresentado na Figura 62.

Figura 62 – Placa eletrônica do conversor T-NPC modificada para uso como carregador bidirecional.



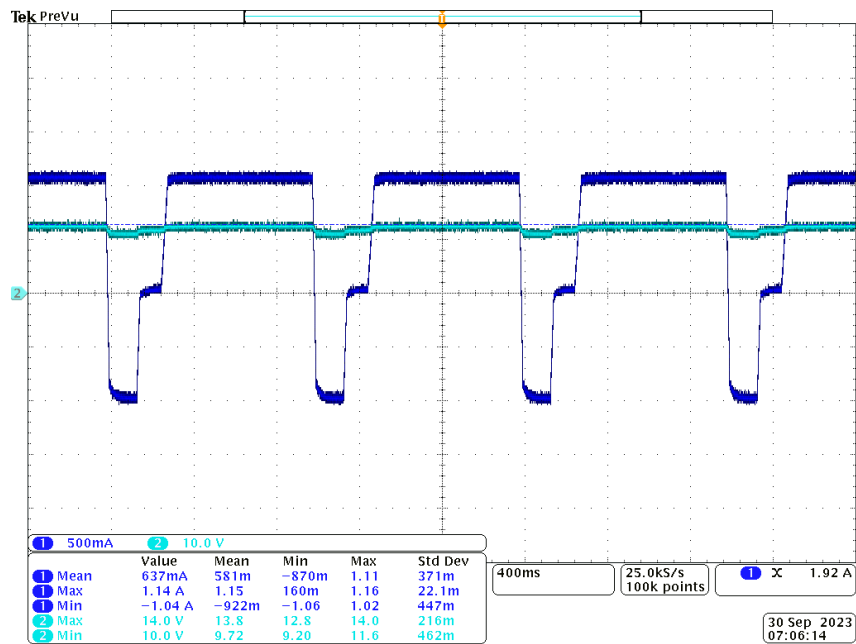
Fonte: O autor

Neste projeto, utilizaram-se dois indutores em série com valor da indutância total de aproximadamente 3,24mH, que estavam disponíveis na placa, este valor é maior que a indutância estipulada no projeto inicial para atender o critério de corrente e ondulação, a medida que permitirá a utilização do conversor para projetos futuros com maiores valores de tensão na carga. Na entrada do conversor utilizaram-se dois capacitores eletrolíticos de 470uF em paralelo, totalizando 940uF. Também na entrada foi conectado um banco de resistores de potência, para queimar a energia vinda das baterias no ciclo de descarga. Os diodos foram alocados na entrada do conversor, para impedir o fluxo de corrente para a fonte.

6.3 FORMAS DE ONDA DO CONVERSOR

As formas de onda do conversor para etapa de carregamento medidas no indutor de saída em sentido a carga estão apresentadas na Figura 63, juntamente com a medida da tensão nas baterias. Os tempos para os pulsos positivo, negativo e para o período relaxamento foram definidos como os utilizados por (SCHIMITT, 2021) que apresentou seus estudos com a utilização de baterias chumbo-ácidas.

Figura 63 – Corrente no indutor e tensão nas baterias na saída do conversor durante o processo de carga.

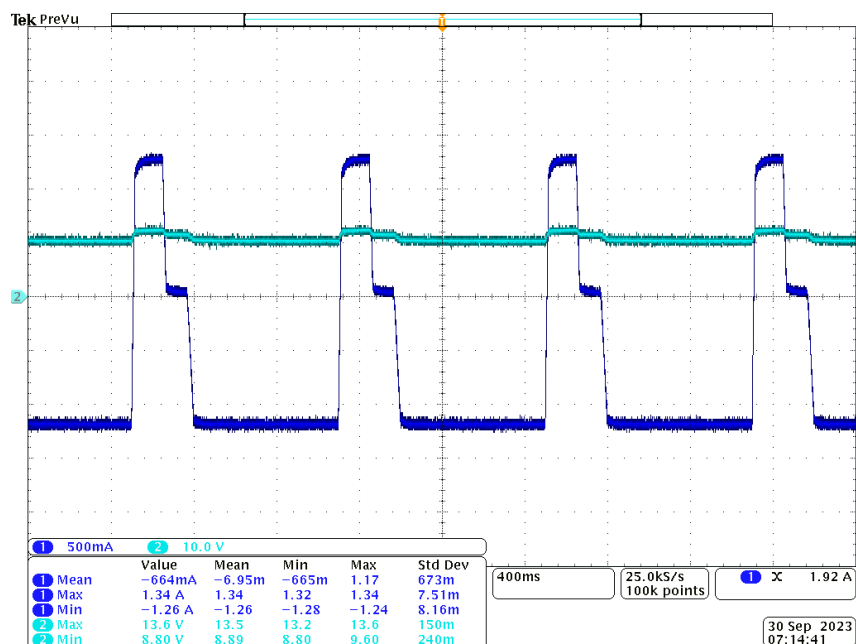


Fonte: O autor

A corrente apresenta três níveis como esperado para o método de carga Reflex. Os valores de máximo e mínimo da corrente ficam aproximados aos valores projetados, resultando em um valor médio da corrente próximo aos 0,25C estipulados para o processo. A tensão na saída apresenta elevação durante a aplicação da corrente positiva e reduz durante o ciclo de corrente negativa, como esperado em função de sua resistência série representada no modelo equivalente com elementos passivos.

Para o método de descarga, as formas de onda são apresentadas na Figura 64.

Figura 64 – Corrente no indutor e tensão nas baterias na saída do conversor durante o processo de descarga.

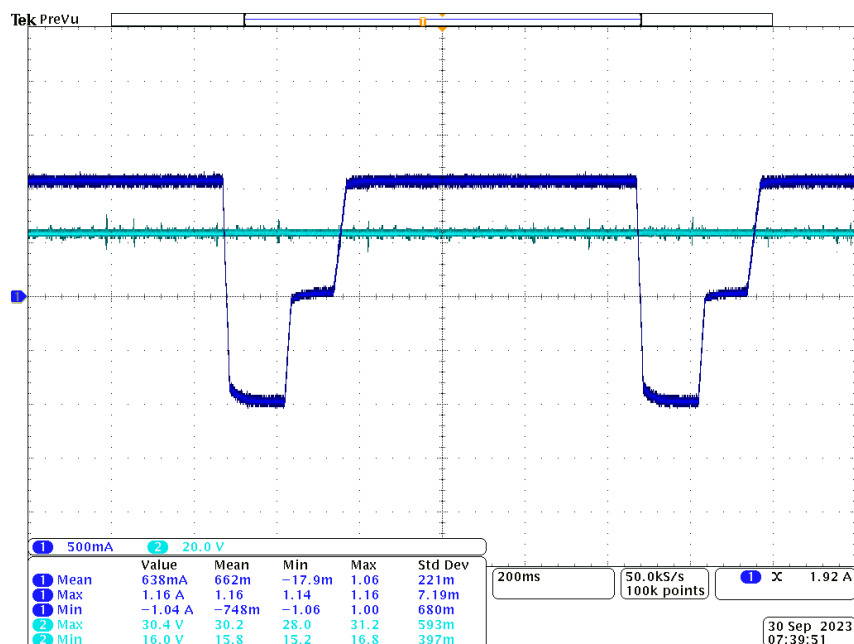


Fonte: O autor

Para a descarga as formas de onda apresentam comportamento similar ao visto durante o processo de carga, contudo o período em que a tensão no conjunto de baterias se mantém no menor patamar é maior devido ao maior tempo de corrente negativa aplicado nesta etapa.

A tensão no barramento juntamente com a corrente utilizada para o processo de carga das baterias é mostrada na Figura 65. Como neste projeto foram utilizados capacitores superdimensionados, a amplitude de corrente utilizada para o ciclo de corrente negativa não é suficiente para causar elevações de tensão no capacitor ante a dissipação da energia pelo no resistor, assim não é perceptível uma variação significativa para estes níveis de corrente.

Figura 65 – Corrente no indutor na saída do conversor e tensão nos capacitores do barramento de entrada.

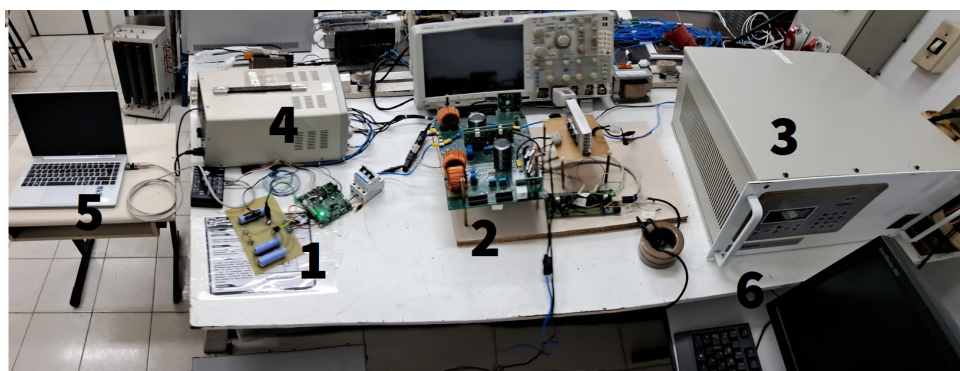


Fonte: O autor

6.4 BANCADA PARA OS TESTES COM O MÉTODO REFLEX

Para realização dos testes com o método Reflex foi necessária a montagem do *setup* de testes, como apresentado na Figura 66.

Figura 66 – Bancada para realização dos testes com o método Reflex.



Fonte: O autor

Na execução experimental foi necessária a isolamento galvânica com a utilização de transformadores isoladores para os computadores ligados a rede, devido à necessidade de se utilizarem dois computadores, um para configurar e monitorar o BMS através da interface visual BqStudio®, e outro para carregar o programa do DSP pela ferramenta Code Composer Studio®, ambos de propriedade da empresa Texas Instruments®.

Na bancada de testes são vistos em 1 o módulo BMS com o conjunto de baterias conectados ao conversor BRC apresentado em 2. O conversor é alimentado na entrada por uma

fonte de tensão CC da Supplier®, que pode ser vista em 3. Em 4 temos a fonte auxiliar da Politerm®, utilizada pelo conversor para alimentação dos circuitos auxiliares de 15V, 12V e 5V. Os computadores utilizados para comunicação com as ferramentas BqStudio® e Code Composer Studio® são apresentados em 5 e 6 respectivamente.

6.5 BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO PARA OS ENSAIOS DE CARGA E DESCARGA

As baterias utilizadas para este estudo foram baterias de íons de lítio do modelo ICR18650 22P. As características desta bateria estão apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Características das baterias de íons de lítio ICR18650 22P.

Característica	Valor
Capacidade típica (mA)	2150
Tensão de máxima (V)	4,2
Tensão de corte (V)	2,75
Corrente de carga padrão (mA)	1075
Máxima temperatura de carga (°C)	45
Máxima temperatura de descarga (°C)	60

Fonte: O Autor

Este modelo de bateria apresenta boa resistência a temperaturas elevadas, podendo suportar até 45°C durante o carregamento e possui corrente de carga recomendada pelo fabricante de 0,5C.

6.6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA OS PROCESSOS DE CARGA E DESCARGA DAS BATERIAS

Os resultados experimentais foram obtidos através da aquisição de dados do BMS. O trabalho apresenta a comparação para a utilização dos métodos CC e Reflex aplicados a carga e descarga de baterias de íons de lítio. Algumas considerações foram feitas para a realização dos experimentos, primeiro que por se tratar de uma bateria de lítio, a tensão de carga máxima foi definida como 4,2V e mínima como 2,8V para considerar a bateria descarregada, em ambos os métodos de carregamento. Como o método Reflex se trata da utilização de períodos de corrente positiva, corrente negativa e corrente nula para as etapas de carga e descarga da bateria, foram considerados o maior valor de tensão lido nos terminais da bateria para a etapa de carga e o menor valor para a etapa de descarga.

O BMS foi inicialmente projetado por (OENING, 2022) para operação com o processo de carga com corrente constante, onde os CIs utilizados foram previamente ajustados para o método CC e CC-CV de carregamento. Desta maneira, limitações foram verificadas na parte prática, limitando os testes pela taxa de aquisição do BMS, numa frequência de 1Hz com o método Reflex.

O BMS será configurado para não realizar o processo de equalização de tensão entre as baterias durante o processo de carregamento, uma vez que a quantidade de energia que pode ser dissipada durante o processo de equalização não é muito significativa em relação à corrente de carga. Além disso, a não utilização do processo de equalização permitirá a avaliação de outros efeitos, como o crescente desequilíbrio entre as tensões das baterias, caso haja.

Para a realização dos testes, foram utilizados 2 conjuntos de baterias, com diferentes baterias, o conjunto A apresenta 3 bateria novas e o conjunto B com duas baterias novas e 1 degrada para permitir avaliar os efeitos que baterias mais degradadas podem causar em um conjunto. Para cada conjunto foram realizados os testes de carregamento CC e Reflex e para o conjunto A, com baterias novas, também foi realizado um teste CC-CV a critério de comparação. A Tabela 15 apresenta os conjuntos e os testes aplicados.

Tabela 15 – Conjuntos de baterias utilizados para os testes.

Conjunto	Número total de baterias	Número de baterias novas	Número de baterias degradadas	Testes realizados
A	3	3	0	CC Reflex CC-CV
B	3	2	1	CC Reflex

Fonte: O Autor

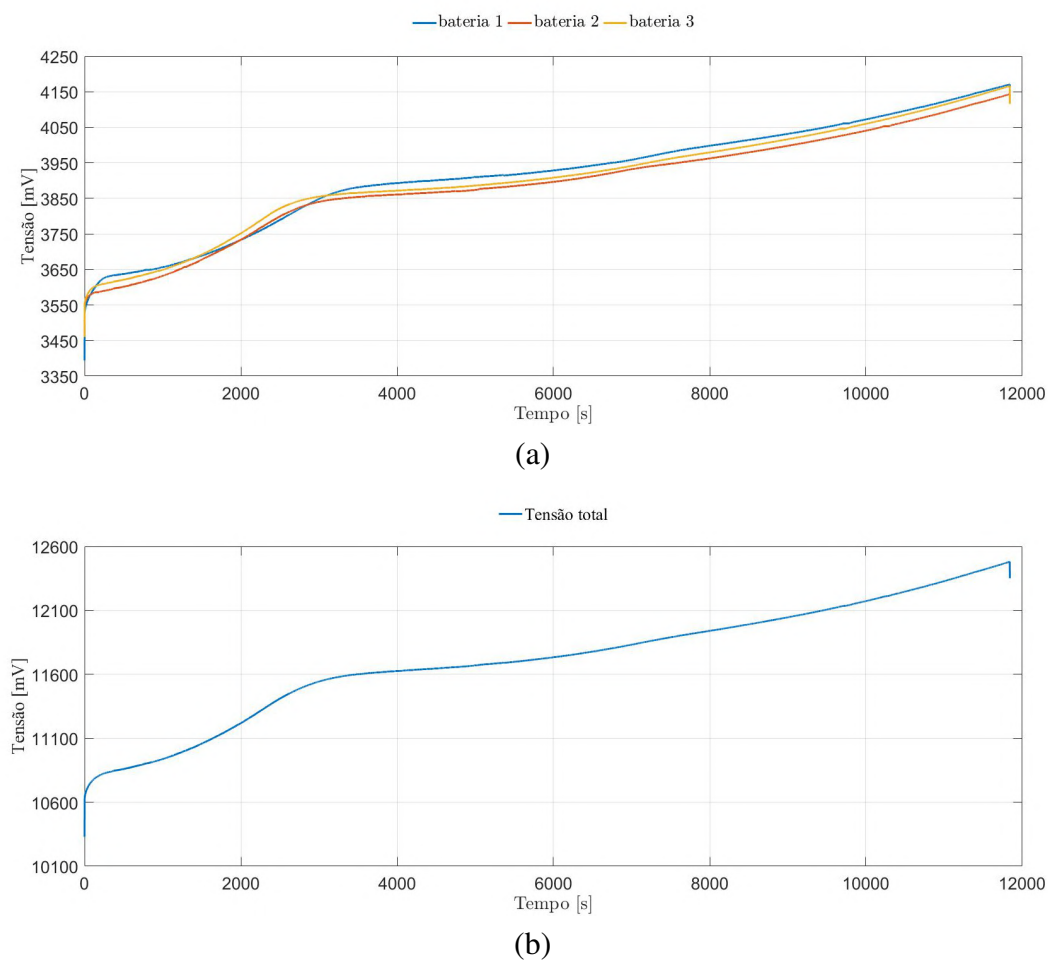
6.6.1 Carregamento CC para as baterias do conjunto A

Os resultados experimentais com o método de carregamento CC foram obtidos com a utilização do módulo BMS e uma fonte de bancada da Politerm®, como fonte de alimentação durante o processo de carga. Para que a corrente permaneça constante durante todo o ciclo de carregamento, a fonte é configurada com uma limitação de corrente de 660mA ou 0,25C, e sua tensão limite é definida para valores acima do valor final de tensão da bateria, evitando a redução da corrente de carga durante o processo. O fim do processo de carga é feito automaticamente pelo BMS e acontece quando a primeira bateria atingir a tensão de 4,2V.

Antes do primeiro ciclo de carga as baterias são totalmente carregadas e equalizadas, e então sofrem uma descarga pelo método CC com a utilização da carga eletrônica configurada para operar com uma corrente de descarga de 660 mA até que uma das baterias atinja 2,8V definido como valor de mínima tensão.

A Figura 67 apresenta os resultados da medição individual das tensões nas baterias durante todo o processo de carregamento, juntamente com o valor total da tensão do conjunto de baterias durante o primeiro teste.

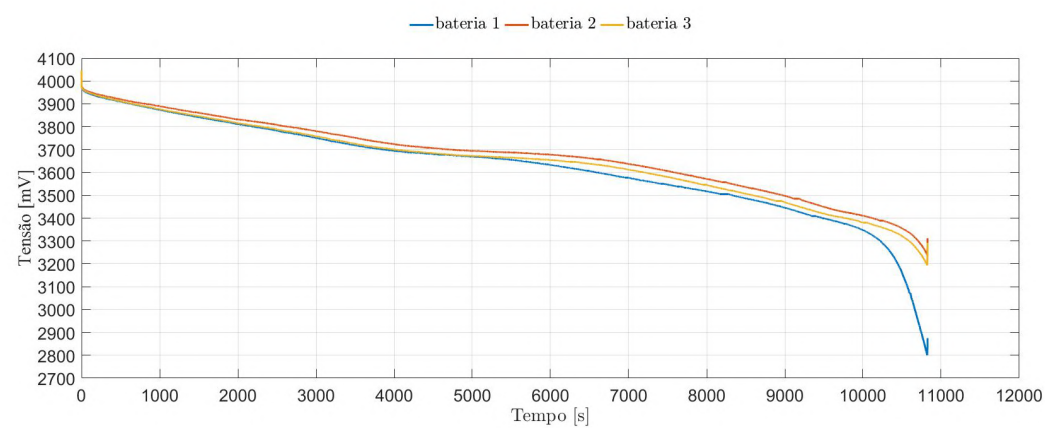
Figura 67 – Carregamento do conjunto A de baterias para o método CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Tensão total do conjunto.



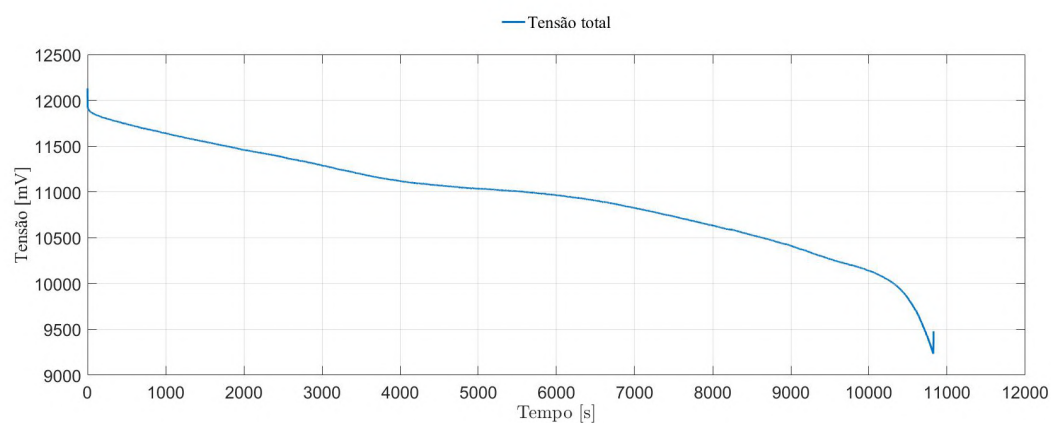
Fonte: O autor

Da mesma maneira, o processo de descarga também foi monitorado, onde foi aplicada a mesma corrente de descarga de $0,25C$. Os resultados com as curvas de descarga são mostrados na Figura 68, para as baterias individuais e também para a soma de tensão do conjunto de baterias.

Figura 68 – Descarga do conjunto A de baterias para o método CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Tensão total do conjunto.



(a)



(b)

Fonte: O autor

Os experimentos foram repetidos 9 vezes e as curvas para estes ciclos de carga e descarga encontram-se no Apêndice B. A Tabela 16 apresenta todos os resultados obtidos durante os testes.

Tabela 16 – Resultados para o método de carregamento CC com as baterias do conjunto A.

Teste	Estado	Tensão bateria 1 (mV)	Tensão bateria 2 (mV)	Tensão bateria 3 (mV)	Corrente média (mA)	Tempo total (hh:mm:ss)	Tempe- ratura inicial (°C)	Tempe- ratura final (°C)
1	Inicial Final	3394 4179	3476 4154	3460 4166	663	3:17:19	20	23,5
2	Inicial Final	3216 4199	3360 4179	3328 4194	663	3:27:29	20,2	23,7
3	Inicial Final	3409 4199	3474 4187	3461 4192	663	3:21:32	21,2	24,5
4	Inicial Final	3329 4199	3425 4181	3400 4196	663	3:22:14	21	24,1
5	Inicial Final	3434 4200	3492 4176	3482 4194	663	3:21:16	22,1	24,9
6	Inicial Final	3325 4199	3429 4169	3393 4186	663	3:20:48	22,8	25,3
7	Inicial Final	3431 4199	3488 4166	3480 4186	663	3:16:41	21,6	24,4
8	Inicial Final	3330 4199	3431 4168	3397 4187	663	3:18:11	22,7	25,6
9	Inicial Final	3420 4199	3483 4180	3466 4193	663	3:18:44	22,0	24,9

Fonte: O Autor

Os testes foram realizados sem a utilização da equalização pelo BMS para verificar, caso haja, a existência de um efeito crescente no desequilíbrio entre os estados de carga das baterias do conjunto.

É possível verificar que a primeira bateria atinge o limite superior de tensão de 4,2V, que acaba por ser a responsável pela parada do ciclo de carregamento. A bateria 2 sempre apresenta o menor nível de tensão, o que resulta em um menor acúmulo de energia por sua parte quando avaliada em relação a sua capacidade máxima, resultando em sua subutilização. Avaliando as diferenças entre as tensões durante os ciclos, percebe-se que para este processo não há um incremento significativo e constante nas diferenças de tensões nas baterias, sendo observado que é a mesma bateria que gera o fim do processo de carga no BMS em todos os ciclos.

O mesmo processo de medição e aquisição de dados foi feito para o processo de descarga. A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 17 – Resultados para o método de descarga CC com as baterias do conjunto A

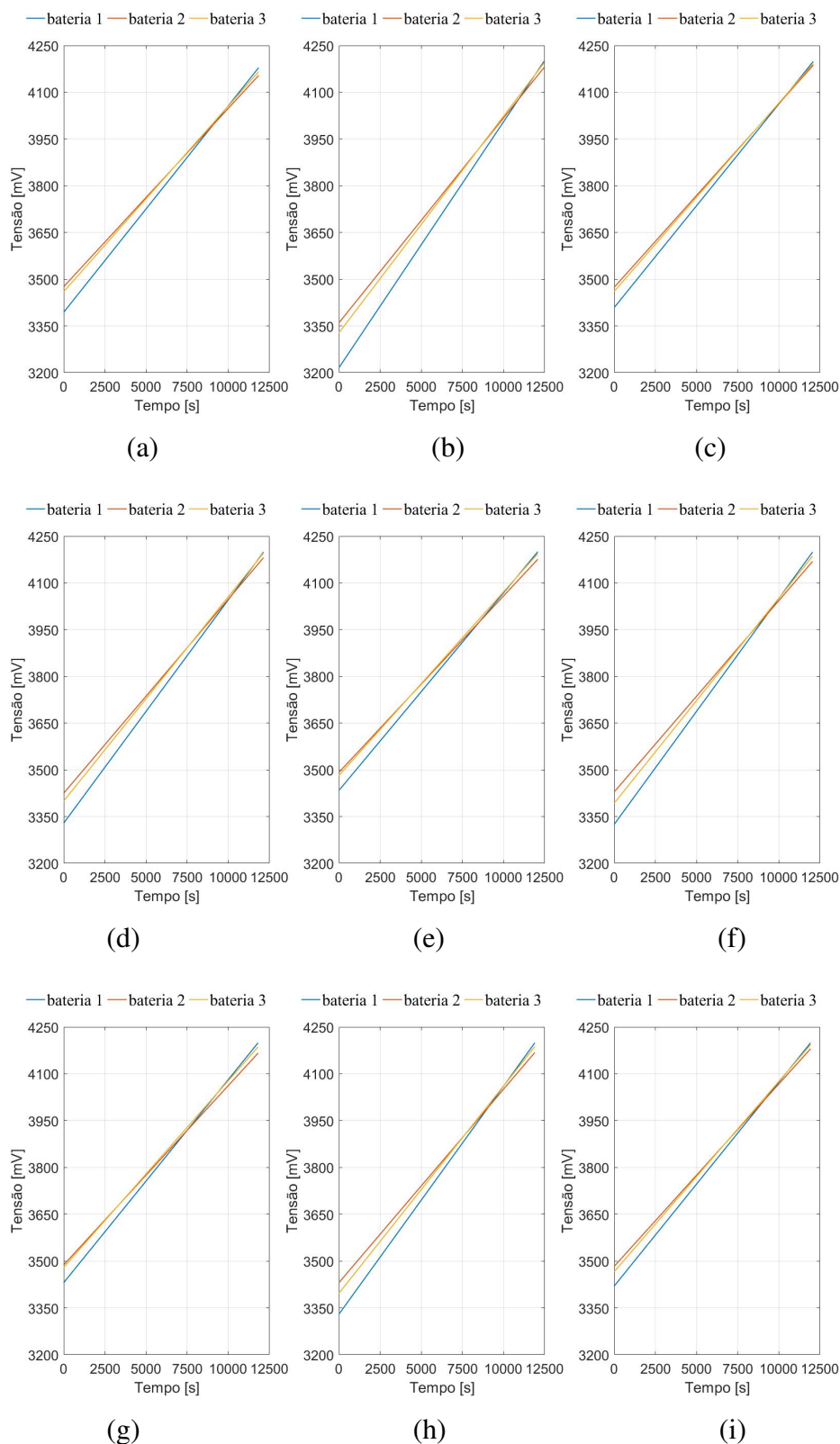
Teste	Estado	Tensão bateria 1 (mV)	Tensão bateria 2 (mV)	Tensão bateria 3 (mV)	Corrente média (mA)	Tempo total (hh:mm:ss)	Tempe- ratura inicial (°C)	Tempe- ratura final (°C)
1	Inicial Final	4042 2798	4048 3238	4046 3192	668	3:00:24	21,2	24,1
2	Inicial Final	4069 2799	4074 3185	4072 3154	668	3:06:13	21,6	24,3
3	Inicial Final	4067 2798	4071 3210	4068 3167	668	3:05:59	21,2	24,2
4	Inicial Final	4071 2798	4075 3185	4073 3143	668	3:06:20	20,8	23,7
5	Inicial Final	4073 2797	4078 3256	4076 3187	668	3:07:25	23,5	26,5
6	Inicial Final	4068 2798	4073 3252	4071 3181	668	3:06:22	23,4	26,5
7	Inicial Final	4067 2798	4070 3268	4068 3198	668	3:04:11	22,4	25,2
8	Inicial Final	4068 2798	4071 3258	4069 3187	668	3:04:07	22,7	26,0
9	Inicial Final	4076 2799	4078 3251	4076 3189	668	3:06:17	23,1	26,5

Fonte: O Autor

O processo de descarga da bateria apresentado é dado após as baterias passarem por um período de repouso de aproximadamente 1 hora, após terem sido carregadas. É possível verificar que a primeira bateria, a qual atingiu primeiramente o estado de carga máximo, é a responsável pelo fim do processo de descarga, por ser a primeira a atingir o valor de tensão mínimo definido para o fim do ciclo, assim percebe-se que esta é a bateria com menor capacidade.

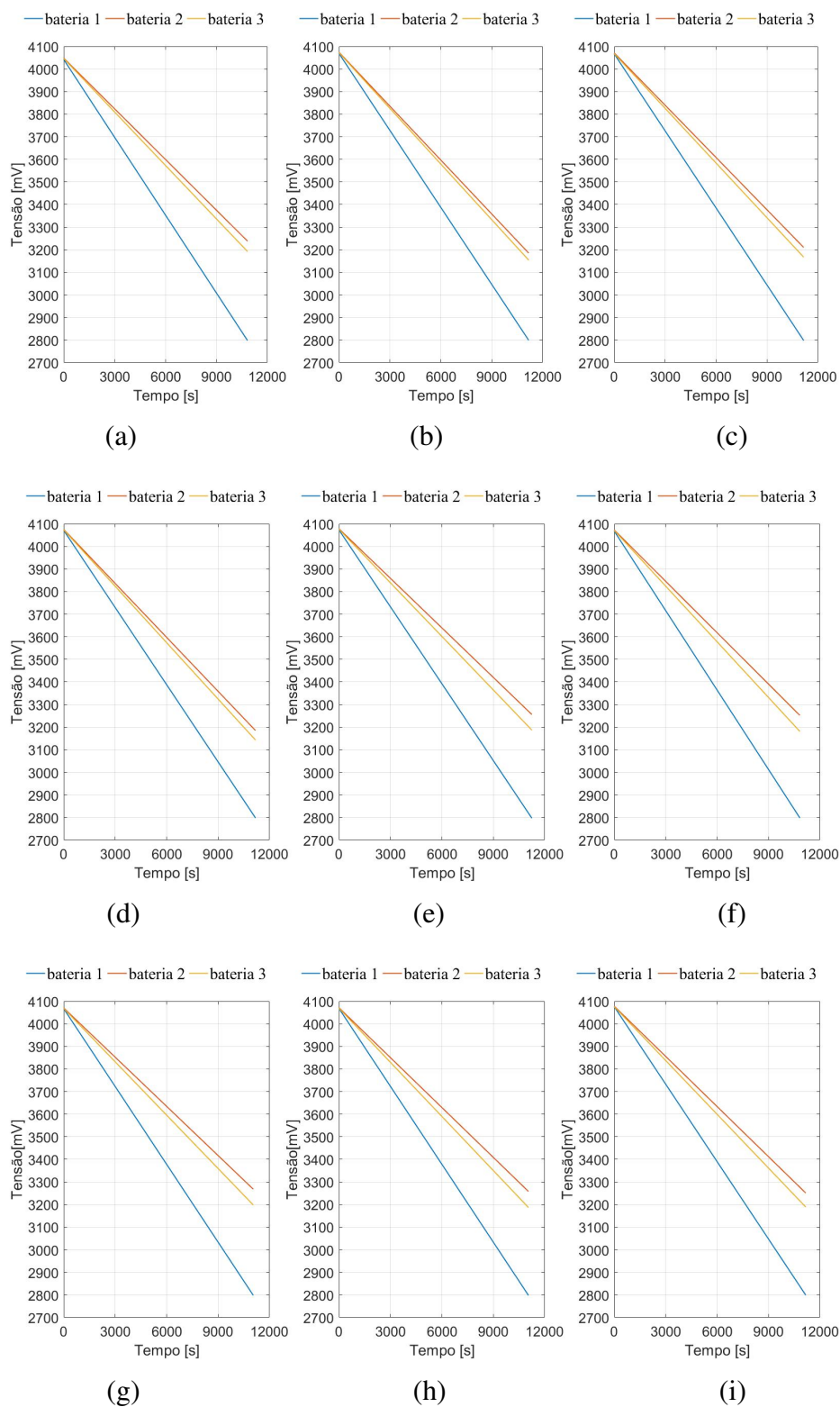
Uma análise comparativa entre as tensões iniciais e finais das baterias em função do tempo para os ciclos de carga e descarga são apresentadas na Figura 69 e Figura 70 respectivamente, para o conjunto A de baterias com o método CC.

