

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

ROBERTO SCHMITT

ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE MÉTODO DE CARGA POR CORRENTE
PULSADA PARA BATERIAS DE FONTES ININTERRUPTAS DE ENERGIA

JOINVILLE

2021

ROBERTO SCHMITT

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE MÉTODO DE CARGA POR CORRENTE
PULSADA PARA BATERIAS DE FONTES ININTERRUPTAS DE ENERGIA**

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 obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Joselito Anastácio Heerdt

JOINVILLE

2021

Schmitt, Roberto

Estudo e implementação de método de carga por corrente pulsada para baterias de fontes ininterruptas de energia / Roberto Schmitt. -- 2021.

147 p.

Orientador: Joselito Anastácio Heerd

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação , Joinville, 2021.

1. Método Reflex. 2. Método CC-CV. 3. UPS. 4. Bateria chumbo-ácido. 5. Conversor CC-CC bidirecional em corrente. I. Heerd, Joselito Anastácio. II. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação . III. Título.

ROBERTO SCHMITT

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE MÉTODO DE CARGA POR CORRENTE
PULSADA PARA BATERIAS DE FONTES ININTERRUPTAS DE ENERGIA**

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 obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Joselito Anastácio Heerdt, Dr.

CCT/UEDESC

Membros:

Prof. Cassiano Rech, Dr.

UFSM

Prof. Yales Rômulo de Novaes, Dr.

CCT/UEDESC

Joinville, 31 de maio de 2021.

AGRADECIMENTOS

O meu primeiro agradecimento devo aos céus, ao nosso senhor Jesus Cristo e a Nossa Senhora de Fátima.

À minha amada esposa Giovana Ersching Schmitt e minha filha Ana Clara Schmitt, que estiveram sempre ao meu lado apoiando e compreendendo os vários momentos de ausência durante este trabalho, sendo elas a minha grande fonte de inspiração nesta vida.

Agradeço aos meus pais Ingrid e Olímpio Schmitt, que dedicaram grande parte de suas vidas me provendo sustento, educação e pelos cuidados com a minha filha. Foram indispensáveis para que eu chegasse até aqui.

Agradeço a minha irmã Fernanda Schmitt Baehr, ao meu cunhado Ivo Baehr Júnior e a minha querida e única sobrinha Thayná Emanuelle Baehr, por todo apoio durante estes anos.

Agradeço imensamente meus sogros Isabel e Ademar José Ersching, que são meus segundos pais, por todo incentivo e pelos cuidados com a minha filha.

Sou muito grato ao professor Dr. Joselito Anastácio Heerdt. Seu conhecimento, auxílio e incentivo incessantes foram muito importantes para elaboração deste trabalho. Sua orientação não considerou apenas o conteúdo da pesquisa, mas também o meu perfil como aluno pesquisador, em um retorno aos estudos que seu deu muito tempo depois de ter finalizado a graduação.

Agradeço aos Professores da banca, que se dispuseram a leitura e avaliação do trabalho.

A todos os professores e colaboradores da Universidade do Estado de Santa Catarina que colocaram à disposição sua atenção e conhecimento, me auxiliando ao longo dessa jornada no decorrer do Programa de Pós-Graduação.

A WEG, em especial aos senhores Adalberto José Rossa, Juarez Monteiro dos Santos e Guilherme Bonan, cujos auxílios foram essenciais.

Aos colegas de trabalho Bruno Goulart Schwinden, Felipe Leonardo Pereira, Thayná Oening, Naelton Oliveira de Souza, Mario Diego Grabowski, Eduardo Falchetti Sovrani, Jonas Formanski Pereira, Fábio Cadore Posser e Thiago Malaquias.

Aos amigos que o mestrado me deu: Ederson Manarim, Mateus Nicoladelli de Oliveira e Rodrigo José Piontkewicz.

A um amigo que conheci no ensino fundamental e que se tornou meu irmão na vida: Vanduir Enke.

A todos que contribuíram com seus impostos para que eu pudesse ter um ensino digno.

“Se você não está falhando, você não está empurrando seus limites.
Se você não está empurrando seus limites, você não está maximizando seu potencial.”

Ray Dalio

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo de um método de carga não convencional de uma bateria chumbo-ácida, considerando sua aplicação em fontes ininterruptas de energia. Para sua realização, fez-se uso de um conversor CC-CC bidirecional em corrente, objetivando a comparação deste método com o método convencional de carga em corrente constante e tensão constante. Na comparação feita foram considerados o tempo de carga e a elevação da temperatura durante o processo de carga. O método Reflex proporciona pulsos de corrente de carga positivo, negativo e zero à bateria, prometendo cargas rápidas e prolongamento de sua vida útil. Diante das características deste método e visando o objetivo estabelecido, é apresentada uma revisão sobre as fontes ininterruptas de energia e seus modos de operação, bem como as características das baterias de chumbo-ácido e os principais métodos de cargas aplicados a ela. Em seguida é realizado um estudo teórico específico sobre o método Reflex e o projeto do conversor bidirecional. O estudo realizado é validado em um protótipo e os resultados experimentais são apresentados para corroborar com as análises desenvolvidas e demonstrar o funcionamento do método.

Palavras-chave: Método Reflex, método CC-CV, UPS, bateria chumbo-ácida, conversor CC-CC bidirecional em corrente.

ABSTRACT

This work presents the study of an unconventional charging method for a lead-acid battery, considering its application in uninterruptible power supply. For its realization, a current bidirectional DC-DC converter was used, aiming to compare this method with the conventional method of constant current and constant voltage. In the comparison made, the charging time and temperature rise during the charging process were considered. The Reflex method provides pulses of positive, negative and zero charge current to the battery, promising fast charges and extending its useful life. In view of the characteristics of this method and aiming at the established objective, a review is presented on the uninterruptible power supply and their modes of operation, as well as the characteristics of lead-acid batteries and the main charging methods applied to it. Then a specific theoretical study is carried out on the Reflex method and the design of the bidirectional DC-DC converter. The study carried out is validated in a prototype and the experimental results are presented to corroborate with the developed analyzes and demonstrate the operation of the method.

Keywords: Reflex method, CC-CV method, UPS, lead-acid battery, Bidirectional DC-DC converter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de blocos simplificado com a composição da UPS.....	30
Figura 2 – UPS do modo off-line	32
Figura 3 – UPS do modo line interactive	33
Figura 4 – UPS do modo on-line	34
Figura 5 - Principais distúrbios apresentados na rede elétrica	36
Figura 6 - Bateria de chumbo-ácido selada regulada por válvula de 12V 9Ah (BAT 0090122)	38
Figura 7 – Aspecto construtivo de bateria de chumbo-ácido regulada por válvula	39
Figura 8 - Capacidade x Vida útil da bateria	40
Figura 9 – Ciclo de vida x profundidade de descarga	40
Figura 10 – Influência da temperatura na vida útil das baterias	41
Figura 11- Modelo elétrico simplificado da bateria	42
Figura 12 - Modelo elétrico complexo da bateria.....	42
Figura 13 – Projeção da vida útil da bateria de chumbo-ácido Cral® estacionária x temperatura interna	44
Figura 14 - Carga pelo método de corrente constante	46
Figura 15 – Carga pelo método de tensão constante	47
Figura 16 - Carga pelo método de corrente constante e tensão constante.....	48
Figura 17 – Carga pelo método por pulsos de corrente.....	49
Figura 18 - Carga pelo método Reflex	49
Figura 19 – Comparativo entre os estados dos eletrodos de baterias com vários ciclos de carga, através do método por corrente pulsada (A e D) e pelo método CC-CV (B e E), comparados com uma bateria nova (C e F).....	51
Figura 20 – Primeira topologia a utilizar pulsos positivos e negativos de corrente na bateria	55
Figura 21 – Conversor CC-CC bidirecional em corrente	55
Figura 22 – Modo de carga realizada método Reflex.....	56
Figura 23 - Operação modo Buck: Estágio 1	57
Figura 24 - Operação modo Buck: Estágio 2	57
Figura 25 - Operação modo Boost: Estágio 1.....	58
Figura 26 - Operação modo Boost: Estágio 2.....	59
Figura 27 - Intervalo de Descanso: estágio único.....	59
Figura 28 - Núcleo de ferrite do tipo EE e carretel	64

Figura 29 – Proposta de integração das placas que compõem o sistema de ensaio	65
Figura 30 – Kit DSC para desenvolvimento.....	66
Figura 31 – Circuito de potência do conversor.....	67
Figura 32- Circuito de Gate-Driver	67
Figura 33 – Circuito de medição de corrente	68
Figura 34 – Circuito de Medição de Tensão.....	69
Figura 35 – Separação dos circuitos no projeto da PCI.....	70
Figura 36 – Camada superior da PCI (<i>Top layer</i>)	71
Figura 37 - Camada inferior da PCI (<i>bottom layer</i>).	71
Figura 38 – Visão superior da PCI	72
Figura 39 - PCI de potência (a) e kit didático (controle) (b)	72
Figura 40 - Diagrama de blocos para controle de corrente.....	73
Figura 41 - Diagrama de Bode do resultado do controlador	76
Figura 42 - Diagrama de Bode da FTMA compensada.....	77
Figura 43 - FTMF do sistema de controle	77
Figura 44 - Discretização do controle pelo software PSIM	78
Figura 45 – Circuito simulado do conversor CC-CC bidirecional	79
Figura 46 – Resultados da simulação do método Reflex	79
Figura 47 - Forma de onda da corrente do método Reflex e corrente de referência	82
Figura 48 - Características da forma de onda de corrente para o método Reflex.....	83
Figura 49 - Forma de onda da corrente do método Reflex (Canal 1) e Tensão no barramento de entrada (Canal 2).....	83
Figura 50 - Forma de onda da corrente do método Reflex (Canal 1) e Tensão de entrada medida por acoplamento c.a. (Canal 2)	84
Figura 51 - Tensão da bateria durante o pulso Reflex.....	84
Figura 52 - Variação dos tempos dos intervalos positivo, negativo e de descanso (a) e (b)....	85
Figura 53 - Variação dos intervalos de tempos positivo, negativo e de descanso (c)	86
Figura 54 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 1Hz e nível de corrente em 0,1C	88
Figura 55 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 1Hz e nível de corrente em 0,1C	89
Figura 56 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 3Hz e nível de corrente em 0,1C	90

Figura 57 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 3Hz e nível de corrente em 0,1C	90
Figura 58 – Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 5Hz e nível de corrente em 0,1C	91
Figura 59 – Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 5Hz e nível de corrente em 0,1C	92
Figura 60 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 10Hz e nível de corrente em 0,1C	93
Figura 61 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 10Hz e nível de corrente em 0,1C	93
Figura 62 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 20Hz e nível de corrente em 0,1C	94
Figura 63 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 20Hz e nível de corrente em 0,1C	95
Figura 64 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 40Hz e nível de corrente em 0,1C	96
Figura 65 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 40Hz e nível de corrente em 0,1C	96
Figura 66 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 80Hz e nível de corrente em 0,1C	97
Figura 67 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 80Hz e nível de corrente em 0,1C	98
Figura 68 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 1Hz e nível de corrente em 0,15C	99
Figura 69 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 1Hz e nível de corrente em 0,15C	99
Figura 70 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 3Hz e nível de corrente em 0,15C	100
Figura 71 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 3Hz e nível de corrente em 0,15C	100
Figura 72 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 5Hz e nível de corrente em 0,15C	101
Figura 73 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 5Hz e nível de corrente em 0,15C	101

Figura 74 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 10Hz e nível de corrente em 0,15C	102
Figura 75 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 10Hz e nível de corrente em 0,15C	102
Figura 76 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 20Hz e nível de corrente em 0,15C	103
Figura 77 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 20Hz e nível de corrente em 0,15C	103
Figura 78 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 40Hz e nível de corrente em 0,15C	104
Figura 79 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 40Hz e nível de corrente em 0,15C	104
Figura 80 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 80Hz e nível de corrente em 0,15C	105
Figura 81 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 80Hz e nível de corrente em 0,15C	105
Figura 82 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 1Hz e nível de corrente em 0,18C	106
Figura 83 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 1Hz e nível de corrente em 0,18C	107
Figura 84 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 3Hz e nível de corrente em 0,18C	107
Figura 85 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 3Hz e nível de corrente em 0,18C	108
Figura 86 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 5Hz e nível de corrente em 0,18C	108
Figura 87 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 5Hz e nível de corrente em 0,18C	109
Figura 88 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 10Hz e nível de corrente em 0,18C	109
Figura 89 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 10Hz e nível de corrente em 0,18C	110
Figura 90 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 20Hz e nível de corrente em 0,18C	110

Figura 91 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 20Hz e nível de corrente em 0,18C	111
Figura 92 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 40Hz e nível de corrente em 0,18C	111
Figura 93 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 40Hz e nível de corrente em 0,18C	112
Figura 94 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 80Hz e nível de corrente em 0,18C	113
Figura 95 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 80Hz e nível de corrente em 0,18C	113
Figura 96 - Tempo de carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,1C - Parcial	114
Figura 97 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,1C - Parcial.....	115
Figura 98 - Tempo de carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,1C - Completo.....	116
Figura 99 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,1C - Completo	116
Figura 100 - Tempo de carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,15C - Parcial	117
Figura 101 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,15C - Parcial	118
Figura 102 - Tempo de carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,15C - Completo.....	118
Figura 103 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,15C - Completo.....	119
Figura 104 - Tempo de carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,18C - Parcial	120
Figura 105 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,18C - Parcial	120
Figura 106 - Tempo de carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,18C - Completo.....	121
Figura 107 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,18C - Completo.....	122

Figura 108 - UPS comercial com a bateria conectada externamente para realização dos ensaios	122
Figura 109 - Tempo de carga da bateria com o método CC-CV na UPS comercial e nível de corrente em 0,1C - Parcial	123
Figura 110 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método CC-CV na UPS comercial e nível de corrente em 0,1C - Parcial.....	123
Figura 111 - Tempo de carga da bateria com o método CC-CV na UPS comercial e nível de corrente em 0,1C - Completo.....	124
Figura 112 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método CC-CV na UPS comercial e nível de corrente em 0,1C - Completo	125
Figura 113 - Medição dos tempos de carga e descarga resultantes dos ensaios pelo método Reflex.....	127
Figura 114 - Medição das temperaturas na bateria durante a carga nos ensaios realizados pelo método Reflex.....	127
Figura 115 - Medição dos tempos de carga e descarga nos ensaios parciais (P) pelo método CC-CV.....	128
Figura 116 - Medição dos tempos de descarga nos ensaios completos (C) pelo método CC-CV	128
Figura 117 - Medição das temperaturas na bateria durante a carga nos ensaios realizados pelo método CC-CV parciais (P) e completos (C)	129
Figura 118 - Comparação entre os tempos de carga, descarga e temperaturas pelo método Reflex dos dois extremos de correntes: 900mA e 1,62A a 3Hz.....	130
Figura 119 - Comparação entre os tempos de carga, descarga e temperaturas pelo método CC-CV parciais dos dois extremos de correntes: 900mA e 1,62A	131
Figura 120 - Diferenças entre as cargas realizadas pelo método Reflex e CC-CV (parcial e completa) com corrente inicial de 900mA.....	133
Figura 121 - Diferenças entre as cargas realizadas pelo método Reflex e CC-CV (parcial e completa) com corrente inicial de 1,35A.....	135
Figura 122 - Diferenças entre as cargas realizadas pelo método Reflex e CC-CV (parcial e completa) com corrente inicial de 1,62A.....	136
Figura 123 - Diferenças entre as cargas realizadas pelo método Reflex a 3Hz e CC-CV completa com corrente inicial de 1,35A.....	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de tensão para monitoramento do estado de carga (bateria UP1270SEG)	43
Tabela 2 – Comparativo entre os diferentes métodos de carga	50
Tabela 3 - Parâmetros para o projeto do conversor bidirecional	61
Tabela 4 - Equações do conversor bidirecional: modo <i>Buck</i>	62
Tabela 5 - Resultado do cálculo da indutância do conversor bidirecional	62
Tabela 6 - Equações das perdas nos MOSFETs do conversor	63
Tabela 7 – Especificações da chave MOSFET	63
Tabela 8 – Equações para o projeto físico do indutor	64
Tabela 9 – Especificações técnicas da bateria utilizada nos ensaios	81
Tabela 10 - Tempo dos pulsos para carga da bateria com o método Reflex em 1Hz e nível de corrente em 0,1C	88
Tabela 11 - Tempo dos pulsos para carga da bateria com o método Reflex em 3Hz e nível de corrente em 0,1C	89
Tabela 12 - Tempo dos pulsos para carga da bateria com o método Reflex em 5Hz e nível de corrente em 0,1C	91
Tabela 13 - Tempo dos pulsos para carga da bateria com o método Reflex em 10Hz e nível de corrente em 0,1C	92
Tabela 14 - Tempo dos pulsos para carga da bateria com o método Reflex em 20Hz e nível de corrente em 0,1C	94
Tabela 15 - Tempo dos pulsos para carga da bateria com o método Reflex em 40Hz e nível de corrente em 0,1C	95
Tabela 16 - Tempo dos pulsos para carga da bateria com o método Reflex em 80Hz e nível de corrente em 0,1C	97
Tabela 17 - Dados provenientes dos ensaios de carga dos métodos Reflex e CC-CV	126
Tabela 18 - Comparação entre os ensaios pelo método Reflex dos dois extremos de correntes: 900mA e 1,62A a 3Hz	130
Tabela 19 - Comparação entre os ensaios pelo método CC-CV Parciais dos dois extremos de correntes: 900mA e 1,62A	131
Tabela 20 - Comparação entre os ensaios pelo método CC-CV Completos dos dois extremos de correntes: 900mA e 1,62A	132
Tabela 21 - Melhores resultados dos ensaios realizados com a corrente inicial de 900mA pelo método Reflex e CC-CV	133

Tabela 22 - Melhores resultados dos ensaios realizados com a corrente inicial de 1,35A pelo método Reflex e CC-CV	134
Tabela 23 - Melhores resultados dos ensaios realizados com a corrente inicial de 1,62A pelo método Reflex e CC-CV	135
Tabela 24 - Comparação entre o método CC-CV (C) e o método Reflex a 3Hz com corrente inicial de 1,35A	136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico para Digital
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CC-CC	Conversor de corrente contínua para corrente contínua
CI	Circuito Integrado
DSC	<i>Digital Signal Controller</i>
FTMA	Função de Transferência de Malha Aberta
FTMF	Função de Transferência de Malha Fechada
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PI	Proporcional Integral
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SOC	<i>State Of Charge</i>
SOH	<i>State Of Health</i>
THT	<i>Through Hole Technology</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A_e	Área da perna central do núcleo
A_w	Área de janela do núcleo
C_{min}	Capacitância mínima
C_{Ah}	Capacidade efetiva da bateria
$C1_{(s)}$	Controlador com ganho unitário
I_o	Corrente de saída nominal
I_{o_min}	Corrente de saída mínima
I_{o_max}	Corrente de saída máxima
I_p	Corrente de pico
I_{D_ef}	Corrente eficaz no diodo
I_{D_max}	Corrente máxima do diodo
I_{D_med}	Corrente média no diodo
I_{M_ef}	Corrente eficaz do MOSFET
I_{M_max}	Corrente máxima do MOSFET
l_g	Distância do entreferro
k	Fator de ocupação do enrolamento de cobre dentro do carretel
F_s	Frequência de comutação do conversor
F_c	Frequência de corte
$FTMA_{(s)}$	Função de transferência em malha aberta
$G_{PWM_{(s)}}$	Ganho do bloco PWM
SI	Ganho do sensor de corrente
$F_{SI_{(s)}}$	Ganho do filtro de corrente
G_{AD}	Ganho analógico digital unitário
L_{min}	Indutância mínima
B_{max}	Indução magnética máxima
T_s	Período de comutação
P_w	Perdas no enrolamento de cobre do indutor
P_v	Perdas no núcleo de ferrite do indutor
P_T	Perdas totais no indutor
μ_o	Permeabilidade magnética do ar
Δ_T	Período de tempo

$I_{d(s)}$	Planta de corrente do conversor
D	Razão cíclica do conversor
D_{max}	Razão cíclica máxima
D_{min}	Razão cíclica mínima
R_{ds}	Resistência de condução do MOSFET
R_T	Resistência térmica do núcleo de ferrite
R_{Fio}	Resistência do indutor
V_{In}	Tensão de entrada
$V_{i_{min}}$	Tensão mínima de entrada
$V_{i_{max}}$	Tensão máxima de entrada
V_F	Tensão média de queda do diodo
V_o	Tensão média de saída do conversor
V_r	Tensão de ondulação (<i>ripple</i>)
v_{ref}	Tensão de referência

SÍMBOLOS USADOS PARA REFERENCIAR ELEMENTOS DE CIRCUITOS

C	Capacitor
D	Diodo
L	Inductor
R	Resistor
S	Interruptor
Q	Interruptor

SÍMBOLOS DE UNIDADES DE GRANDEZAS FÍSICAS

A	Ampère
C	Coulomb
F	Faraday
H	Henry
J	Joule
V	Volt
W	Watt
Ω	Ohm

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	26
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	26
2	FONTE DE ENERGIA ININTERRUPTA	29
2.1	ASPECTOS CONSTRUTIVOS DE UMA UPS.....	29
2.1.1	Retificador carregador de bateria	30
2.1.2	Bateria ou banco de baterias.....	30
2.1.3	Inversor	30
2.1.4	Chave estática ou <i>by-pass</i>	31
2.2	MODOS DE OPERAÇÃO DE UMA UPS	31
2.2.1	UPS <i>off-line</i> ou <i>stand-by</i>.....	31
2.2.2	UPS <i>line interactive</i>	32
2.2.3	UPS <i>on-line</i>	34
2.3	DISTÚRBIOS DA REDE ELÉTRICA	35
3	BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO	37
3.1	CAPACIDADE DA BATERIA	39
3.2	VIDA ÚTIL	39
3.3	ESTADO DE CARGA (SOC) E ESTADO DE SAÚDE (SOH)	41
3.4	MODELAGEM DAS BATERIAS.....	42
3.5	NÍVEIS DE TENSÃO	43
3.6	NÍVEIS DE CORRENTE.....	43
3.7	TEMPERATURA.....	44
4	MÉTODOS DE CARREGAMENTO DE BATERIA.....	45
4.1	PRINCIPAIS MÉTODOS DE CARGAS DE BATERIAIS	45
4.1.1	Métodos convencionais	45
4.1.1.1	<i>Método de Corrente Constante</i>	46

4.1.1.2	<i>Método de tensão constante</i>	46
4.1.1.3	<i>Método de corrente constante e tensão constante</i>	47
4.1.2	Métodos não convencionais	48
4.1.2.1	<i>Método por pulsos de corrente</i>	48
4.1.2.2	<i>Método Reflex</i>	49
4.2	COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE CARGA DE BATERIAS	50
5	MÉTODO REFLEX DE CARGA DE BATERIA	53
5.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESCOLHA E A IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO	53
5.2	DEFINIÇÃO DA TOPOLOGIA DO CONVERSOR	54
5.3	ETAPAS DE FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR.....	56
5.3.1	Operação modo <i>Buck</i>	57
5.3.2	Operação modo <i>Boost</i>	58
5.3.3	Operação no intervalo de descanso (ID)	59
6	PROJETO DO CONVERSOR	61
6.1	DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR.....	61
6.1.1	Parâmetros básicos do projeto	62
6.1.2	Chaves eletrônicas	62
6.1.3	Indutor	64
6.2	CIRCUITOS ELETRÔNICOS	65
6.2.1	Microcontrolador	66
6.2.2	Circuito de potência	66
6.2.3	Gate drivers	67
6.2.4	Circuito de medição de corrente	68
6.2.5	Circuito de medição de tensão	68
6.3	PROJETO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	69
6.3.1	Disposição dos circuitos na PCI de potência	70

6.4	CONTROLE DO SISTEMA	73
6.5	PROJETO DO CONTROLADOR	74
6.5.1	Requisitos de projeto	74
6.5.1.1	<i>Modulador PWM</i>	75
6.5.1.2	<i>Sensor de corrente e filtro anti-aliasing</i>	75
6.5.2	Controlador	75
6.5.2.1	<i>Discretização do controle</i>	78
6.6	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	78
7	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	81
7.1	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DA BATERIA	81
7.2	ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO MÉTODO REFLEX.....	82
7.2.1	Aplicação do método diretamente à bateria	82
7.3	ENSAIOS DE CARGA DA BATERIA COM O MÉTODO REFLEX.....	86
7.3.1	Ensaio de carga com o método Reflex com nível de corrente em 0,1C.....	87
7.3.2	Ensaio de carga com o método Reflex com nível de corrente em 0,15C.....	98
7.3.3	Ensaio de carga com o método Reflex com nível de corrente em 0,18C.....	106
7.4	ENSAIOS DE CARGA DA BATERIA COM O MÉTODO CC-CV.....	113
7.4.1	Ensaio de carga com o método CC-CV com nível de corrente em 0,1C – Parcial	114
7.4.2	Ensaio de carga com o método CC-CV com nível de corrente em 0,1C – Completo	115
7.4.3	Ensaio de carga com o método CC-CV com nível de corrente em 0,15C – Parcial	117
7.4.4	Ensaio de carga com o método CC-CV com nível de corrente em 0,15C – Completo.....	118
7.4.5	Ensaio de carga com o método CC-CV com nível de corrente em 0,18C – Parcial	119

7.4.6	Ensaio de carga com o método CC-CV com nível de corrente em 0,18C – Completo.....	121
7.4.7	Ensaio de carga com o método CC-CV e UPS comercial – Ensaio Parcial....	122
7.4.8	Ensaio de carga com o método CC-CV e UPS comercial – Ensaio Completo	124
7.5	ANÁLISE DOS ENSAIOS	125
8	CONCLUSÕES GERAIS	139
8.1	POSSIBILIDADES PARA TRABALHOS FUTUROS	140
	REFERÊNCIAS	141
	ANEXO A - CATÁLOGO BATERIA 12V 9Ah – BAT 0090122.....	146

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de alimentação ininterrupta de energia, do inglês UPS (*Uninterruptible Power Supply*), vêm sendo procurados e aplicados pelas mais diversas áreas da indústria, hospitais, data centers, sistemas de telecomunicação, residências, entre outros. Essa demanda se justifica pois alguns equipamentos não podem ter seu funcionamento interrompido, o que pode acarretar, em alguns casos, danos irreversíveis. Para além da capacidade de fornecer energia em caso de interrupção por um período limitado de tempo, as UPS podem corrigir outros eventos de rede como sobretensões, variações de tensão, ruídos, instabilidade de frequência ou distorção harmônica.

Considerando sua aplicação, a confiabilidade de uma UPS é elemento essencial, uma vez que, na maioria dos casos, é empregada em dispositivos que não aceitam a falta de energia provenientes da rede elétrica comercial. Como exemplo comum, pode-se citar a dependência de equipamentos médicos para garantir a sobrevivência de pacientes.

A necessidade da confiabilidade do produto faz com que seja necessária a pesquisa permanente por tecnologias que possam aumentar a densidade de potência, eficiência e autonomia de todo o sistema. Dentre os componentes críticos que compõem uma UPS, há destaque para a bateria utilizada. É comum a utilização de baterias estacionárias de chumbo-ácido (LAZZARIN, 2006; CARLETTE e SANTOS, 2017), porém, observam-se dois problemas no uso destas baterias: um eventual processo inadequado da carga pode gerar uma recarga que seja insuficiente à bateria ou ao banco de baterias, reduzindo sua autonomia quando for exigida sua operação e, por segundo, a redução de sua vida útil devido à recarga com níveis inadequados de tensão, variações na temperatura de operação, descargas profundas e problemas de sulfatação.

Há diferentes topologias de UPS que podem ser abordadas durante o desenvolvimento de um projeto (PINHEIRO, 2007), cada qual com suas próprias características, vantagens e desvantagens, que devem ser consideradas de acordo com a aplicação do sistema. Tem-se observado como uma característica comum dos sistemas que procuram utilizar de novas tecnologias a busca por soluções que atendam a melhor relação entre custo, eficiência e autonomia. A compreensão dos métodos de carga existentes é um processo fundamental para que seja possível a implantação de um método de carga que melhore a vida útil das UPS.

Tendo em vista este contexto, a pesquisa encontra-se delimitada no estudo de um método de carga capaz de carregar rapidamente a bateria, buscando minimizar o impacto de problemas que comumente são observados nos processos de carga. Para isso, os ensaios

propostos encontram-se direcionados à análise do método de carregamento de uma bateria de chumbo-ácido de 12V/9A e, dentre os métodos possíveis de serem utilizados em uma bateria com essa tecnologia, fez-se a opção pelo método de carga Reflex.

A escolha deste método levou em consideração, ainda, a carência de pesquisas acerca de seu uso, bem como a constatação, em estudos já realizados, de algumas contradições na forma de sua aplicação. Os ensaios propostos neste trabalho visam comparar o método Reflex com o método de carga convencional de CC-CV (corrente constante e tensão constante).

1.1 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Em um cenário onde se projeta a ampliação da presença de UPS em equipamentos de uso cotidiano, é preciso investir em estudos que venham ao encontro das necessidades dos usuários e também agreguem valor aos fabricantes. Para tal, faz-se necessário considerar tanto a funcionalidade desses equipamentos como a importância da manutenção da integridade da bateria, que se constitui um dos principais componentes do sistema.

A partir do estudo de diferentes métodos de carga de baterias de chumbo-ácido usualmente recomendados pelos fabricantes, a presente pesquisa busca estabelecer uma relação comparativa entre o método convencional CC-CV e o método de carga Reflex que, teoricamente, apresenta-se como mais rápido no processo de carga da bateria e traz benefícios à vida útil desta. Por meio de um conversor CC-CC bidirecional em corrente, o estudo tem a intenção de, a partir da aplicação do método Reflex, validar essa comparação através de ensaios em bancada. Estes ensaios estarão direcionados ao encontro da melhor frequência para os pulsos, aplicando-se também níveis de correntes médias diferentes à bateria desde o início do processo de carga, visando o menor tempo de carga possível e respeitando as características técnicas da bateria.

Dentre as contribuições também destacam-se que a mesma plataforma permite a realização dos ensaios pelo método Reflex e CC-CV até o limite de 1,62A e a utilização de uma UPS comercial para comparação dos resultados na corrente inicial de 900mA.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho encontra-se estruturado em 8 capítulos, sendo este, introdutório, o primeiro deles.

Uma contextualização sobre as fontes de energia ininterruptas é apresentada no Capítulo 2, onde são abordados os aspectos construtivos da UPS, seus modos de operação, bem como os distúrbios gerados pela rede elétrica.

O terceiro capítulo corresponde a bateria de chumbo-ácido, detalhando suas peculiaridades e condições de operação.

Na sequência, o Capítulo 4 apresenta a análise da revisão bibliográfica dos principais métodos de carga, compreendendo os métodos convencionais e os métodos não convencionais. Ao final deste capítulo faz-se uma síntese comparativa entre as vantagens e desvantagens de cada método.

No Capítulo 5 há o detalhamento do método de carga proposto para esta pesquisa, assim como as considerações sobre a escolha e a topologia do conversor empregado e as etapas de funcionamento do mesmo.

Após a apresentação do Estado da Arte acerca da temática que permeia este estudo experimental nos capítulos iniciais, tem-se no Capítulo 6 o projeto do conversor, onde são apresentados os seus parâmetros e os passos para o dimensionamento dos seus principais componentes, como: indutor e chaves eletrônicas. Além disso, são apresentados os demais circuitos que também deram origem ao protótipo desenvolvido para este estudo. O projeto do controle do sistema e a simulação do método proposto também se encontram descritos neste capítulo.

No Capítulo 7 são apresentados os resultados obtidos experimentalmente pelo método de carga Reflex e pelo método convencional de CC-CV.

Por fim, tem-se no Capítulo 8 uma análise dos resultados obtidos a partir dos objetivos inicialmente propostos para a pesquisa, caracterizando-se como as conclusões gerais do trabalho. Neste capítulo também constam possibilidades para a continuidade dessa pesquisa em trabalhos futuros.

2 FONTE DE ENERGIA ININTERRUPTA

Uma fonte de energia ininterrupta, também chamada de UPS ou Nobreak, consiste em um sistema de alimentação que tem como objetivo fornecer energia estabilizada quando há interrupção ou falhas na fonte primária. Para garantir esse fornecimento há necessidade de um sistema de armazenamento de energia independente, sendo as baterias o tipo mais utilizado nas UPS (SCHUCH et al, 2004).

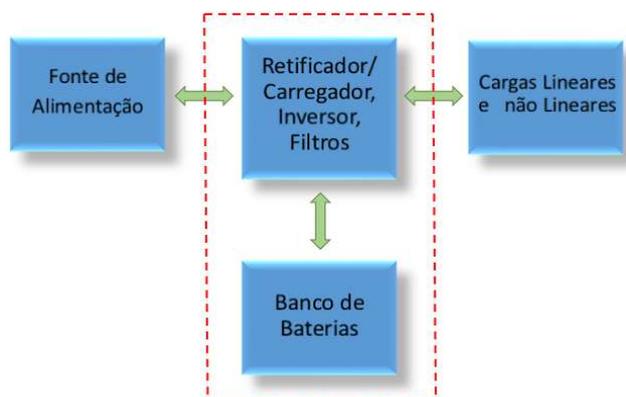
Além de garantir o fornecimento de energia em situações de interrupção, alguns modelos de UPS podem corrigir outros problemas de rede como variações de tensão, ruídos, instabilidade de frequência ou distorção harmônica. Por essas características, as UPS são comumente empregadas em computadores e outros eletrônicos, evitando o desligamento brusco no caso de falhas e garantindo um tempo de funcionamento quando da ausência de energia.

Este capítulo apresenta a composição de uma UPS e seus principais modos de operação.

2.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DE UMA UPS

Conforme (APOLINÁRIO, 2017), a composição de uma UPS contempla: um circuito retificador que converte a tensão alternada em tensão contínua para alimentação do inversor, um carregador de baterias para realizar a recarga do banco de baterias, um banco de baterias que é responsável pelo armazenamento da energia utilizada para alimentar a carga durante falhas da rede elétrica, um circuito inversor de tensão que converte a tensão contínua proveniente do retificador ou banco de baterias em tensão alternada para alimentar a carga, e uma chave estática ou *bypass* que transfere a carga para a rede de entrada da UPS em caso de falha no sistema, ou para a realização dos processos de manutenção preventiva ou corretiva. A Figura 1 ilustra um diagrama de blocos simplificado com a composição da UPS.

Figura 1 – Diagrama de blocos simplificado com a composição da UPS



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Outros componentes como supressores de surto, transformadores isoladores e filtros de linha também são comumente utilizados na UPS.

As próximas subseções deste capítulo apresentam, a partir do estudo realizado por (GONÇALVES, 2008), uma breve descrição da funcionalidade dos principais componentes de uma UPS.

2.1.1 Retificador carregador de bateria

O retificador é um circuito que realiza a conversão da energia elétrica de corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC), a fim de entregar à bateria uma tensão CC, com nível de ondulação (*ripple*) o menor possível. Dependendo do tipo de UPS, o retificador e o carregador são conversores independentes.

2.1.2 Bateria ou banco de baterias

As baterias são essenciais para o objetivo final da UPS, tendo em vista que na hipótese de falha da rede ou interrupção da energia, a bateria supre, por meio do inversor, a energia necessária para manter o funcionamento adequado da carga.

2.1.3 Inversor

O inversor é um circuito que realiza a conversão de energia CC em CA para entregar à carga uma tensão de valor eficaz e frequência determinadas. A forma de onda da tensão entregue à carga depende do tipo de inversor e da tecnologia empregada na conversão.

2.1.4 Chave estática ou *by-pass*

É o dispositivo responsável pela transferência de uma ou mais cargas conectadas a uma fonte de energia principal (rede de energia CA) para outra fonte de energia secundária. A chave de transferência pode ser tanto automática quanto manual.

A UPS pode utilizar a chave manual para fins de manutenção e/ou automática para realizar o chaveamento entre a rede de energia CA e as baterias, mas também é acionada para fins de proteção da UPS.

2.2 MODOS DE OPERAÇÃO DE UMA UPS

Os três principais modos de operação de uma UPS são: *off-line*, *line interactive* e *on-line*. A descrição do funcionamento de cada um desses modos é detalhada nas subseções que seguem.