Figura 69 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo com o conjunto A de baterias para o método de carga CC: (a) Carga 1. (b) Carga 2. (c) Carga 3. (d) Carga 4. (e) Carga 5. (f) Carga 6. (g) Carga 7. (h) Carga 8. (i) Carga 9.



Fonte: O autor

Figura 70 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo com o conjunto A de baterias para o método de descarga CC: (a) Descarga 1. (b) Descarga 2. (c) Descarga 3. (d) Descarga 4. (e) Descarga 5. (f) Descarga 6. (g) Descarga 7. (h) Descarga 8. (i) Descarga 9.



Fonte: O autor

Desta maneira, não há efeitos diretos no desequilíbrio das baterias, visto que as curvas para carga e descarga se mantêm com mesma tendência e comportamento com a execução repetida dos ciclos de carga e descarga completos. Quanto à energia armazenada no conjunto, há a limitação devido ao desequilíbrio gerado pelos fatores construtivos das baterias que o compõe, e ficam aparentes quando um sistema de equalização não está aplicado.

6.6.2 Carregamento Reflex para as baterias do conjunto A

O método de carregamento Reflex, como já explano em capítulos anteriores, apresenta três estágios de carregamento. Um pulso positivo de corrente, onde há transferência de energia para a bateria, um pulso negativo onde ocorre um período de descarga na bateria e o terceiro estágio, onde a bateria passa por um período de relaxamento, onde a corrente fica nula.

O valor médio da corrente foi mantido próximo a 0,25C. Os testes foram realizados para a frequência 1Hz, devido às limitações da taxa de amostragem do BMS, que por ser previamente projetado para aplicação dos métodos CC e CC-CV não possui capacidade de operar com tempos menores que 600ms, além de que para estes valores não apresentar uma aquisição síncrona dos dados, ou seja, apresentando um intervalo de tempo significativo entre as medidas, além de apresentar limitações no recebimento dos dados pelo computador. Assim, os períodos do sinal de corrente para o método de carregamento Reflex foram definidos como na Tabela 18.

Tabela 18 – Períodos do sinal para os testes de carga Reflex para as baterias do conjunto A.

Frequência do sinal (Hz)	Amplitude da corrente (A)	Duração do pulso positivo (ms)	Duração do pulso negativo (ms)	Duração do período de relaxamento (ms)
1	1,10	700	150	150

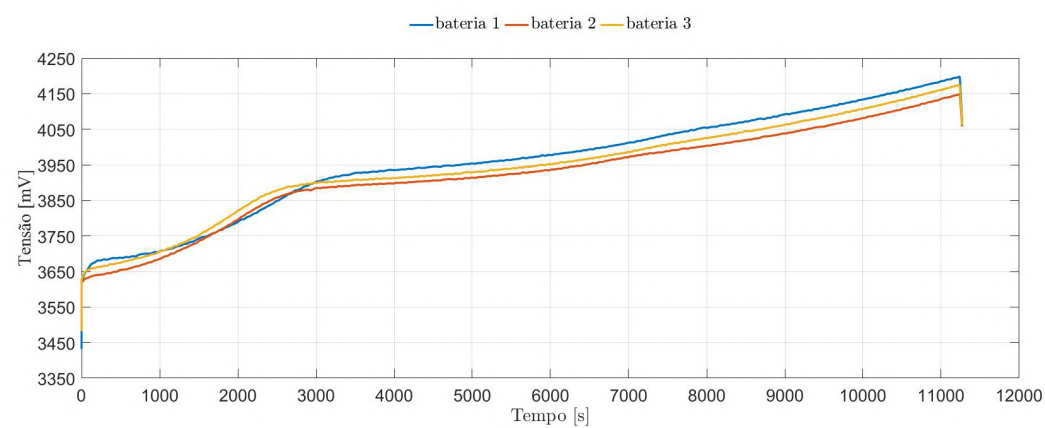
Fonte: O Autor

A duração dos pulsos de corrente positiva, negativa e o tempo de relaxamento apresentam a mesma razão que os utilizados por (SCHIMITT, 2021) para o estudo de carregamento de baterias chumbo-ácidas.

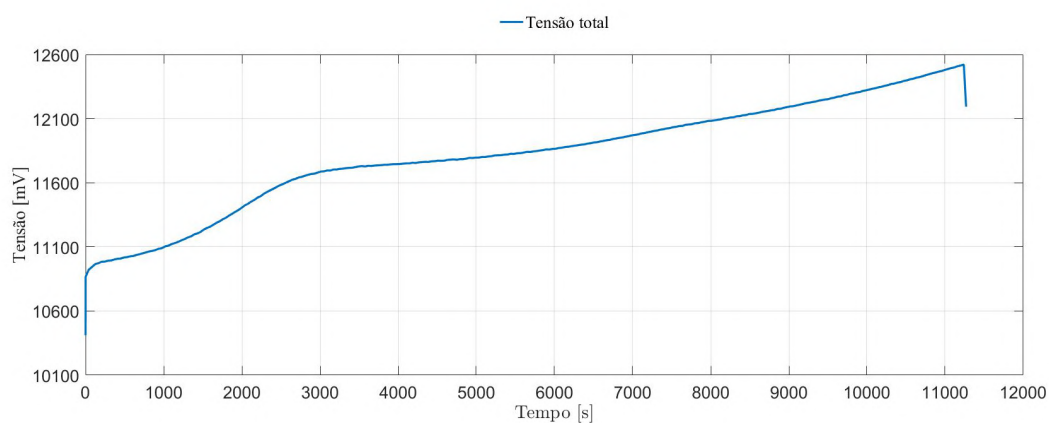
As medições das tensões obtidas pelo BMS são realizadas durante a etapa em que a corrente flui da fonte para as baterias durante o processo de carga, ou seja, pelo máximo do valor de tensão, e para o processo de descarga pelo menor valor de tensão, uma vez em que se busca realizar a medição durante o período de corrente negativo.

O valor das tensões medidas pelo BMS individualmente nas baterias e do conjunto total para o teste de carga são apresentados na Figura 71.

Figura 71 – Carregamento do conjunto A de baterias para o método Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Tensão total do conjunto.



(a)

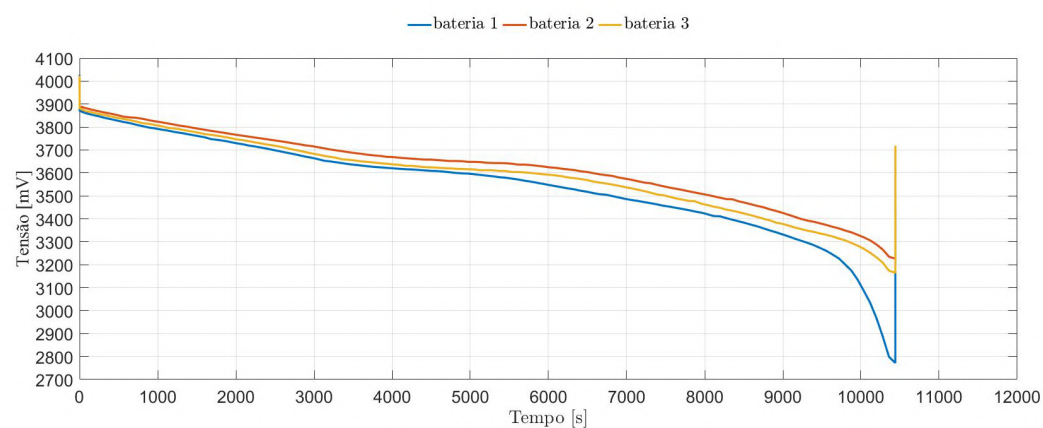


(b)

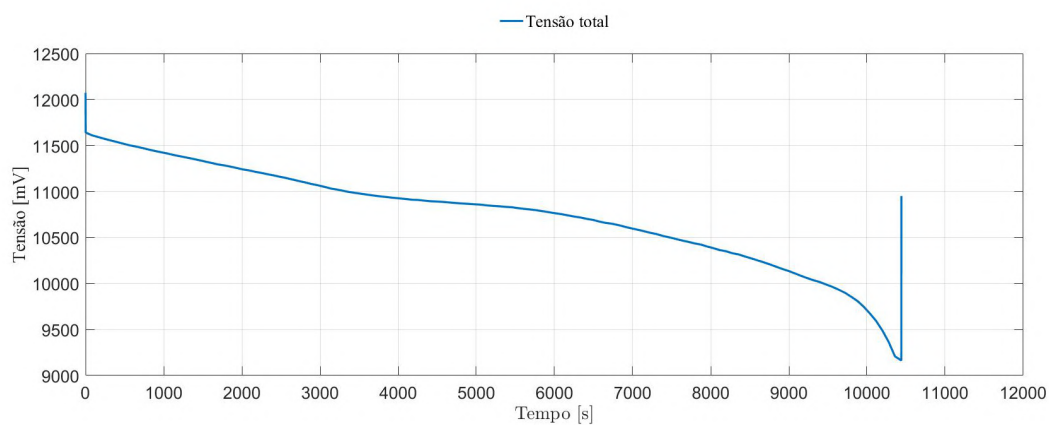
Fonte: O autor

Do mesmo modo, os resultados obtidos para o processo de descarga são apresentados na Figura 72. No processo de descarga o ensaio se encerra quando a primeira bateria atinge o menor valor permitido e configurado no BMS, ou seja, em 2,8V.

Figura 72 – Descarga do conjunto A de baterias para o método Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Tensão total do conjunto.



(a)



(b)

Fonte: O autor

Assim os resultados obtidos no modo Reflex estão apresentados na Tabela 19. O valor da corrente média foi definido com a utilização de um osciloscópio, com uma ponteira de corrente isolada Tectronics®, modelo TCP0030A, uma vez que se trata de um sinal de corrente com diferentes patamares.

Tabela 19 – Resultados para o método de carregamento Reflex com as baterias do conjunto A.

Teste	Estado	Tensão bateria 1 (mV)	Tensão bateria 2 (mV)	Tensão bateria 3 (mV)	Corrente média (mA)	Tempo total (hh:mm:ss)	Tempe- ratura inicial (°C)	Tempe- ratura final (°C)
1	Inicial Final	3432 4198	3497 4149	3482 4174	647	3:07:48	23,1	25,9
2	Inicial Final	3432 4201	3497 4157	3482 4184	647	3:16:39	23,0	25,9
3	Inicial Final	3432 4200	3497 4125	3482 4139	647	3:00:23	21,9	25,2
4	Inicial Final	3358 4165	3448 4107	3424 4127	650	3:00:28	23,2	26,0
5	Inicial Final	3432 4201	3497 4144	3482 4168	641	3:07:48	22,7	26,0
6	Inicial Final	3432 4200	3497 4139	3482 4160	646	3:10:22	20,1	23,1
7	Inicial Final	3360 4200	3445 4139	3418 4160	648	3:10:25	21,9	24,8
8	Inicial Final	3370 4193	3461 4171	3448 4201	638	3:15:06	22,7	25,4
9	Inicial Final	3460 4201	3497 4162	3489 4191	647	3:12:24	22,9	26,4

Fonte: O Autor

Os resultados para descarga das baterias do conjunto de baterias de lítio estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Resultados para o método de descarga Reflex com as baterias do conjunto A.

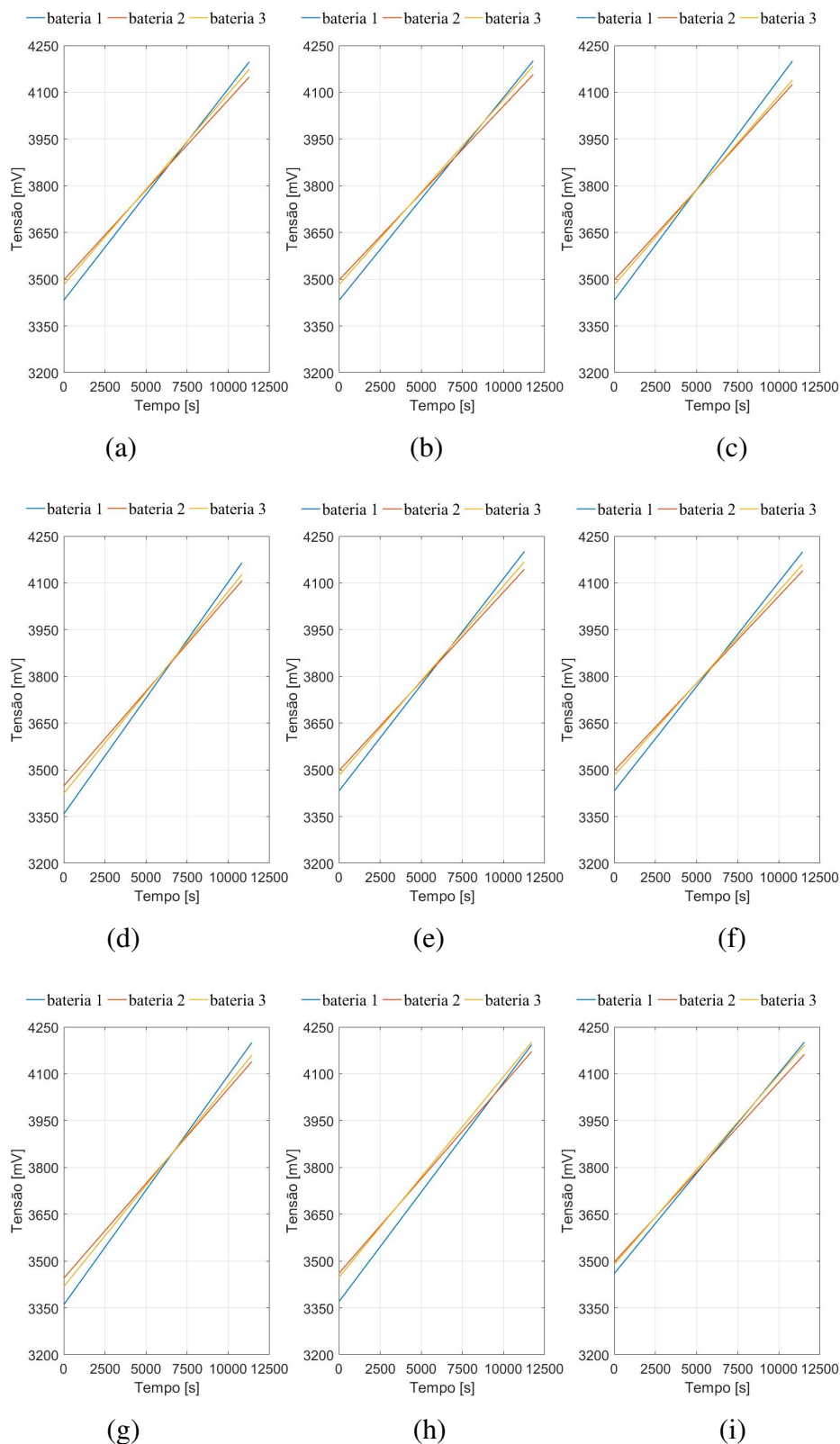
Teste	Estado	Tensão bateria 1 (mV)	Tensão bateria 2 (mV)	Tensão bateria 3 (mV)	Corrente média (mA)	Tempo total (hh:mm:ss)	Tempe- ratura inicial (°C)	Tempe- ratura final (°C)
1	Inicial Final	4027 2772	4023 3226	4023 3165	647	2:54:35	23,1	26,1
2	Inicial Final	4041 2782	4036 3232	4039 3176	648	2:57:17	22,9	26,0
3	Inicial Final	3982 2796	3990 3244	3988 3177	646	2:47:12	22,9	25,5
4	Inicial Final	3984 2837	3988 3231	3987 3179	651	2:43:07	22,8	25,5
5	Inicial Final	4027 2788	4023 3236	4023 3170	655	2:53:53	21,2	23,9
6	Inicial Final	4004 2786	4012 3262	4009 3188	651	2:50:04	21,0	24,0
7	Inicial Final	4027 2789	4028 3246	4026 3171	654	2:54:38	22,9	26,0
8	Inicial Final	4050 2793	4051 3256	4047 3193	659	2:57:14	21,5	24,4
9	Inicial Final	4044 2789	4041 3238	4041 3185	654	2:57:23	22,6	25,7

Fonte: O Autor

Da mesma maneira, foram realizados para este teste 9 ciclos de carga e descarga para as baterias a fim de também acompanhar possíveis efeitos de desequilíbrio entre as baterias. As demais curvas para os outros ciclos de carregamento foram adicionadas e encontram-se no Apêndice C.

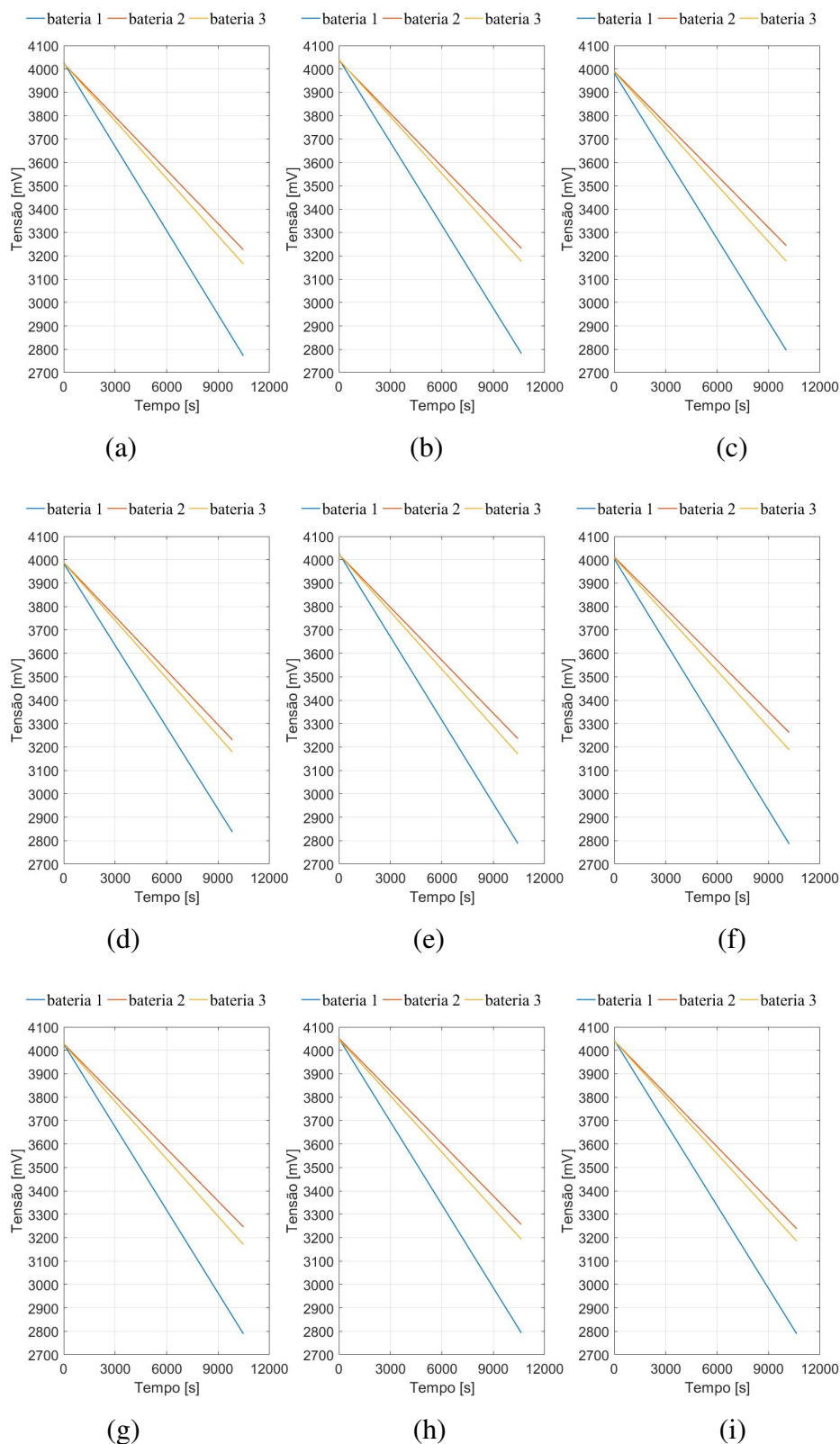
Uma análise comparativa entre as tensões iniciais e finais em função do tempo para o método Reflex pode ser vista na Figura 73 para os ciclos de carga com as baterias do conjunto A, e para o caso da descarga, esta comparação é apresentada na Figura 74.

Figura 73 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo com o conjunto A de baterias para o método Reflex: (a) Carga 1. (b) Carga 2. (c) Carga 3. (d) Carga 4. (e) Carga 5. (f) Carga 6. (g) Carga 7. (h) Carga 8. (i) Carga 9.



Fonte: O autor

Figura 74 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo para o conjunto A de baterias com o método Reflex: (a) Descarga 1. (b) Descarga 2. (c) Descarga 3. (d) Descarga 4. (e) Descarga 5. (f) Descarga 6. (g) Descarga 7. (h) Descarga 8. (i) Descarga 9.



Fonte: O autor

Foram verificados com os testes que a aplicação do método Reflex, não interferiu no desequilíbrio das baterias durante os ciclos de carregamento, sendo visível que a bateria 1 atinge o valor final da tensão de carregamento antes das demais do conjunto, e também é a mesma a encerrar o ciclo de descarga, atingindo o valor de mínima tensão. De maneira similar à vista para o método anterior, a limitação construtiva das baterias do conjunto também é responsável por gerar as limitações de energia, uma vez que sem a utilização de um sistema de equalização não se torna possível compensar estas diferenças durante o período de carga.

Outro ponto a ser avaliado é a questão do pulso positivo possuir uma amplitude maior que o valor máximo no método CC, acaba por resultar em um pico de tensão maior na bateria e consequentemente resultando em um encerramento do ciclo de carregamento mais rápido, sabendo-se que o bloqueio do BMS ocorre pela limitação do valor máximo de tensão na bateria. Uma modulação em amplitude no estágio final do carregamento poderia ser a solução para este caso em específico, de forma que a redução gradual da corrente prolongaria o tempo de carregamento das baterias.

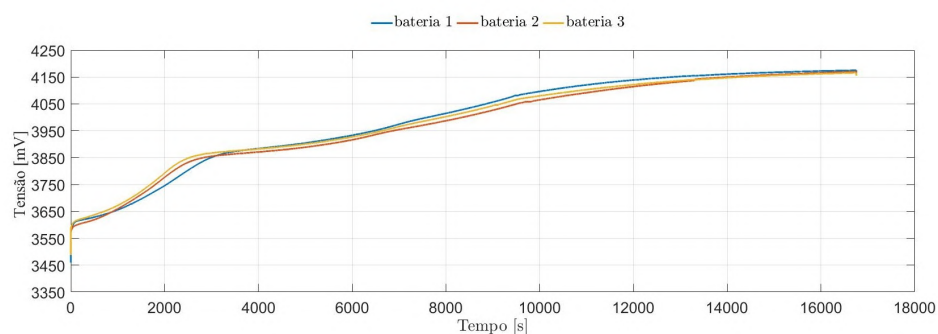
6.6.3 Carregamento CC-CV para as baterias do conjunto A

O método de carregamento CC-CV é um dos métodos mais utilizados para o carregamento de baterias. Para aplicação destes testes o BMS foi acoplado a uma fonte de bancada da Politerm® POL-16E da mesma maneira que para o método de carregamento CC, mas agora para haver o estágio de redução gradual de corrente na bateria, a fonte de alimentação possui sua tensão configurada com o máximo valor tensão na bateria de 12,6V, e a corrente inicialmente configurada como 0,25C. A medida que a tensão se aproxima do valor máximo de tensão na bateria, a corrente decresce de forma gradual até o fim do ciclo de carregamento. Por se tratar de um método conhecido, foram realizados dois testes, de maneira a servir de critério comparativo para este trabalho, onde critérios como possíveis desequilíbrios podem ser verificados sem a atuação do equalização.

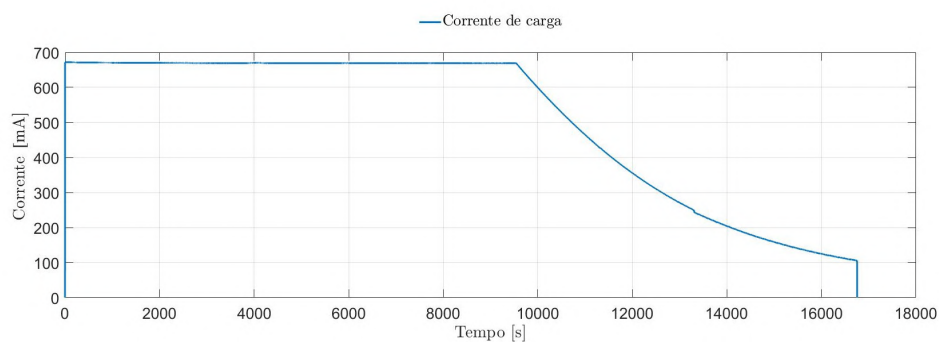
Da mesma maneira que para os testes anteriores, as baterias de lítio foram totalmente carregadas e equalizadas, sofrendo uma descarga com corrente constante a uma amplitude de 0,25C, com o uso da carga eletrônica, até que a primeira bateria do conjunto atinja a tensão mínima de 2,8V.

Os resultados para as tensões durante o primeiro ciclo de carga com as tensões individuais nas baterias e total no conjunto são apresentados na Figura 75.

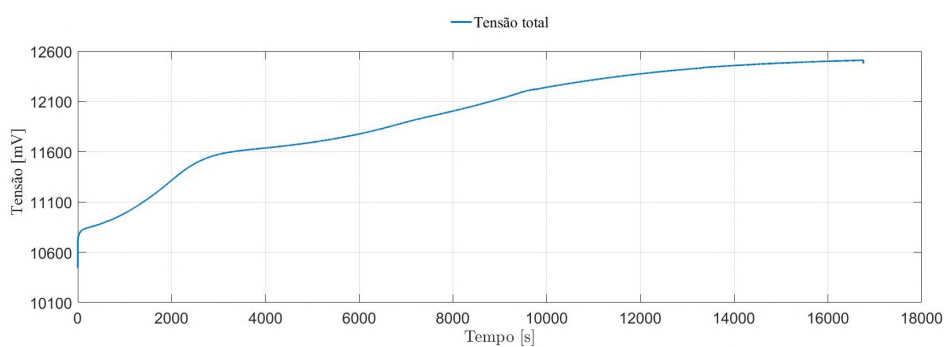
Figura 75 – Carregamento do conjunto A de baterias para o método CC-CV sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Corrente de carga. (c) Tensão total no conjunto.



(a)



(b)

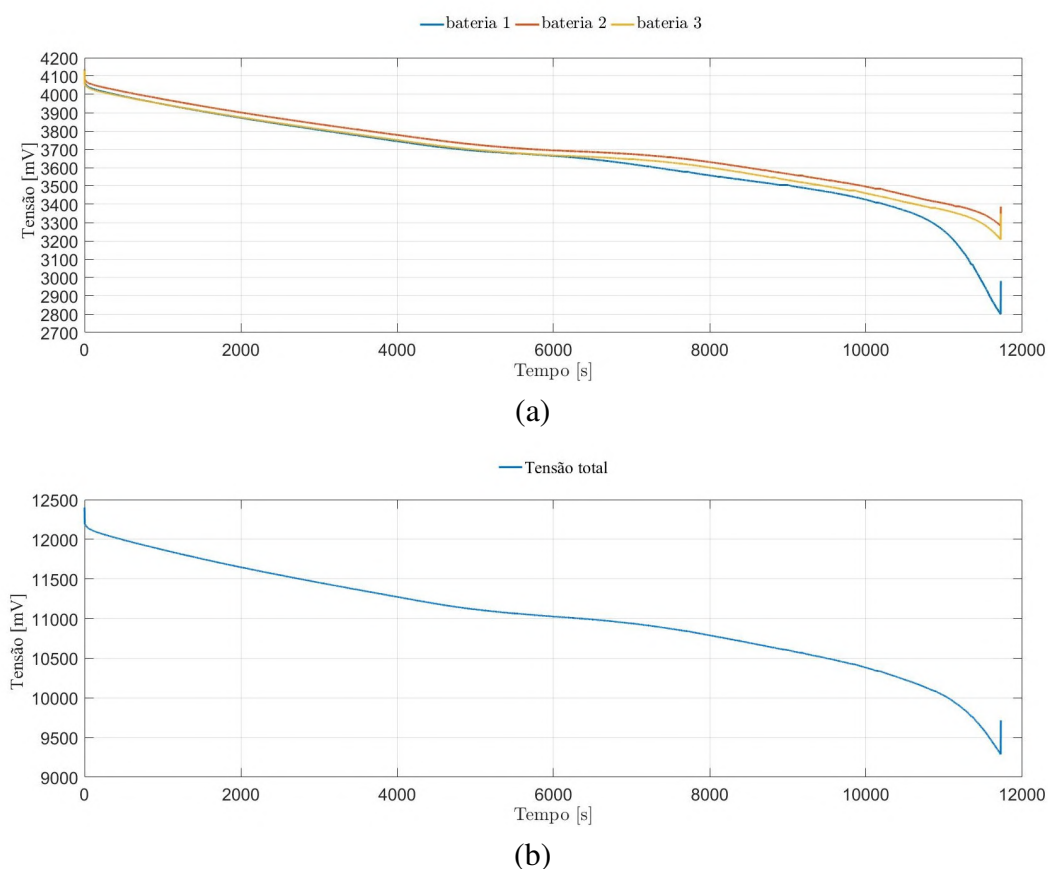


(c)

Fonte: O autor

A descarga foi aplicada por corrente constante com o BMS conectado a carga eletrônica, a qual permite uma corrente de descarga constante de 0,25C. Os resultados estão na Figura 76.

Figura 76 – Descarga CC do conjunto A de baterias para o método de carregamento CC-CV sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Tensão total do conjunto.



Fonte: O autor

É visível o tempo mais elevado para o carregamento, verificado que a etapa final acabou por incrementar o tempo de carregamento consideravelmente.