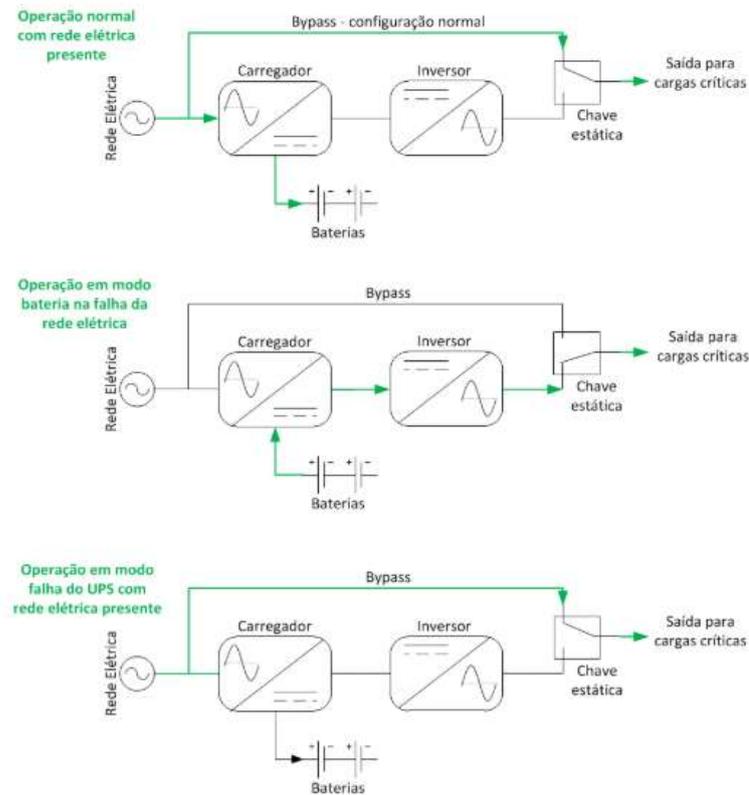
2.2.1 UPS *off-line* ou *stand-by*

Conforme ilustrado no diagrama simplificado da Figura 2, o sistema ininterrupto off-line, também conhecido como *stand-by*, é composto por uma chave de transferência, carregador de baterias, banco de baterias e inversor.

A chave de transferência está programada para selecionar a entrada CA como fonte de energia primária, e comutar para o modo de bateria/inversor como fonte alternativa caso exista um defeito na fonte primária por interrupção. Quando isto acontece, a chave de transferência deve comutar a carga para a fonte de energia alternativa de bateria/inversor. O inversor só liga no caso de falta de energia.

As principais vantagens deste modo são a reduzida quantidade de elementos, simplicidade, alto rendimento e baixo custo; no entanto como desvantagens citam-se a não regulação da tensão na carga, tempo de transferência dependente das características da chave, a forma de onda de saída que geralmente é quadrada e o baixo desempenho frente a cargas não lineares (BEKIAROV; STOYAN, 2002)

Figura 2 – UPS do modo off-line



Fonte: (SCHNEIDER ELETRIC, 2017)

Caso ocorra uma falha da rede, a chave de transferência desconecta a carga da rede e a conecta ao inversor, passando desta forma às baterias, que suprem a energia para a carga. Esta comutação entre rede e inversor pode ocasionar danos a alguns tipos de cargas devido ao tempo de interrupção de energia.

2.2.2 UPS *line interactive*

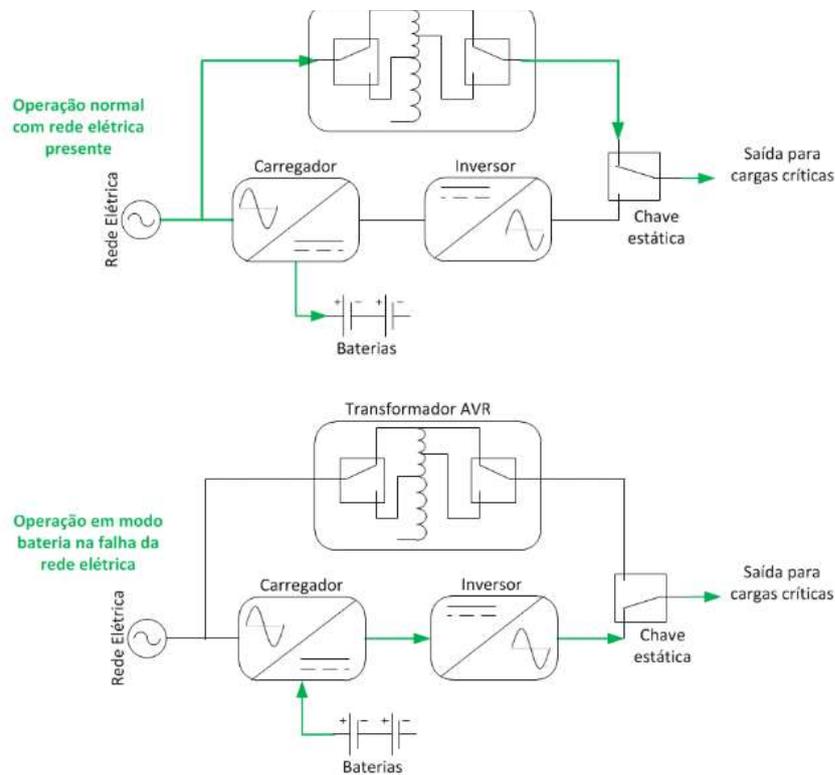
Neste modo de operação, que encontra-se ilustrado na Figura 3, o conversor está sempre ligado, porém, fazendo a função de carregador de bateria. Quando a alimentação de entrada falha (por interrupção, sobretensão ou subtensão), a chave de transferência comuta e transfere o fluxo de energia da bateria para o inversor que alimenta a carga. Esse modo de operação costuma incorporar um transformador com variação de *taps* (estabilizador de tensão). Isto acrescenta a função de controle de tensão mediante o ajuste dos *taps* do transformador na medida em que a tensão de entrada sofre variações.

O controle da tensão é uma característica importante quando há condições de baixa tensão, sem ele, a UPS transferiria a carga para a bateria e eventualmente diminuiria sua carga.

O uso mais frequente da bateria pode provocar falha prematura do sistema. Porém, o inversor também pode ser projetado de maneira tal que, mesmo falhando, permita que a energia flua da entrada CA para a saída, o que elimina a possibilidade de pontos únicos de falha e estabelece de maneira eficaz dois circuitos de energia independentes.

Faz-se necessário ressaltar que, assim como na configuração anterior, este modo de operação também tem um intervalo de tempo que não alimenta a carga.

Figura 3 – UPS do modo line interactive



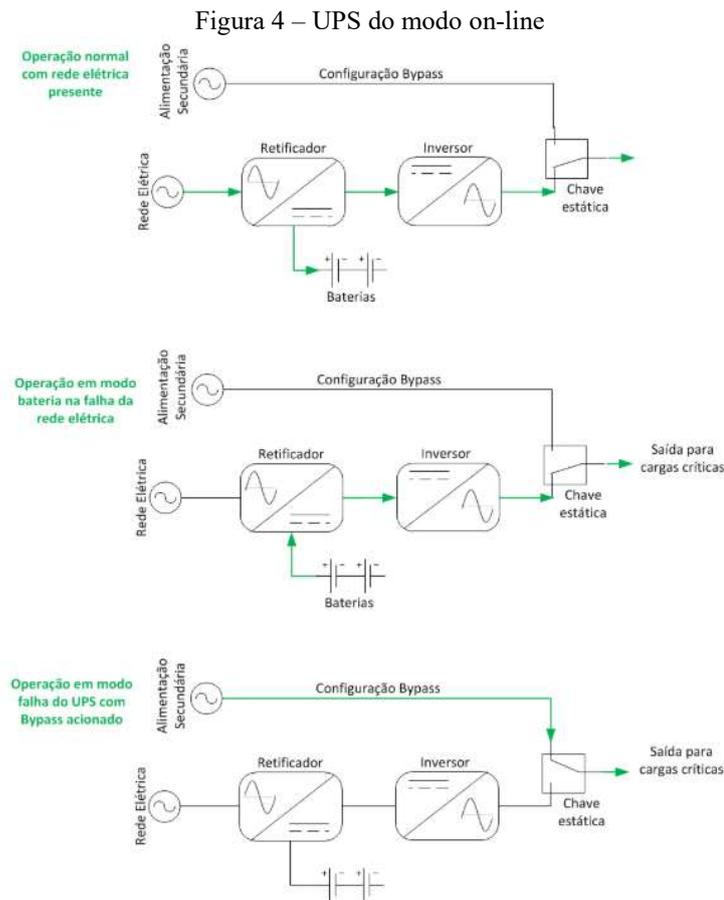
Fonte: (SCHNEIDER ELETRIC, 2017)

As dimensões reduzidas e o baixo custo aliados a alta confiabilidade e capacidade de corrigir variações na entrada CA são as vantagens desse modo de operação. As principais desvantagens são a não regulação da frequência de saída e o uso da bateria em excesso quando não se tem um estabilizador para as correções das variações na entrada CA. Outra desvantagem a pontuar é a não isolação da carga frente à rede elétrica (BEKIAROV; STOYAN, 2002).

2.2.3 UPS *on-line*

Conforme ilustrado na Figura 4, o sistema ininterrupto do modo on-line, também conhecido como sendo de dupla conversão, não possui chave de transferência e é composto por um conversor (primeira conversão) responsável por carregar o banco de baterias e alimentar o conversor CC-CA de tensão (segunda conversão).

É aplicado em cargas críticas nas quais há exigência de maior confiabilidade e menor tolerância a falhas. Isto só é possível porque não ocorre o chaveamento da carga para o inversor, porque neste modo de operação o inversor trabalha constantemente ativo alimentando a carga, ora através do circuito retificador (com a rede elétrica presente), ora através do banco de baterias (rede elétrica ausente). Portanto, durante falhas na entrada CA (por interrupção, sobretensão, subtensão, distorção, harmônicas, surtos, ruídos, etc) a operação não registra tempo de transferência.



Fonte: (SCHNEIDER ELETRIC, 2017)

Como principais vantagens destaca-se a regulação da tensão e da frequência de saída que são precisas, o tempo de transferência inexistente e a proteção da carga pelo circuito inversor. Como desvantagem, (KARVE, 2000) menciona a complexidade elevada que é consequência do elevado número de estágios e aumento de custo, além do baixo rendimento por possuir dois conversores em série e o fato de processar energia permanentemente.

2.3 DISTÚRBIOS DA REDE ELÉTRICA

Os distúrbios na qualidade da energia elétrica e sua relação com os equipamentos susceptíveis a danos e/ou interrupção no funcionamento tem ocasionado grande preocupação na indústria, em estabelecimentos comerciais e em residências. De acordo com (DUGAN et al., 2012), dentre as razões que levam esta preocupação aos consumidores, podem ser destacadas:

- Menor robustez e maior sensibilidade de novos equipamentos que possuem uma sofisticada eletrônica de potência;
- Aumento do conteúdo harmônico no sistema elétrico local, em decorrência do elevado número de cargas eletrônicas;
- Um maior entendimento por parte do usuário final quanto às causas e fenômenos que promovem distúrbios na qualidade da energia elétrica; e
- A interligação de processos que implica na confiabilidade e garantia da operação de todos os equipamentos em um dado processo.

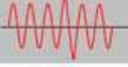
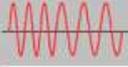
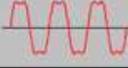
Os estudos realizados por (APOLINÁRIO, 2017) apontam que os distúrbios são muito comuns e podem ser ocasionados por eventos da natureza (tempestades ou raios), acidentes (quedas de árvores ou de postes), defeitos ou manutenção nos equipamentos das concessionárias ou distribuidoras de energia, sobrecarga da rede elétrica ou remanejamento de carga e infraestrutura elétrica deficiente ou inadequada. No entanto, conforme este autor, apesar das diferentes causas, de modo geral, observa-se o incremento na produtividade como sendo o principal elemento impulsionador das razões citadas.

Considerando o incremento crescente observado na capacidade produtiva das indústrias, com uso cada vez maior de equipamentos que tem sua funcionalidade dependente da rede elétrica, é preciso pensar em alternativas que minimizem o impacto que a interrupção ou oscilações de energia causam. Cabe ressaltar, de acordo com (APOLINÁRIO, 2017), que além das falhas perceptíveis, existem também outros problemas da rede elétrica que não são visivelmente detectados, mas que também prejudicam estes equipamentos.

Conforme estabelecido em norma específica, as UPS podem corrigir tais distúrbios inerentes ao seu modo de operação, haja vista que uma de suas finalidades é proteger cargas críticas contra perturbações (FUENTES; PINHEIRO, 2000). Em relação a estes distúrbios, (GUERRERO, 2007), descreve como sendo os principais: interrupção (*outage*, ou *blackouts*), afundamento instantâneo de tensão (*sags*, ou *dip*), elevação instantânea de tensão (*surge*), afundamento momentâneo de tensão (*brownouts*), elevação momentâneo de tensão (*swell*), transitório impulsivo (*spikes*), variação na frequência, ruídos, e distorção harmônica.

Apresenta-se na Figura 5 a classificação dos distúrbios na qualidade de energia mais comuns a serem solucionados em função da categoria de cada UPS. Observa-se que os problemas listados possuem uma dependência com a tensão e frequência na saída, de modo que uma dada categoria possa suprimir uma maior quantidade de distúrbios, em detrimento a categoria anterior. As soluções contempladas com o benefício do modo de operação on-line, conforme (APOLINÁRIO, 2017) oferecem uma maior confiabilidade e robustez do equipamento, em vista a supressão dos nove tipos de distúrbios apresentados na referida figura.

Figura 5 - Principais distúrbios apresentados na rede elétrica

Problema (Distúrbio)	Forma de onda	Stand-by	Interativo	On-line
1) interrupção (<i>outage</i> , ou <i>blackouts</i>)		✓	✓	✓
2) afundamento instantâneo de tensão (<i>sags</i> , ou <i>dip</i>)			✓	✓
3) elevação instantânea de tensão (<i>surge</i>)			✓	✓
4) afundamento momentâneo de tensão (<i>brownouts</i>)			✓	✓
5) elevação momentâneo de tensão (<i>swell</i>)			✓	✓
6) transitório impulsivo (<i>spikes</i>)				✓
7) variação na frequência				✓
8) ruídos				✓
9) distorção harmônica				✓

Fonte: Adaptado de (APOLINÁRIO, 2017)

3 BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO

Em 1859, 60 anos após as descobertas da Célula Galvânica por Alessandro Volta, Gaston Planté realiza a demonstração prática da primeira bateria composta por eletrodos de chumbo imersos em solução ácida (eletrólito de ácido sulfúrico), capaz de sofrer polarização por uma fonte externa e cuja propriedade característica mais importante era sua reversibilidade do estado de carga. Entretanto, a falta de sistemas eficientes de carga não permitiu que as baterias tivessem aplicações práticas até o desenvolvimento do dínamo em 1886 (CHAGAS, 2007).

Desde então, outros modelos de armazenadores de energia foram desenvolvidos, como, por exemplo, as baterias alcalinas de níquel-cádmio. Todavia, o tipo chumbo-ácido ainda se mantém como solução econômica mais adequada às necessidades de consumidores em diversos ramos, desde veículos de combustão interna, até sistemas ininterruptos de energia. De acordo com (OLIVEIRA, 2016) essa preferência pode ser justificada pelo fato delas se destacarem das demais não somente pelo baixo custo por unidade de potência e energia, mas também por, diferentemente das baterias alcalinas, não estarem sujeitas facilmente ao efeito memória.

A bateria é um dispositivo eletroquímico e, como tal, apresenta a capacidade de armazenar de forma reversível energia química em energia elétrica. Ainda que as baterias sejam a melhor opção em armazenamento de energia atualmente, existem muitas melhorias a serem feitas. Diversas pesquisas são realizadas com a intenção de descobrir novos elementos que forneçam a elas melhores características elétricas. Dentre as características principais, faz-se necessário o aprimoramento da densidade de energia, tempo de vida útil, capacidade e tempo de recarga. Esse aprimoramento decorre do fato de que, nas aplicações recentes, como os veículos elétricos e os sistemas de energia estacionários, essas características interferem no avanço tecnológico das baterias (OENING, 2017).

Os tipos de bateria existentes podem ser classificados de acordo com sua finalidade. No caso de UPS, de acordo com a norma IEEE 1184 (2006), *Guide for Batteries for Uninterruptible Power Supply Systems*, os tipos de baterias recomendados são listados a seguir:

- Chumbo-ácida ventilada (VLA – *Vented lead-acid*);
- Chumbo-ácida regulada por válvula (VRLA – *Valve-regulated lead-acid*)
- Níquel – Cádmio ventilada (*Vented Ni-Cd*);
- Níquel – Cádmio selada (*Sealed Ni-Cd*)

Apesar da recomendação dos tipos acima listados, (LEÃO et al, 2010) ressalta que as baterias de chumbo-ácido ainda são as mais utilizadas nos sistemas de UPS, sendo também empregadas em sistemas fotovoltaicos e automotivos.

Esse tipo de bateria ainda está presente em muitas aplicações e também deve movimentar um mercado de aproximadamente 85 bilhões de dólares até 2025 (GRAND VIEW RESEARCH, 2020), sendo cerca de 10% das baterias fabricadas com essa composição destinadas aos sistemas de UPS.

Na Figura 6 tem-se o modelo da bateria de chumbo-ácido que se constitui o objeto de estudo desta pesquisa. Suas especificações são apresentadas de modo detalhado no catálogo disponível no Anexo I.

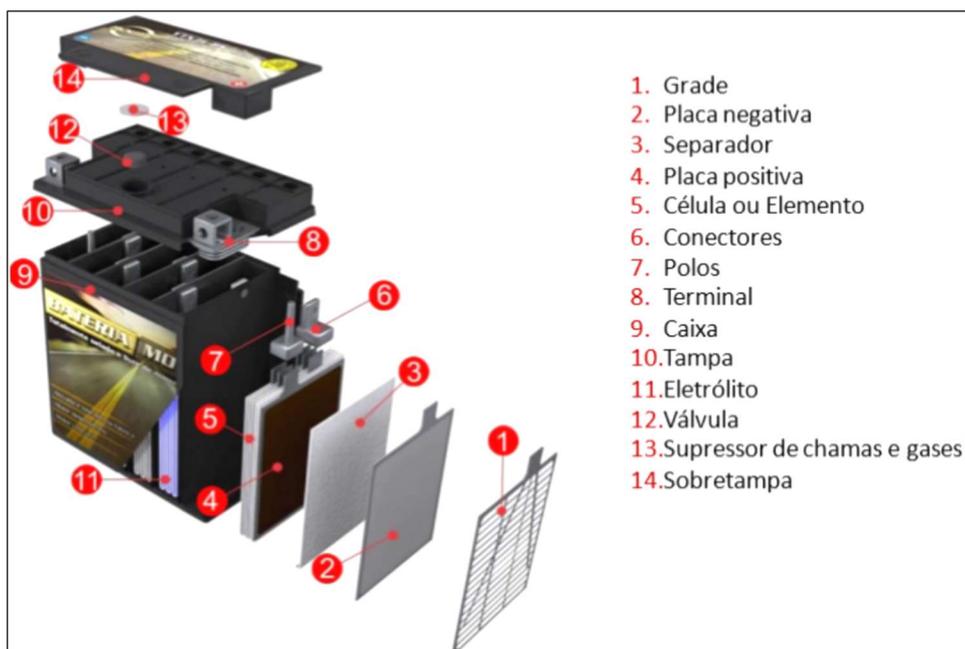
Figura 6 - Bateria de chumbo-ácido selada regulada por válvula de 12V 9Ah (BAT 0090122)



Fonte: WEG, 2020

A bateria de chumbo-ácido selada regulada por válvula é composta, basicamente, por catorze elementos. Seu aspecto construtivo, com a visualização desses elementos, é detalhado nos estudos realizados por (CARNEIRO et. al, 2019), sendo apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Aspecto construtivo de bateria de chumbo-ácido regulada por válvula



Fonte: (CARNEIRO et. al, 2019)

3.1 CAPACIDADE DA BATERIA

A capacidade é a carga elétrica total com que uma bateria pode ser carregada ou descarregada sob condições específicas, tendo como unidade de medida Ampere-hora (Ah). De acordo com (SERÔDIO, 2018), normalmente, a capacidade é medida em coulomb (C), mas no que diz respeito às baterias, Ah é a unidade a ser utilizada. Isso está relacionado ao fato de que na área da eletricidade, a quantidade de energia é obtida normalmente em Watt-hora (Wh).