Os resultados obtidos para o processo de carga da bateria estão apresentados na Tabela 21 e para descarga na Tabela 22.

Tabela 21 – Resultados para o método carga CC-CV com as baterias do conjunto A

Teste	Estado	Tensão bateria 1 (mV)	Tensão bateria 2 (mV)	Tensão bateria 3 (mV)	Tempo total (hh:mm:ss)	Tempe- ratura inicial (°C)	Tempe- ratura final (°C)
1	Inicial	3460	3494	3488	4:39:15	20,4	22,8
	Final	4175	4170	4166			
2	Inicial	3458	3492	3487	4:46:25	21,4	24,3
	Final	4166	4160	4157			

Fonte: O Autor

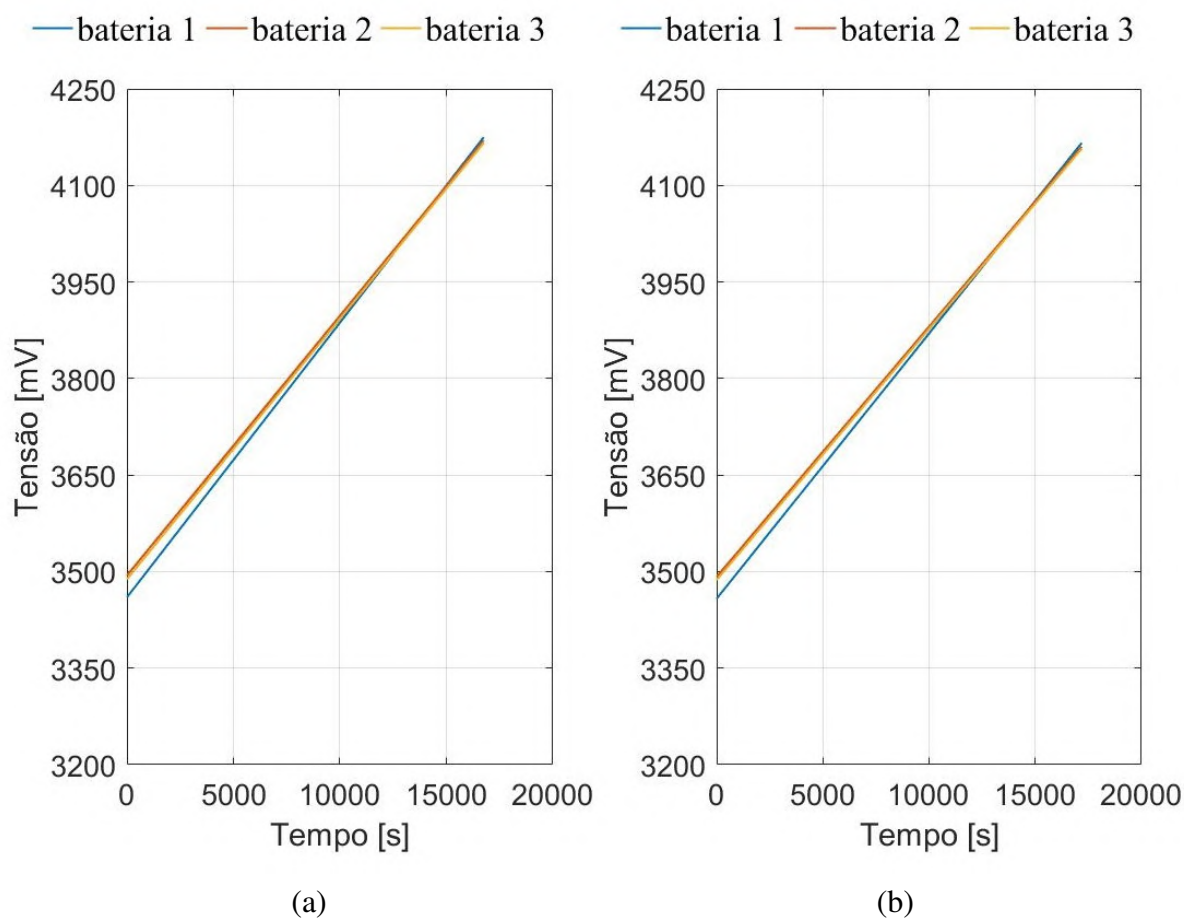
Tabela 22 – Resultados para o método de descarga CC com as baterias do conjunto A.

Teste	Estado	Tensão bateria 1 (mV)	Tensão bateria 2 (mV)	Tensão bateria 3 (mV)	Tempo total (hh:mm:ss)	Tempe- ratura inicial (°C)	Tempe- ratura final (°C)
1	Inicial	4134	4136	4131	3:15:26	21,9	24,7
	Final	2799	3281	4166			
2	Inicial	4143	4142	4139	3:18:29	23,7	26,8
	Final	2799	3265	3213			

Fonte: O Autor

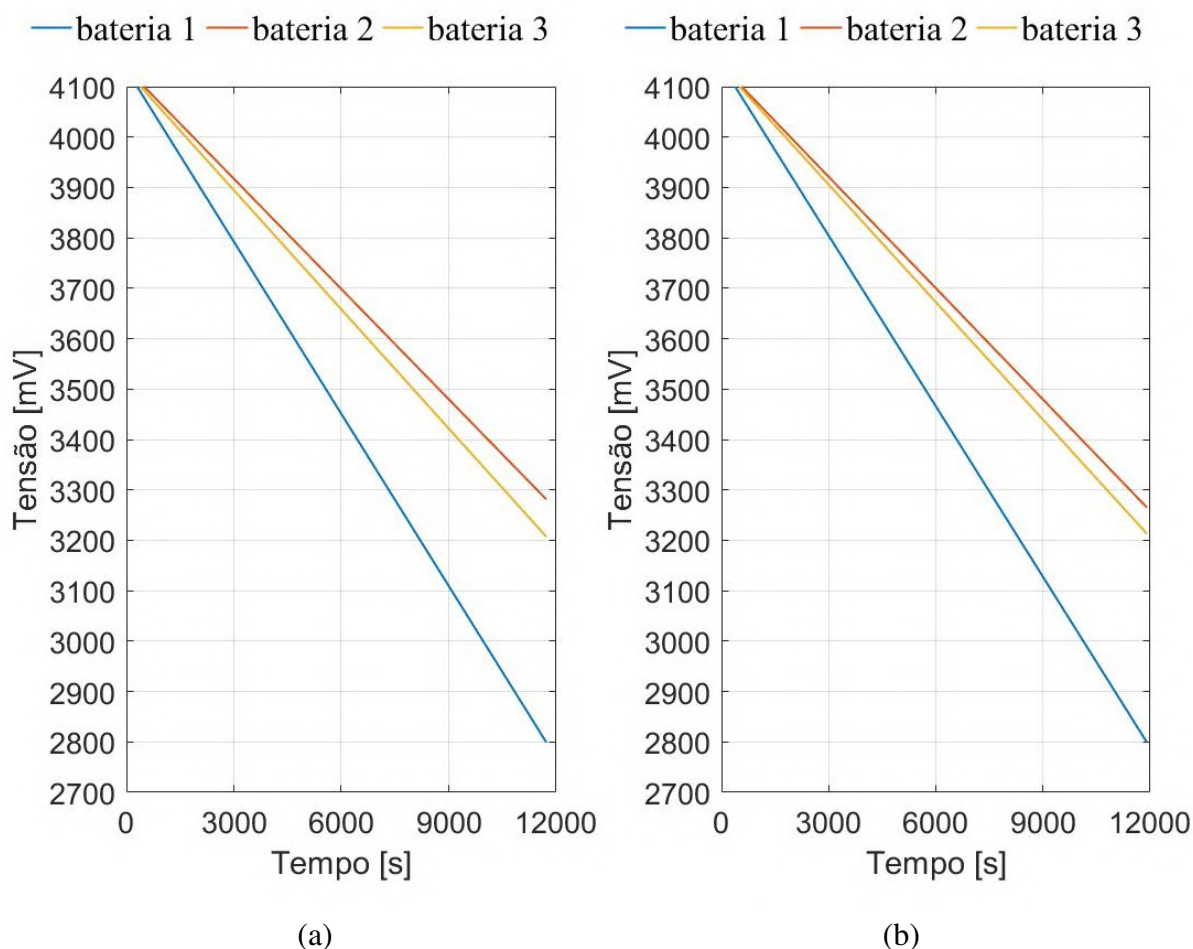
Os gráficos com as tensões iniciais e finais em função do tempo a critério comparativo são apresentados na Figura 77 para a carga e Figura 78 para a descarga.

Figura 77 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo com o conjunto A de baterias para o método CC-CV: (a) Carga 1 (b) Carga 2



Fonte: O autor

Figura 78 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo com o conjunto A de baterias para o método de descarga CC: (a) Descarga 1 (b) Descarga 2



Fonte: O autor

Os testes apresentaram uma tensão final mais próxima entre as baterias, devido à menor corrente no estágio final do carregamento. Não são percebidos efeitos de desequilíbrio entre as baterias resultantes da aplicação do método. A etapa de carregamento constante tornou claramente o processo total de carregamento mais longo, incrementando o tempo em mais de 1 hora e 30 minutos para alguns casos quando comparado apenas ao processo de carga por corrente constante, contudo este método conseguiu armazenar uma pequena quantidade a mais de energia na bateria, antes da interrupção pelo BMS de máxima tensão atingida numa das baterias.

6.6.4 Avaliação comparativa entre os métodos CC, Reflex e CC-CV para as baterias do conjunto A

Uma comparação entre os resultados obtidos com os métodos abordados é apresentada nesta secção. A Tabela 23 apresenta o resumo dos testes pelo método CC e a Tabela 24 para o método Reflex.

Tabela 23 – Resultados para o método de carregamento CC com as baterias do conjunto A.

Teste	Processo	Tensão total inicial (mV)	Tensão total final (mV)	Tempo total (hh:mm:ss)	Fluxo de energia (mA/h)	Variação de temperatura (C)
1	Carga	10330	12499	3:17:19	2176,56	3,5
	Descarga	12136	9228	3:00:24	2019,32	2,9
2	Carga	9904	12572	3:27:29	2289,31	3,5
	Descarga	12215	9138	3:06:13	2067,44	2,7
3	Carga	10344	12578	3:21:32	2235,49	3,3
	Descarga	12156	9175	3:05:59	2065,81	3,0
4	Carga	10154	12576	3:22:14	2248,1	3,1
	Descarga	12219	9126	3:06:20	2064,1	2,9
5	Carga	10408	12570	3:21:16	2232,4	2,8
	Descarga	12227	9240	3:07:25	2080,7	3,0
6	Carga	10147	12554	3:20:48	2236,4	2,5
	Descarga	12212	9231	3:06:22	2067,9	3,1
7	Carga	10399	12551	3:16:41	2196,7	2,8
	Descarga	12205	9264	3:04:11	2052,8	2,8
8	Carga	10158	12554	3:18:11	2226,3	2,9
	Descarga	12208	9243	3:04:07	2047,4	3,3
9	Carga	10369	12572	3:18:44	2229	2,9
	Descarga	12230	9239	3:06:17	2081,2	3,4

Fonte: O Autor

Algumas conclusões são tomadas pelo processo de carga e descarga CC, uma vez que é possível monitorar o tempo de carregamento e a corrente média, pode-se calcular a quantidade de A/h (Amperes/hora) transferidos para bateria durante a carga e retirados durante a descarga, e de maneira que a bateria não é um elemento ideal, a quantidade de A/h fornecidos a bateria são maiores que as drenadas. Verifica-se que apenas com a aplicação do método de carregamento por corrente constante a bateria não é capaz de atingir o máximo SOC, porém nota-se que consegue atingir valores superiores a 90% do SOC máximo, considerando-se as condições de corrente e tensão de carregamento na bateria definidas para os testes.

Contudo, é clara a limitação deste método, não sendo capaz de obter uma carga completa da bateria, e uma vez que haja a intenção de reduzir ainda mais o tempo de carregamento através do aumento da amplitude da corrente de carga, o armazenamento de energia na bateria sofrerá com a tendência de redução da energia armazenada.

Outro ponto a ser analisado é o fato de nenhum dos ciclos atingirem o valor estipulado nominal para este conjunto, que seria 12,6V, sendo que para todos os casos os valores ficam menores que 4,2V em duas das baterias, efeito este causado pelas próprias baterias, que possuem suas limitações e diferenças construtivas, e o não uso do sistema de equalização durante o ciclo de carga causa uma grande limitação no armazenamento total do conjunto em função da bateria

com menor capacidade.

Tabela 24 – Resultados para o método de carregamento Reflex com as baterias do conjunto A.

Teste	Processo	Tensão total inicial (mV)	Tensão total final (mV)	Tempo total (hh:mm:ss)	Fluxo de energia (mA/h)	Variação de temperatura (°C)
1	Carga	10411	12521	3:07:48	2025,17	2,8
	Descarga	12073	9163	2:54:35	1882,65	3,0
2	Carga	10411	12542	3:16:39	2120,54	2,9
	Descarga	12116	9190	2:57:17	1914,59	3,1
3	Carga	10411	12464	3:00:23	1945,19	3,3
	Descarga	11960	9217	2:47:12	1800,10	2,6
4	Carga	10230	12399	3:00:23	1955,14	2,8
	Descarga	11959	9247	2:43:07	1769,85	2,7
5	Carga	10411	12513	3:07:48	2006,39	3,3
	Descarga	12073	9194	2:53:53	1898,19	2,7
6	Carga	10411	12499	3:10:22	2049,59	3,1
	Descarga	12025	9236	2:50:04	1845,25	3,0
7	Carga	10223	12499	3:10:25	2055,89	2,7
	Descarga	12081	9206	2:54:38	1903,53	3,1
8	Carga	10279	12565	3:15:06	2074,57	3,1
	Descarga	12148	9242	2:57:14	1946,70	2,9
9	Carga	10466	12554	3:12:24	2074,75	3,5
	Descarga	12126	9212	2:57:23	1933,51	3,1

Fonte: O Autor

Percebe-se que para o método Reflex houve menores tempos durante o processo de carga e descarga, uma vez que para este método de carregamento maiores picos de tensão foram percebidos durante o carregamento quando comparado ao método de carregamento CC, por ser necessário um valor maior de corrente durante o ciclo de corrente positiva para compensar o período de corrente negativa e de corrente nula durante o processo, efeito este responsável por encerrar o processo de carregamento pelo BMS mais rapidamente que quando comparado ao método de carregamento CC. O mesmo raciocínio é válido para o período de descarga da bateria que apresenta maiores amplitudes de corrente negativa que o método CC. Quanto a energia armazenada, a relação entre a energia transferida e retirada da bateria se manteve em valores próximos a 90%, mantendo uma razão similar de amperes-hora transferidos e retirados do conjunto de baterias quando comparado com o método anterior. Assim, perceberam-se tempos menores para carga e descarga, contudo sem apresentar mudanças significativas entre a relação de energia transferida para a bateria e drenada durante o período de descarga.

Este método, como o anterior, também apresentou o desequilíbrio das baterias, não atingindo o valor total de tensão de 4,2V em duas das três baterias, neste caso também não sendo possível o máximo armazenamento de energia, causando limitação de energia do conjunto.

Porém, embora seja percebido os efeitos do desequilíbrio, aqui também são vindos dos fatores construtivos da bateria, uma vez que com a utilização do método Reflex, não há um incremento no desequilíbrio de forma crescente entre os ciclos, de maneira que o mesmo padrão é apresentado para os diversos ciclos de carga.

Além disso, é visto que ambos os métodos acabam por sofrer com menor armazenamento de energia, por não possuírem um estágio de redução de corrente, o qual é responsável por prolongar o estágio de carregamento, porém realizando uma carga completa.

De maneira similar, também são apresentados os resultados dos ensaios com o processo de carga CC-CV na Tabela 25.

Tabela 25 – Resultados para o método CC-CV com as baterias do conjunto A.

Teste	Processo	Tensão total inicial (mV)	Tensão total final (mV)	Tempo total (hh:mm:ss)	Fluxo de energia (mA/h)	Variação de temperatura (°C)
1	Carga	10442	12511	4:39:15	2380,12	2,4
	Descarga	12401	9287	3:15:26	2177,29	2,8
2	Carga	10437	12518	4:46:25	2387,00	2,9
	Descarga	12424	9277	3:18:29	2202,74	3,1

Fonte: O Autor

O Método CC-CV apresentou um tempo maior de carregamento, porém apresentou maior densidade de energia armazenada que os outros métodos em vista do maior tempo de descarga e consequentemente maior quantidade de energia retirada da bateria. Embora o processo tenha demorado tempos superiores a quatro horas e trinta minutos para o ciclo total de carregamento, isso deve-se claramente ao último estágio deste método de tensão constante, como citado nos capítulos anteriores.

Quanto ao desequilíbrio, para este método também não foi aplicado o processo de equalização, inicialmente as baterias apresentando um desvio similar ao visto para o método CC, previamente estudado, porém com a aplicação do estágio de tensão constante, as tensões entre as baterias passam a se aproximar, efeito este devido à redução gradual da corrente a medida em que as baterias vão aumentando seu estado de carga.

6.6.5 Estudo dos efeitos de baterias degradadas associadas em um conjunto

Para ser possível avaliar o efeito de baterias degradadas em conjuntos de baterias foram realizados testes com o conjunto de baterias B, incluindo uma bateria degradada juntamente a duas baterias novas. Este estudo permite a verificação dos efeitos como limitação de energia no conjunto e os efeitos causados pelo não utilização de um circuito de equalização para carregamento das baterias.

Os dados coletados das baterias do conjunto B para os testes estão apresentados na Tabela 26. Para medição da resistência das baterias utilizou-se o equipamento Liitokala®.

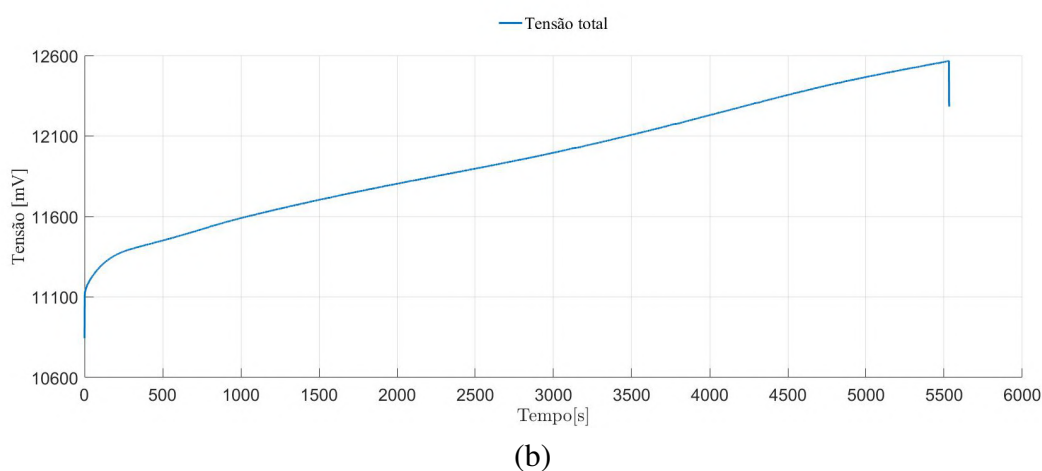
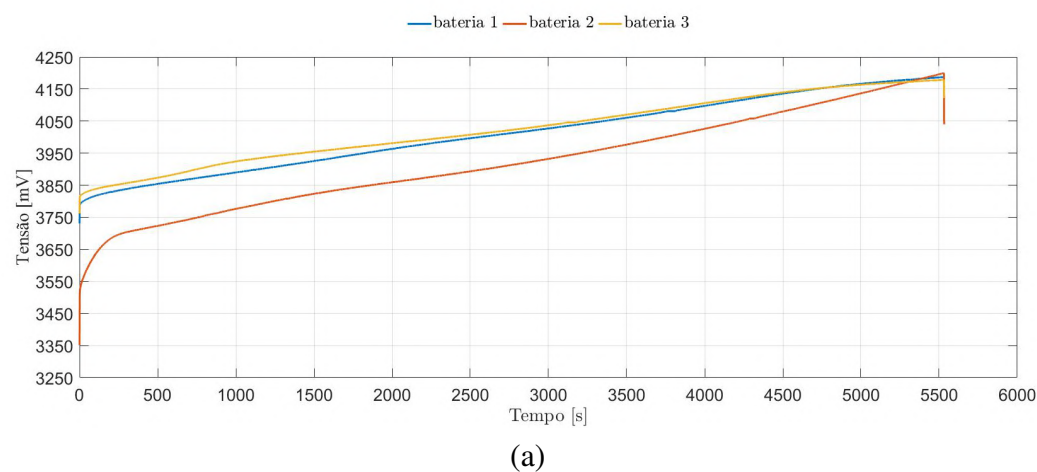
Tabela 26 – Características para as baterias do conjunto B

Bateria	Resistência interna ($m\Omega$)
1	19
2	48
3	19

Fonte: O Autor

Os testes CC foram realizados da mesma forma que para o conjunto de baterias anterior, sendo os resultados apresentados na Figura 79 para o carregamento das baterias.

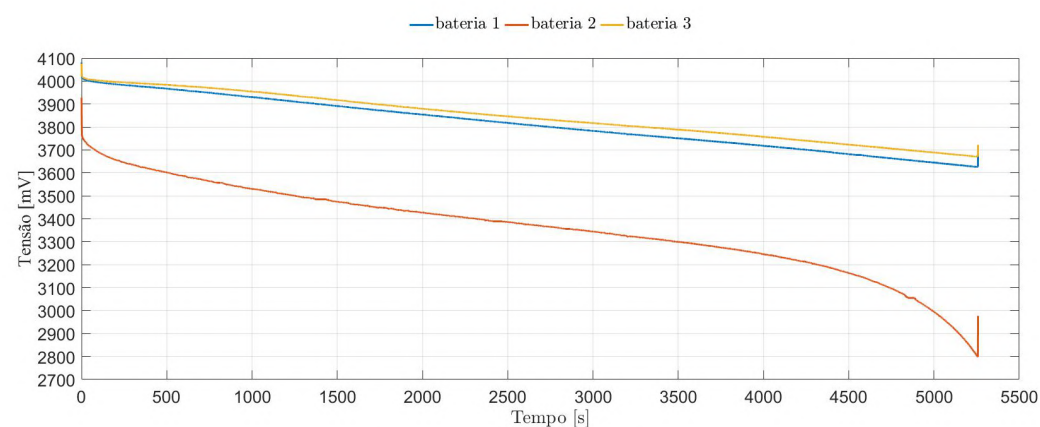
Figura 79 – Carregamento do conjunto B de baterias para o método CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Tensão total do conjunto



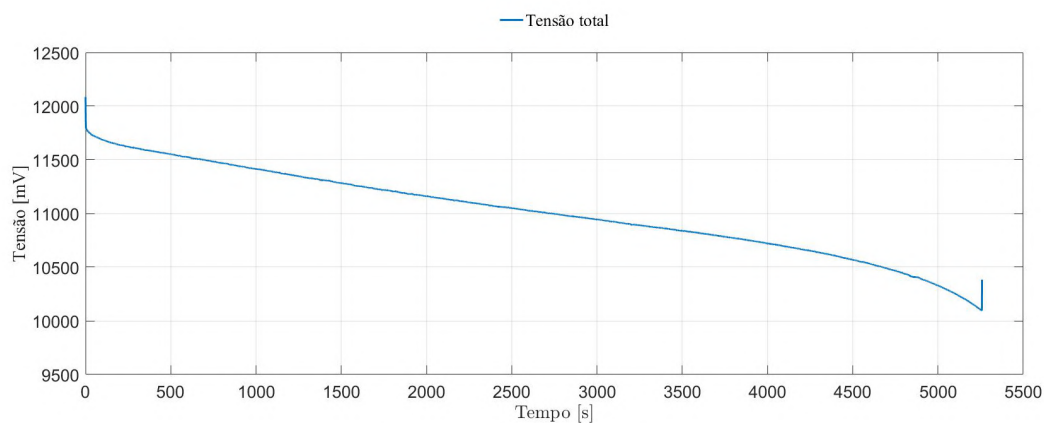
Fonte: O autor

Da mesma maneira, é possível verificar as curvas de descarga individual e total apresentadas na Figura 80.

Figura 80 – Descarga CC do conjunto B de baterias para o método de carregamento CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Tensão total do conjunto.



(a)



(b)

Fonte: O autor

Os resultados para os testes são apresentados na Tabela 27 e Tabela 28, que apresentam os resultados obtidos com o BMS para os testes de carga e descarga.

Tabela 27 – Resultados para o método de carregamento CC com o conjunto B de baterias.

Teste	Estado	Tensão bateria 1 (mV)	Tensão bateria 2 (mV)	Tensão bateria 3 (mV)	Corrente média (mA)	Tempo total (hh:mm:ss)	Tempe- ratura inicial (°C)	Tempe- ratura final (°C)
1	Inicial	3731	3351	3762	663	01:32:12	25,1	27,8
	Final	4188	4200	4179				
2	Inicial	3718	3330	3747	661	01:34:54	25,3	27,8
	Final	4185	4200	4177				
3	Inicial	3719	3379	3746	662	01:34:08	25,5	27,9
	Final	4182	4199	4175				

Fonte: O Autor

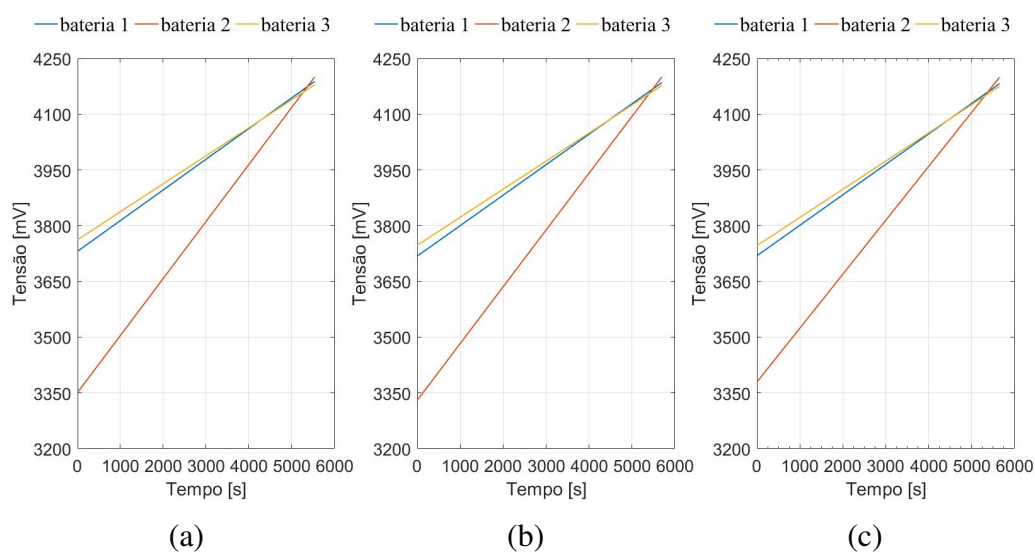
Tabela 28 – Resultados para o método de descarga CC com o conjunto B de baterias.

Teste	Estado	Tensão bateria 1 (mV)	Tensão bateria 2 (mV)	Tensão bateria 3 (mV)	Corrente média (mA)	Tempo total (hh:mm:ss)	Tempe- ratura inicial (°C)	Tempe- ratura final (°C)
1	Inicial	4081	3928	4076	669	01:27:38	25,4	27,7
	Final	3626	2799	3671				
2	Inicial	4081	3933	4076	670	01:27:05	26,1	28,6
	Final	3625	2798	3670				
3	Inicial	4081	3936	4076	669	01:26:33	25,8	28,6
	Final	3622	2796	3667				

Fonte: O Autor

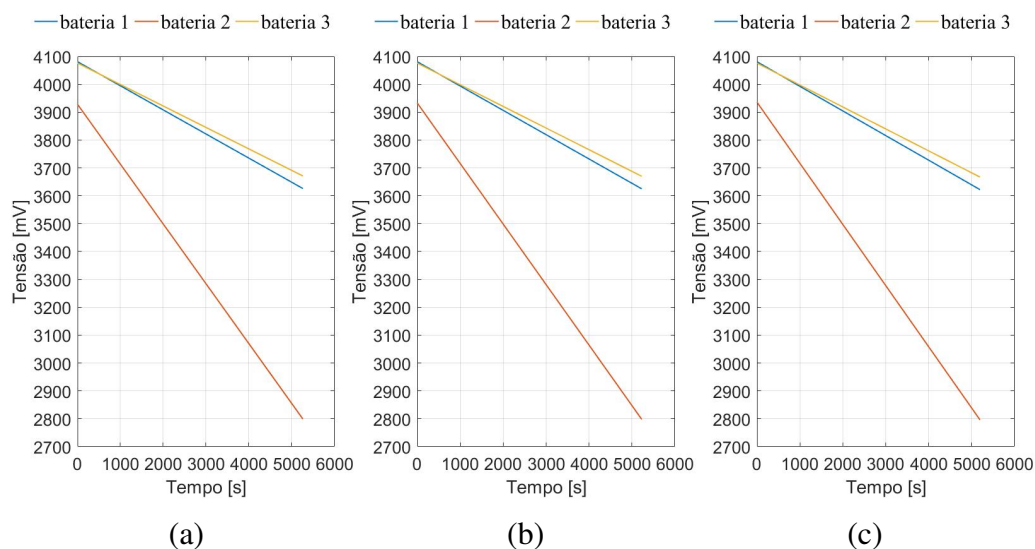
Uma análise comparativa com os tempos e valores de tensão inicial e final para os ciclos de carga e descarga são apresentados na Figura 81 e Figura 82.

Figura 81 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo com o conjunto B de baterias para o método CC: (a) Carga 1. (b) Carga 2. (c) Carga 3.



Fonte: O autor

Figura 82 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo com o conjunto B de baterias para o método CC: (a) Descarga 1. (b) Descarga 2. (c) Descarga 3.



Fonte: O autor

Para este caso a bateria 2, é a responsável por encerrar o processo de carga, assim como também o processo de descarga.

Os resultados para todo o conjunto das baterias do conjunto B podem ser vistos na Tabela 29.