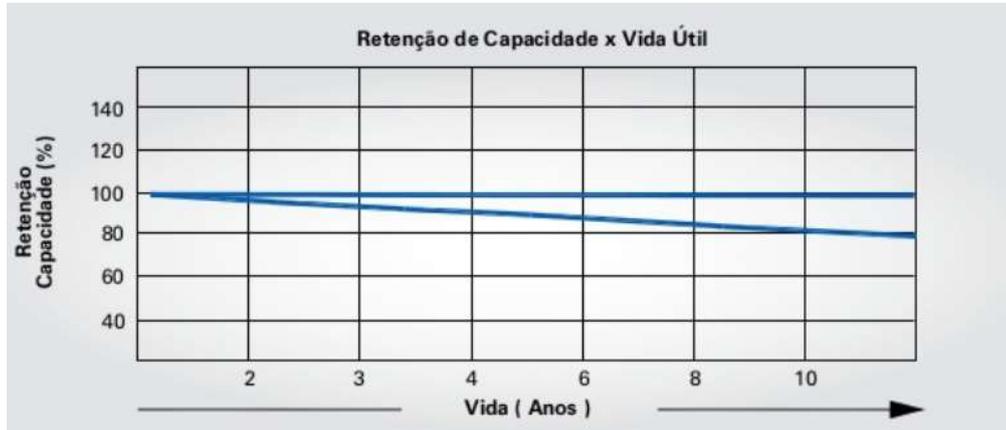
Na obtenção da capacidade, esta pode ser influenciada por vários parâmetros como por exemplo: temperatura da bateria, corrente de descarga, como for efetuado o processo de descarga, idade da bateria e o seu estado de carga (SoC) (BOSCH, 2007).

3.2 VIDA ÚTIL

É considerado que uma bateria de chumbo-ácido chega ao final de sua vida útil quando atinge 80% de sua capacidade nominal (CARDOSO, 2016). Inúmeros fatores podem influenciar na abreviação deste tempo tais como: corrente de carga e descarga, manutenção, temperatura, tensão de flutuação, números de ciclos de carga, ciclos parciais de carga e a idade.

Segundo a fabricante (MOURA, 2019) uma bateria quando submetida a condições normais de operação (temperatura de 25°C e 1,75V/e, mantida em flutuação), pode durar mais que 10 anos, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 - Capacidade x Vida útil da bateria



Fonte: MOURA, 2019

Os estudos desenvolvidos por (CARDOSO, 2016) indicam que o regime de carga e descarga está relacionado à vida útil da bateria pela profundidade com que é submetida, chamado de “grau de descarga”. Esse grau se refere à percentagem da capacidade da bateria com que ela é descarregada e carregada novamente, sendo necessário considerar que a percentagem limite de descarga da capacidade de uma bateria de chumbo-ácido é de 80%.

Conforme é possível observar no gráfico presente na Figura 9, o nível percentual de descarga está diretamente relacionado aos ciclos de carga e descarga da bateria.

Figura 9 – Ciclo de vida x profundidade de descarga

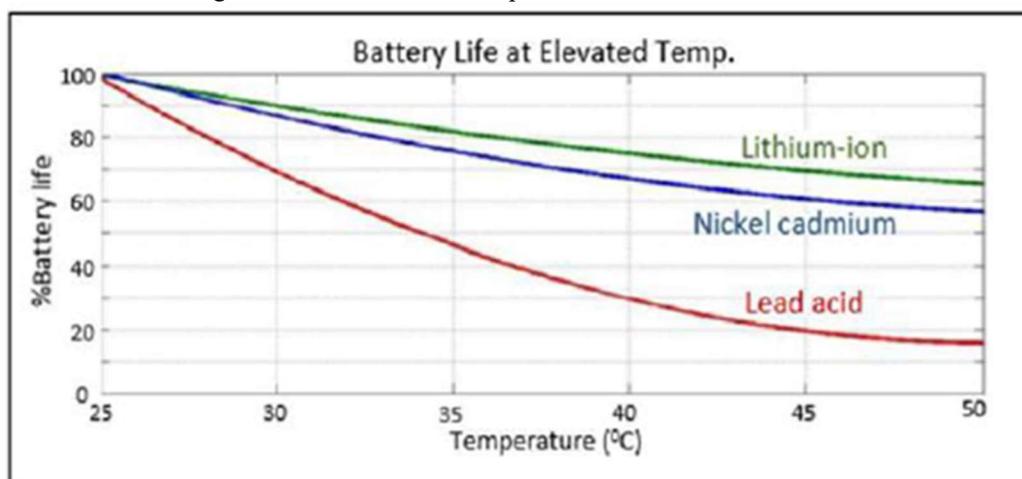


Fonte: CRAL, 2020

A análise do gráfico permite verificar que, quanto menor for o nível de descarga, maior o número de ciclos de carga. Por exemplo, para um grau de descarga de 55% o número de ciclos ficaria em torno de 500 ciclos, enquanto que para um grau de 20%, seriam aproximadamente 1500 ciclos.

O armazenamento da bateria é também um fator a ser considerado na análise de sua vida útil. A orientação padrão dos fabricantes recomenda que toda a bateria seja guardada completamente carregada, em local limpo, seco e bem ventilado a fim de evitar a corrosão das placas e a sulfatação. Há de se considerar, ainda, o impacto do aumento de temperatura na vida útil de diferentes tipos de baterias. Na Figura 10 é possível observar que as baterias de chumbo-ácido são as mais prejudicadas quando submetidas a elevadas temperaturas.

Figura 10 – Influência da temperatura na vida útil das baterias



Fonte: JAMPEETHONG; KHOMFOI, 2015

3.3 ESTADO DE CARGA (SOC) E ESTADO DE SAÚDE (SOH)

O estado de carga (SoC) e o estado de saúde (SoH) de uma bateria são características determinantes para o seu funcionamento.

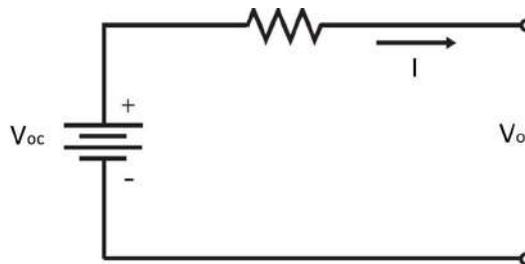
Mais popularmente conhecido em inglês como *State of Charge* (SoC), o estado de carga indica o percentual de energia acumulada na bateria. Baseado nos estudos de (BERGVELD et al, 2002) e (KULARATNA, 2015), (SYLVESTRIN, 2020) define o SoC como o percentual da máxima carga possível que está disponível em uma bateria recarregável. De acordo com este autor, é o nível de SoC que indicará a quantidade de energia que ainda poderá ser retirada de uma bateria respeitando os seus limites de operação.

O estado de saúde da bateria, em inglês denominado como *State of Health* (SoH), é um parâmetro utilizado, principalmente, no caso de sistemas de energia ininterrupta (UPS) ou de emergência. O SoH é uma medida da capacidade que a bateria tem de fornecer a corrente especificada quando solicitada em relação a capacidade nominal. Uma vez que a bateria tenha entrado em uso, o SoH é um fator importante para o acompanhamento do seu desempenho (LINDEN; REDDY, 2001).

3.4 MODELAGEM DAS BATERIAS

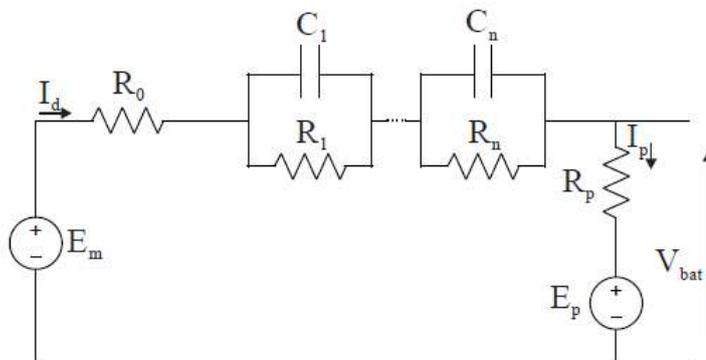
Os modelos matemáticos utilizados para representar as baterias consistem em circuitos elétricos equivalentes. Eles podem ser apresentados desde um modelo mais básico (LORENCETTI, 2018), composto de uma fonte ideal de tensão e uma resistência elétrica, conforme a Figura 11, até um modelo mais complexo que possui uma fonte de tensão, uma resistência e um ou mais ramos de resistores e capacitores em paralelo, conectados em série, como pode ser observado na Figura 12. (ROCHA; RECH, 2020)

Figura 11- Modelo elétrico simplificado da bateria



Fonte: LORENCETTI, 2018

Figura 12 - Modelo elétrico complexo da bateria



Fonte: ROCHA; RECH, 2020

Geralmente a tensão interna da bateria, representada nos circuitos acima por V_{OC} e E_m , possui, além da temperatura e corrente de carga e descarga, relação direta com o seu estado de carga. Porém, a medição desta tensão só pode ser realizada através da tensão terminal da bateria, onde naturalmente deve-se levar em consideração suas perdas internas.

3.5 NÍVEIS DE TENSÃO

Os níveis de tensão na bateria são provenientes de diferentes reações químicas internas manifestadas durante os processos de carga e descarga. Esses níveis possuem relação direta com a densidade do eletrólito (CARDOSO, 2016).

Considerando a influência dessas reações químicas no funcionamento da bateria, existem alguns valores de tensão que variam de acordo com o modelo da bateria e que devem ser verificados com o objetivo de manter suas características originais. A Tabela 1 apresenta um exemplo desses valores, considerando a bateria UP1270SEG da marca Unipower®.

Tabela 1 - Valores de tensão para monitoramento do estado de carga (bateria UP1270SEG)

Estado	Valor (volts por elemento)
Descarregada	1,75 V/e
Flutuação	2,23 V/e
Equalização	2,40 V/e
Sobrecarga	2,70 V/e
Fim de carga	2,65 – 2,70 V/e

Fonte: CARDOSO, 2016

3.6 NÍVEIS DE CORRENTE

As reações químicas que configuram os níveis de tensão existentes em uma bateria são reguladas a partir dos níveis de corrente empregados, o que ocorre tanto para situações de carga quanto de descarga. Essa regulação necessita ser precisamente controlada, haja vista que qualquer alteração, tanto em níveis acima quanto abaixo interferem na vida útil da bateria.

Conforme (CARDOSO, 2016), níveis elevados de recarga, valores acima do estipulado pelos fabricantes, até 25% do valor nominal, ocasionam o superaquecimento dos elementos,

levando a redução da resistência interna da bateria e também a um desprendimento maior de gases. No caso de níveis abaixo dos estipulados, este autor sinaliza que, dependendo do estado de carga da bateria, podem não compensar a autodescarga.

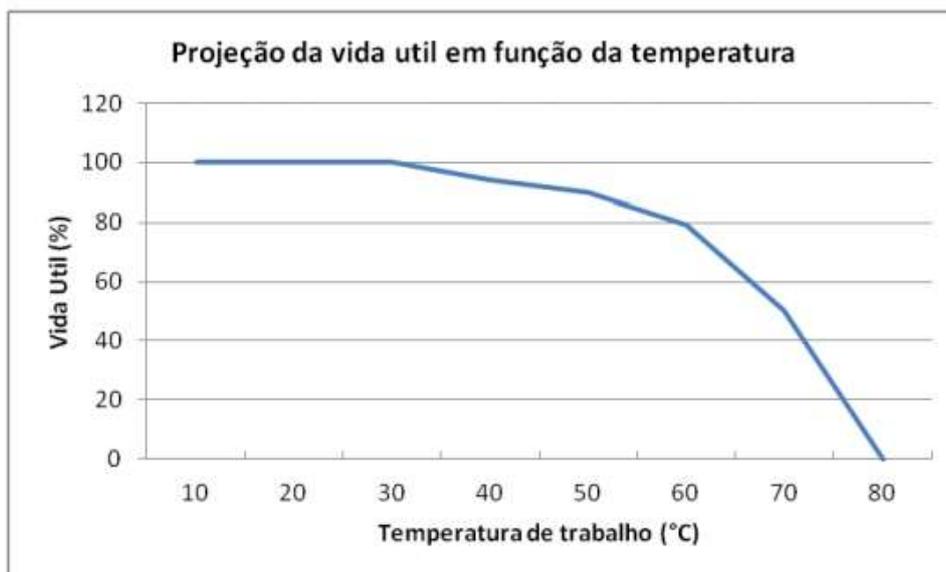
Em contrapartida, nas situações de descarga, a vida útil da bateria sofre influência direta de acordo com o nível de profundidade, uma vez que uma descarga num curto intervalo de tempo com uma alta corrente compromete diretamente sua funcionalidade.

3.7 TEMPERATURA

A temperatura é um elemento que interfere diretamente em reações químicas decorrentes de troca de energia. Tal fato leva a necessidade de monitoramento constante do local em que as baterias são armazenadas ou utilizadas, evitando assim influência deste aspecto em seu desempenho.

Como é possível observar na Figura 13, no caso de temperaturas de trabalhos altas nas baterias de chumbo-ácido estacionárias, a vida útil diminui. Tal fato evidencia a necessidade do monitoramento desta variável, tendo sua vida prolongada em situações de trabalho em temperaturas baixas.

Figura 13 – Projeção da vida útil da bateria de chumbo-ácido Cral® estacionária x temperatura



Fonte: CRAL, 2020.

4 MÉTODOS DE CARREGAMENTO DE BATERIA

O crescente desenvolvimento de aplicações dependentes de fontes de energia para alimentação de seu sistema tem mobilizado indústrias e pesquisadores nos dias atuais. Observa-se, dentre estes estudos, grande preocupação com questões relacionadas ao armazenamento de energia, sendo o uso de baterias uma das formas mais comuns a esse armazenamento em aparelhos elétricos e eletrônicos.

Para acompanhar os avanços tecnológicos dos dispositivos nos quais são utilizadas, é preciso também investir em melhorias em seus sistemas de energia. No caso das baterias, elas perdem sua carga após um tempo de uso do dispositivo ao qual se encontram acopladas, implicando, conforme (SERÔDIO, 2018), na necessidade de um equipamento eletrônico capaz de fornecer uma tensão de alimentação durante períodos prolongados, ou que seja capaz de carregar totalmente a bateria num curto período de tempo com alta eficiência sem danificá-la.

Ao considerar que o carregamento de uma bateria não é um processo simples, é preciso analisar as características dos diferentes métodos de carga a fim de identificar aquele que melhor se adequa a cada tipo de bateria. É preciso ressaltar que não há um método de carregamento padrão ou ideal, uma vez que a definição do método a ser empregado deve considerar as características de cada bateria (CHIH-CHIANG; MENG-YU, 2000).

4.1 PRINCIPAIS MÉTODOS DE CARGAS DE BATERIAIS

Nesta seção apresenta-se uma breve descrição de métodos convencionais (corrente constante, tensão constante, corrente constante e tensão constante) e de métodos não convencionais (por pulsos e Reflex) para as baterias de chumbo-ácido. A principal distinção entre estes métodos está relacionada ao tempo destinado para a carga, o que varia de acordo com a aplicação do equipamento em que a bateria é utilizada.

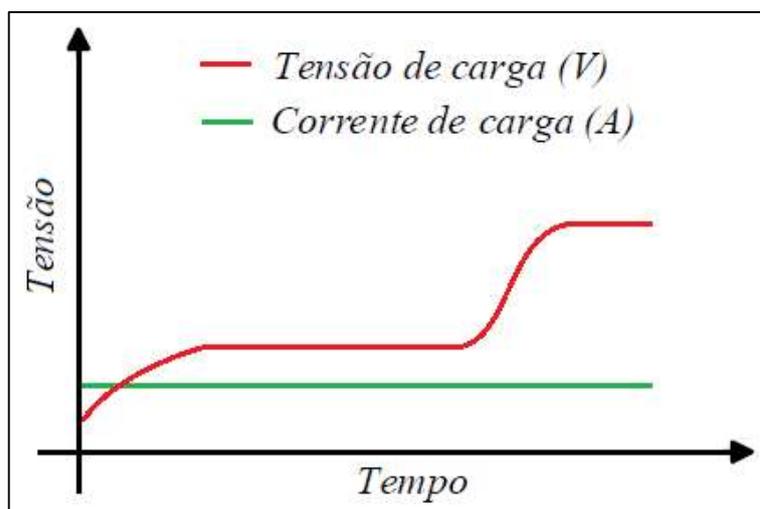
4.1.1 Métodos convencionais

Na sequência são apresentados os métodos convencionais de carga de baterias.

4.1.1.1 Método de Corrente Constante

Sabe-se que uma sobrecarga diminui a vida útil da bateria, do mesmo modo que a redução da intensidade da corrente aplicada implica na ampliação do tempo de carregamento. Neste método a bateria é carregada com uma fonte de corrente constante até atingir sua tensão limite de carga. Tem-se na Figura 14 a representação gráfica deste método de carga.

Figura 14 - Carga pelo método de corrente constante



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

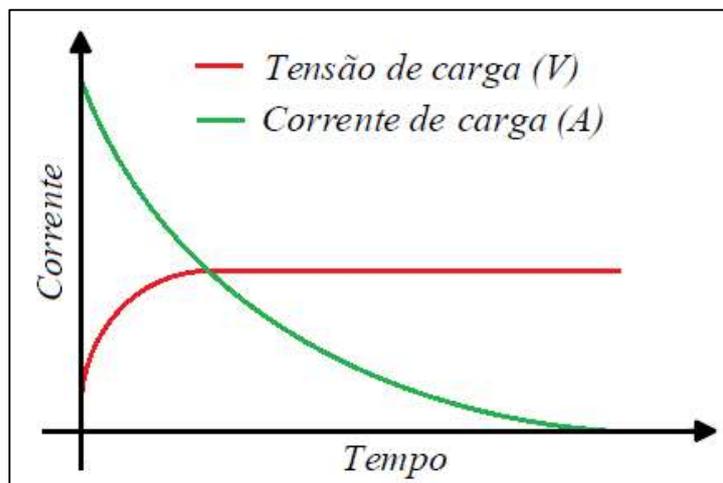
Os carregadores utilizados por este método de carga apresentam baixo custo e fácil implementação. Apesar dessa facilidade, (SERÔDIO, 2018) ressalta que o referido método não otimiza o desempenho da bateria, uma vez que ela tem seu funcionamento prejudicado pela formação de dendritos¹ quando carregada com baixos níveis de corrente, podendo haver a redução do número de ciclos de carga/descarga.

4.1.1.2 Método de tensão constante

O princípio deste método está na aplicação de uma tensão constante nos terminais da bateria, com uma redução progressiva da corrente até atingir o seu carregamento completo. A representação gráfica desse processo pode ser observada na Figura 15.

¹ Acúmulo de cristais que normalmente começam no ânodo da bateria após muitos ciclos de carga e descarga.

Figura 15 – Carga pelo método de tensão constante



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Quando aplicada uma corrente de carga excessiva, a temperatura interna da bateria aumenta, ocasionando problemas à vida útil da bateria. Mas, mantendo a tensão da bateria constante e com a redução gradativa da corrente por meio deste método de carga, a temperatura interna é reduzida (PANASONIC INDUSTRIAL, 2005; C&D TECHNOLOGIES, 2012).

4.1.1.3 Método de corrente constante e tensão constante

O emprego deste método para o carregamento de baterias deve se dar considerando três fases distintas, as quais são apresentadas por (ZANGIROLAMI, 2017) a partir dos estudos publicados por (SAAD, 2012).

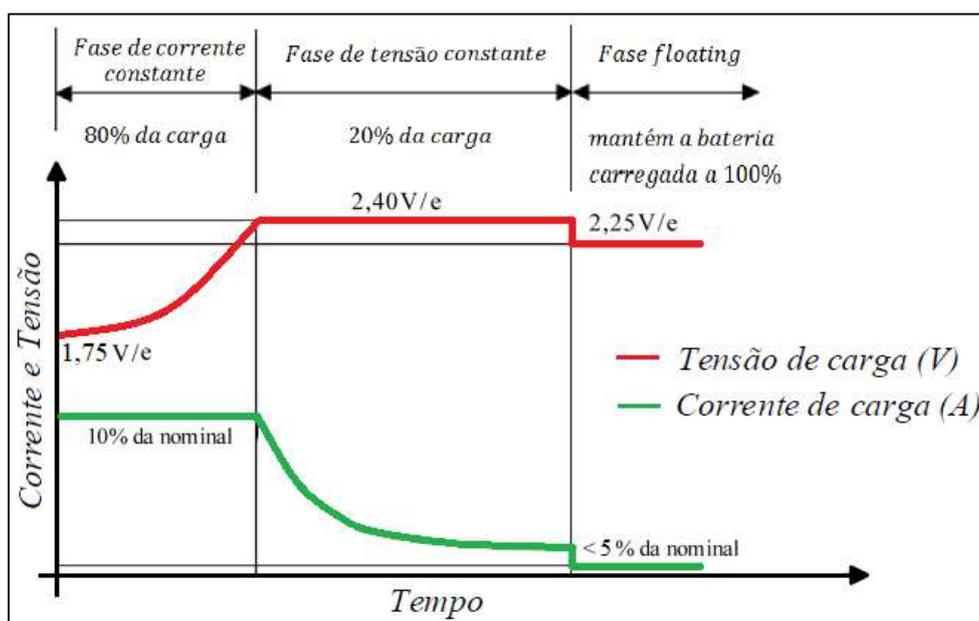
De acordo com (ZANGIROLAMI, 2017), na primeira fase aplica-se uma corrente constante que, seguindo a recomendação da maior parte dos fabricantes, deve ficar entre 10 e 20% da corrente nominal da bateria. Por isso, o tempo correspondente a esta primeira fase varia de acordo com o modelo da bateria e do percentual da corrente inicial aplicada, sendo aconselhável que se mantenha até a bateria atingir 80% da carga. Nesta fase é possível observar a elevação da tensão enquanto se dá o carregamento da bateria, o que ocorre até ela atingir sua tensão de equalização.

A fase seguinte corresponde à tensão constante. Nela, a tensão de equalização da bateria deve ser mantida ao mesmo tempo em que deve haver uma redução da corrente, o que se dá a partir do aumento gradativo da carga da bateria. A duração dessa fase corresponde ao tempo necessário para que a bateria atinja 100% de sua carga, até que atinja uma corrente mínima de manutenção da carga, que geralmente é menor do que 5% da corrente nominal da bateria.

A terceira e última fase deste método é chamada de flutuação ou *floating* em inglês, quando tem-se, então, a tensão responsável por manter a bateria carregada.

Este método de carga está ilustrado na Figura 16, evidenciando a variação da corrente e da tensão durante a carga em suas três fases.

Figura 16 - Carga pelo método de corrente constante e tensão constante



Fonte: Adaptado de (UNIPOWER, 2020).

Este é o método utilizado com maior frequência para o carregamento de banco de baterias de UPS e sistemas de emergência. Há de se considerar, conforme (SERÔDIO, 2018) que a principal desvantagem deste método é o tempo total de carga. Isso ocorre porque o maior percentual da carga total da bateria é atingido na primeira fase de carga (corrente constante), que é concluída num espaço de tempo substancialmente inferior quando comparado com o método de corrente constante. No entanto, a segunda fase (tensão constante) necessita de um tempo maior do que o utilizado na primeira para carregar os 20% da carga a ela correspondentes.

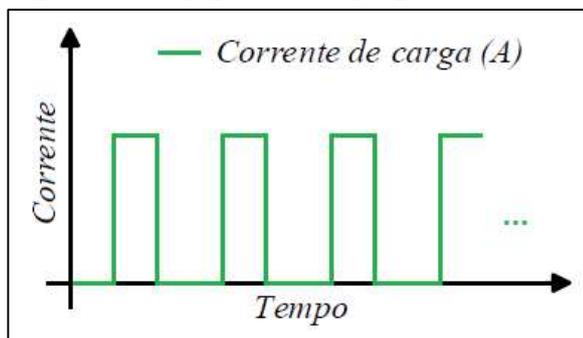
4.1.2 Métodos não convencionais

4.1.2.1 Método por pulsos de corrente

O método por pulsos de corrente, também conhecido como método por corrente pulsada, se caracteriza pela periódica aplicação à bateria de pulsos de corrente (Figura 17), garantindo um tempo de descanso no processo de carga. Esse tempo de descanso é necessário para que,

nele, ocorram as reações químicas, levando ao carregamento uniforme da bateria e evitando a formação de dendritos em seu interior. Além disso, essa característica do método retarda o aumento da temperatura na bateria, o que diminui o risco de sobrecarga e aumenta seu tempo de vida (NGUYEN; BUSHNELL, 2003).

Figura 17 – Carga pelo método por pulsos de corrente

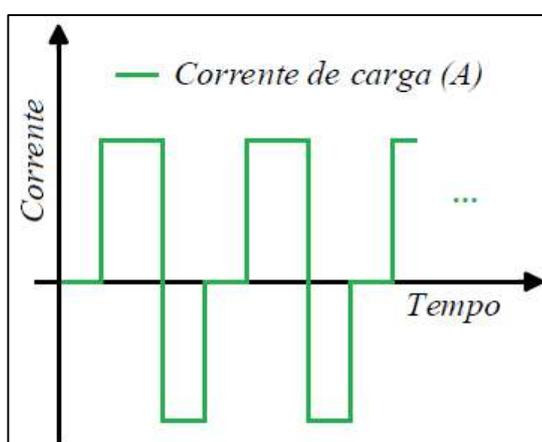


Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

4.1.2.2 Método Reflex

Este método tem seu princípio baseado no método por pulsos de corrente, fazendo com que as reações químicas internas da bateria se estabilizem mais rapidamente. Tal fato, conforme demonstrado na Figura 18, se dá porque, além de ter os pulsos positivos, aplica-se um pulso negativo (momento de descarga), o qual antecede ao tempo de descanso. Com isso, é conseguido um processo de carga de menor tempo e que prolonga a vida útil da bateria (CHIH-CHIANG; MENG-YU, 2000; FAN; CHANG; TSENG, 2011).

Figura 18 - Carga pelo método Reflex



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Este foi o método escolhido para o estudo e será melhor discutido no capítulo 5.

4.2 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE CARGA DE BATERIAS

A partir da caracterização dos cinco métodos de carga apresentados na seção anterior (métodos convencionais e não convencionais), estabelece-se uma comparação na Tabela 2 que sintetiza as principais vantagens e desvantagens de cada um dos métodos, conforme os estudos realizados por (SERÔDIO, 2018), (TAVARES, 2015), (PANASONIC INDUSTRIAL, 2005; C&D TECHNOLOGIES, 2012), (NGUYEN; BUSHNELL, 2003), (CHIH-CHIANG; MENG-YU, 2000; FAN; CHANG; TSENG, 2011).

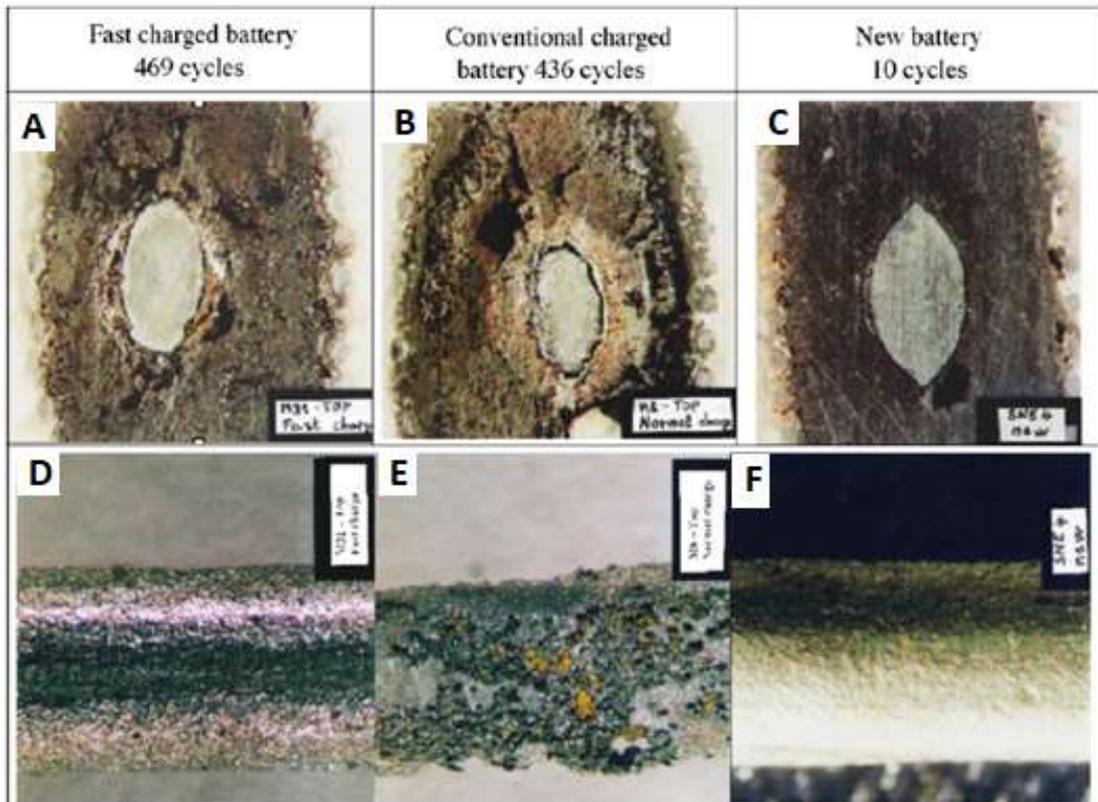
Tabela 2 – Comparativo entre os diferentes métodos de carga

MÉTODO DE CARGA	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Corrente Constante	- Simplicidade para implementação; - Baixo custo.	- Formação de dendritos; - Sobrecarga.
Tensão Constante	- Busca o estado de carga completo; - Baixo custo.	- Controle do tempo de equalização para não provocar sobrecarga nas baterias.
Corrente constante e tensão constante	- Simplicidade para implementação.	- Tempo total de carga.
Corrente pulsada	- Aumento da vida útil da bateria; - Busca garantir o estado de carga completo da bateria.	- Depende do monitoramento da tensão de flutuação e equalização.
Reflex	- Aumento da vida útil da bateria - Permite acelerar o processo de carga, para a mesma corrente média inicial aplicada.	- Implementação mais complexa.

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Considerando os estudos comparativos entre métodos de carregamento não convencionais (método por corrente pulsada) e métodos convencionais (método por corrente constante e tensão constante) realizados por (SVOBODA, DOERING e GARCHE, 2005), pode-se constatar que os primeiros causam menor deterioração às baterias. Essa constatação é evidenciada na Figura 19, onde apresenta-se um comparativo após vários ciclos de carga.

Figura 19 – Comparativo entre os estados dos eletrodos de baterias com vários ciclos de carga, através do método por corrente pulsada (A e D) e pelo método CC-CV (B e E), comparados com uma bateria nova (C e F)



Fonte: (SVOBODA, DOERING e GARCHE, 2005)

Por meio desta análise microscópica é observado, através de um corte transversal dos eletrodos positivos da bateria (itens A e B), como eles se apresentam após vários ciclos de carga e seu efeito corrosivo, e, posteriormente, comparados a um corte transversal de um eletrodo de uma bateria nova (item C). Os itens D e E trazem, através da visão lateral dos eletrodos, a diferença após vários ciclos de carga a partir do método por corrente pulsada e pelo método CC-CV, sendo também comparados a um eletrodo de uma bateria nova (item F).

5 MÉTODO REFLEX DE CARGA DE BATERIA

A partir do estudo dos diferentes métodos de carga e, diante das características específicas das baterias de chumbo-ácido, delimitou-se o método de carga Reflex como foco dos ensaios práticos desta pesquisa.

O método Reflex deriva-se do método de corrente pulsada, o qual, na década de 70, trouxe inovações significativas ao considerar o processo químico que ocorre nas baterias, aumentando, com isso, a eficiência do processo de carga. Os autores (GUERRERO, DE VICUNA e UCEDA, 2007) afirmam que, quando uma corrente constante é aplicada por um longo período de tempo, ocorre um gradiente de íons devido ao limite de transporte de massa da bateria. Este gradiente gera uma baixa eficiência no carregamento de baterias, provocando aumento de temperatura, perda de capacidade e uma menor vida útil. A interrupção periódica da recarga permite a melhor distribuição dos íons, eliminando gradientes e minimizando os efeitos vistos ao aplicar apenas a corrente contínua.

Essa característica presente no método de corrente pulsada é incorporada pelo método Reflex, objeto de estudo desta pesquisa, com o adendo de haver um pulso negativo que, ao dar uma breve descarga na bateria, pode vir a melhorar os benefícios já observados no método anterior. Estudos realizados por (CHIH-CHIANG e MENG-YU, 2000) e também por (PRAISUWANNAE e KHOMFOI, 2013) reconhecem a validade do método Reflex, sendo considerados na delimitação desta pesquisa.

5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESCOLHA E A IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO

Os estudos realizados para fundamentar a estruturação desta pesquisa reforçam uma constatação que faz parte do cotidiano atual: há no mercado um número cada vez maior de aparelhos eletrônicos que utilizam baterias como fonte de energia. A necessidade de utilização desses aparelhos para realização de atividades diárias estimula a adoção de métodos de carga rápida e que não abreviem a vida útil das mesmas. Teoricamente, as características do carregamento pelo método Reflex vem ao encontro desta necessidade, justificando a realização de ensaios que verifiquem seu efeito para tal, buscando o carregamento mais rápido e um menor aquecimento da bateria durante a carga.

Estes mesmos estudos, quando direcionados a características de UPS nacionais de baixa potência, revelaram a ausência da utilização deste método de carga em suas especificações técnicas. O método de corrente constante e tensão constante (CC-CV) se faz presente na maioria

destas UPS, sendo também o mais recomendado pelos fabricantes de baterias por ser o método mais antigo e validado pela indústria.

A constatação do predomínio da utilização deste método foi o parâmetro considerado para a comparação com o método Reflex, o que se dá na ânsia de reduzir o tempo de carga da bateria, vislumbrando também o aumento de sua vida útil. Em determinadas aplicações, a redução do tempo de carga da UPS é fator determinante, uma vez que esse tempo está diretamente relacionado a sua disponibilidade de uso.

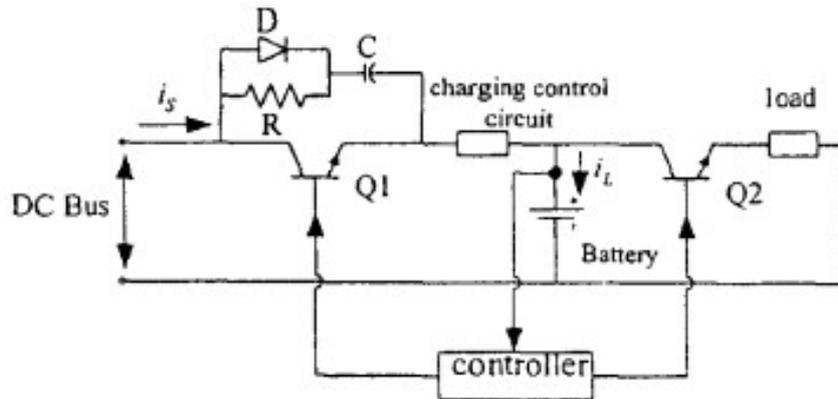
Ademais, não foram identificadas no âmbito da Universidade do Estado de Santa Catarina, até o presente momento, pesquisas que tenham implementado o método de carga Reflex, evidenciando o caráter pioneiro do presente estudo.

No que se refere à sua implementação, há de se considerar a ausência de um método para definir a melhor frequência para aplicação dos pulsos de corrente. Este fato, conforme (CHEN, 2007), faz com que a determinação da melhor frequência seja obtida por meio de um processo de tentativa e erro ou até, muitas vezes, aplicada empiricamente. Conseqüentemente, tem-se um projeto do carregador com maior complexidade, uma vez que este deve considerar que os valores dos tempos positivo, negativo e de descanso variam de acordo com as características tecnológicas da bateria (CARDOSO, 2016). Além dessa variação, observa-se ainda, em pesquisas relacionadas ao tema, a ausência de um consenso sobre a amplitude ideal da corrente de carga que deve ser aplicada.

5.2 DEFINIÇÃO DA TOPOLOGIA DO CONVERSOR

As primeiras topologias que realizavam a carga utilizando um pulso positivo e negativo, conforme proposto pelo método Reflex, utilizavam a estrutura apresentada na Figura 20. Nessa estrutura, ao fechar a chave Q1 e manter a chave Q2 aberta, tem-se o pulso positivo, momento em que é realizada a carga da bateria. Na etapa seguinte de operação, a chave Q1 é aberta e fecha-se a chave Q2. Esse procedimento faz com que a corrente na bateria passe a apresentar sentido negativo, o que se dá por ela estar se descarregando, implicando que, para isso, dissipe sua energia na carga. Na terceira e última etapa de operação, ambas as chaves estão abertas e não há circulação de corrente na bateria.