Tabela 29 – Resultados para o método CC com as baterias do conjunto B

Teste	Processo	Tensão total inicial (mV)	Tensão total final (mV)	Tempo total (hh:mm:ss)	Fluxo de energia (mA/h)	Variação de temperatura (°C)
1	Carga	10844	12567	01:32:12	1018,89	2,7
	Descarga	12085	10096	01:27:38	977,82	2,3
2	Carga	10795	12562	01:34:54	1046,68	2,5
	Descarga	12090	10093	01:27:05	973,22	2,5
3	Carga	10844	12556	01:34:08	985,29	2,4
	Descarga	12093	10085	01:26:33	877,45	2,8

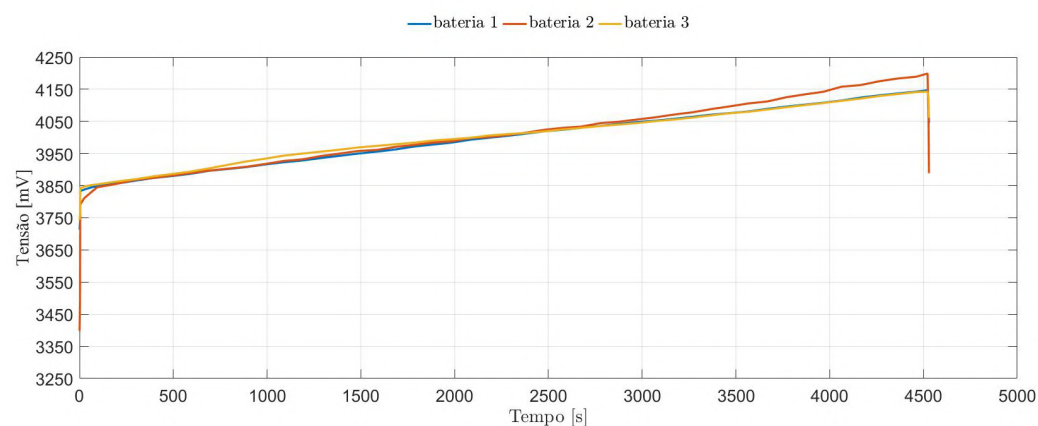
Fonte: O Autor

Verifica-se que a relação entre a corrente transferida e drenada da bateria é menor que quando avaliada para conjunto de baterias nova, resultado claro este da inclusão da bateria desgastada, a qual é diretamente responsável pela limitação do conjunto. A bateria 2 neste caso é a primeira a atingir a tensão máxima, encerrando o ciclo de carregamento, e a primeira a atingir a tensão mínima na descarga. Além destas limitações, a inclusão de uma bateria degradada não

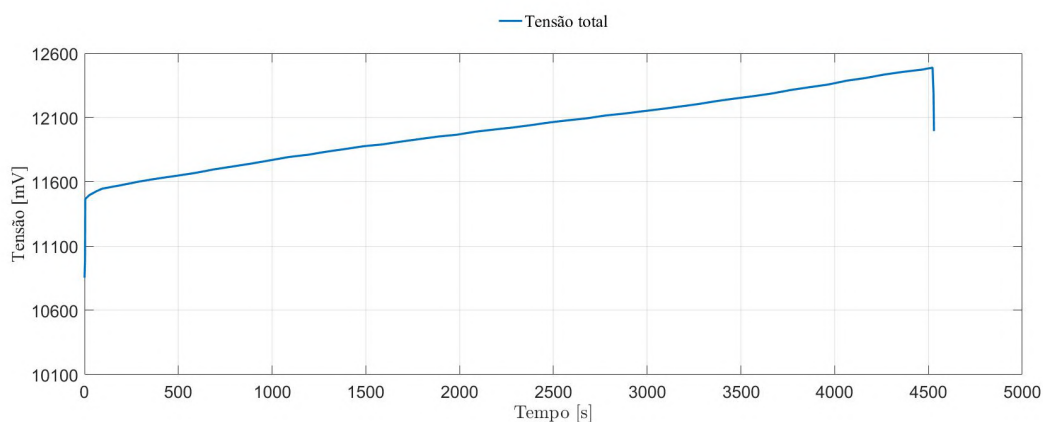
apresenta resultados diretos ao comportamento entre os ciclos, referente às baterias novas, que mostram comportamento similar nos ciclos de carga e descarga, percebendo-se que a maior limitação aqui é relativa à energia armazenada.

Da mesma maneira, foi aplicado o teste Reflex para o conjunto com uma bateria degradada. A tensão durante a carga está apresentada na Figura 83.

Figura 83 – Carregamento do conjunto B de baterias para o método Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Tensão total do conjunto.



(a)

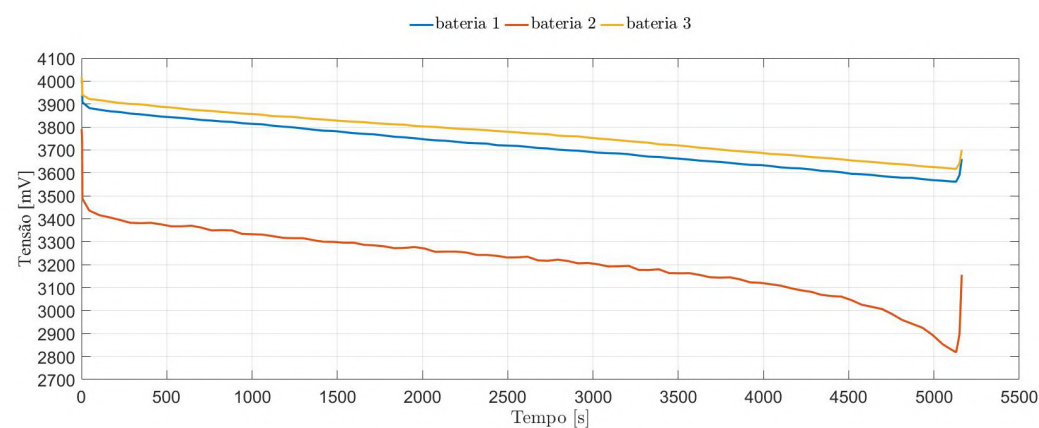


(b)

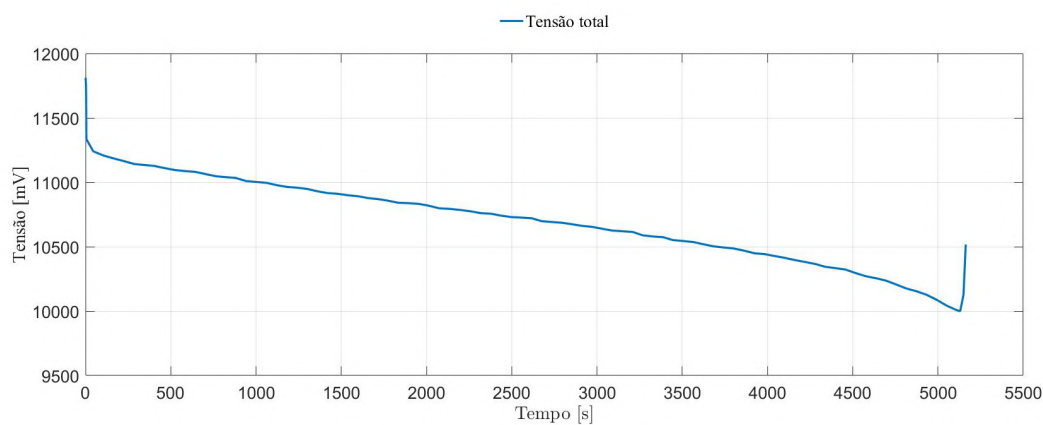
Fonte: O autor

A tensão para a descarga está apresentada na Figura 84 para as baterias de forma individual e para a tensão total do conjunto.

Figura 84 – Descarga do conjunto B de baterias para o método Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual de cada bateria. (b) Tensão total do conjunto.



(a)



(b)

Fonte: O autor

Nestes testes novamente a bateria 2 foi responsável por encerrar o ciclo carga e atingir consequentemente a tensão mínima de descarga bloqueando o fornecimento de energia do conjunto, de forma similar ao que ocorreu nos testes com corrente constante, sendo perceptível aqui as mesmas limitações em função do armazenamento de energia, além de as baterias novas não sofrerem diretamente a curto prazo, efeitos causados pelos ciclos de carga e descarga, ou efeitos de desequilíbrio advindos do uso da bateria degradada. As demais curvas para ambos os métodos de carregamento são apresentadas nos Apêndice D e Apêndice E.

A Tabela 30 e Tabela 31 apresentam os resultados obtidos com o BMS para os testes de carga e descarga.

Tabela 30 – Resultados para o método de carregamento Reflex com o conjunto B de baterias

Teste	Estado	Tensão bateria 1 (mV)	Tensão bateria 2 (mV)	Tensão bateria 3 (mV)	Corrente média (mA)	Tempo total (hh:mm:ss)	Tempe- ratura inicial (°C)	Tempe- ratura final (°C)
1	Inicial	3713	3398	3743	652	1:15:28	26,8	29,5
	Final	4165	4199	4158				
2	Inicial	3689	3359	3716	639	1:24:20	27,4	30,4
	Final	4156	4197	4148				
3	Inicial	3687	3360	3714	642	1:24:07	27,6	31,0
	Final	4152	4197	4142				

Fonte: O Autor

Tabela 31 – Resultados para o método de descarga Reflex com o conjunto B de baterias

Teste	Estado	Tensão bateria 1 (mV)	Tensão bateria 2 (mV)	Tensão bateria 3 (mV)	Corrente média (mA)	Tempo total (hh:mm:ss)	Tempe- ratura inicial (°C)	Tempe- ratura final (°C)
1	Inicial	4003	3791	4018	562	01:26:03	26,5	31,1
	Final	3562	2806	3618				
2	Inicial	4012	3814	4027	564	01:28:04	27,5	30,7
	Final	3563	2805	3615				
3	Inicial	4011	3820	4024	563	01:28:19	27,6	30,7
	Final	3558	2799	3619				

Fonte: O Autor

A análise comparativa para as tensões iniciais e finais para o ciclo de carga e descarga são apresentadas na Figura 85 e Figura 86.

Figura 85 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo com o conjunto B de baterias com o método Reflex: (a) Carga 1. (b) Carga 2. (c) Carga 3.

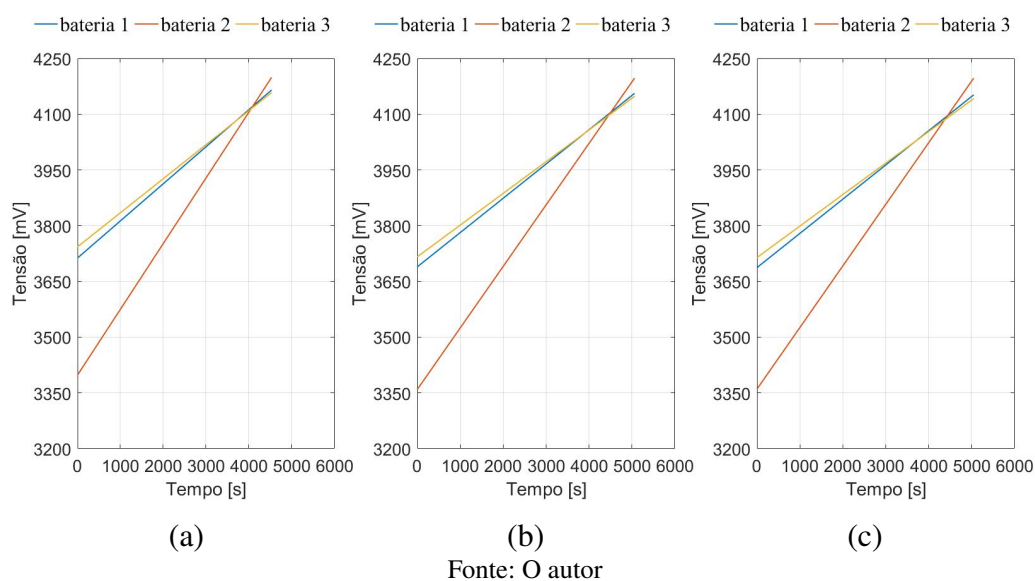
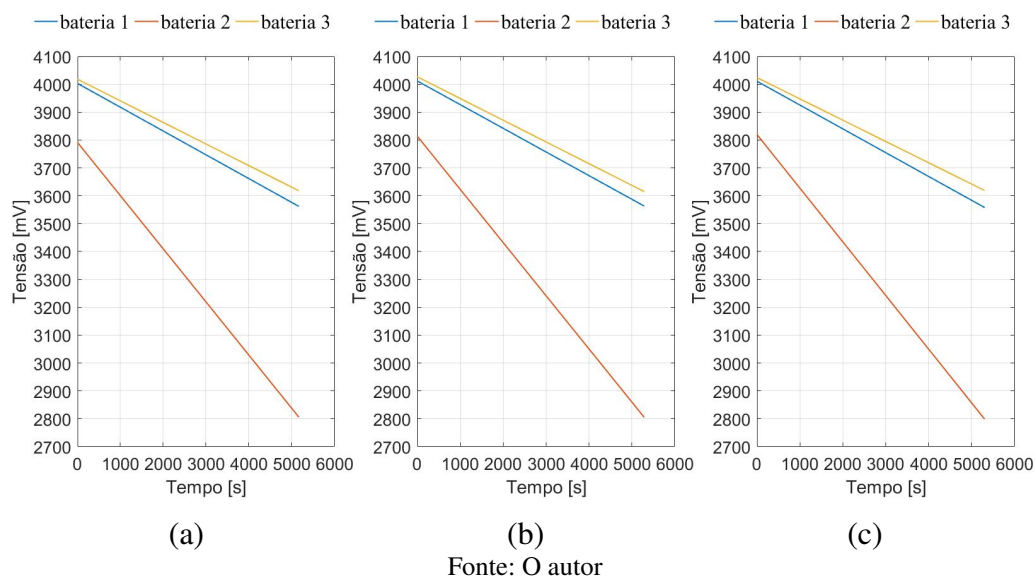


Figura 86 – Análise comparativa das tensões iniciais e finais em função do tempo com o conjunto B de baterias com o método Reflex: (a) Descarga 1. (b) Descarga 2. (c) Descarga 3.



Os resultados para análise para todo conjunto podem ser vistos na Tabela 32.

Tabela 32 – Resultados para o método Reflex com o conjunto de baterias B

Teste	Processo	Tensão total inicial (mV)	Tensão total final (mV)	Tempo total (hh:mm:ss)	Fluxo de energia (mA/h)	Variação de temperatura (C)
1	Carga	10854	12522	01:15:28	820,1	2,8
	Descarga	11812	9986	01:26:03	805,9	3,6
2	Carga	10764	12501	01:24:20	898,1	3,0
	Descarga	11853	9983	01:28:04	827,7	3,2
3	Carga	10761	12491	01:24:07	900,1	3,4
	Descarga	11855	9976	01:28:19	828,7	3,1

Fonte: O Autor

Neste caso a bateria 2 é capaz de limitar o fornecimento de energia do conjunto, verificado que mesmo com a inclusão de um sistema de equalização passivo para a etapa de carregamento, isto ainda não seria suficiente para obter resultados muito melhores, uma vez que as baterias novas embora não atinjam a maior tensão, elas nunca possuem sua energia totalmente drenada em função das limitações causadas pela bateria degradada incluída ao conjunto. Embora a inclusão de uma bateria degradada modifique a dinâmica do sistema, nenhum desequilíbrio foi detectado em função da bateria propriamente dito, concluindo que os efeitos se limitam principalmente a reduzir a quantidade de energia armazenada pelas baterias e limitam posteriormente a quantidade de energia drenada do conjunto.

6.6.6 Avaliação quantitativa da energia remanescente armazenada nas baterias com descarga incompleta

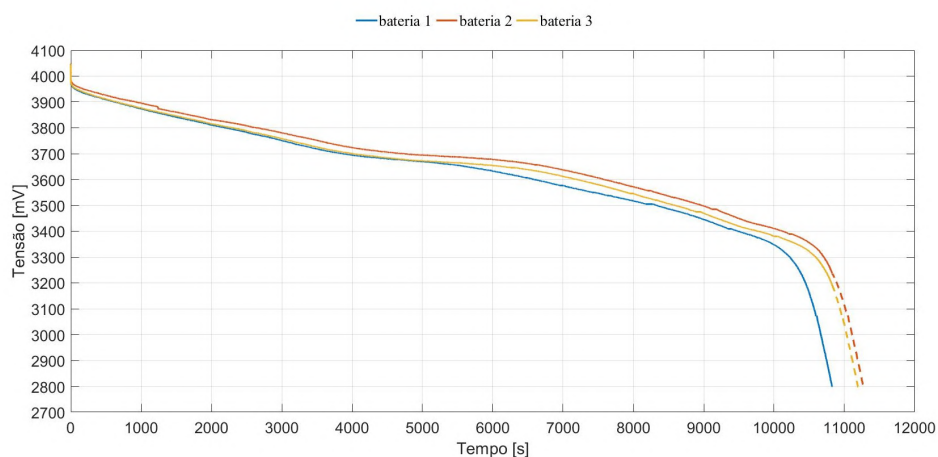
Para os experimentos realizados, se pode perceber que duas das três baterias não possuem sua descarga completa, ou seja, possuem energia remanescente causada pelo encerramento do processo de descarga gerado pela bateria de menor capacidade de armazenamento de energia. Assim, uma aproximação das curvas para os métodos de descarga permite uma melhor visualização das limitações causadas pela bateria de menor capacidade em cada um dos conjuntos.

6.6.6.1 Estimativa da energia remanescente nas baterias durante o processo de descarga para os métodos de carregamento CC, Reflex e CC-CV para o conjunto A

Para ser possível uma melhor visualização das limitações causadas pela bateria de menor energia, uma aproximação para continuidade das curvas foi aplicada à descarga para os métodos de carregamento CC, Reflex e CC-CV. Para isso, utilizando os dados do primeiro ciclo de descarga para cada um dos métodos, uma previsão do comportamento da curva para cada uma das baterias foi aplicada, considerando o comportamento da primeira bateria ao atingir o menor nível de tensão, com o auxílio da ferramenta de *software* Excel®.

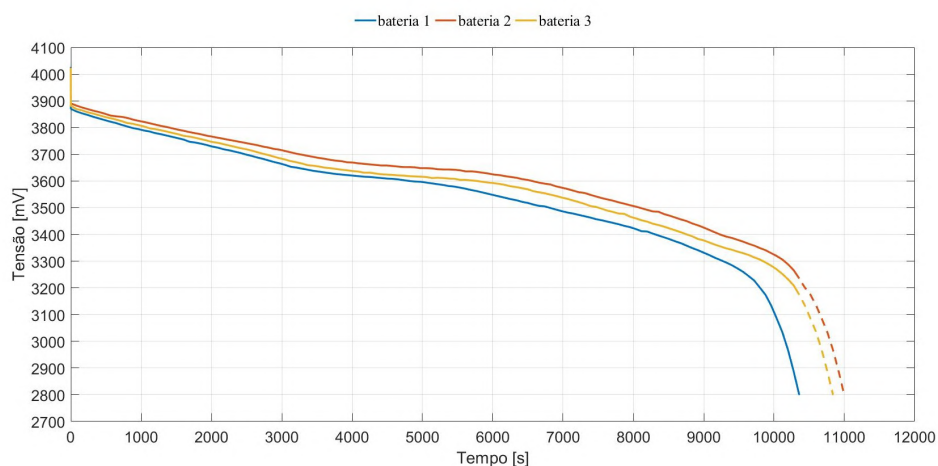
Os resultados podem ser vistos na Figura 87, para o método de descarga CC com a estratégia de carregamento CC, na Figura 88 para o método de descarga Reflex com a estratégia de carregamento Reflex e na Figura 89 com a descarga CC com a estratégia de carregamento CC-CV.

Figura 87 – Aproximação das curvas de descarga para cada bateria até a mínima tensão com o método de descarga CC para o teste de carregamento CC com o conjunto A de baterias.



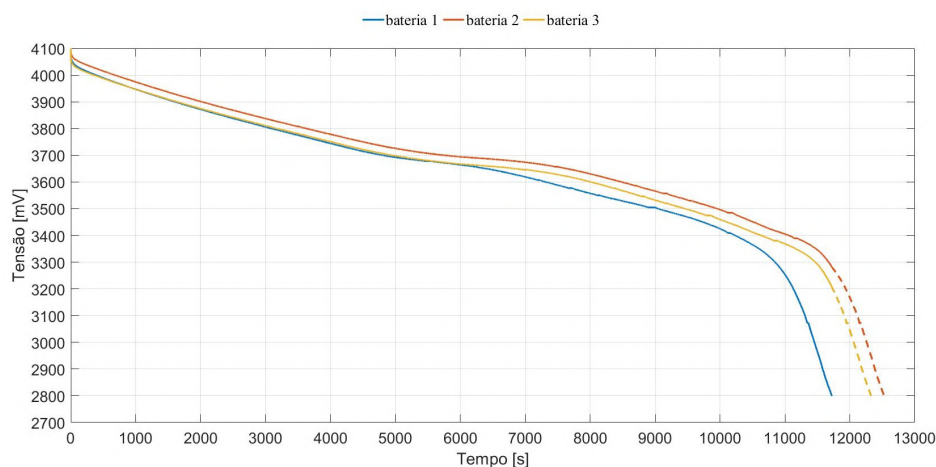
Fonte: O autor

Figura 88 – Aproximação das curvas de descarga para cada bateria até a mínima tensão com o método de descarga Reflex para o teste de carregamento Reflex com o conjunto A de baterias.



Fonte: O autor

Figura 89 – Aproximação das curvas de descarga para cada bateria até a mínima tensão com o método de descarga CC para o teste de carregamento CC-CV com o conjunto A de baterias.



Fonte: O autor

É verificado que, para todos os testes, a bateria 3 seria a próxima a descarregar, enquanto a bateria 2, com mais energia remanescente, seria a última a atingir a tensão mínima.

Como a descarga acontece com um valor constante de corrente, e possuindo os tempos totais, é possível estimar quanta energia as baterias 2 e 3 seriam capazes de fornecer caso a bateria 1 não encerrasse o processo de descarga. Os dados são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 – Resultados para a predição da energia remanescente nas baterias 2 e 3 do conjunto A.

Método de carregamento	Bateria	Tempo até o fim da descarga pela bateria 1 (s)	Energia drenada até o fim da descarga pela bateria 1 (mAh)	Tempo remanescente de descarga (s)	Corrente de descarga considerada (mA)	Energia remanescente (mAh)	Energia remanescente em relação à energia total (%)
CC	2	10824	2019,32	443	668	82	3,09
	3			367	668	68	3,25
Reflex	2	10475	1882,62	638	647	113	5,66
	3			560	647	110	5,52
CC-CV	2	11726	2177,29	805	667	148	6,36
	3			603	667	112	4,89

Fonte: O Autor

Pode-se notar que haveria mais energia a ser retirada para os testes com o método Reflex e CC-CV do que para o método CC para as baterias com energia remanescente. Para a descarga CC aplicada as baterias submetidas ao método de carregamento CC-CV pode se notar que as baterias 2 e 3 foram mais profundamente carregadas, uma vez que se pode estimar uma maior densidade

de energia remanescente em cada uma, apesar de toda energia retirada até o encerramento do ciclo de descarga pela bateria 1.

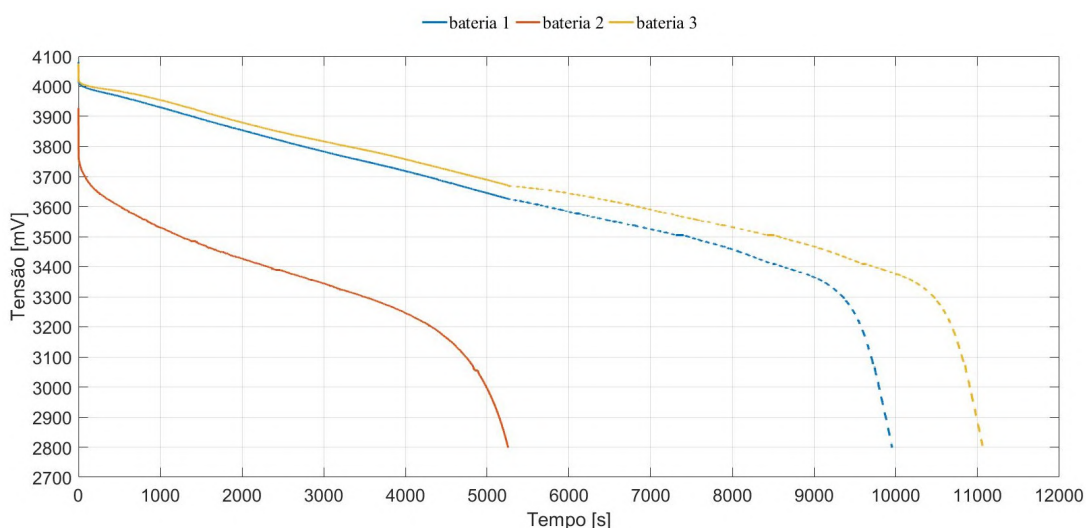
Para estes casos, um sistema de equalização para o processo de carregamento não seria muito eficaz em questão de armazenamento de energia pelas baterias, pois embora as baterias 2 e 3 não atinjam o valor máximo de tensão, elas ainda retem mais energia que a bateria 1, e possuiriam ainda mais energia remanescente durante o fim do período de descarga.

Contudo, também é necessário considerar que as baterias não são elementos ideais, e possuem diferenças construtivas entre os modelos que podem gerar diferenças nas curvas de descargas entre os elementos do conjunto, não sendo possível prever com exatidão toda energia a ser retirada de cada bateria.

6.6.6.2 *Estimativa da energia remanescente nas baterias durante o processo de descarga para os métodos de carregamento CC e Reflex com o conjunto B*

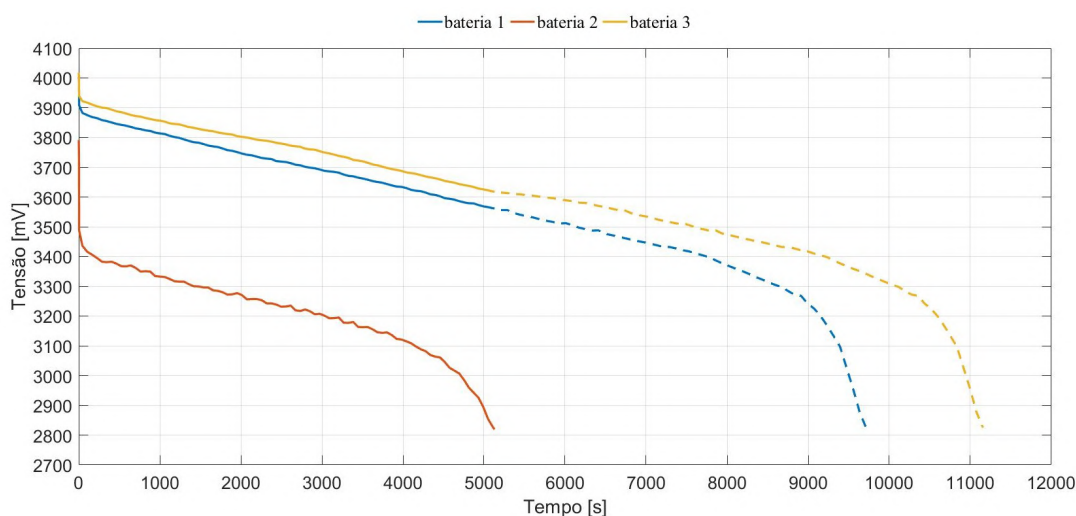
Uma avaliação como feita para o conjunto A é também realizada para o conjunto B. Para este caso, como a bateria 2 apresenta um estado de degradação muito maior que as outras, nota-se que as baterias 2 e 3 possuem uma quantidade maior de energia armazenada. As curvas de tendência feitas com o auxílio do *software* Excel® são apresentadas na Figura 90 para o método de descarga CC, com o método de carregamento CC e na Figura 91 para a descarga Reflex com o método de carregamento Reflex.

Figura 90 – Aproximação das curvas de descarga para cada bateria até a mínima tensão com o método de descarga CC para o teste de carregamento CC com o conjunto B de baterias.



Fonte: O autor

Figura 91 – Aproximação das curvas de descarga para cada bateria até a mínima tensão com o método de descarga Reflex para o teste de carregamento Reflex com o conjunto B de baterias.



Fonte: O autor

É verificado que a bateria 1 seria a próxima a descarregar seguida pela bateria 3. A Tabela 34 apresenta os resultados calculados.

Tabela 34 – Resultados para predição da energia remanescente nas baterias 1 e 3 do conjunto B.

Método de carregamento	Bateria	Tempo até o fim da descarga pela bateria 2 (s)	Energia drenada até o fim da descarga pela bateria 2 (mAh)	Tempo remanescente de descarga (s)	Corrente de descarga considerada (mA)	Energia remanescente (mAh)	Energia remanescente em relação à energia total (%)
CC	1	5163	977,82	4695	668	873	47,16
	3			5807	668	1080	52,50
Reflex	1	5284	805,90	4583	647	827	50,64
	3			5209	647	940	53,84

Fonte: O Autor

A comparação é realizada considerando a aproximação de uma linha de tendência gerada com a bateria 1 do conjunto A para o primeiro ciclo de descarga, assim é verificado que as baterias 1 e 3 possuiriam mais de 47% de sua energia ainda armazenada para o método CC e mais de 50% para o método Reflex até o fim do ciclo de descarga.

Para este caso se percebe também que um sistema de equalização durante o período de carregamento não seria eficaz, e um melhor resultado seria obtido com a aplicação de um sistema de equalização ativo durante o período de descarga da bateria, permitindo que a bateria 2 mais degradada possua menor capacidade de limitar a energia drenada do conjunto.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi verificada a diferença entre os resultados aplicando os métodos de carga e descarga convencional CC e CC-CV, e o método de carga e descarga não convencional Reflex. O projeto e adaptação de um conversor Buck reversível em corrente foi desenvolvido, e um sistema de BMS foi configurado e programado para operar junto ao conversor para aquisição de dados das baterias. Para o estudo realizado com o método Reflex, para frequência estudada de 1Hz, não apresentou grandes melhorias quando comparado ao método CC, uma vez que, mesmo apresentando um tempo reduzido de carregamento, não demonstrou ganhos quando avaliada a relação de energia transferida e retida das baterias durante os processos de carga e descarga. Uma vez que para o método Reflex se aplicaram maiores picos de corrente, picos de tensão mais elevados apareceram nas baterias do conjunto, as quais tiveram seus limites para o encerramento do processo de carga e descarga definidos para a máxima leitura de tensão durante o ciclo de carga e mínima leitura de tensão durante o ciclo de descarga, se pode considerar que maiores valores de corrente influenciam os resultados negativamente, quando comparados ao CC, o qual apresenta o mesmo valor médio, contudo menores picos de tensão, tornando o período de carregamento mais longo, antes que ocorra o bloqueio pelo BMS.

Para os métodos CC e Reflex percebe-se que ambos apresentam limitações na absorção de energia durante o processo de carga, e ao comparar com os resultados obtidos com o método CC-CV se pode dizer que ambos seriam beneficiados pela utilização de um estágio de redução gradual da corrente, que apesar de prologar o tempo total de carregamento permitiria que as baterias absorvessem um maior volume de energia, aproximando-se do estado de carga máximo. Também para os métodos CC e Reflex, caso seja desejada a aplicação de maiores valores médios de corrente durante o carregamento, para que se possa acelerar o processo de carga, haverá algumas limitações referentes a absorção de energia, uma vez que devido à resistência interna da bateria, maiores valores de tensão serão medidos nos terminais da bateria, fazendo com que sua tensão se eleve mais rapidamente, e encerre o processo de carregamento com menos energia armazenada, fato que não influenciaria o método CC-CV devido a sua etapa final com a redução gradual de corrente.

Quando analisado para o conjunto onde é incluída uma bateria degradada, como feito para o conjunto B, não houve uma influência direta do método de carregamento, uma vez que a dinâmica entre os dois métodos se mostrou similar à obtida com as baterias novas. Assim, a aplicação do método Reflex não foi capaz de causar melhorias no desempenho do conjunto, uma vez que não pode causar melhorias diretas no comportamento da bateria mais degradada, responsável por limitar a energia drenada do conjunto. Desta maneira, se pode considerar que os efeitos obtidos são mais característicos do estado de saúde das baterias de lítio, do que influenciados pelo método de carregamento propriamente dito.

Para o estudo referente a equalização, percebe-se que a aplicação desta técnica é de suma importância para qualquer um dos métodos, uma vez que a medida que a primeira bateria alcança

o estado de carga máximo, limita a energia armazenada nas outras baterias, efeito mais evidente com a inclusão de baterias degradadas em um mesmo conjunto. Outro ponto a ser verificado para ambos os métodos de carregamento é que a aplicação do processo de equalização durante o carregamento, não soluciona o problema de que as demais baterias de um conjunto teriam seu fornecimento de energia limitado durante a descarga, em vista que a bateria de menor energia interromperia o processo de descarga, assim a aplicação de um processo de equalização ativa durante a descarga, equilibrando a quantidade de energia entre as baterias, permitiria que a descarga perdurasse por um período maior de tempo, garantindo a maior utilização da energia do conjunto. Isto pode ser mais evidenciado para o conjunto com uma bateria degradada quando visto que as baterias novas poderiam manter o sistema fornecendo energia por mais tempo.

Outro fator a ser considerado é que as baterias, mesmo novas, possuem suas diferenças intrínsecas resultantes de sua fabricação, o que pode acarretar diferenças entre suas resistências internas e diferentes capacidades de armazenamento, fatores imprevisíveis os quais também podem ser beneficiados pelo processo de equalização.

Não são perceptíveis durante os ciclos de carga, efeitos de aumento de desequilíbrio, principalmente para conjuntos onde uma bateria se encontra mais degradada, sem incremento nas diferenças entre as tensões ou modificação das curvas de carga, mantendo uma mesma dinâmica, por todos os ciclos de carregamento avaliados. Define-se então que as baterias mais degradadas tendem a limitar o conjunto, fator o qual tende a se agravar com os ciclos futuros, uma vez que o desgaste natural da bateria é esperado. Assim, é perceptível que para um melhor uso da energia do conjunto é necessário que as baterias possuam estados de saúde semelhantes, o que reduzirá os efeitos de excessiva energia remanescente nas baterias, evitando a subutilização da capacidade das baterias e melhorando o desempenho do conjunto.

Assim, verifica-se que a utilização do método Reflex na frequência de 1 Hz aplicado ao processo de carga e descarga da bateria, embora não trouxe melhorias a curto prazo em relação ao desequilíbrio das baterias, também não afeta negativamente a dinâmica de equilíbrio no conjunto de baterias. Contudo, como este método pode ser aplicado em diferentes frequências, e deve-se considerar que sua operação pode se tornar mais benéfica à bateria quando aplicado a maiores frequências, em pontos de menores impedâncias, onde se é possível obter menores perdas e menor elevação de temperatura na bateria, reduzindo o tempo do processo de carregamento e incrementando sua vida útil.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Com os estudos realizados, é possível definir alguns pontos a serem estudados nos trabalhos futuros.

1. Aplicar testes para outros valores de correntes de pico e diferentes tempos;
2. Desenvolver um novo sistema de monitoramento (BMS) para aumentar a taxa de amostra-

gem para que frequências mais elevadas possam ser aplicadas;

3. Realizar um estudo com a utilização de equipamentos que permitam carga e descarga cíclica, permitindo mais ciclos de carga e descarga nas baterias para verificar o efeito dos métodos de carregamento estudados para toda vida das baterias do conjunto.
4. Realizar a espectroscopia da impedância eletroquímica ou EIS (*Electrochemical Impedance Spectroscopy*), para medir e identificar as frequências com menor impedância na bateria.
5. Realizar os ensaios em uma câmara térmica com temperatura controlada.

REFERÊNCIAS

- AMANOR-BOADU, J.M.; GUISEPPI-ELIE, A.; SANCHEZ-SINENCIO, E. The impact of pulse charging parameters on the life cycle of lithium-ion polymer batteries. **Energies**, v. 11, p. 2162, 08 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/327126734_The_Impact_of_Pulse_Charging_Parameters_on_the_Life_Cycle_of_Lithium-Ion_Polymer_Batteries>. Citado na página 54.
- ARGYROU, Maria C.; CHRISTODOULIDES, Paul; KALOGIROU, Soteris 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. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118304817>>. Citado na página 35.
- AVELAR, V. Martin Z. Battery technology for single phase ups systems: Vrla vs. li-ion. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- BARBI, Ivo. **Modelagem de Conversores CC-CC**. 1a edição. ed. [S.l.]: Casa do Código, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 81, 82, 83 e 84.
- BONO-NUEZ, Antonio et al. Recipient size estimation for induction heating home appliances based on artificial neural networks. **Neural Computing and Applications**, v. 28, 11 2017. Citado na página 76.
- CAMAS, Mónica Nafate et al. Modeling and simulation of a commercial lithium-ion battery with charge cycle predictions. **Sustainability**, v. 14, n. 21, 2022. ISSN 2071-1050. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/14/21/14035>>. Citado na página 36.
- CHEN, Liang-Rui et al. Sinusoidal-ripple-current charging strategy and optimal charging frequency study for li-ion batteries. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 60, n. 1, p. 88–97, 2013. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6140959>>. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.
- CHEN, Xiaopeng et al. An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles. In: **2012 10th International Power Energy Conference (IPEC)**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 230–235. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34 e 36.
- CHOI, Woosung et al. Modeling and applications of electrochemical impedance spectroscopy (eis) for lithium-ion batteries. **Journal of Electrochemical Science and Technology**, v. 11, p. 1–13, 03 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/340310645_Modeling_and_Applications_of_Electrochemical_Impedance_Spectroscopy_EIS_for_Lithium-ion_Batteries>. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 41.
- COLLIN, Ryan et al. Advanced electric vehicle fast-charging technologies. **Energies**, v. 12, n. 10, 2019. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/10/1839>>. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 53.
- EVANS, Annette; STREZOV, Vladimir; EVANS, Tim J. Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 4141–4147, 2012. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112002316>>. Citado na página 31.

FANG, Huazhen; DEPCIK, Christopher; LVOVICH, Vadim. Optimal pulse-modulated lithium-ion battery charging: Algorithms and simulation. **Journal of Energy Storage**, v. 15, p. 359–367, 2018. ISSN 2352-152X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X17303006>>. Citado 3 vezes nas páginas 56, 57 e 58.

FILHO, Tone T. **“Influência da Qualidade do Pó de Zinco na Geração de Hidrogênio em Pilhas Alcalinas**. Dissertação (Mestrado) — UFMG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 2007. Citado na página 31.

FREEDOM. Manual técnico bateria estacionária. 2008. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/media/pdf/manuais/Freedom_Baterias_Estacionarias_manual_tecnico_pt.pdf>. Citado na página 34.

HANNAN, M. A. et al. State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: Issues and recommendations. **IEEE Access**, v. 6, p. 19362–19378, 03 2018. Citado na página 32.

HEERDT, Joselito Anástacio. **Carga Regenerativa Trifásica**. Tese (Doutorado), 2013. Citado 6 vezes nas páginas 76, 77, 78, 79, 80 e 96.

HOSSAIN, Eklas et al. A comprehensive review on second-life batteries: Current state, manufacturing considerations, applications, impacts, barriers potential solutions, business strategies, and policies. **IEEE Access**, v. 07, p. 73215–73252, 05 2019. Citado na página 33.

HUANG, Xinrong et al. A review of pulsed current technique for lithium-ion batteries. **Energies**, v. 13, n. 10, 2020. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/10/2458>>. Citado 5 vezes nas páginas 52, 54, 55, 60 e 61.

HUANG, Xinrong et al. Effect of pulsed current on charging performance of lithium-ion batteries. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 69, n. 10, p. 10144–10153, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 61.

IJUI, FELIPE. **Configuração de controlador digital de sinais aplicado a conversores chaveados utilizando a ferramenta PSIM/SIMCODER**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Universidade do Estado de Santa Catarina, 2014. Citado na página 89.

JAMPEETHONG, Phoompat; KHOMFOI, Surin. An ev quick charging station using a pulse frequency current control technique. In: . [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–5. Citado na página 49.

Ji, Dengyue et al. Research on adaptability of charging strategy for electric vehicle power battery. **Journal of Power Sources**, v. 437, p. 226911, 10 2019. Citado na página 61.

KIM, Dae Kyeong et al. Handbook on battery energy storage system. **Asian Development Bank: Manila, Philippines**, 2018. Citado na página 37.

KOMABA, Shinichi et al. Fluorinated ethylene carbonate as electrolyte additive for rechargeable na batteries. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 3, n. 11, p. 4165–4168, 2011. PMID: 22026720. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/am200973k>>. Citado na página 35.

KRIVÍK, Petr et al. Determination of state of charge of lead-acid battery by eis. **Journal of Energy Storage**, v. 21, p. 581–585, 2019. ISSN 2352-152X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X18304079>>. Citado na página 51.

LEM. **Current Transducer LTSP 25-P**. [s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/ltsp_25-np.pdf>. Citado na página 79.

Li, Jun et al. The effects of pulse charging on cycling characteristics of commercial lithium-ion batteries. **Journal of Power Sources**, v. 102, n. 1, p. 302–309, jan. 2001. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2001JPS...102..302L>>. Citado na página 61.

LI, Rong et al. The challenges and perspectives of developing solid-state electrolytes for rechargeable multivalent battery. **Journal of Solid State Electrochemistry**, v. 27, p. 1–37, 02 2023. Citado na página 39.

LORENCETTI, E. **SISTEMA DE GERENCIAMENTO ATIVO DE EQUALIZAÇÃO DE ENERGIA EM BANCO DE BATERIAS USANDO CONVERSOR CC-CC BIDIRECIONAL MODULAR**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Estado de Santa Catarina, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 62, 63, 64 e 65.

LYU, Peizhao et al. Investigation on the thermal behavior of ni-rich nmc lithium ion battery for energy storage. **Applied Thermal Engineering**, v. 166, p. 114749, 2020. ISSN 1359-4311. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431119337111>>. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.

MAGMATEC. Núcleo sendust. s.d. Disponível em: <https://www.magmattec.com.br/wp-content/uploads/2019/09/SENDUST_01.pdf>. Citado na página 183.

MAYER, Robson. **Conversor CC-CC Bidirecional Buck + Boost Multifásico Não Isolado Aplicado ao Sistema Elétrico de Tração de Veículos Elétricos e Híbridos Leves**. Dissertação (Mestrado) — UDESC - Universidade do Estado de Santa Catarina, 02 2014. Citado 6 vezes nas páginas 63, 66, 67, 68, 69 e 72.

MEI, J.; CHENG, Eric K. W.; FONG, Y. C. Lithium-titanate battery (lto): A better choice for high current equipment. In: **2016 International Symposium on Electrical Engineering (ISEE)**. [s.n.], 2016. p. 1–4. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7846362>>. Citado na página 38.

MICHELINI, A. Baterías recarregáveis para equipamentos portáteis. **STA–Sistemas e Tecnologia Aplicada Ind. Com. LTDA**, 2017. Citado 7 vezes nas páginas 33, 34, 35, 36, 37, 38 e 43.

OENING, Thayna. **LITHIUM-ION BATTERY TESTS USING A DESIGNED BMS**. Dissertação (Mestrado) — UDESC - Universidade do Estado de Santa Catarina, 2022. Citado 5 vezes nas páginas 89, 90, 91, 94 e 102.

OMAR, Noshin et al. Evaluation of performance characteristics of various lithium-ion batteries for use in bev application. In: **2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference**. [s.n.], 2010. p. 1–6. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5729083>>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

PALACÍN, M. Rosa. Understanding ageing in li-ion batteries: a chemical issue. **Chemical Society reviews**, v. 47 13, p. 4924–4933, 2018. Citado na página 45.

PURUSHOTHAMAN, B. K.; MORRISON, P. W.; LANDAU, U. Reducing mass-transport limitations by application of special pulsed current modes. *The Electrochemical Society*, v. 152,

n. 4, p. J33, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1149/1.1861172>>. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 56.

SABOO, Krishna; MANGSULE, Rucha; DESHPANDE, Amruta. State of charge (soc) estimation of li-ion battery. In: . [s.n.], 2021. p. 340–345. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/350927278_State_of_Charge_SOC_Estimation_of_Li-Ion_Battery>. Citado na página 43.

SAMOLYK, M.; SOBCZAK, Jakub. Development of an algorithm for estimating lead-acid battery state of charge and state of health. In: . [s.n.], 2013. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Development-of-an-algorithm-for-estimating-Battery-Samolyk-Sobczak/12e4ea6d0132f83d543b26e2b6aeaaaf219147b>>. Citado na página 43.

SAWICKI, Monica; LEON, Shaw. Cheminform abstract: Advances and challenges of sodium ion batteries as post lithium ion batteries. **RSC Adv.**, v. 5, 06 2015. Citado na página 35.

SCHIMITT, R. **Estudo e implementação por método de carga por corrente pulsada para baterias de fontes ininterruptas de energia**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Estado de Santa Catarina, 2021. Citado 7 vezes nas páginas 29, 43, 52, 53, 65, 99 e 110.

SERHAN, Hany A.; AHMED, Emad M. Effect of the different charging techniques on battery life-time: Review. In: **2018 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)**. [s.n.], 2018. p. 421–426. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8316661>>. Citado na página 53.

SERÔDIO, P. **Desenvolvimento de um conversor CC/CC bidirecional interleaved para testes de batteries de Lítio Ferro Fosfato LiFePO₄**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Minho, 2018. Citado na página 54.

SHAH, Rajesh; MITTAL, Vikram; PRECILLA, Angelina Mae. Challenges and advancements in all-solid-state battery technology for electric vehicles. **J**, v. 7, n. 3, p. 204–217, 2024. ISSN 2571-8800. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2571-8800/7/3/12>>. Citado na página 39.

SPITTHOFF, Lena; SHEARING, Paul R.; BURHEIM, Odne Stokke. Temperature, ageing and thermal management of lithium-ion batteries. **Energies**, v. 14, n. 5, 2021. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/5/1248>>. Citado na página 43.

STEVANATTO, L.; BRUSAMARELLO, Valner; TAIROV, Stanislav. Analysis of the propagated uncertainty in a identification algorithm applied to a lead-acid battery. **2012 IEEE I2MTC - International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Proceedings**, 05 2012. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 42.

SUN, Bingxiang et al. Modeling study for li-ion batteries considering high-frequency inductance characteristics based on electrochemical impedance spectroscopy. **DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Science**, 2019. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Modeling-Study-for-Li-ion-Batteries-Considering-on-Sun-Bian/32a81f8a92156b26f1be1ee002881d001c0afa97>>. Citado na página 41.

TAVARES, G. **SISTEMA KERS DE RECUPERAÇÃO DA ENERGIA CINÉTICA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS EM ULTRACAPACITORES E BANCO DE BATERIAS COM GERENCIAMENTO DE CARGA**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Estado de Santa Catarina, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 33.

TRAN, Manh-Kien et al. Comparative study of equivalent circuit models performance in four common lithium-ion batteries: Lfp, nmc, lmo, nca. **Batteries**, v. 7, p. 51, 07 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/353499592_Comparative_Study_of_Equivalent_Circuit_Models_Performance_in_Four_Common_Lithium-Ion_Batteries_LFP_NMC_LMO_NCA>. Citado na página 37.

TREDEAU, F.P.; KIM, B.G.; SALAMEH, Z.M. Performance evaluation of lithium cobalt cells and the suitability for use in electric vehicles. In: . [s.n.], 2008. p. 1 – 5. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/224350190_Performance_evaluation_of_Lithium_Cobalt_cells_and_the_suitability_for_use_in_electric_vehicles>. Citado na página 36.

VERTIV. The advantages of using lithium-ion batteries as a backup power source in single-phase ups applications for remote and edge data centers. 2023. Disponível em: <<https://www.vertiv.com/globalassets/products/critical-power/uninterruptible-power-supplies-ups/advantages-of-using-lithium-ions-batteries-sl-70595.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

VIGNAROOBAN, K. et al. State of health determination of sealed lead acid batteries under various operating conditions. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 18, p. 134–139, 2016. ISSN 2213-1388. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221313881630131X>>. Citado na página 50.

WANG, Jiayuan; SUN, Zechang; WEI, Xuezhe. Performance and characteristic research in lifepo4 battery for electric vehicle applications. In: **2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference**. [s.n.], 2009. p. 1657–1661. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5289664>>. Citado na página 37.

WESTERHOFF, Uwe et al. Analysis of lithium-ion battery models based on electrochemical impedance spectroscopy. **Energy Technology**, v. 4, n. 12, p. 1620–1630, 2016. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ente.201600154>>. Citado 4 vezes nas páginas 45, 46, 47 e 48.

YIN, Meng Di et al. Dynamic frequency and duty cycle control method for fast pulse-charging of lithium battery based on polarization curve. In: **2015 Ninth International Conference on Frontier of Computer Science and Technology**. [s.n.], 2015. p. 40–45. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7314647>>. Citado na página 54.

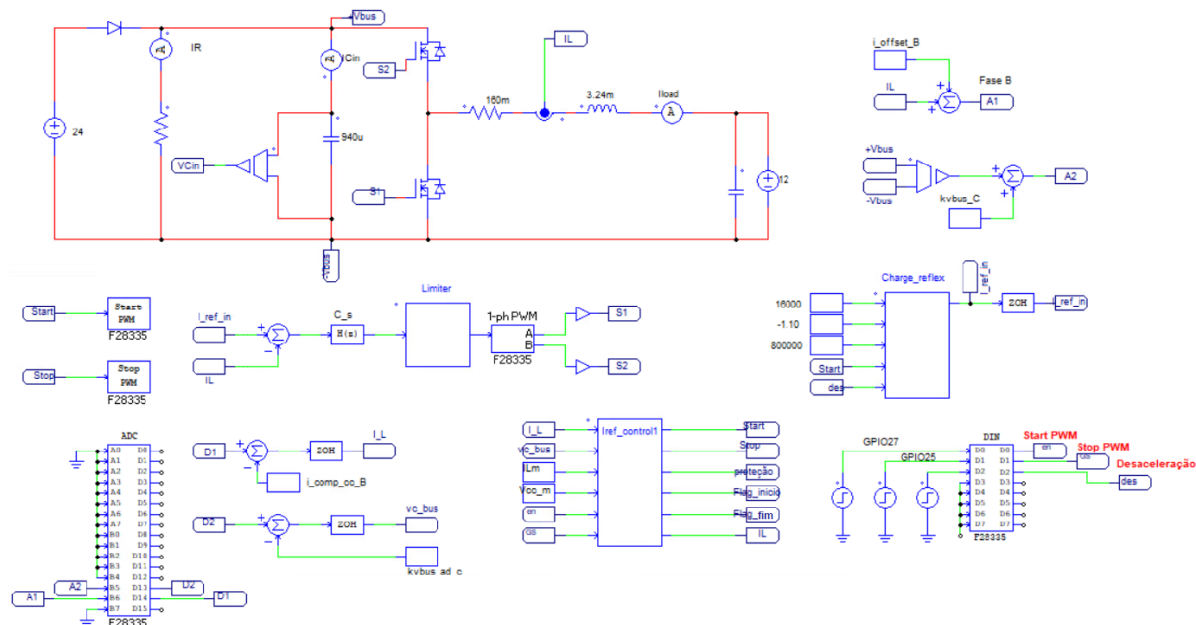
ZIA, Muhammad Fahad; ELBOUCHIKHI, Elhoussin; BENBOUZID, Mohamed. Optimal operational planning of scalable dc microgrid with demand response, islanding, and battery degradation cost considerations. **Applied Energy**, v. 237, p. 697–707, 03 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/340310645_Modeling_and_Applications_of_Electrochemical_Impedance_Spectroscopy_EIS_for_Lithium-ion_Batteries>. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 49.

APÊNDICES

APÊNDICE A – DIAGRAMA DE BLOCOS PARA O PROJETO DO CÓDIGO COM O SOFTWARE PSIM®

Para o desenvolvimento do código compilado no microcontrolador TMS320F28335 se utilizou a ferramenta de geração automática do *software* PSIM®. A Figura 92 apresenta o circuito completo.

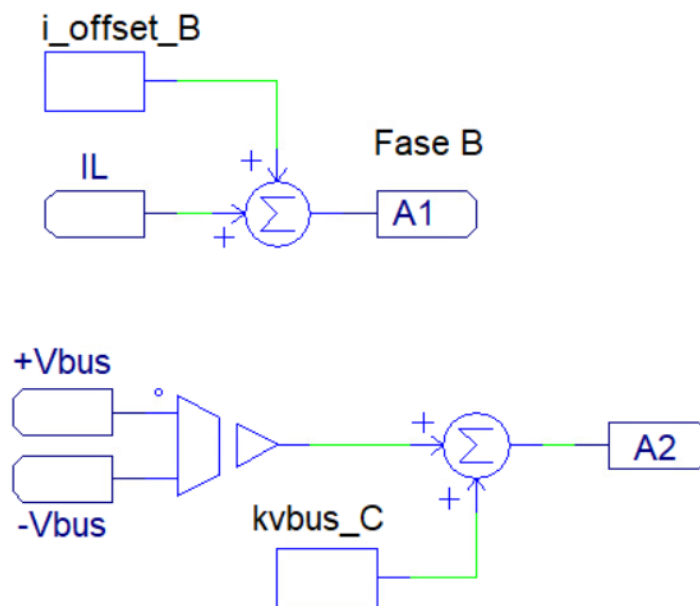
Figura 92 – Circuito completo com os blocos utilizados para geração do código com o *software* PSIM®.



Fonte: O autor

Os blocos apresentados na Figura 93 são utilizados para leitura dos dados da corrente no indutor lida pelo sensor *hall* e a tensão no barramento de entrada do conversor.

Figura 93 – Circuito com os blocos utilizados para leitura da corrente no indutor vinda do sensor *hall* e da tensão no barramento.

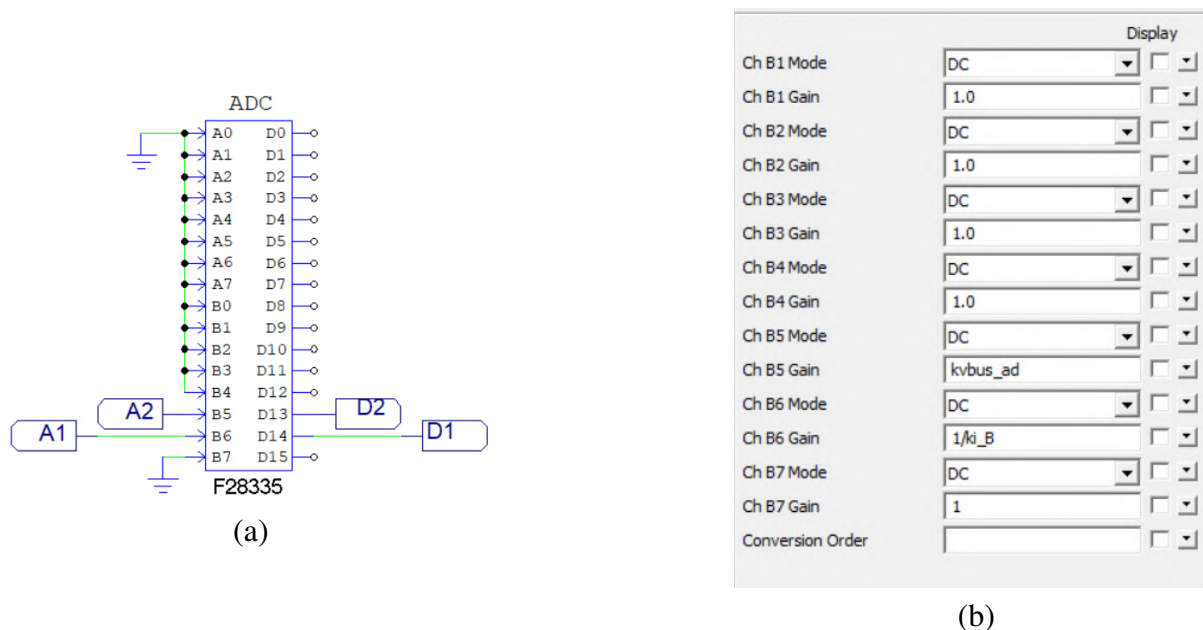


Fonte: O autor

O valor recebido do sensor de corrente é utilizado juntamente com um circuito somador, o qual o valor do bloco somado representa o *offset* do circuito de condicionamento para permitir correntes negativas. Para a tensão do barramento, é utilizado um amplificador operacional que apresenta os ganhos dos circuitos de condicionamento seguidos por um bloco onde é somado o valor do *offset* gerado pelo circuito de condicionamento de tensão.

Os valores são lidos pelo bloco do conversor A/D, que realiza a compensação dos ganhos dos circuitos de condicionamento e sensores. O bloco é apresentado na Figura 94, onde o item (a) apresenta o bloco do conversor A/D e o item (b) a janela de configuração. Aqui, o ganho $kvbus_{ad}$ e ki são configurados de maneira a compensar os ganhos dos circuitos de condicionamento previamente utilizados devido aos limites impostos pelo máximo valor suportado pelo conversor A/D ser apenas 3,3V.

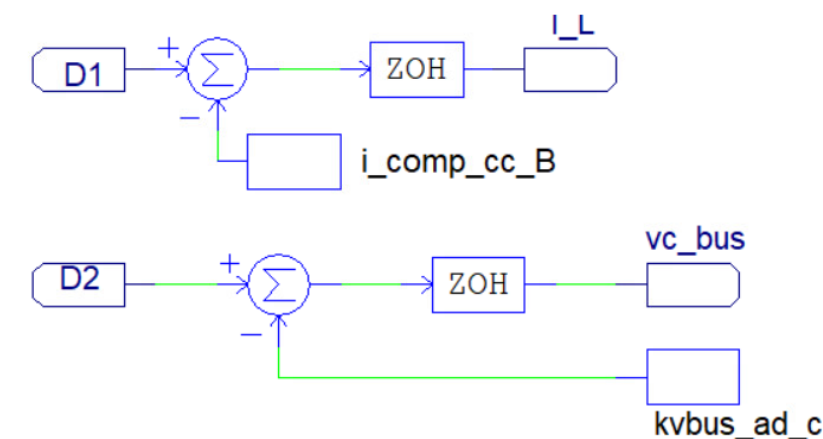
Figura 94 – Bloco utilizado para configurar o conversor A/D: (a) Bloco do conversor A/D. (b) Janela de configuração do conversor A/D.



Fonte: O autor

Os blocos do circuito seguinte na Figura 95 realizam a compensação do *offset* gerado pelo circuito de condicionamento após a leitura pelo conversor A/D. Estas compensações permitem que o *software* trabalhe com os valores reais das correntes e tensões.

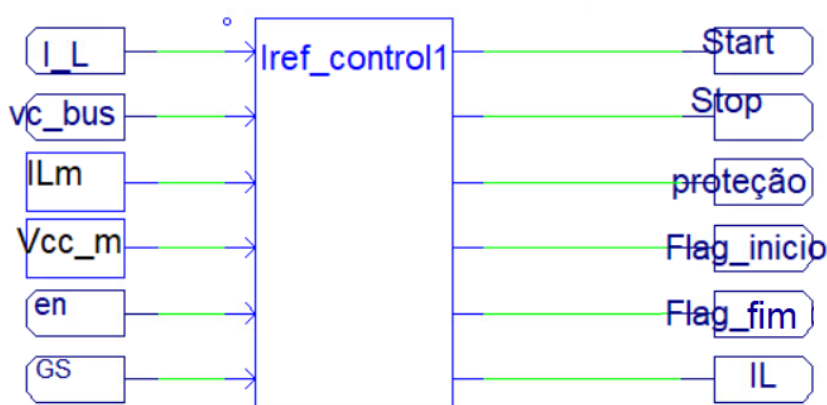
Figura 95 – Blocos para compensação do *offset* dos circuitos de condicionamento após a leitura do conversor A/D.



Fonte: O autor

O valor da corrente e tensão são lidos pelo bloco apresentado na Figura 96, este faz uma média móvel de 3 pontos para leitura da corrente e também possui os valores máximos para a tensão no barramento e corrente no indutor. Caso alguns destes valores sejam ultrapassados, o código seta a variável stop para o nível lógico alto, a qual aciona o bloco Stop PWM e encerra o chaveamento do conversor. O bloco possui em sua saída algumas *flags*, utilizadas para poderem ser verificadas na interface do *software* Code Composer Studio® o acionamento do início do PWM e o acionamento das proteções.

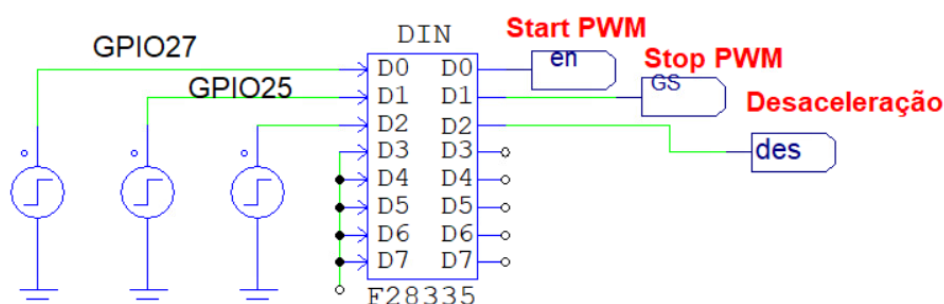
Figura 96 – Bloco com código C para definição dos limites de proteção de máxima tensão do barramento e corrente no indutor.



Fonte: O autor

Este bloco também recebe a entrada de dois sinais vindos das entradas digitais, *en* e *Gs*, vistos na Figura 97 os quais, caso sejam lidos com nível lógico alto, setam as saídas *Stop* e *Start*, para nível alto, acionando os blocos de Start PWM e Stop PWM respectivamente.

Figura 97 – Circuito com o bloco de leitura das entradas digitais.



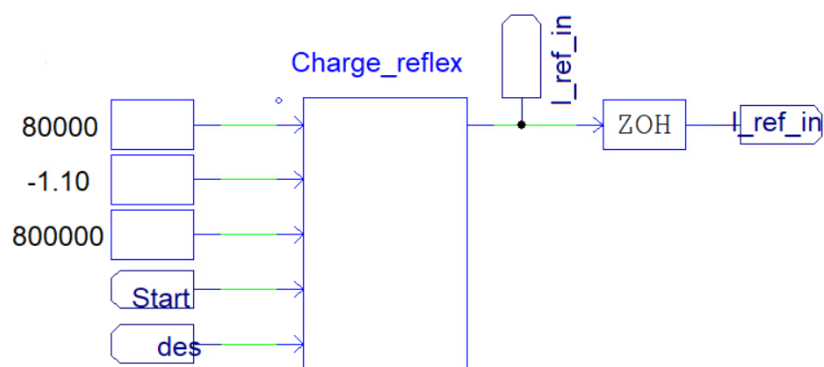
Fonte: O autor

Foram incluídos 3 botões, um para o início do PWM, um para encerrar o PWM e um para a rampa de desaceleração da corrente, evitando uma parada brusca com o encerramento do PWM.

O bloco responsável por gerar a corrente de referência é apresentado na Figura 98. O circuito possui 5 variáveis de entrada, o valor de 80000 é utilizado para configurar o tempo de 1

segundo para o sinal, enquanto o valor de 800000 é utilizado para aplicação de um período de rampa durante o início da condução. O valor de 1,10 representa a amplitude da corrente a ser utilizada para o sinal. Quando a variável *Start* recebe nível lógico alto, uma rampa de aceleração se inicia, até que esta atinja o valor pré-definido. O valor da corrente se apresenta negativo devido a adaptações necessárias para utilização do conversor T-NPC.