Figura 20 – Primeira topologia a utilizar pulsos positivos e negativos de corrente na bateria

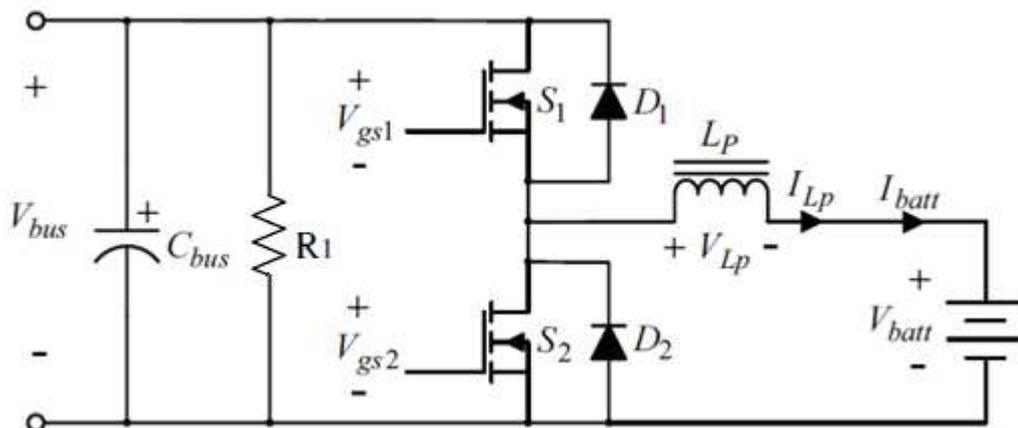


Fonte: (CHIH-CHIANG e MENG-YU, 2000)

Esta topologia, conforme observado, apresenta simplicidade na implementação. Todavia, apresenta rendimento baixo em decorrência da dissipação da energia da bateria em uma resistência, para obter o intervalo de tempo (pulso) com corrente negativa.

As topologias atuais apresentam características que beneficiam o rendimento de conversores, pois com sua topologia bidirecional podem devolver a energia do pulso negativo ao barramento. A Figura 21 apresenta o conversor CC-CC bidirecional em corrente, um dos conversores mais simples e presente nas pesquisas realizadas por (WANG e CHUANG, 2005; LIANG et. al 2001; JAMPEETHONG e KHOMFOI, 2015).

Figura 21 – Conversor CC-CC bidirecional em corrente



Fonte: Adaptado de (CHIH-CHIANG e MENG-YU, 2000)

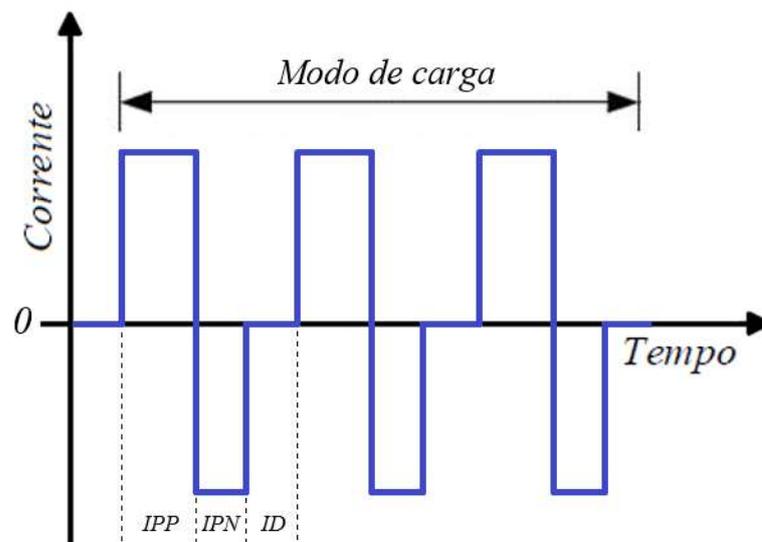
Nesta topologia, no momento em que é realizada a carga da bateria, o conversor opera no modo *Buck*, ou seja, como abaixador de tensão. Ao operar no modo *Boost*, o conversor faz com que a bateria forneça energia para o barramento, elevando a sua tensão de saída. Os ensaios realizados nesta pesquisa consideraram esta topologia, no entanto, foi nela acrescentado o

resistor R_1 para dissipação da energia do pulso negativo. Essa adaptação foi necessária devido à ausência de fontes reversíveis em corrente no laboratório e também para limitar a elevação de tensão decorrente do processo.

5.3 ETAPAS DE FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR

A operação do circuito pode ser dividida em duas etapas, que são o modo de carga e descarga da bateria pelo método Reflex. Todavia, diante dos objetivos da presente pesquisa, os ensaios realizados foram delimitados na etapa do modo de carga, com intervalo de pulsos de corrente positivo (IPP), negativo (IPN) e um intervalo de descanso (ID), conforme se observa na Figura 22.

Figura 22 – Modo de carga realizada método Reflex



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

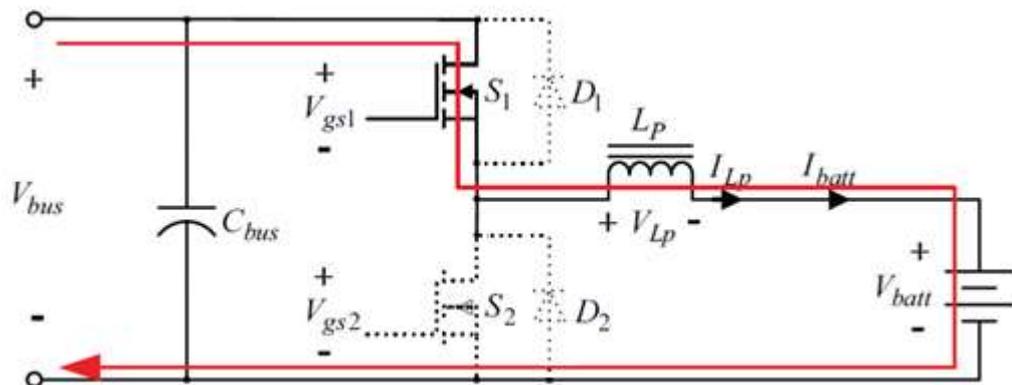
O conversor CC-CC bidirecional em corrente opera com as duas chaves atuando de forma complementar e o sentido da corrente é definido através da malha de controle de corrente, direcionando o fluxo do barramento CC para a bateria ou da bateria para o barramento CC. Ressalta-se que, caso a proposta seja aplicada em uma UPS, o modo descarga seria acionado e a bateria passaria a alimentar a carga na falta da rede elétrica. Essa descarga poderia também ser realizada por uma corrente pulsada na carga.

5.3.1 Operação modo *Buck*

O IPP tem a função de fornecer a corrente de pulso de carregamento da bateria, fazendo o conversor funcionar como um conversor *Buck*. É por meio desse funcionamento, conforme (CHEN et al., 2008) que a corrente flui do barramento CC para a bateria. Esse processo se subdivide em dois estágios:

- Estágio 1: A chave S_1 é acionada e S_2 está bloqueada, enquanto o diodo D_2 também não possui corrente circulando, conforme apresenta-se na Figura 23. Neste estágio, o indutor L_p armazena energia, alimentado pela tensão $V_{bus} - V_{batt}$, de modo que a corrente no indutor começa a aumentar linearmente com a variação de $(V_{bus} - V_{batt})/L_p$.

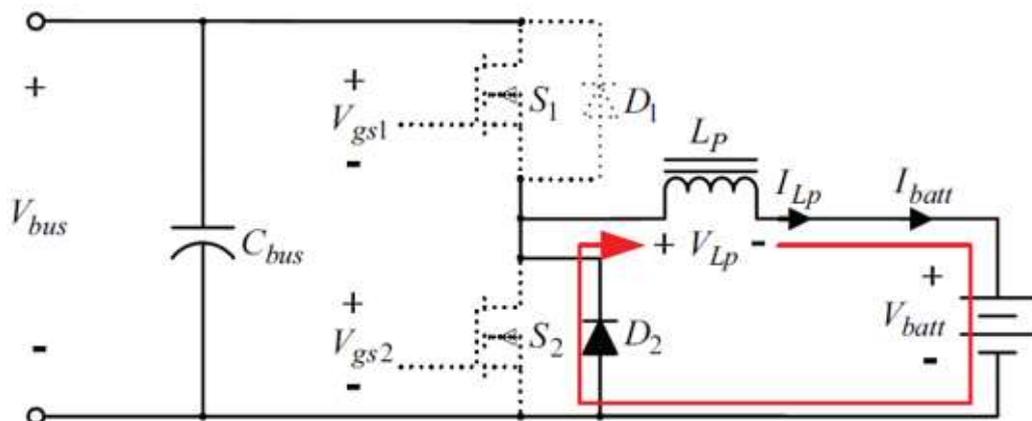
Figura 23 - Operação modo Buck: Estágio 1



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

- Estágio 2: A chave S_1 é também desligada e o diodo D_2 passa a conduzir, conforme a Figura 24. Neste estágio, a tensão no indutor L_p é cerca de $-V_{batt}$, então a sua corrente começa a diminuir linearmente com a variação de $-V_{batt}/L_p$.

Figura 24 - Operação modo Buck: Estágio 2



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

5.3.2 Operação modo *Boost*

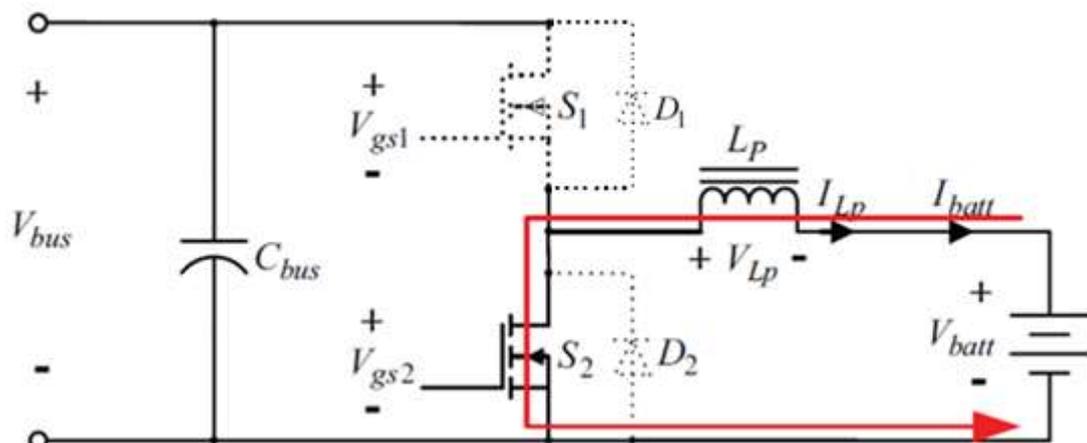
Este intervalo de pulso se caracteriza como uma breve descarga da bateria e tem como função agilizar a estabilização das reações químicas. Para atender a essa característica, o conversor funciona no modo *Boost*, sendo o responsável pela breve descarga que faz com que a corrente circule da bateria para o barramento CC (CHEN et al., 2008). Neste trabalho, como o barramento CC é formado pela alimentação com uma fonte CC não-bidirecional, foi instalado um resistor em paralelo ao C_{bus} para dissipação da energia desta corrente vinda da bateria, não representado nas figuras.

Assim como o IPP, o IPN também se subdivide em dois estágios:

- Estágio 1: A chave S_2 é acionada e a chave S_1 desligada. A corrente no indutor L_p diminui para zero e inverte a polaridade, conforme a Figura 25.

Neste estágio, a tensão no indutor é cerca de $-V_{batt}$, então, a corrente começa a aumentar linearmente com a variação de $-V_{batt}/L_p$.

Figura 25 - Operação modo Boost: Estágio 1



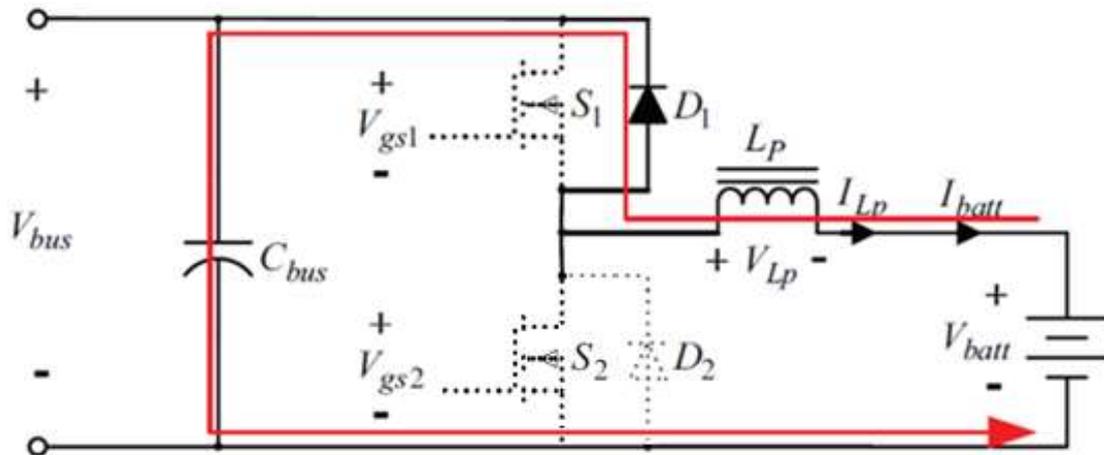
Fonte: Adaptado de (CHEN et al.,2008)

- Estágio 2: Ambas chaves estão desligadas e o diodo D_1 passa a conduzir, conforme a Figura 26.

Neste estágio, a tensão através do indutor é $V_{bus} - V_{batt}$, então a sua corrente diminui linearmente com a variação $(V_{bus} - V_{bat})/L_p$.

O indutor e a bateria estão transferindo energia para o barramento V_{bus} .

Figura 26 - Operação modo Boost: Estágio 2

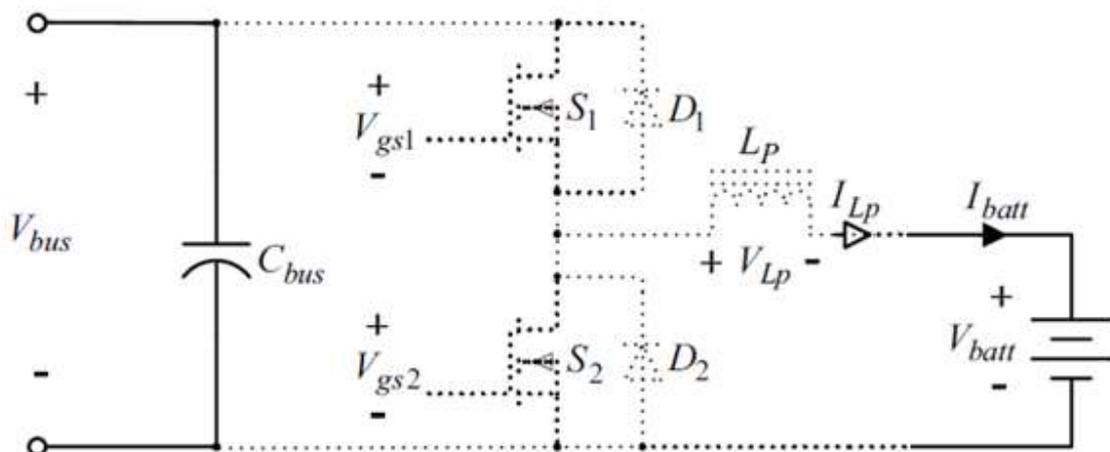


Fonte: Adaptado de (CHEN et al.,2008)

5.3.3 Operação no intervalo de descanso (ID)

No modo de carga o ID possui a mesma finalidade do IPN, auxiliando na estabilização das reações químicas internas da bateria com maior velocidade (CHEN et al., 2008). É constituído por um estágio único, onde que durante o ID, as chaves S_1 e S_2 ficam desligadas para desconectar o barramento CC e a bateria, conforme mostra a Figura 27.

Figura 27 - Intervalo de Descanso: estágio único



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

6 PROJETO DO CONVERSOR

Neste capítulo é apresentado brevemente o procedimento de projeto do protótipo do conversor CC-CC bidirecional em corrente usado para carga da bateria e o dimensionamento dos principais componentes do circuito: o indutor e os interruptores semicondutores (MOSFETs). Este procedimento é baseado na proposta desenvolvida por (LORENCETTI, 2018) para o desenvolvimento do projeto do conversor CC-CC bidirecional em corrente.

Por fim são apresentados os esquemas eletrônicos, o projeto da placa de circuito impresso, o projeto do controle do sistema e a simulação do método Reflex.

6.1 DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR

A Tabela 3 apresenta as especificações do conversor que será responsável exclusivamente por carregar uma só bateria de 12V 9Ah, cujas especificações detalhadas estão disponíveis no Anexo I.

Tabela 3 - Parâmetros para o projeto do conversor bidirecional

Parâmetros	Descrição	Valor
$V_o[V]$	Tensão de Saída	13,5
$I_o[A]$	Corrente de Saída	2
$V_i[V]$	Tensão de Entrada	24,0
$V_r[V]$	Tensão de “Ripple”	$V_o/100$
$\Delta I_L [\%]$	Varição da corrente	20
$F_s[kHz]$	Frequência de chaveamento	30

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

O sistema de teste é composto por uma fonte CC externa não-bidirecional para gerar o barramento de 24V de entrada, uma placa controladora (Kit DSP Texas), placa de potência (conversor), bateria para os ensaios e medidores externos de temperatura para a bateria, cuja proposta de integração é apresentada no item 6.2, na Figura 29.

Para o processo de carga da bateria, quando o conversor estiver operando no modo *Buck*, a corrente de carga é limitada para o valor máximo de 0,18C. Com estas informações, os parâmetros do conversor são calculados e, posteriormente simulados com a intenção de validar os valores reais que serão utilizados no protótipo funcional deste projeto.

6.1.1 Parâmetros básicos do projeto

A fase inicial do dimensionamento do conversor contempla o cálculo do valor da indutância, que é calculado para o modo *Buck* (modo de carga da bateria), mas o conversor poderá operar em qualquer um dos dois sentidos, *Buck* e *Boost* com o valor proposto.

Os cálculos podem ser obtidos através das equações apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Equações do conversor bidirecional: modo *Buck*

Parâmetros	Modo Buck
D	$\frac{V_o}{V_i}$
L_{min}	$\frac{V_i}{4F_s \cdot \Delta I_L \cdot I_o}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Considerando os parâmetros apresentados na Tabela 4, o resultado do cálculo do projeto é apresentado na Tabela 5. Este é o valor que determina o limite mínimo para o funcionamento do conversor, no modo de carga.