Figura 98 – Circuito com o bloco de código C utilizado para gerar a referência de corrente.



Fonte: O autor

O código utilizado internamente ao bloco é apresentado na Figura 99.

Figura 99 – Código do bloco para gerar a referência de corrente.

Following variables are valid: t, delt
 Input x1, x2, x3, x4, x5
 Output y1

```

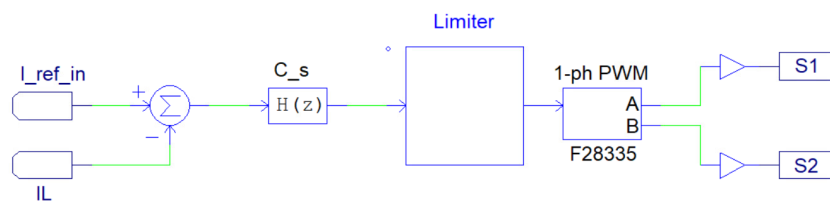
1 static double cont=0; // Variaveis para rampa de aceleração
2 static double k=0;
3 static double cont2=0;
4 static double time=0;
5
6 if(x4==1){ // Rampa de aceleração
7
8 if(cont2>x1){
9 cont2=0;
10 }
11 time=(cont2/x1)*3;
12 k=(x2/x3)*(cont); // Variavel da amplitude da do sinal
13
14 // Sinal para referência com o modo Reflex
15 if(time>=0 && time<=0.10){
16 y1=(k)*(time/0.10);}
17 if(time>0.10 && time<=2.20){
18 y1=(k);}
19 if(time>2.20 && time<=2.25){
20 y1=k+(2*((-k)*((time-2.20)/(0.05)))));}
21 if(time>2.25 && time<=2.65){
22 y1=(-k*1);}
23 if(time>2.65 && time<=2.70){
24 y1=(-k*1)+((k*1)*((time-2.65)/(0.05)))));}
25
26 if(time>2.70 && time<=3){
27 y1=(0);
28 }
29
30 if(x5==0){
31 if (cont<x3){
32 cont++;} // incremeto da variavel da rampa
33
34 if(cont==x3){
35 cont=cont;}}
36
37 if(x5!=0){
38 if (cont>0){
39 cont--;} // incremeto da variavel da rampa
40
41 if(cont==0){
42 cont=cont;}}
43 cont2++; } // Variave para reiniciar o ciclo do sinal de referência Reflex

```

Fonte: O autor

O sinal de referência é comparado ao sinal recebido pelo conversor A/D, o qual passa pelo bloco de controle e em seguida por um bloco com um código para limitar a razão cíclica do PWM em no máximo em 95%, evitando um curto de braço entre as chaves. Este valor é aplicado a um bloco de PWM complementar, o qual aciona as chaves do conversor. A Figura 100 apresenta este circuito.

Figura 100 – Circuito com o bloco de controle discretizado no espaço de estados e o bloco para o PWM complementar das chaves.

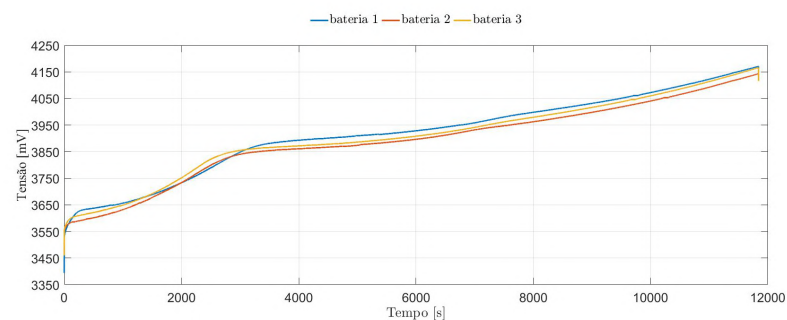


Fonte: O autor

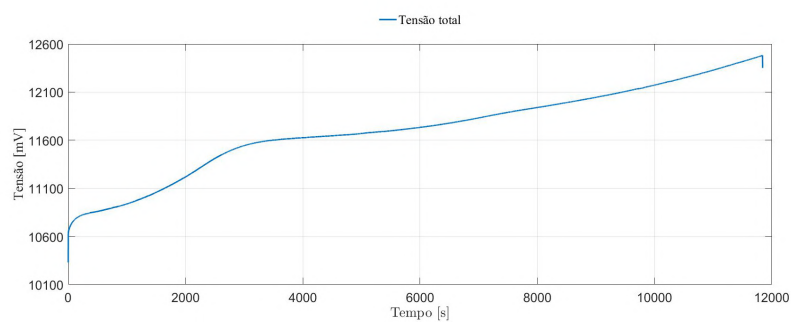
O projeto é feito de maneira que todos os valores utilizados no controlador devem ser discretizados no espaço de estados.

APÊNDICE B – FORMAS DE ONDA PARA O MÉTODO DE CARGA E DESCARGA CC COM AS BATERIAS NOVAS DO CONJUNTO A.

Figura 101 – Primeiro ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



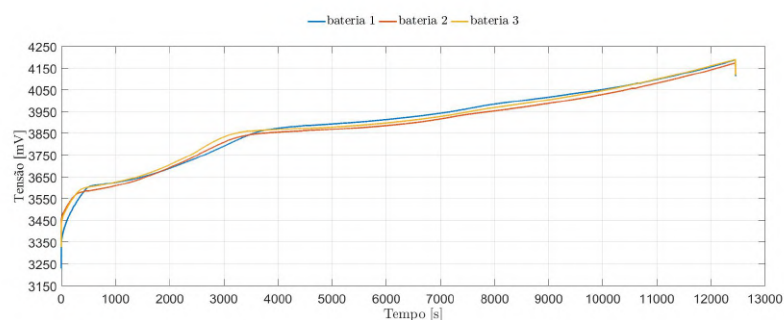
(a)



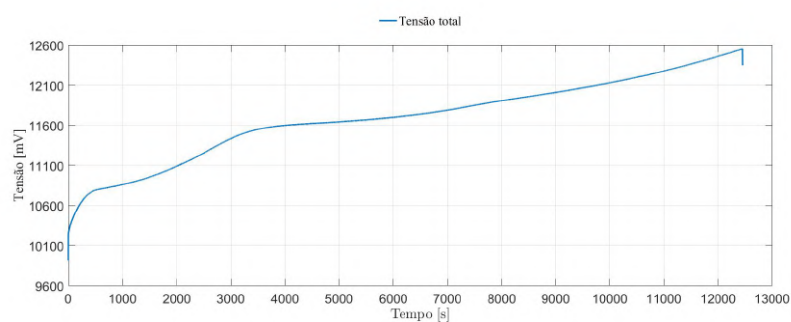
(b)

Fonte: O autor

Figura 102 – Segundo ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



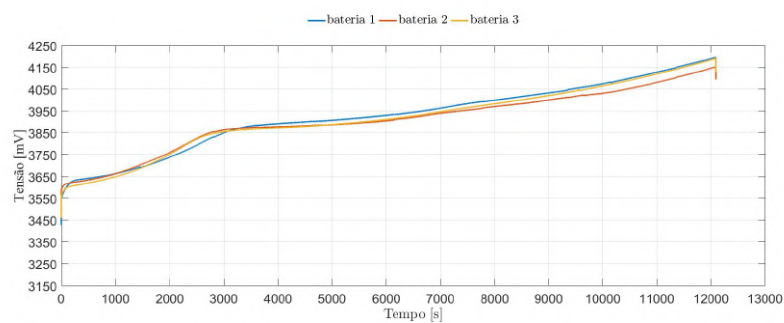
(a)



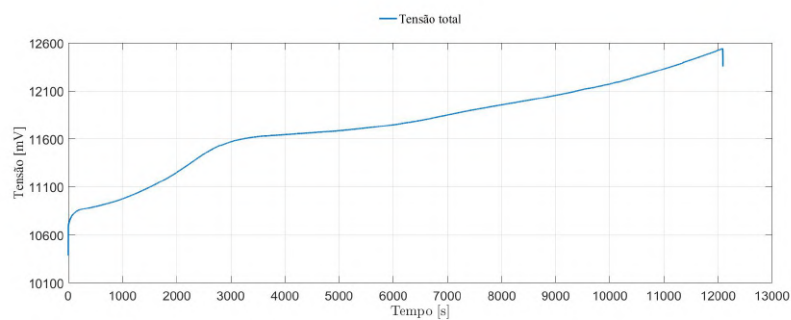
(b)

Fonte: O autor

Figura 103 – Terceiro ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



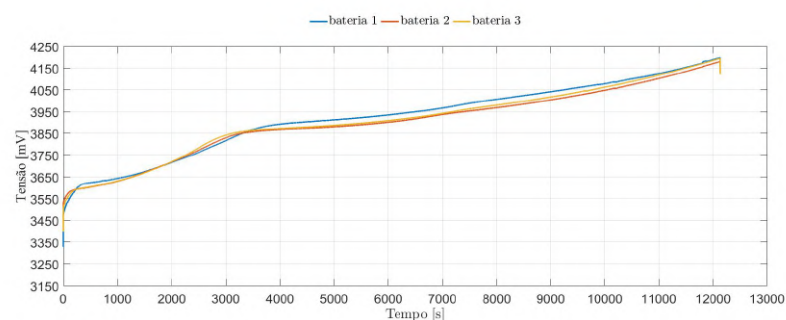
(a)



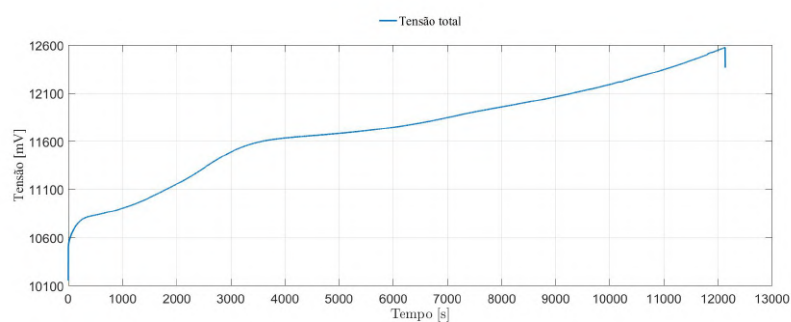
(b)

Fonte: O autor

Figura 104 – Quarto ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



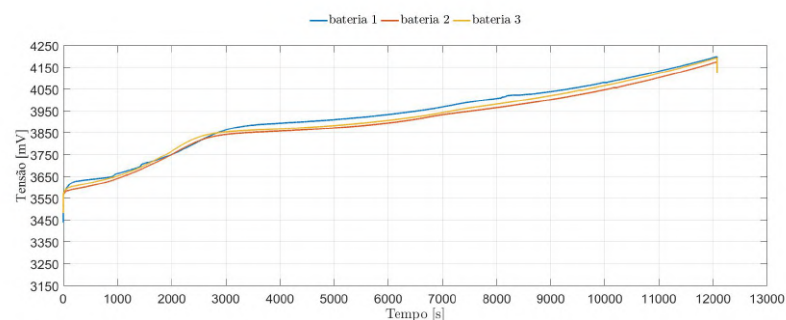
(a)



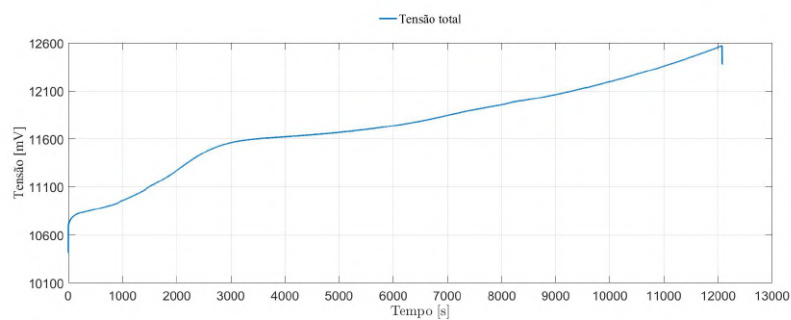
(b)

Fonte: O autor

Figura 105 – Quinto ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



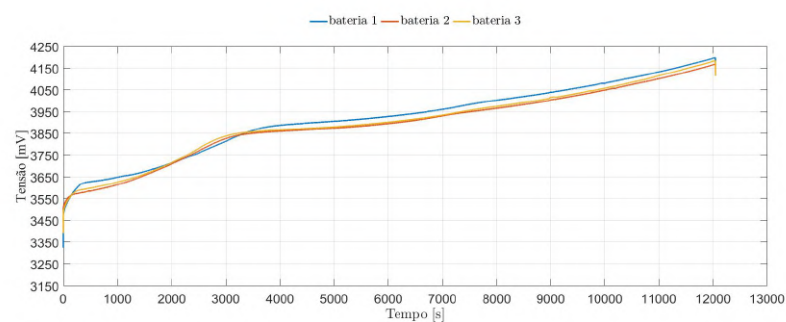
(a)



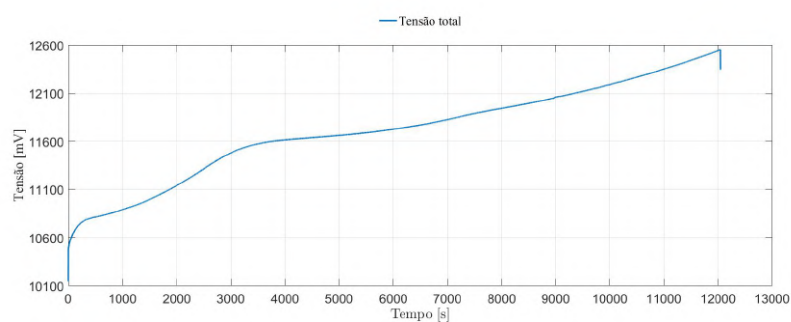
(b)

Fonte: O autor

Figura 106 – Sexto ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



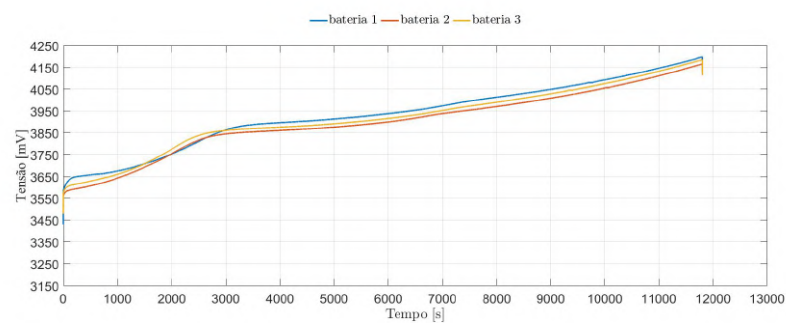
(a)



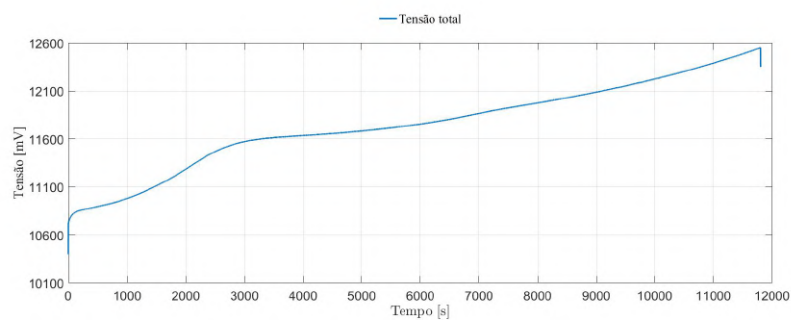
(b)

Fonte: O autor

Figura 107 – Sétimo ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



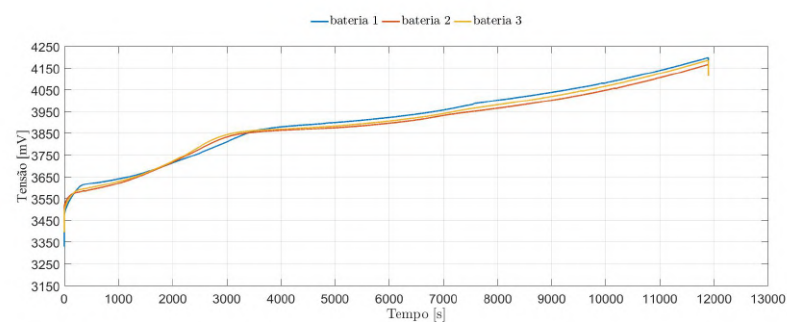
(a)



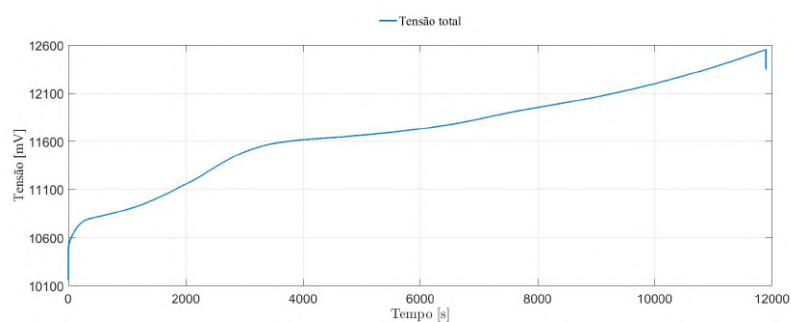
(b)

Fonte: O autor

Figura 108 – Oitavo ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



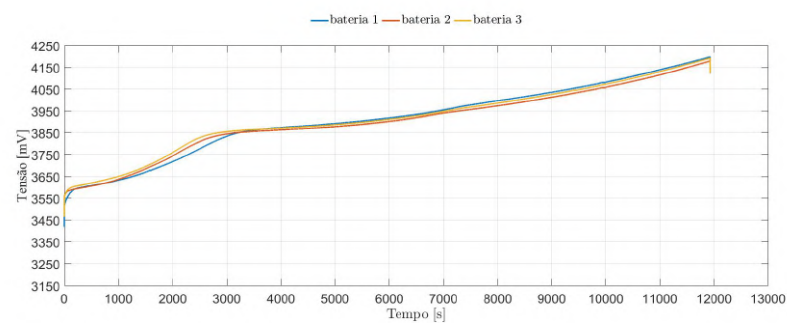
(a)



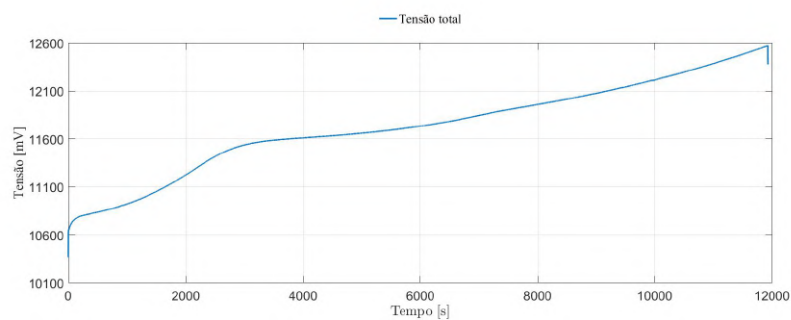
(b)

Fonte: O autor

Figura 109 – Nono ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



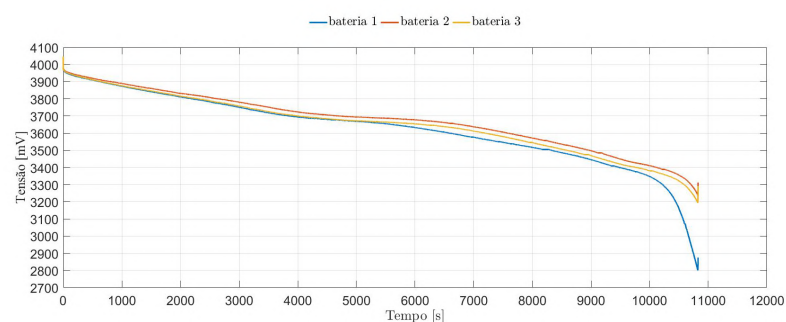
(a)



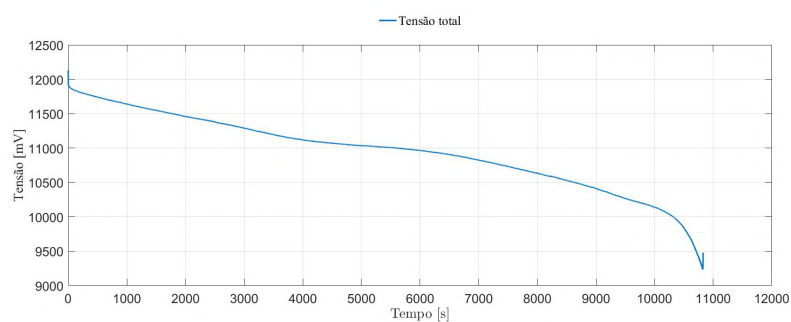
(b)

Fonte: O autor

Figura 110 – Primeiro ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



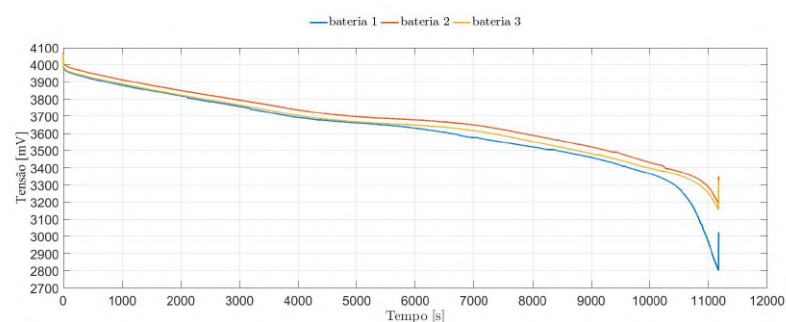
(a)



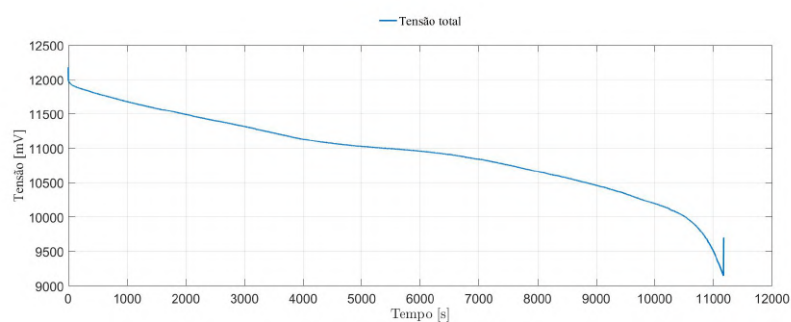
(b)

Fonte: O autor

Figura 111 – Segundo ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



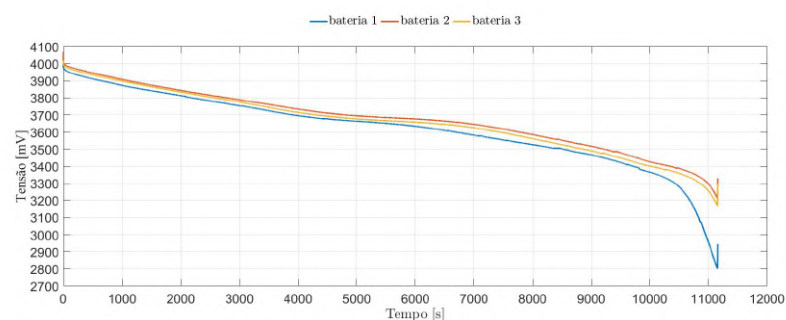
(a)



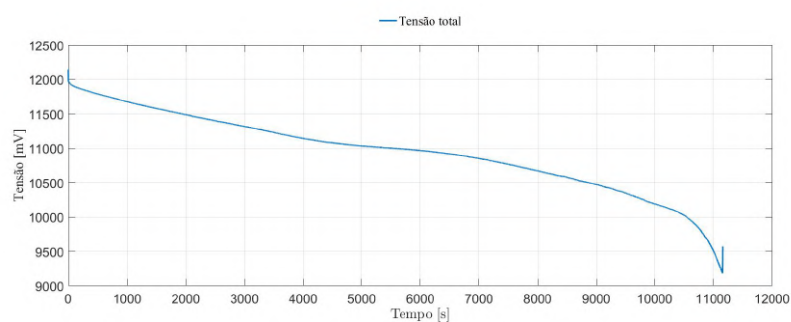
(b)

Fonte: O autor

Figura 112 – Terceiro ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



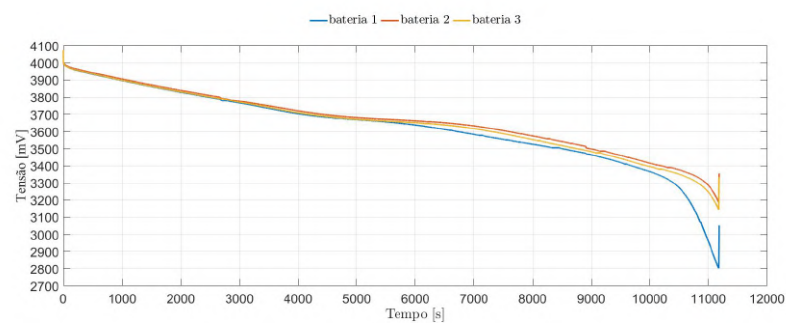
(a)



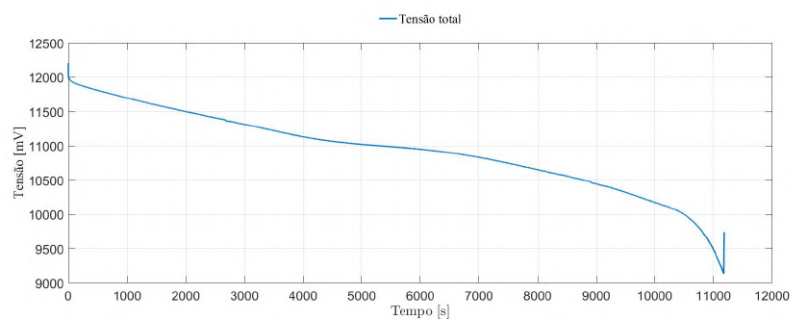
(b)

Fonte: O autor

Figura 113 – Quarto ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



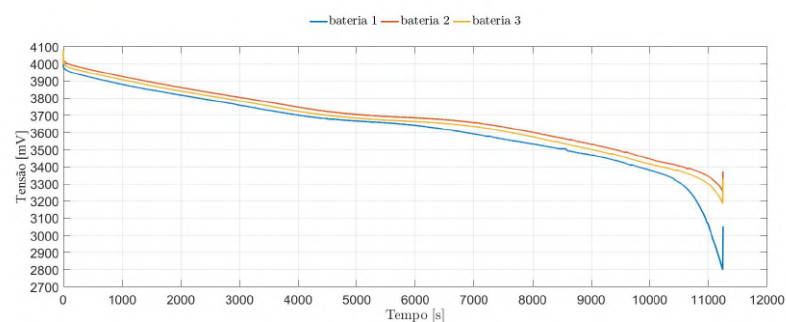
(a)



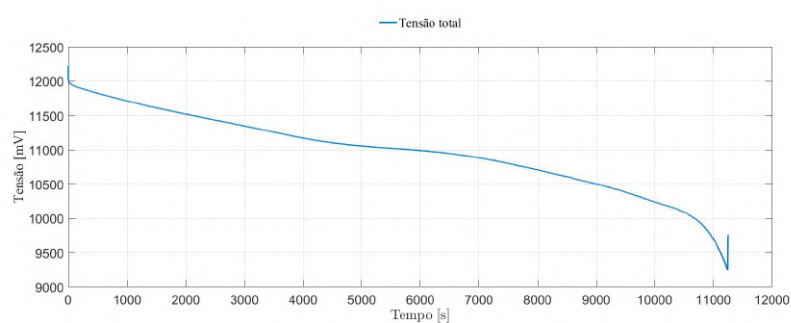
(b)

Fonte: O autor

Figura 114 – Quinto ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



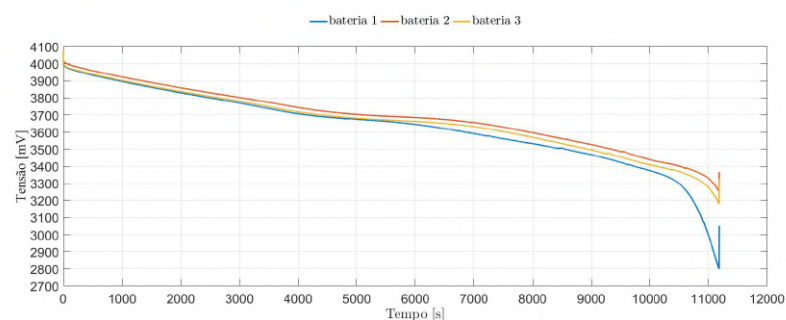
(a)



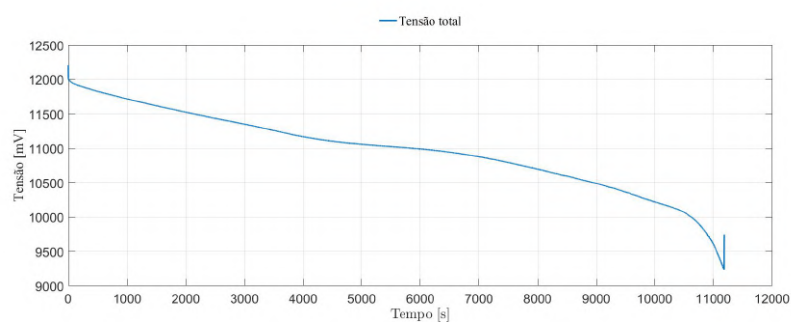
(b)

Fonte: O autor

Figura 115 – Sexto ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



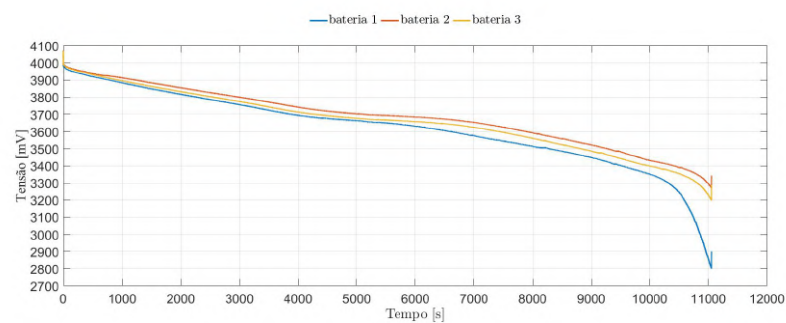
(a)



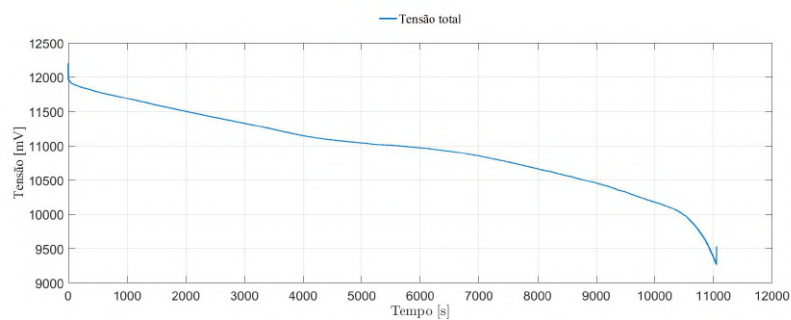
(b)

Fonte: O autor

Figura 116 – Sétimo ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



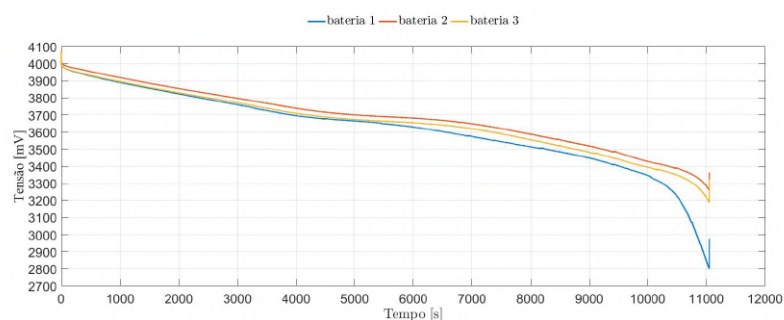
(a)



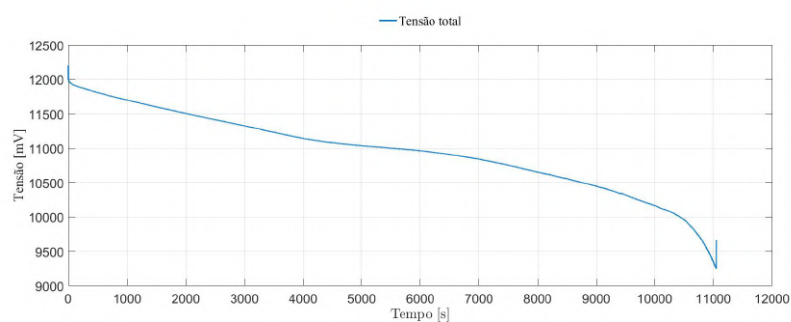
(b)

Fonte: O autor

Figura 117 – Oitavo ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



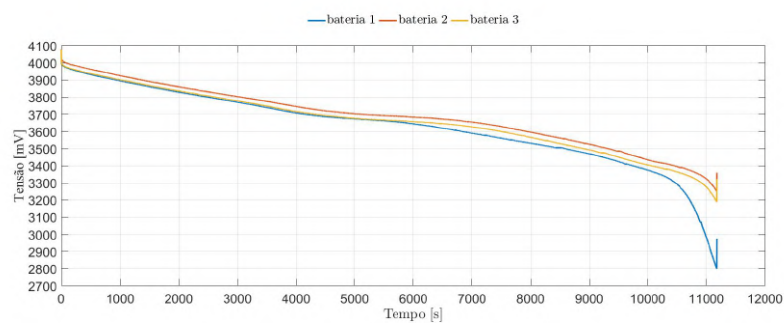
(a)



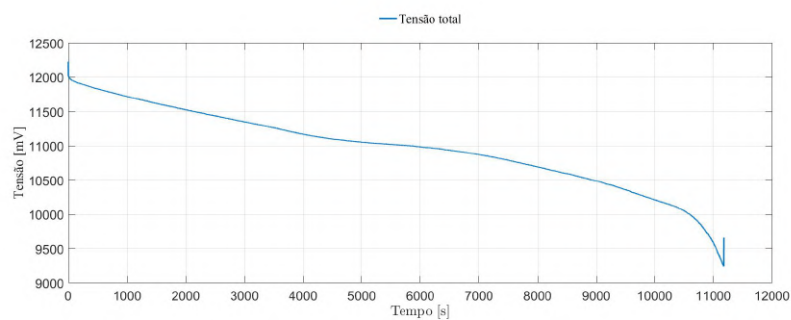
(b)

Fonte: O autor

Figura 118 – Nono ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



(a)

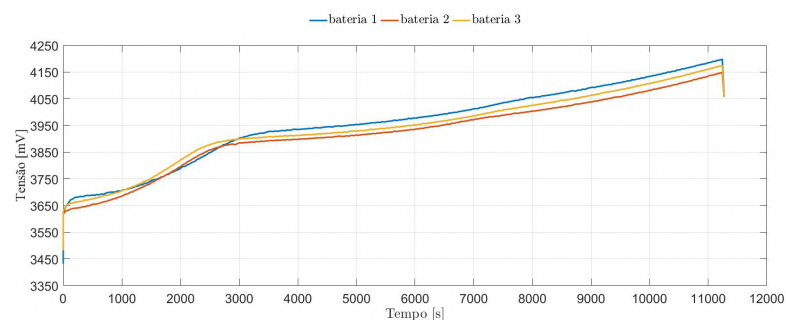


(b)

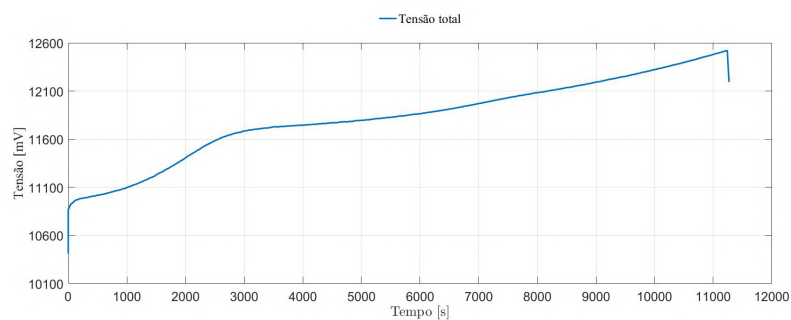
Fonte: O autor

APÊNDICE C – FORMAS DE ONDA PARA MÉTODO DE CARGA E DESCARGA REFLEX COM AS BATERIAS NOVAS DO CONJUNTO A.

Figura 119 – Primeiro ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



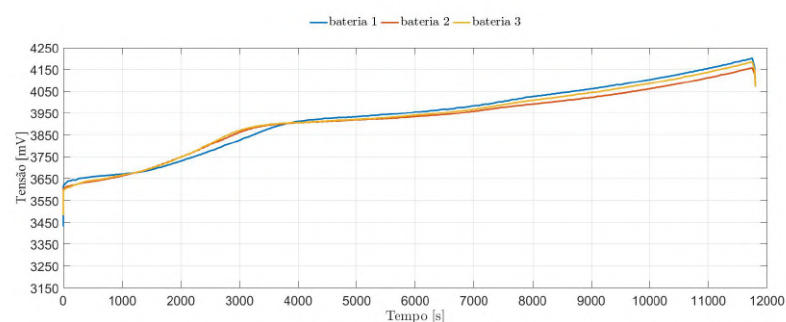
(a)



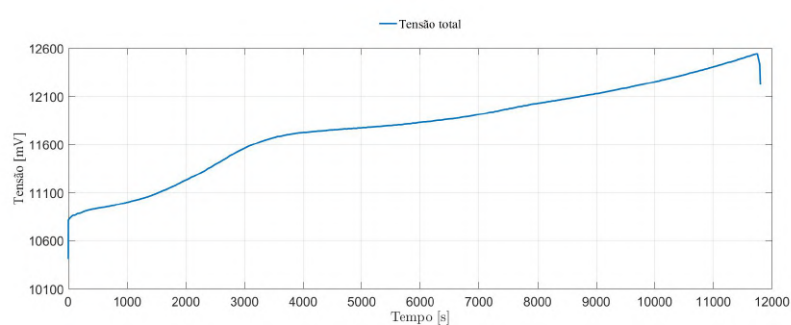
(b)

Fonte: O autor

Figura 120 – Segundo ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



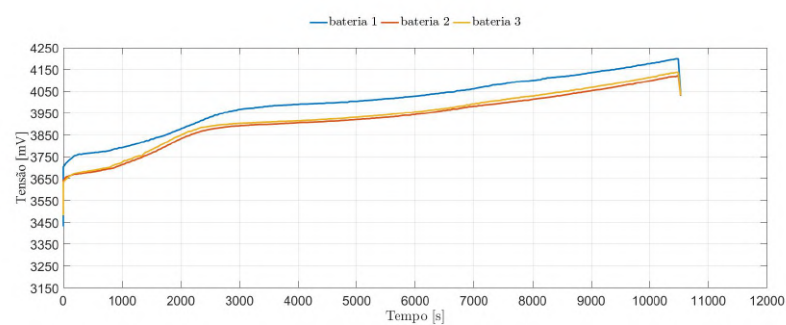
(a)



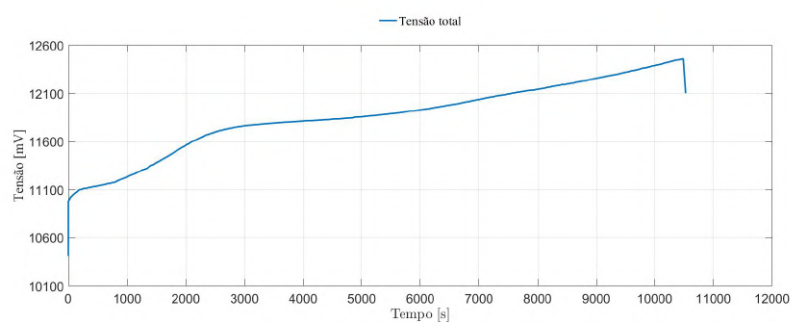
(b)

Fonte: O autor

Figura 121 – Terceiro ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



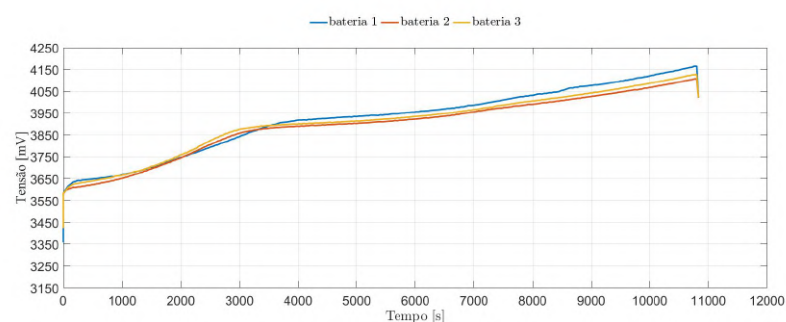
(a)



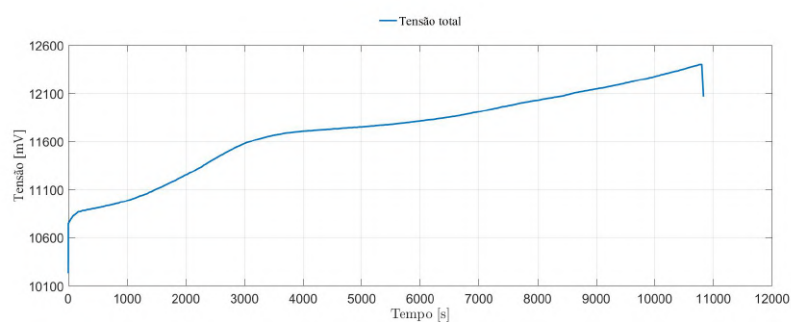
(b)

Fonte: O autor

Figura 122 – Quarto ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



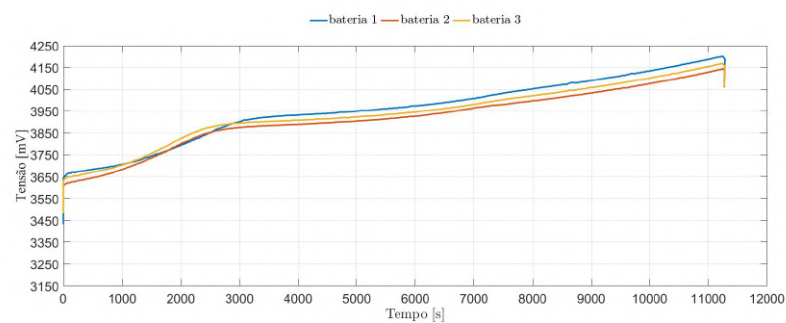
(a)



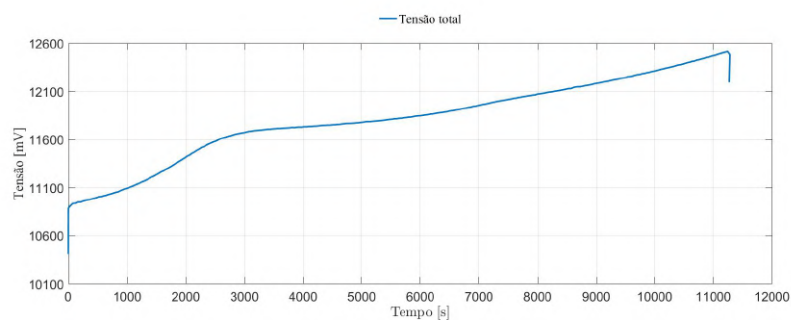
(b)

Fonte: O autor

Figura 123 – Quinto ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



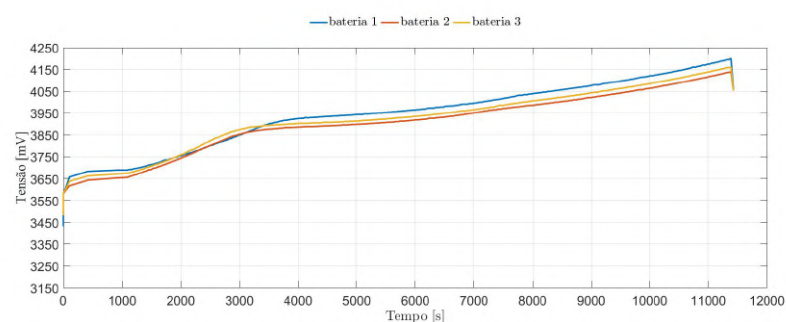
(a)



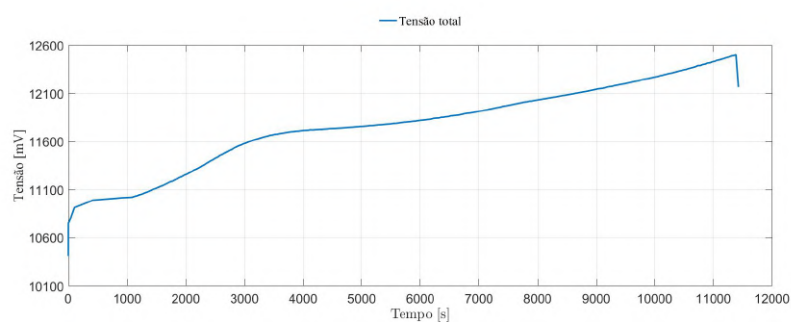
(b)

Fonte: O autor

Figura 124 – Sexto ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



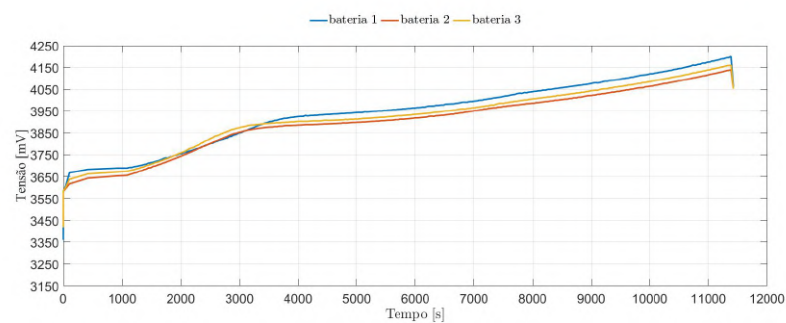
(a)



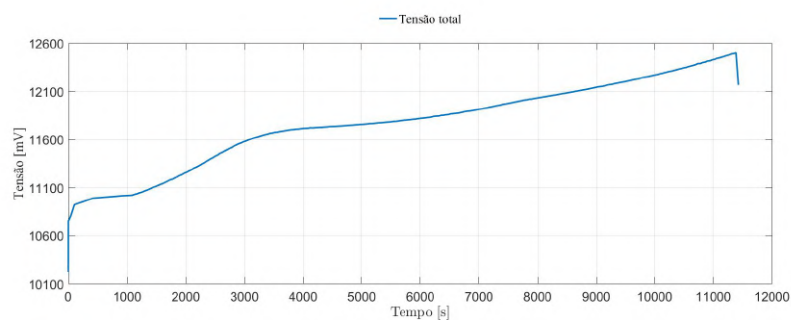
(b)

Fonte: O autor

Figura 125 – Sétimo ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



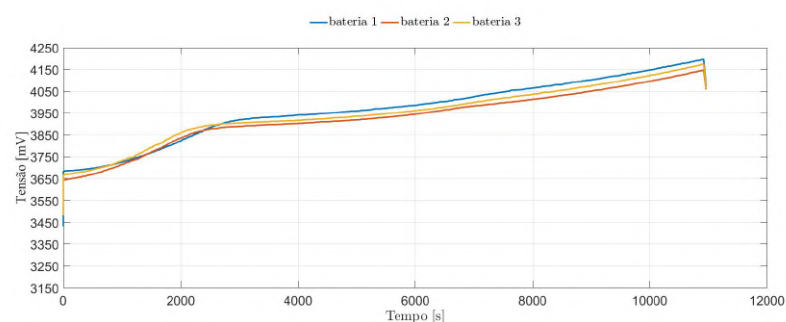
(a)



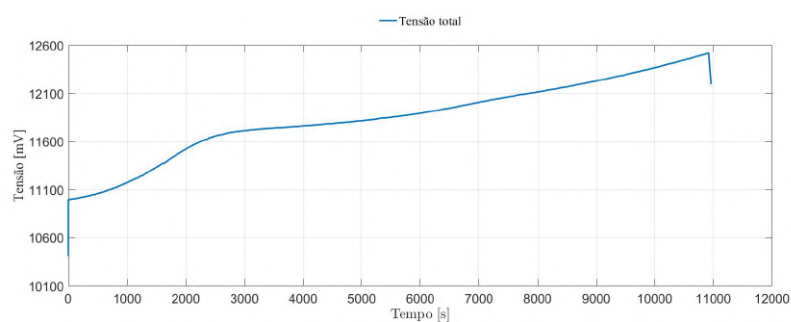
(b)

Fonte: O autor

Figura 126 – Oitavo ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



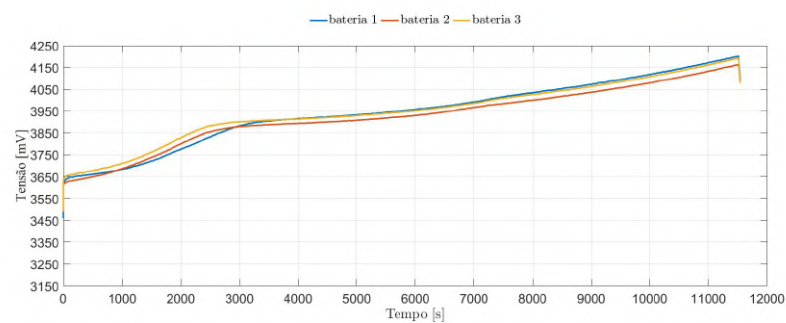
(a)



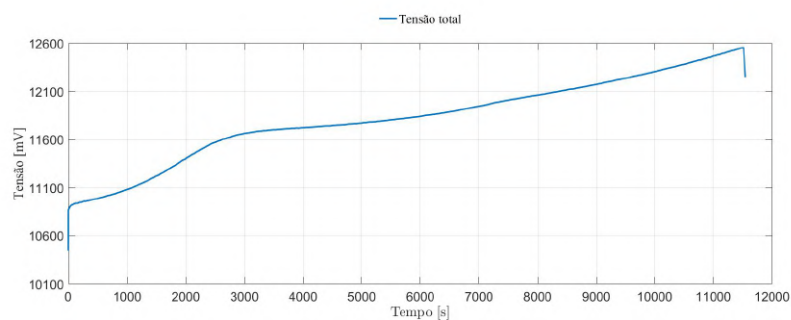
(b)

Fonte: O autor

Figura 127 – Nono ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



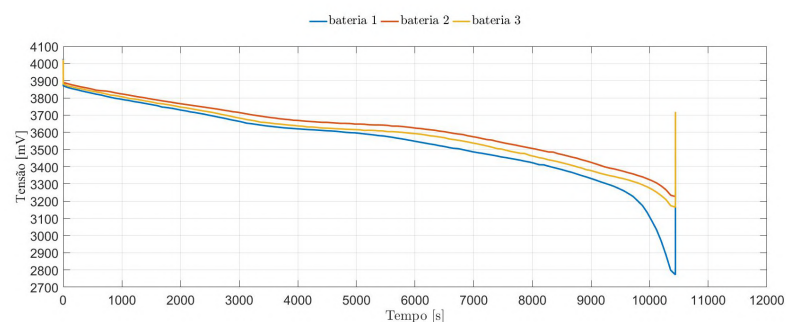
(a)



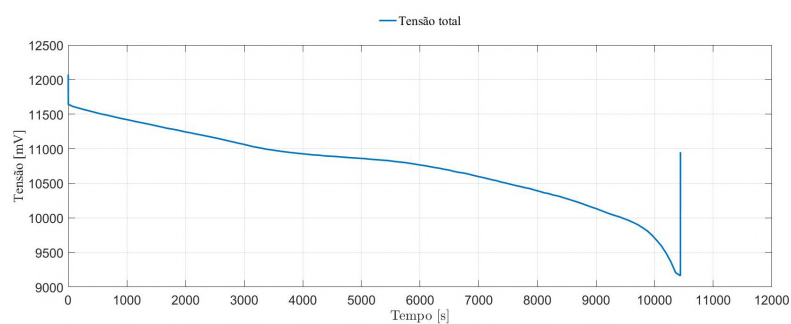
(b)

Fonte: O autor

Figura 128 – Primeiro ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



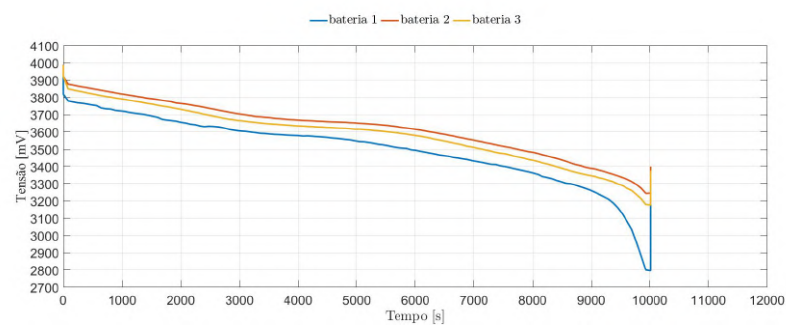
(a)



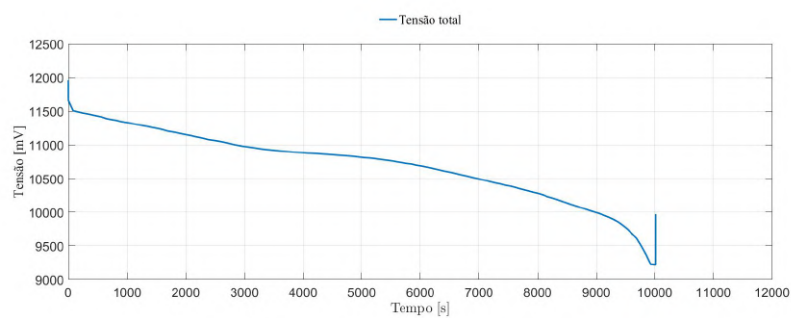
(b)

Fonte: O autor

Figura 129 – Segundo ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



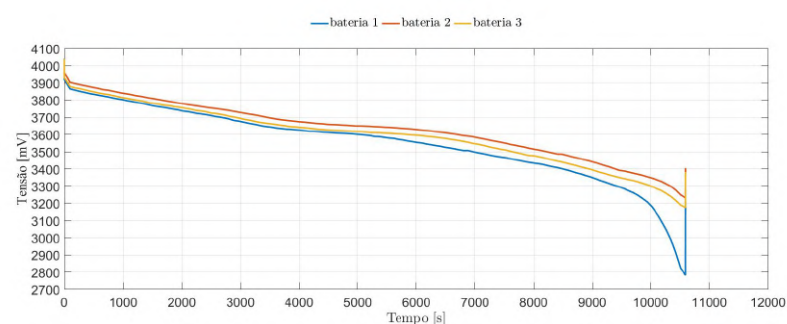
(a)



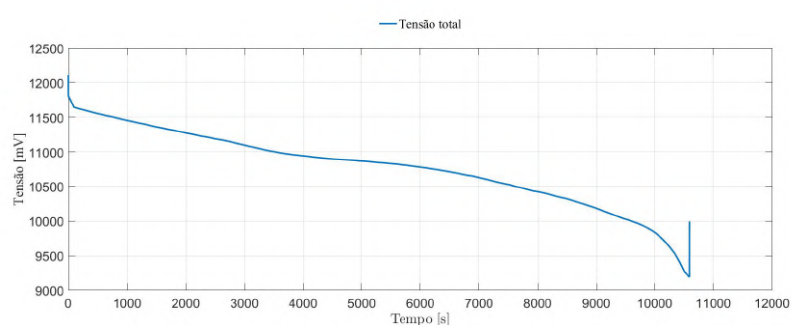
(b)

Fonte: O autor

Figura 130 – Terceiro ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



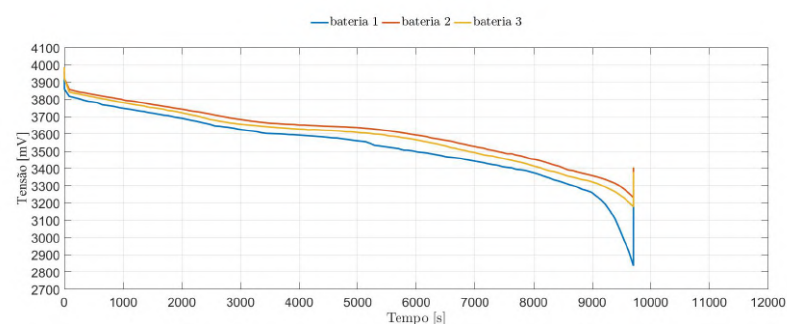
(a)



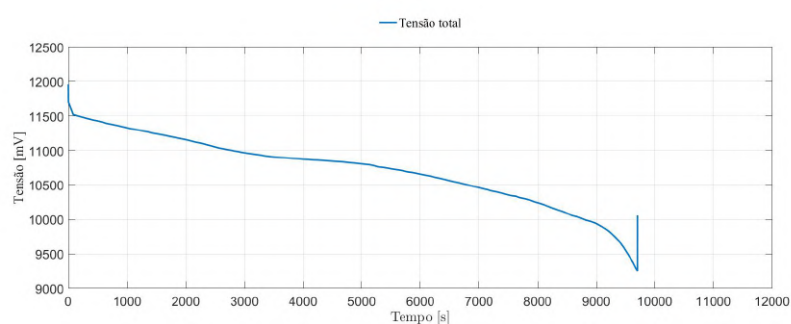
(b)

Fonte: O autor

Figura 131 – Quarto ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



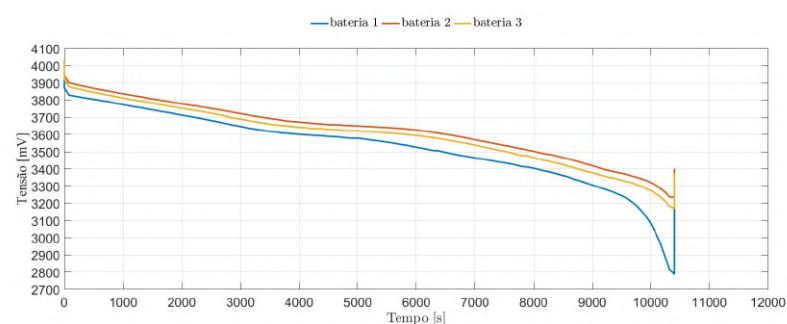
(a)



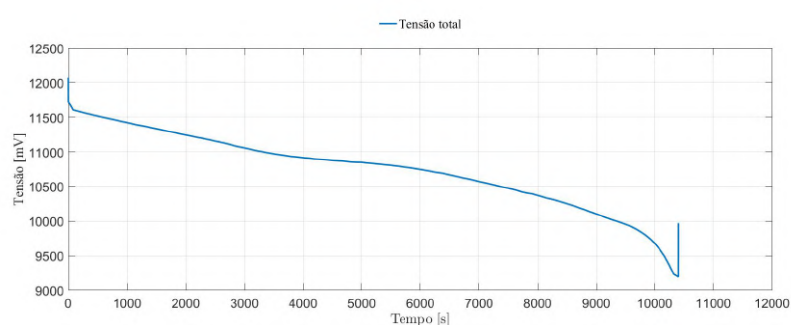
(b)

Fonte: O autor

Figura 132 – Quinto ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



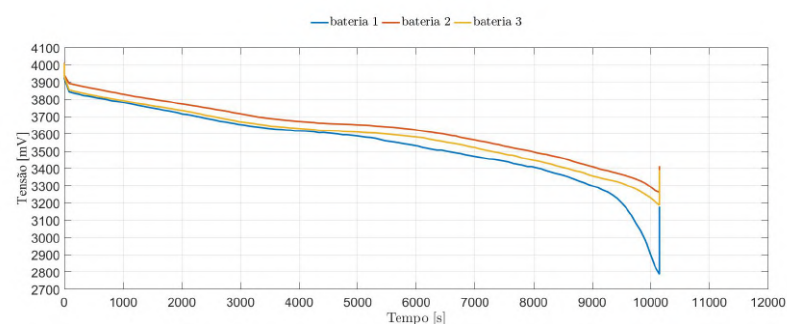
(a)



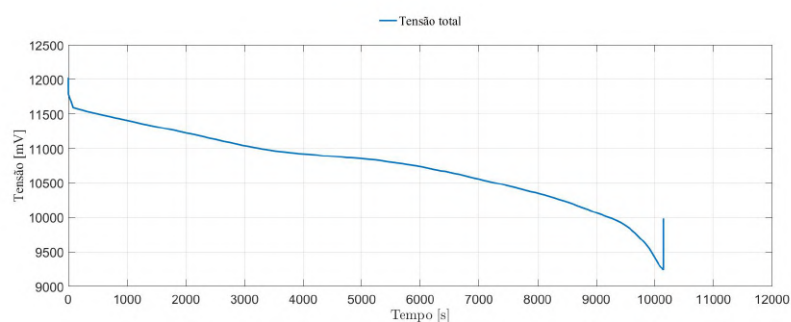
(b)

Fonte: O autor

Figura 133 – Sexto ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



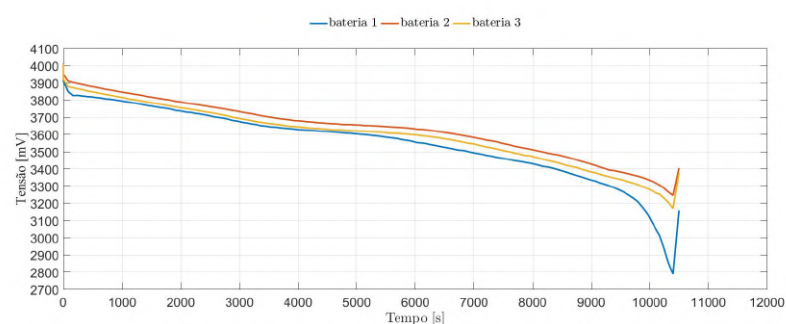
(a)