Tabela 5 - Resultado do cálculo da indutância do conversor bidirecional

Parâmetros	Modo Buck
L_{min}	500 μ H

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Este cálculo considera o modelo ideal do conversor, todavia, na simulação e no protótipo desenvolvido será utilizado um valor maior. Tal definição busca garantir que o valor mínimo do indutor seja respeitado, sendo o valor de indutância para o projeto do conversor definido em 530 μ H.

6.1.2 Chaves eletrônicas

Dentre os modelos de chave eletrônica disponíveis para aplicação em conversores estáticos CC-CC, como as características do projeto deste trabalho são de baixa corrente e

tensão, optou-se pela utilização da chave do tipo MOSFET, que é uma das utilizadas com maior frequência nesse tipo de projeto. Os MOSFETs possuem um gatilho isolado e são disparados por tensão, logo, necessitam de uma baixa potência para serem acionados ou desabilitados.

A Tabela 6 contempla as equações que são utilizadas para os cálculos das perdas nos MOSFETs e os valores calculados.

Tabela 6 - Equações das perdas nos MOSFETs do conversor

Componente	Parâmetros	Modo <i>Buck</i>	Valores
MOSFET	Corrente eficaz	$I_{o_max} \cdot \sqrt{D}$	1,5 A
	Perdas de condução	$D \cdot r_{DS} \cdot I_{o_max}^2$	191 mW
	Perdas de comutação	$\frac{F_s}{2} C_o V_{i_max}^2$	6,91 mW
DIODO	Corrente eficaz	$I_{o_max} \cdot \sqrt{(1 - D)}$	1,323 A
	Perdas condução	$I_{D_med} \cdot 0,7$	612 mW

Fonte: Baseado em (LORENCETTI, 2018)

Baseado nos esforços de tensão e corrente, optou-se por utilizar no projeto a chave do tipo MOSFET IRF540 com encapsulamento TO-220, que atende com folga as especificações e também possui disponibilidade no mercado e custo reduzido. As características técnicas deste modelo de chave encontram-se especificadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Especificações da chave MOSFET

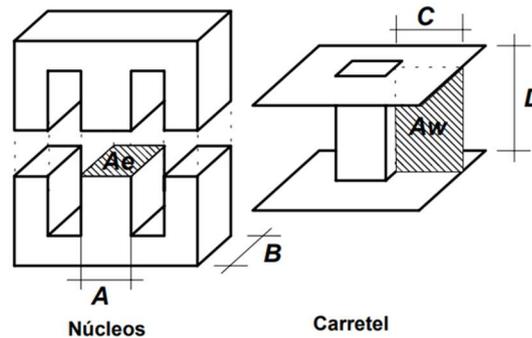
Grandezas	Valores
$V_{ds}(max)$	100 V
$R_{on}(max)$	85 mΩ
I_D	27A @ 25 °C
C_o	800 pF

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

6.1.3 Indutor

O projeto do conversor utilizará de um indutor construído com núcleo de ferrite do tipo EE, conforme a Figura 28. Constituem-se parâmetros para os cálculos do dimensionamento do núcleo: a seção da área transversal, A_e , e a área da janela, A_w .

Figura 28 - Núcleo de ferrite do tipo EE e carretel



Fonte: (BARBI; FONT; ALVES, 2002)

As equações da Tabela 8 foram utilizadas por (LORENCETTI, 2018), sendo replicadas para o projeto físico do indutor de ferrite do tipo EE a ser utilizado nesta pesquisa.

Tabela 8 – Equações para o projeto físico do indutor

Parâmetros	Equações	Grandezas
Produto entre área da seção transversal do núcleo e área da janela do núcleo	$A_e A_w = \frac{L \cdot I_p^2}{k \cdot B_{max} \cdot J_{max}} 10^4$	cm^4
Número de espiras	$N = \frac{L \cdot I_p}{B_{max} \cdot A_e} 10^4$	Volts
Entreferro	$l_g = \frac{N^2 \cdot \mu_o \cdot A_e}{L} 10^{-2}$	mm
Resistência térmica do núcleo	$R_T = 23(A_e \cdot A_w)^{-0,37}$	$^{\circ}C/W$
Elevação de temperatura	$\Delta T = P_T \cdot R_T$	$^{\circ}C$
Perdas no cobre	$P_w = \frac{I_{ef}^2 \cdot N \cdot l_t \cdot \rho}{S}$	W
Perdas no núcleo	$P_v = P_{uv} \cdot V_e$	W
Perdas totais	$P_T = P_w + P_v$	W
Área mínima do condutor	$S_{min} = \frac{100 \cdot I_{ef}}{J_{max}}$	cm^2
Número de fios em paralelo	$n_f = \frac{S_{min}}{S_{avg}}$	-

Fonte: (LORENCETTI, 2018)

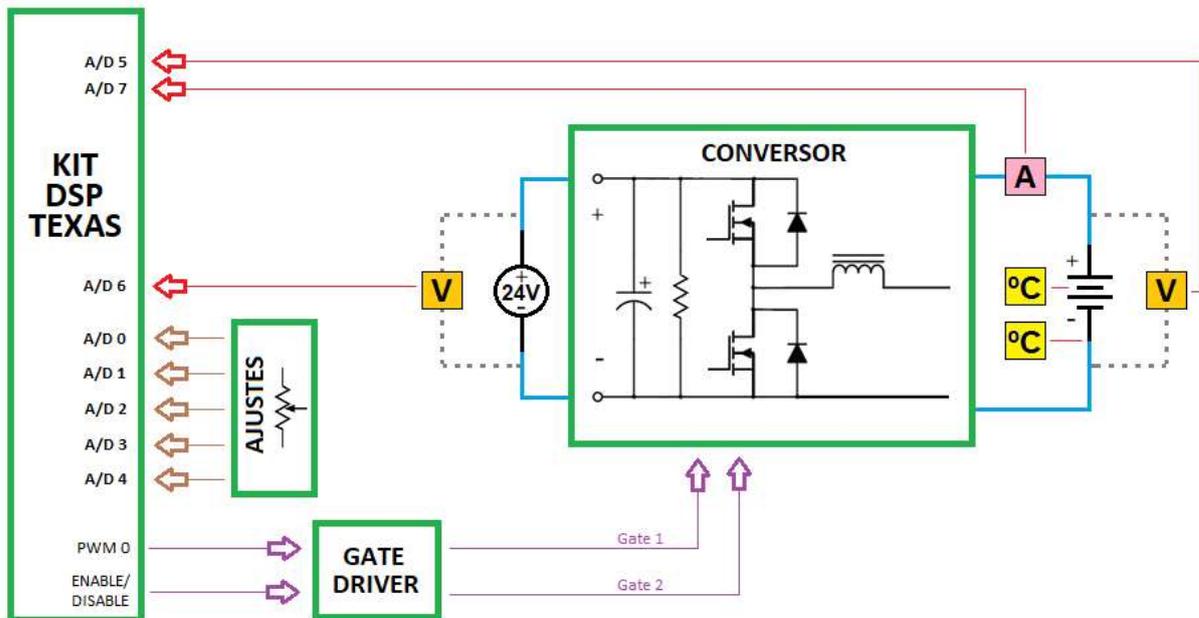
Para o projeto do indutor desenvolvido nesta pesquisa, dentre os parâmetros pré-existentes, considerou-se: o valor máximo de indução magnética $B(max) = 0,3 T$, densidade de corrente $J(max) = 450 A/cm^2$ e permeabilidade do ar $\mu_o = 4. \pi. 10^{-7} H/m$.

Com base nos valores de indutância mínima de $500 \mu H$, o núcleo EE-30/15/07 é núcleo escolhido para o projeto, pois possui uma folga de cerca de 30% a 35% para montagem. Já, para o enrolamento, foram utilizados no projeto 3 condutores em paralelo do fio condutor 27 AWG.

6.2 CIRCUITOS ELETRÔNICOS

Os circuitos que deram origem ao projeto são apresentados na Figura 29.

Figura 29 – Proposta de integração das placas que compõem o sistema de ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

O sistema é composto, basicamente, por uma placa de potência, uma placa controladora e uma fonte de alimentação externa.

A placa de potência possui todo o circuito de potência do conversor (indutor, chaves e resistor para descarga do pulso negativo), sensoramento (medição de tensões e corrente), *gate-drivers* para o disparo das chaves, conectores de entrada e saída, fontes para alimentação dos circuitos de medição e controle.

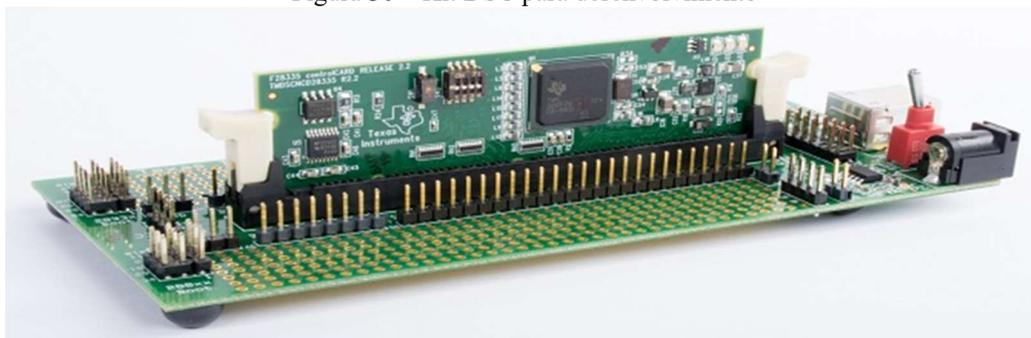
Já a placa de controle (DSC) é responsável por controlar o disparo das chaves e fazer a medição da tensão e corrente da bateria, e da tensão de entrada do sistema. A placa de controle também possui 5 *trimpots* nas entradas A/D para ajustes das amplitudes dos pulsos positivo e negativo e ajuste dos tempos, os quais são utilizados nos ensaios do método de carga Reflex.

A fonte CC externa não-bidirecional é responsável por gerar ao barramento a tensão de 24V de entrada. Já, a medição da temperatura na bateria (corpo e terminal negativo) é realizada por medidores de temperaturas independentes.

6.2.1 Microcontrolador

A Figura 30 apresenta a placa de controle utilizada no projeto. Esta placa se caracteriza como o kit didático do DSC – *Digital Signal Controller*, sendo alimentado por um cabo USB conectado ao computador, por onde também se comunica para a troca de informações.

Figura 30 – Kit DSC para desenvolvimento



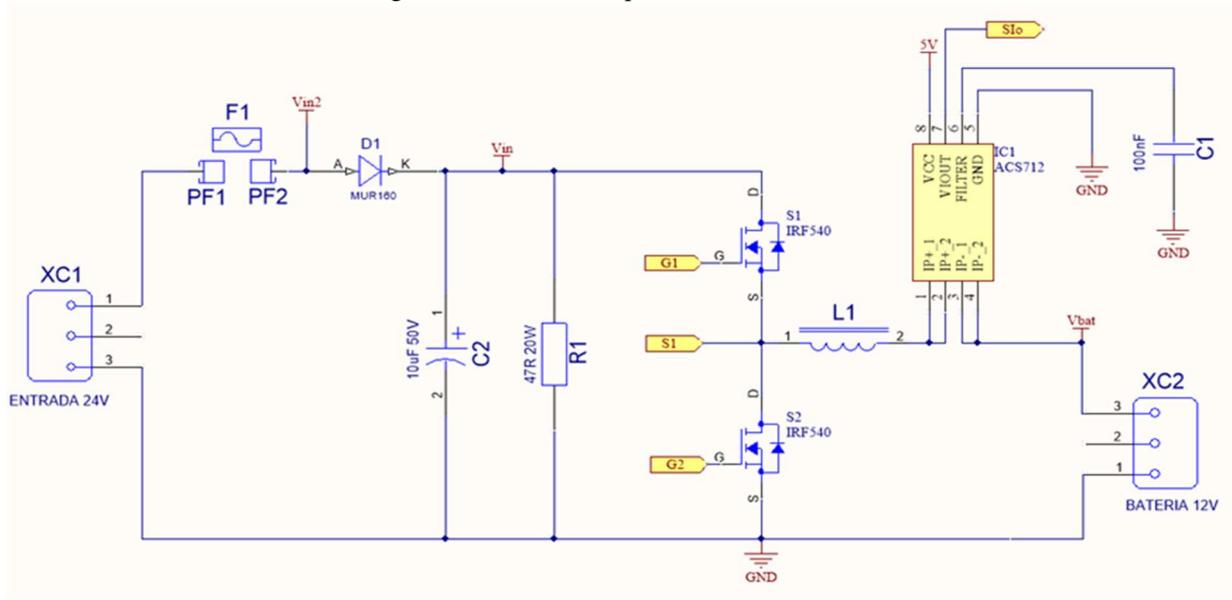
Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2021)

O modelo do DSC escolhido para o projeto é o TMS320F28335, da fabricante Texas Instruments. O seu principal objetivo é controlar o disparo das chaves do conversor através de sua saída de PWM, fazer leituras de tensões e correntes do sistema e a leitura das entradas A/D onde estão conectados os *trimpots* de ajustes.

6.2.2 Circuito de potência

O circuito de potência possui duas chaves MOSFETs, permitindo assim que opere no modo bidirecional. Além das chaves, o conversor também apresenta um indutor, um capacitor de entrada e um resistor que é utilizado para dissipação da energia do pulso de corrente negativa da bateria. O esquema eletrônico é apresentado na Figura 31.

Figura 31 – Circuito de potência do conversor

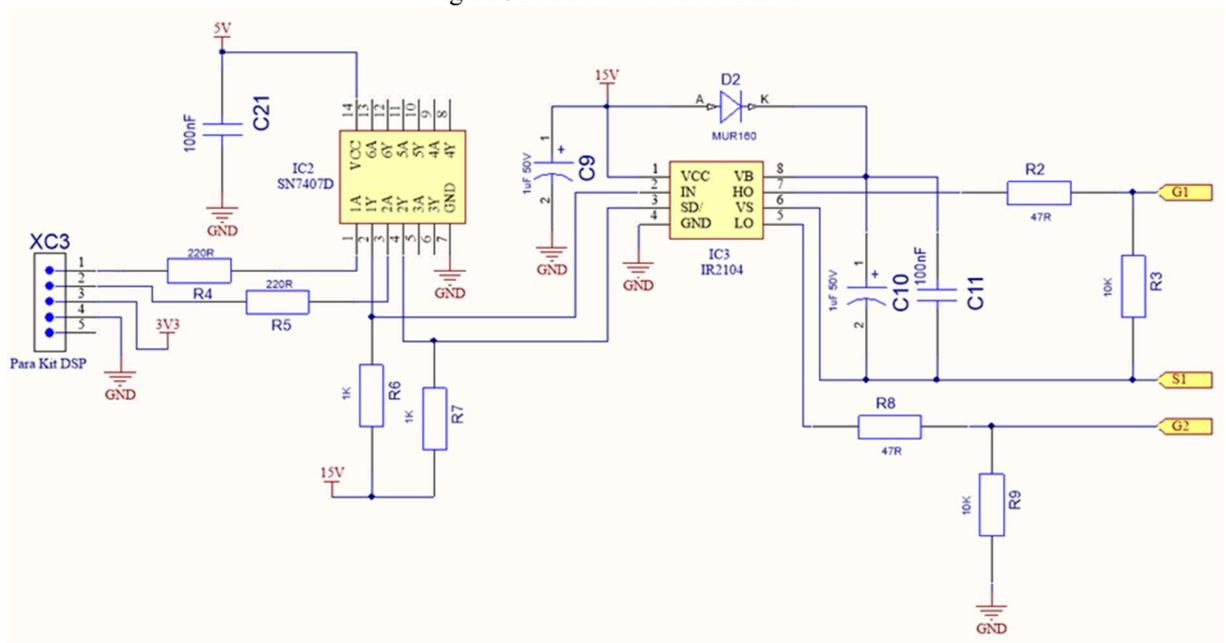


Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

6.2.3 Gate drivers

O circuito eletrônico para o acionamento dos MOSFETs é realizado pelo circuito apresentado na Figura 32.

Figura 32- Circuito de Gate-Driver



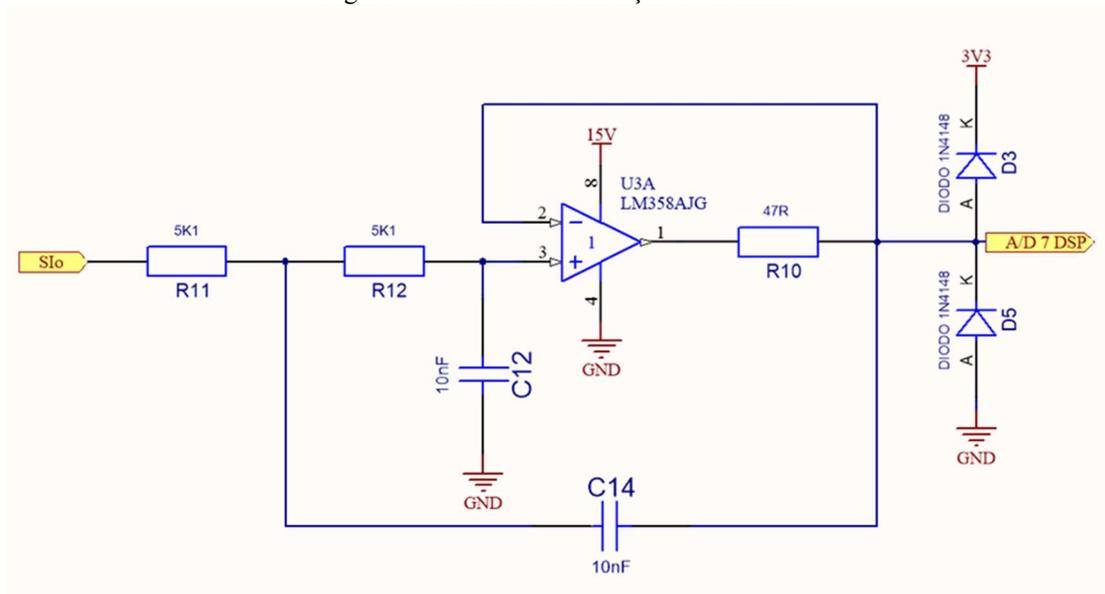
Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Como pode ser observado, o sinal PWM para o acionamento de cada uma das chaves provém do DSC, que passa por um buffer de sinal SN74LS07 do fabricante Texas Instruments, e posteriormente vai para um circuito integrado IR2104, do fabricante International Rectifier, que é responsável pela interface para o disparo dos MOSFETs, estabelecendo seu estado em ligado ou desligado.