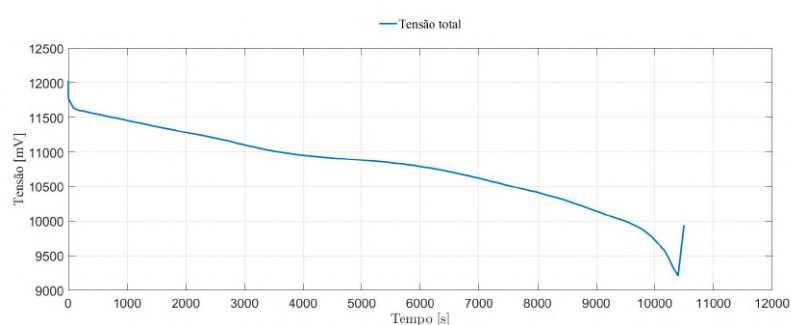
(b)

Fonte: O autor

Figura 134 – Sétimo ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



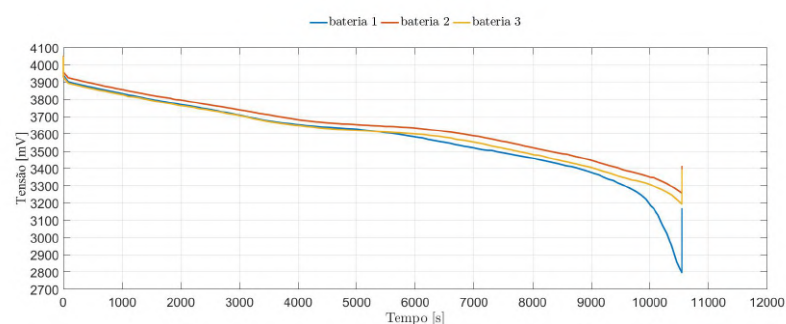
(a)



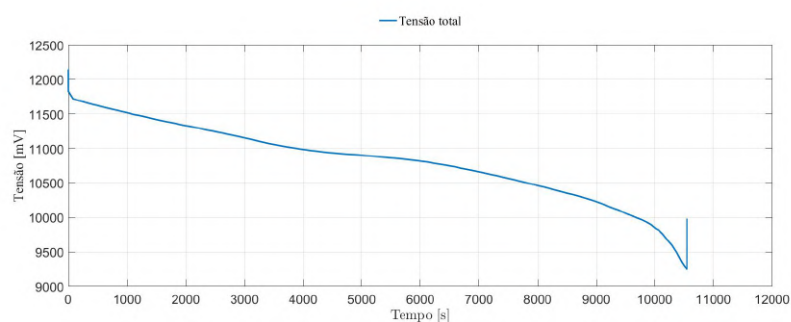
(b)

Fonte: O autor

Figura 135 – Oitavo ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



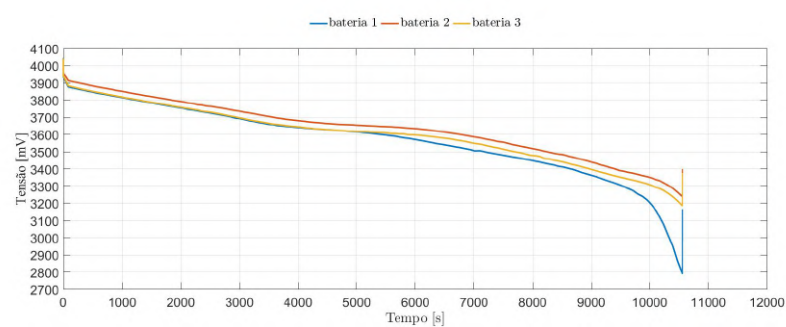
(a)



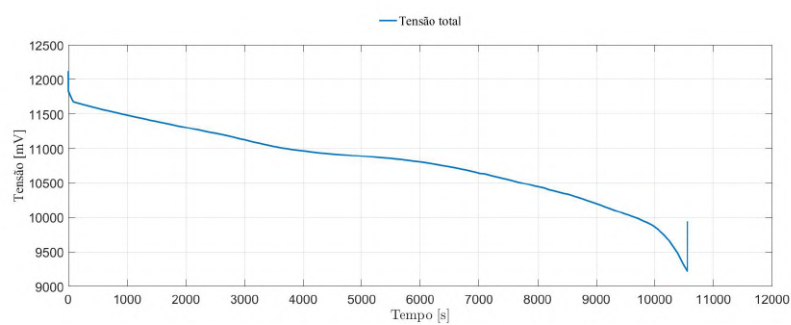
(b)

Fonte: O autor

Figura 136 – Nono ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



(a)

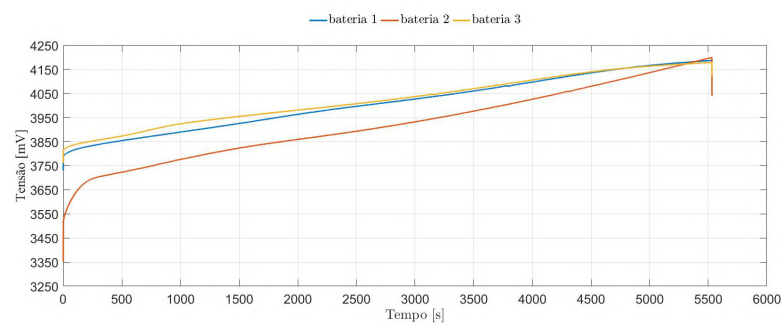


(b)

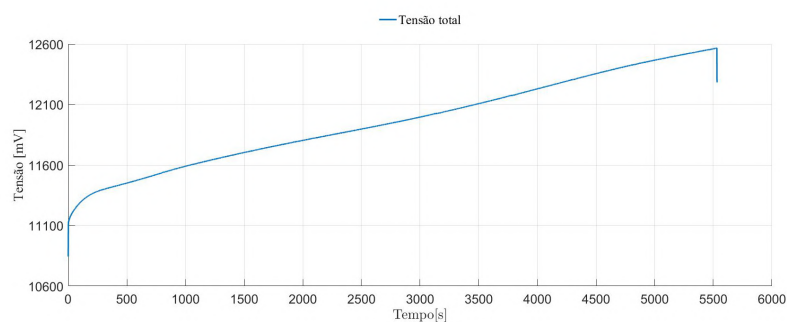
Fonte: O autor

APÊNDICE D – FORMAS DE ONDA PARA MÉTODO DE CARGA E DESCARGA CC COM AS BATERIAS DO CONJUNTO B.

Figura 137 – Primeiro ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



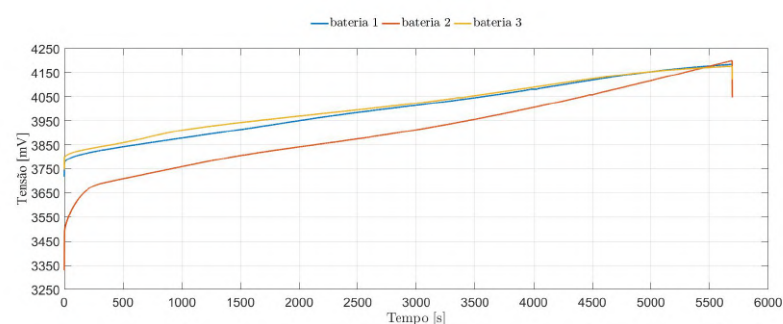
(a)



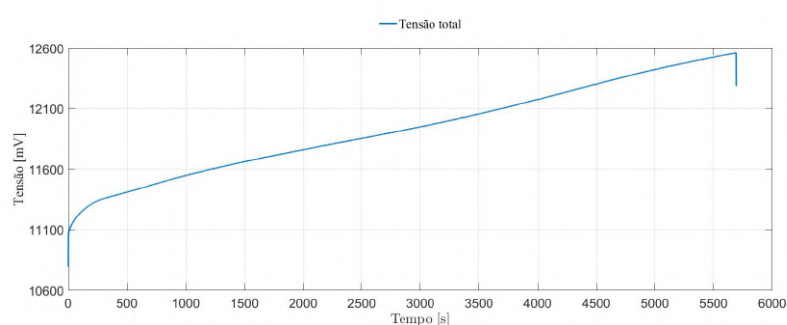
(b)

Fonte: O autor

Figura 138 – Segundo ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



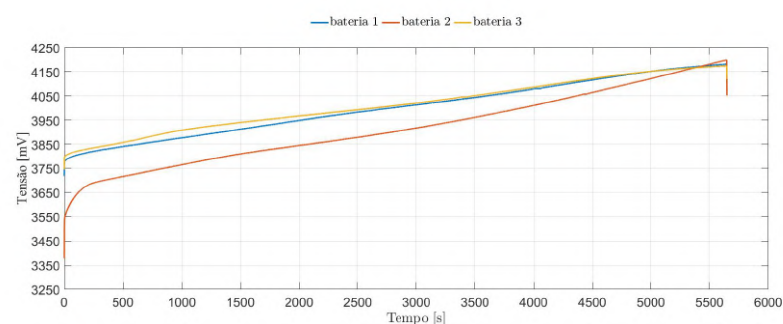
(a)



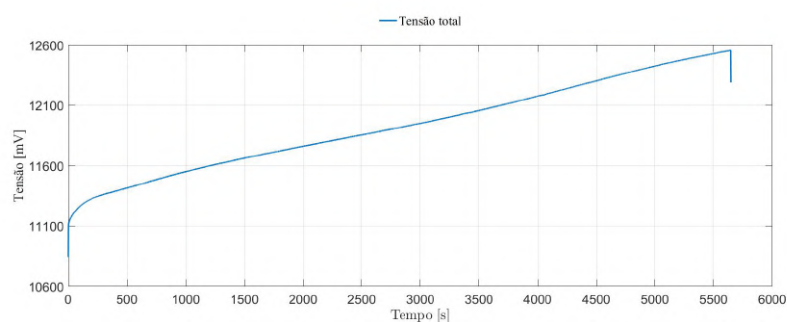
(b)

Fonte: O autor

Figura 139 – Terceiro ciclo de carga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



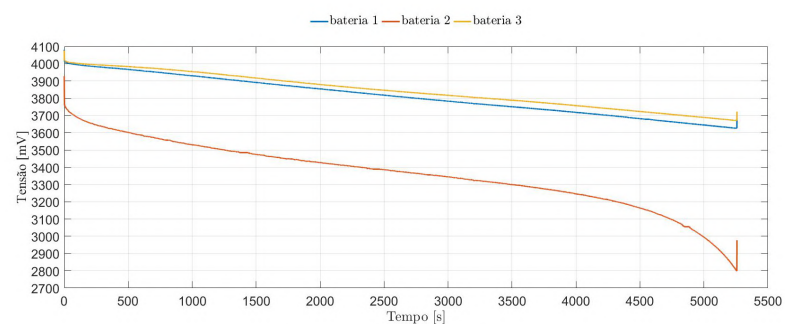
(a)



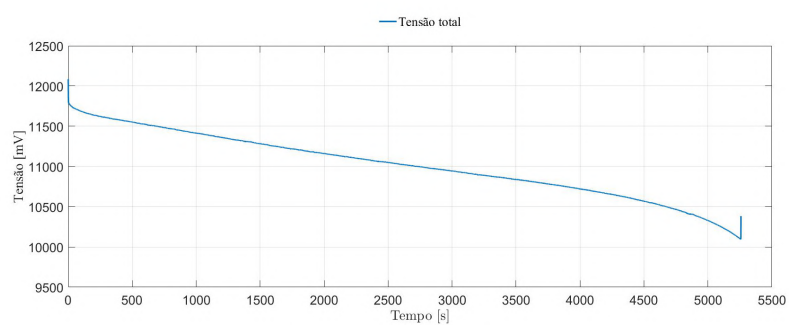
(b)

Fonte: O autor

Figura 140 – Primeiro ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



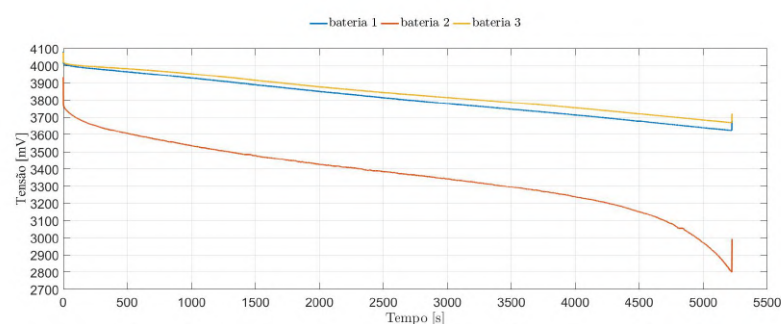
(a)



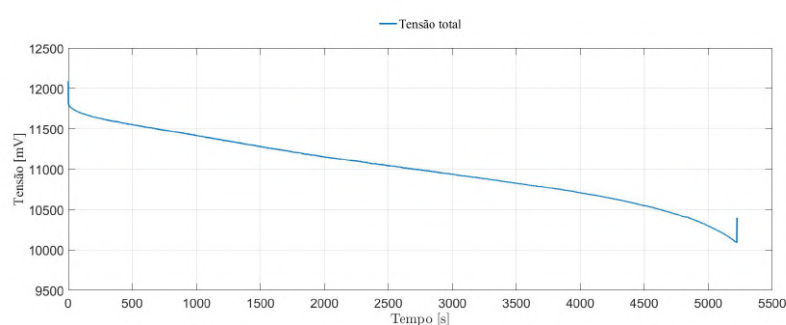
(b)

Fonte: O autor

Figura 141 – Segundo ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



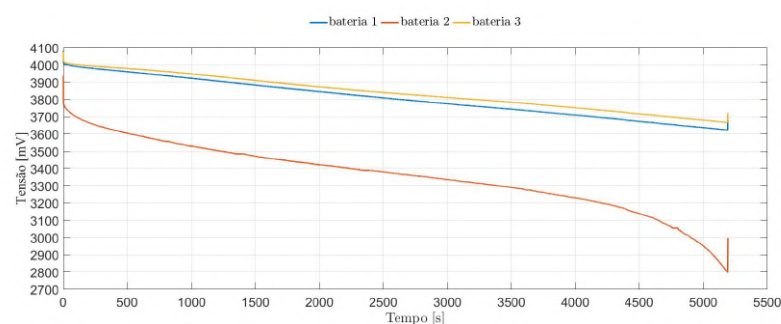
(a)



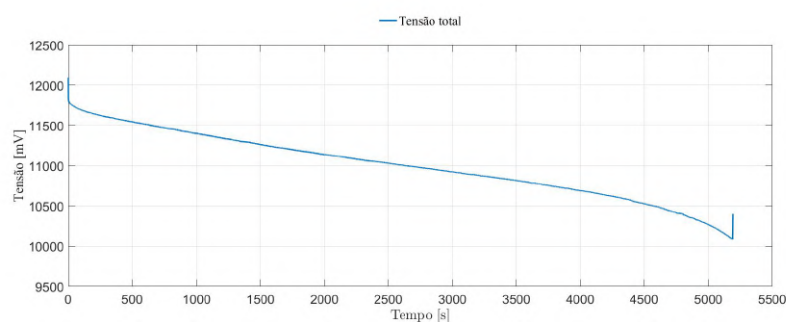
(b)

Fonte: O autor

Figura 142 – Terceiro ciclo de descarga CC sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



(a)

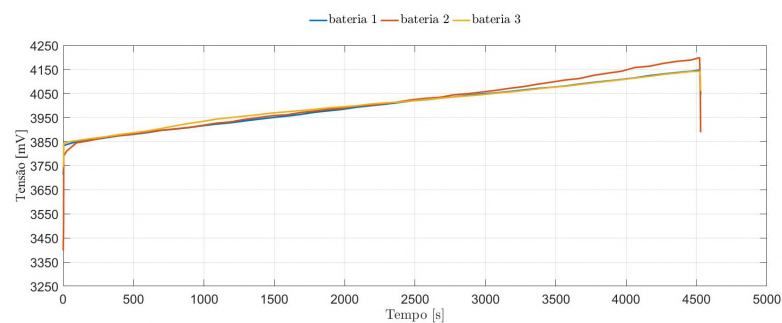


(b)

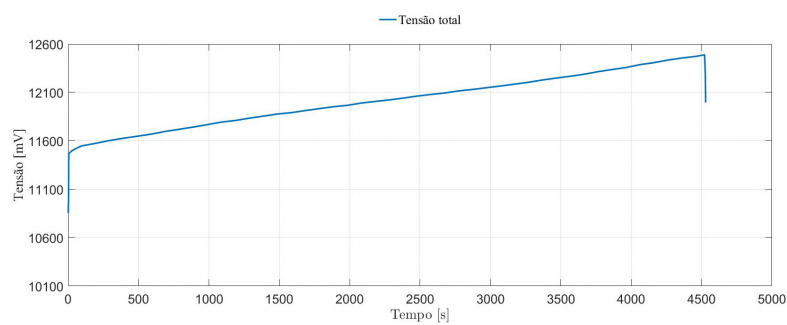
Fonte: O autor

APÊNDICE E – FORMAS DE ONDA PARA MÉTODO DE CARGA E DESCARGA REFLEX COM AS BATERIAS DO CONJUNTO B.

Figura 143 – Primeiro ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



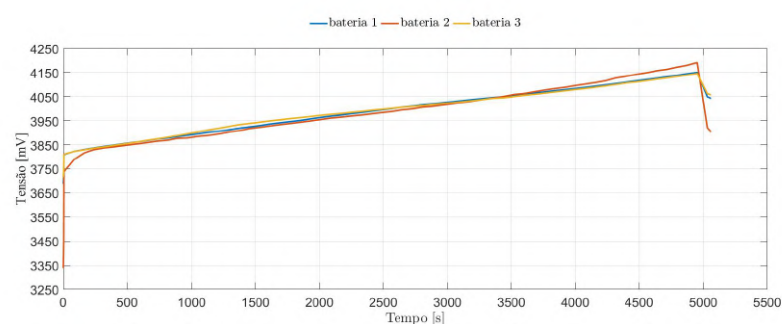
(a)



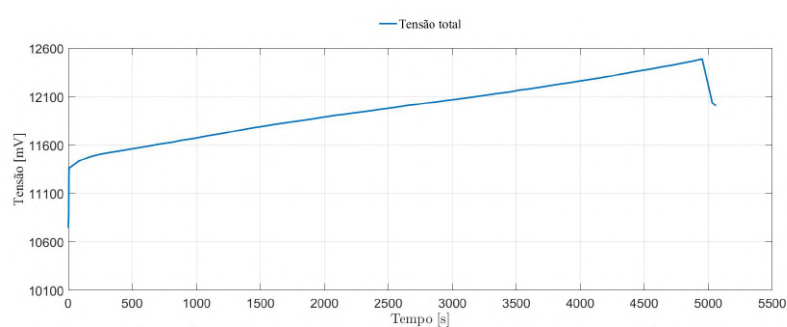
(b)

Fonte: O autor

Figura 144 – Segundo ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



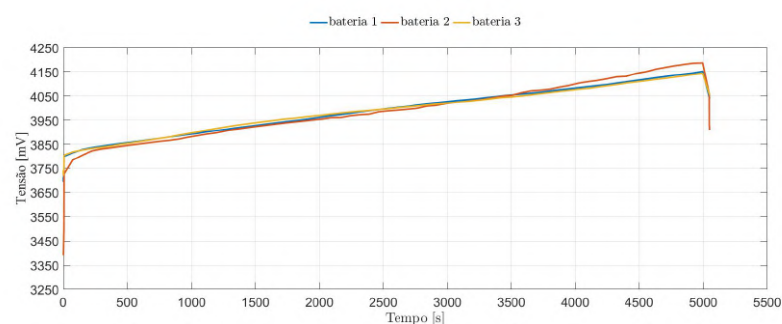
(a)



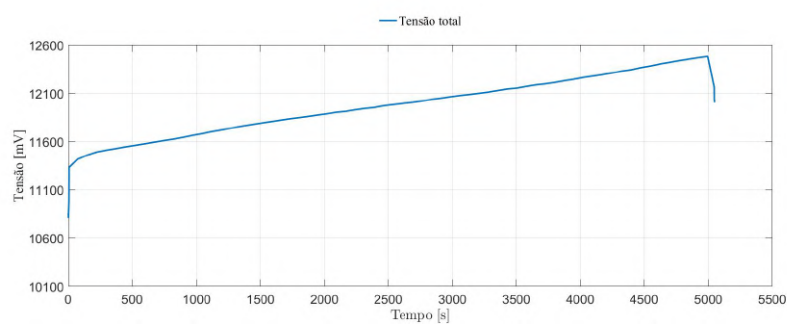
(b)

Fonte: O autor

Figura 145 – Terceiro ciclo de carga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



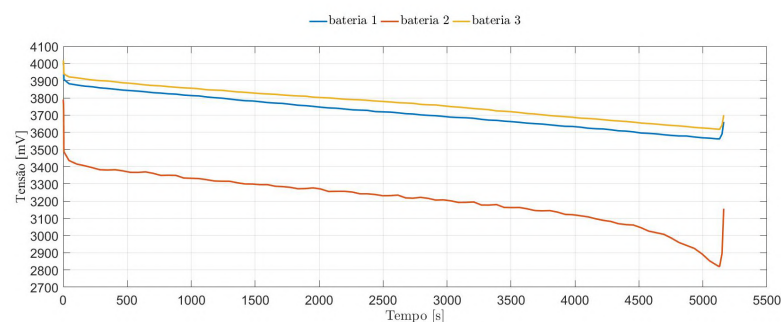
(a)



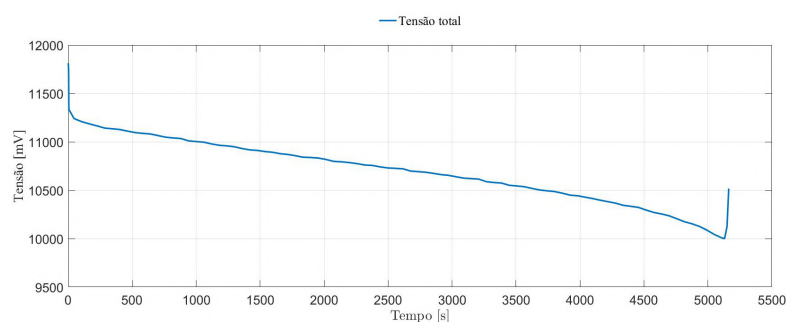
(b)

Fonte: O autor

Figura 146 – Primeiro ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



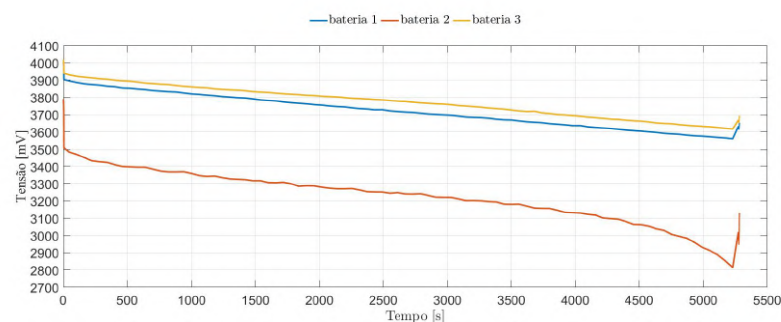
(a)



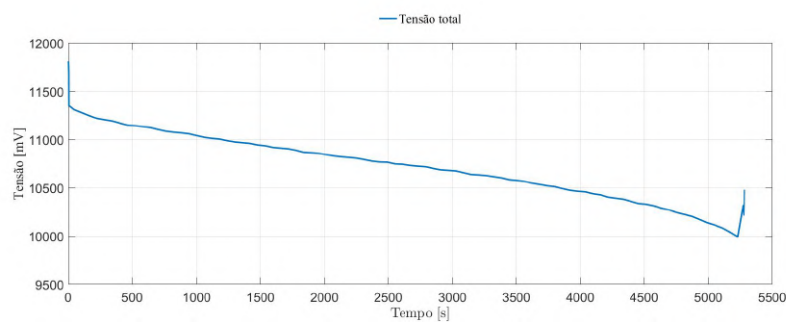
(b)

Fonte: O autor

Figura 147 – Segundo ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



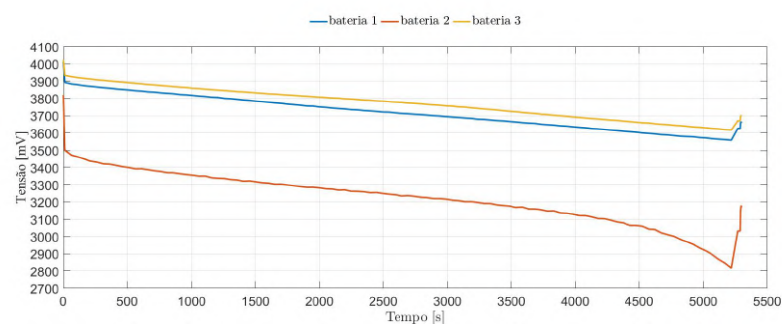
(a)



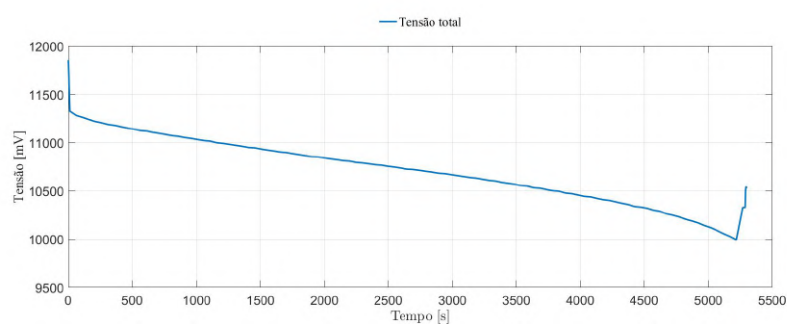
(b)

Fonte: O autor

Figura 148 – Terceiro ciclo de descarga Reflex sem o processo de equalização: (a) Tensão individual nas baterias. (b) Tensão total no conjunto



(a)



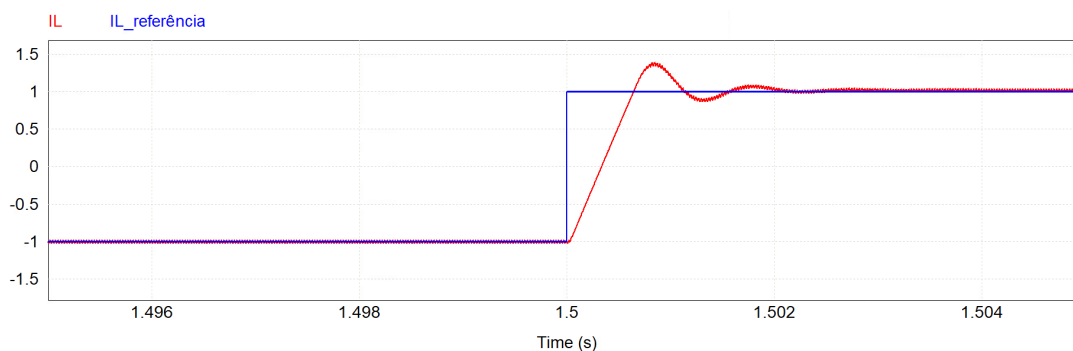
(b)

Fonte: O autor

APÊNDICE F – AVALIAÇÃO DA RESPOSTA DO CONTROLE À APLICAÇÃO DO DEGRAU

A avaliação da resposta ao degrau do controle pode ser verificada na Figura 149, onde, para este caso, é aplicado um degrau, invertendo o sinal da corrente para garantir que este seja capaz de operar no método Reflex para as condições previstas neste trabalho.

Figura 149 – Aplicação do degrau para validação do controle para operação com o método Reflex de carregamento.

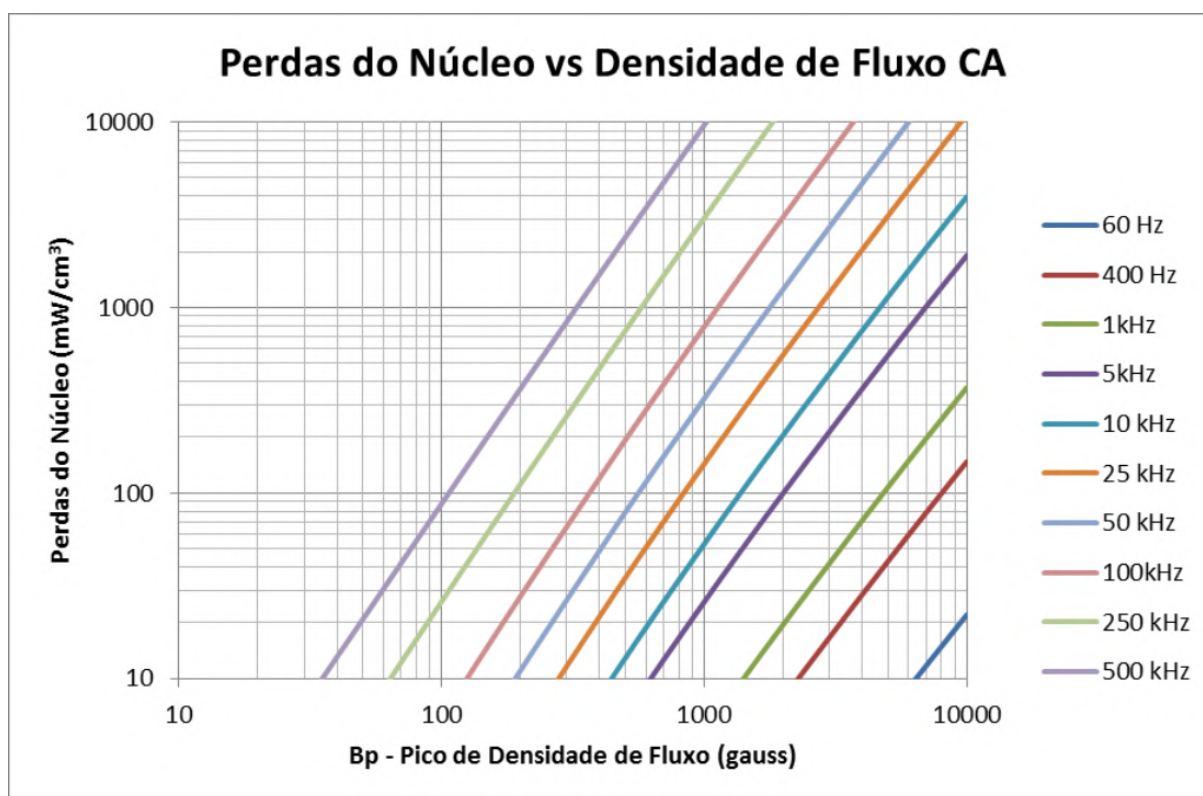


Fonte: O autor

Neste caso, o sinal de referência da corrente sofre uma inversão de polaridade, e se verifica que o controle de corrente atua com uma resposta de aproximadamente 3ms.

ANEXO A – TABELA PARA O CÁLCULO DAS PERDAS NO NÚCLEO MMTS75T4015 SENDUST

Figura 150 – Tabela de perdas no núcleo pela densidade de fluxo magnético CA.



Fonte: (MAGMATEC, s.d.)