6.2.4 Circuito de medição de corrente

Para a realização da medição de corrente da bateria, foi utilizado um sensor de efeito Hall bidirecional e um filtro Sallen-Key. O sensor de corrente utilizado é o CI ACS712 (Figura 31) do fabricante Allegro MicroSystems. O circuito eletrônico para tratamento do sinal é apresentado na Figura 33, e foi projetado para uma frequência de corte de 3 kHz, uma década abaixo da frequência de comutação.

Figura 33 – Circuito de medição de corrente



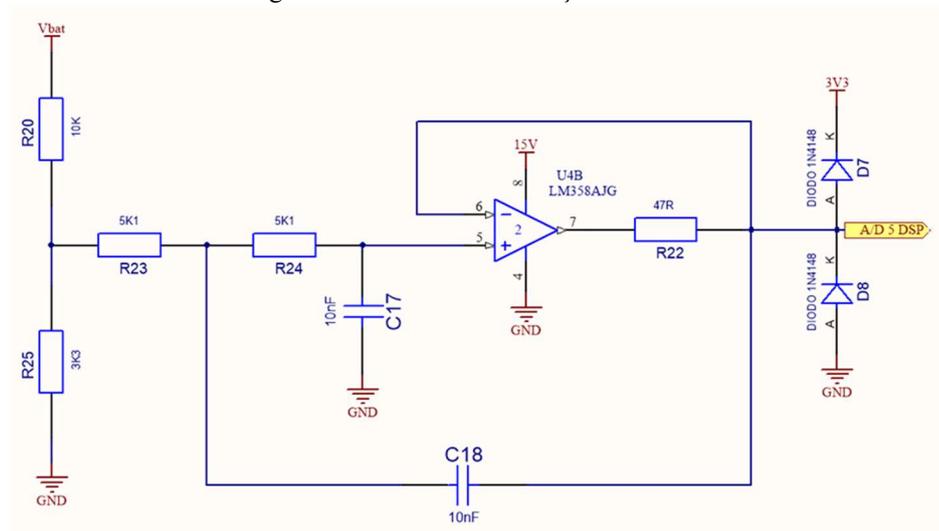
Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

6.2.5 Circuito de medição de tensão

A medição da tensão de entrada do sistema e da tensão da bateria é realizada por divisores resistivos e um amplificador operacional, conforme a Figura 34. A medição da tensão da bateria é responsável por mensurar valores na faixa de 10 a 14,7V, e o conversor não é

habilitado para valores de tensão fora dessa faixa de atuação, primando para que a bateria opere de acordo com as recomendações técnicas do fabricante.

Figura 34 – Circuito de Medição de Tensão



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

6.3 PROJETO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

O projeto da placa de circuito impresso (PCI) de potência foi constituído em uma placa de fibra de vidro e de dupla face de cobre, com todos os componentes discretos (THT), com exceção do sensor de corrente que possuía apenas a opção em SMD para montagem deste protótipo. A opção de utilizar todos os componentes discretos se deu pela sua disponibilidade no mercado, facilitando a aquisição e também a montagem na PCI.

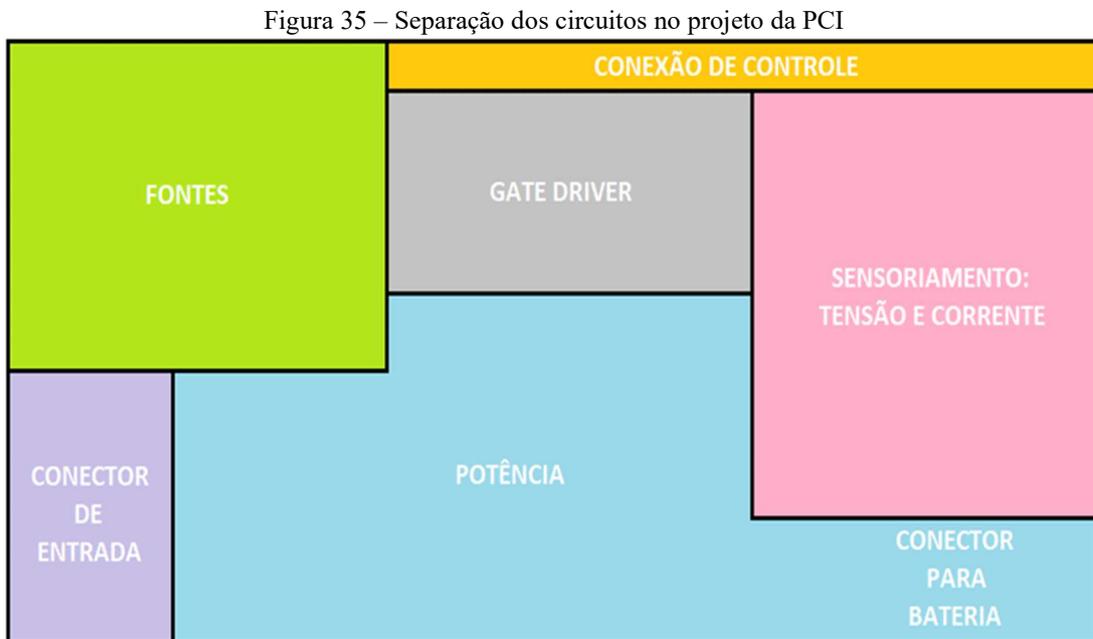
No projeto do layout alguns requisitos foram estabelecidos, com o objetivo de deixar o projeto mais robusto e imune a possíveis ruídos e interferências. Dentre esses requisitos, destacam-se:

- Divisão dos circuitos conforme sua função e nível de corrente;
- Adoção de trilhas de disparos dos *gates* dos MOSFETs de curta distância;
- Foram evitadas curvas de trilhas e cruzamentos em ângulos retos;
- Posicionamento dos capacitores de desacoplamento próximo aos circuitos integrados;
- Utilização de malhas de GND nos circuitos de *gate-driver* (disparo) e sensoriamentos de tensão e corrente;
- Roteamento considerou uma espessura maior para as trilhas de alimentação dos circuitos do que as trilhas de sinais.

6.3.1 Disposição dos circuitos na PCI de potência

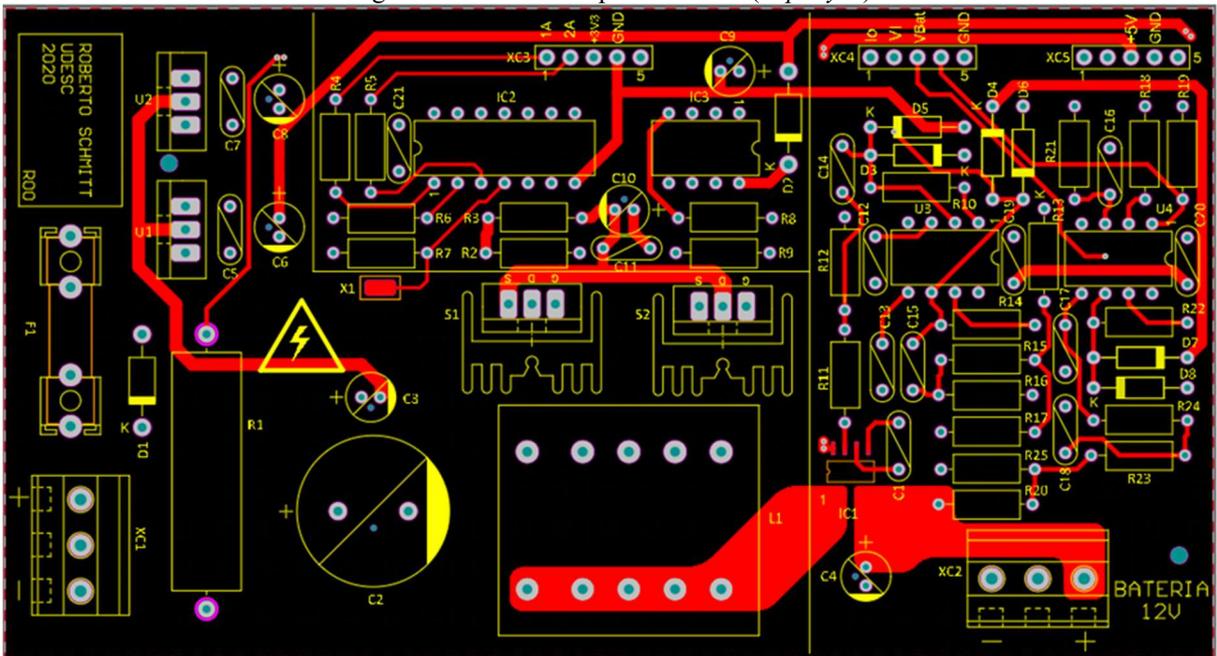
A disposição dos componentes na PCI se deu em apenas uma de suas faces, considerando uma área de 71mm x 131mm. A elaboração do *layout* tomou como primeiro critério a divisão dos circuitos, o que se deu tendo em vista a área disponível. Os circuitos ficaram dispostos em regiões bem definidas, buscando-se evitar os cruzamentos entre os sinais de controle e sensoriamento e os sinais de potência.

A Figura 35 ilustra o esboço do projeto da PCI, com cores distintas para caracterizar os diferentes circuitos.

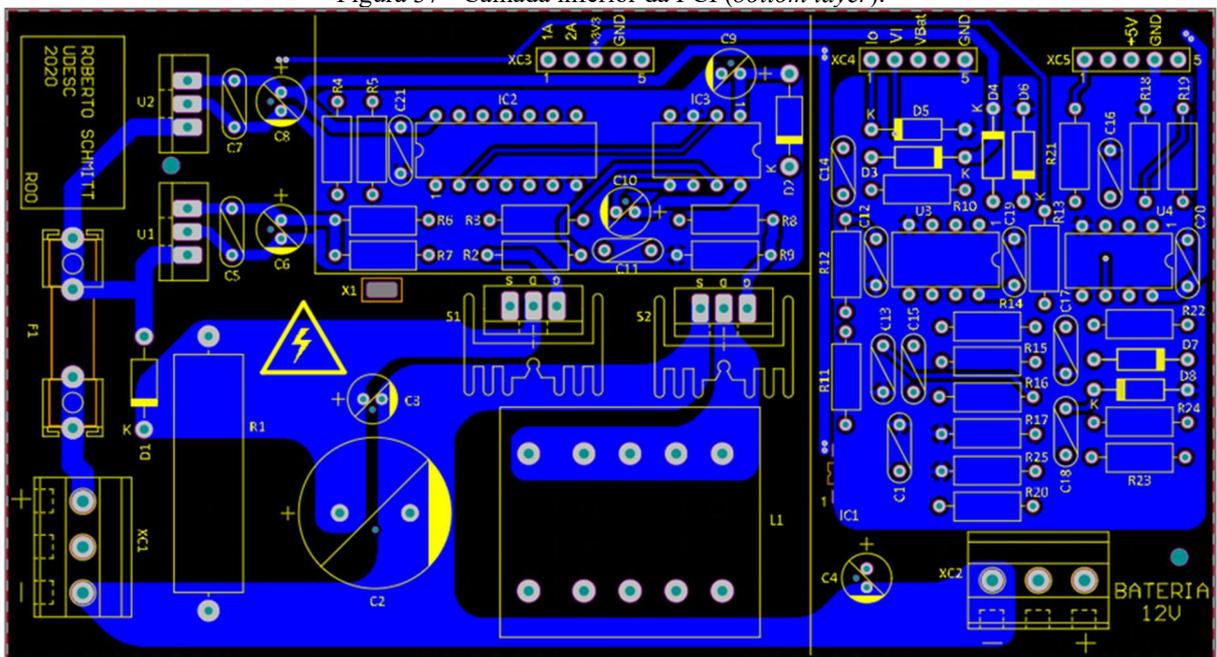


Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

A partir deste esboço, desenvolveu-se o *layout* do projeto no programa *Altium Designer*. O *layout* é apresentado nas duas próximas figuras, sendo que a Figura 36 representa a camada superior da PCI (*top layer*), onde também estão dispostos os componentes, e a Figura 37 representa a sua camada inferior (*bottom layer*).

Figura 36 – Camada superior da PCI (*Top layer*)

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Figura 37 - Camada inferior da PCI (*bottom layer*).

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

A visão superior da PCI favorece a percepção da distinção entre os circuitos eletrônicos existentes, conforme se observa na Figura 38.

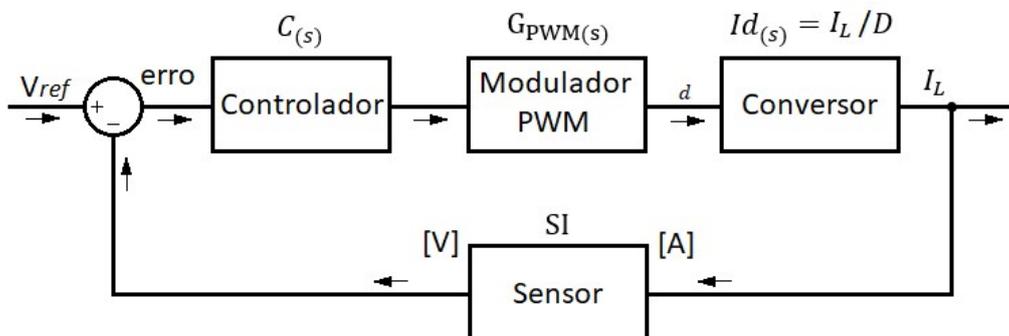
6.4 CONTROLE DO SISTEMA

Para implementação do sinal da corrente desejada na bateria, utiliza-se o controle de corrente no conversor, através de um controlador proporcional integral (PI). Este controle é feito a partir do modelo da corrente pela razão cíclica do conversor, onde a atuação é realizada através da corrente no indutor. A planta do conversor de corrente pela razão cíclica é dada pela Equação 01.

$$Id_{(s)} = \frac{I_L(s)}{D(s)} = \frac{V_{In}}{R_{Fio} + s \cdot L_o} \quad (01)$$

A Figura 40 demonstra o diagrama de blocos para o controle proposto, o qual parte de um sinal de tensão de referência denominado v_{ref} . Esse sinal possui uma relação direta com um sinal referencial de corrente, no entanto, ele é considerado um sinal de tensão por causa da saída do sensor (que é dada por uma tensão). Este bloco do Sensor é composto por um sensor de corrente e por um filtro *anti-aliasing* de topologia *Sallen-key*.

Figura 40 - Diagrama de blocos para controle de corrente



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Após a comparação dos valores do sensor de corrente e tensão de referência, a diferença resultante é, então, o erro. Esse erro segue para o bloco Controlador. A saída do controlador se configura como o sinal de controle. Esse sinal é comparado com a portadora, formando assim o bloco Modulador PWM.

A saída do PWM constitui-se na razão cíclica da chave S_1 . Esse sinal é utilizado nos *gates* dos interruptores do conversor. O bloco Conversor é dado pela planta do conversor, e a sua saída será a corrente no indutor, sendo então utilizada pelo sensor. O sensor possui um

ganho dado em V/A , e, por isso, como já mencionado anteriormente, a sua saída é um valor de tensão.

Através da análise da Figura 40, percebe-se que, uma mudança no sinal de referência (sinal de entrada - v_{ref}), irá resultar em uma mudança na corrente do indutor. Por esse motivo, é dito que o indutor age como uma fonte de corrente controlada por tensão.

6.5 PROJETO DO CONTROLADOR

Nesta seção são demonstrados os requisitos de projeto do controlador. Após sua apresentação, é realizado o estudo da Função de Transferência em Malha Aberta (FTMA) de forma a verificar a resposta existente e, por final, demonstra-se a Função de Transferência em Malha Fechada (FTMF) para o conversor.

6.5.1 Requisitos de projeto

De forma a se obter um controlador que atenda a proposta deste estudo, consideram-se os requisitos de projeto abaixo descritos:

- Erro de regime permanente nulo: Para a resposta transitória é necessário se certificar que o erro será nulo quando o sinal chegar ao regime permanente;
- Inclinação do ganho de -20dB/dec na passagem por 0dB : A partir de uma inclinação de -20dB/dec na passagem por 0dB ;
- Margem de fase entre 45° e 90° : Esta característica é necessária de forma a se certificar que, na frequência de interesse (quando o ganho é de 0dB), a fase não será -180° ;
- Frequência de cruzamento máxima deve ficar afastada de uma década da frequência de comutação: Foi estabelecida a frequência de 1kHz , que ainda resulta em uma boa dinâmica para o sistema controlado;
- Rejeição a ruídos em altas frequências: De forma a rejeitar ruídos de alta frequência, é interessante obter um ganho bastante baixo nesta faixa de frequência.

6.5.1.1 Modulador PWM

O bloco do modulador PWM empregado neste conversor faz uso de uma portadora dente de serra, com valor de pico equivalente a 3V. A Equação 02 apresenta o ganho do modulador PWM e considera o atraso da amostragem.

$$G_{PWM(s)} = \frac{1}{3} e^{-s \frac{1}{30kHz}} \quad (02)$$

6.5.1.2 Sensor de corrente e filtro anti-aliasing

O sensor de corrente utilizado é de efeito hall e possui um ganho de 185mV/A, indicado na Equação 03. Já, o filtro *anti-aliasing* é de topologia *Sallen-key*, com frequência de corte em 30kHz e de ganho unitário, conforme a Equação 04:

$$SI = \frac{G_{SI}}{\Omega} \quad (03)$$

$$F_{SI(s)} = \frac{38446751249.519}{s^2 + 392156.8627451s + 38446751249.519} \quad (04)$$

6.5.2 Controlador

A definição do controlador implica, inicialmente, a análise da FTMA sem o controlador, ou seja, considerando um controlador unitário, a planta, o sensor de corrente e filtro anti-aliasing, o modulador PWM e o ganho analógico-digital unitário. Essa análise encontra-se descrita na Equação 05:

$$FTMA_{(s)} = C1_{(s)} \cdot Id_{(s)} \cdot SI \cdot F_{SI(s)} \cdot G_{PWM(s)} \cdot G_{AD} \quad (05)$$

Analisando a planta de corrente por razão cíclica do conversor da Equação 01, observa-se a presença de apenas um polo. Como o controlador de corrente deve possuir um erro estático nulo em regime permanente, deve-se implementar um polo na origem. O zero do controlador (ω_{zz1}) foi posicionado próximo a frequência do polo da planta, em 20Hz. E um polo adicional foi colocado no controlador e alocado na frequência de 30kHz (ω_{pp1}), de modo a servir de filtro

de ruído para altas frequências. O ganho de valor 267 (K2), foi ajustado para se obter a frequência de cruzamento em 1kHz. A seguir é apresentada a Equação 6 que define o controlador de corrente:

$$C1(s) = \frac{K2 \cdot \left(1 + \frac{s}{2 \cdot \pi \omega_{zz1}} \right)}{s \cdot \left(1 + \frac{s}{2 \cdot \pi \omega_{pp1}} \right)} \quad (6)$$

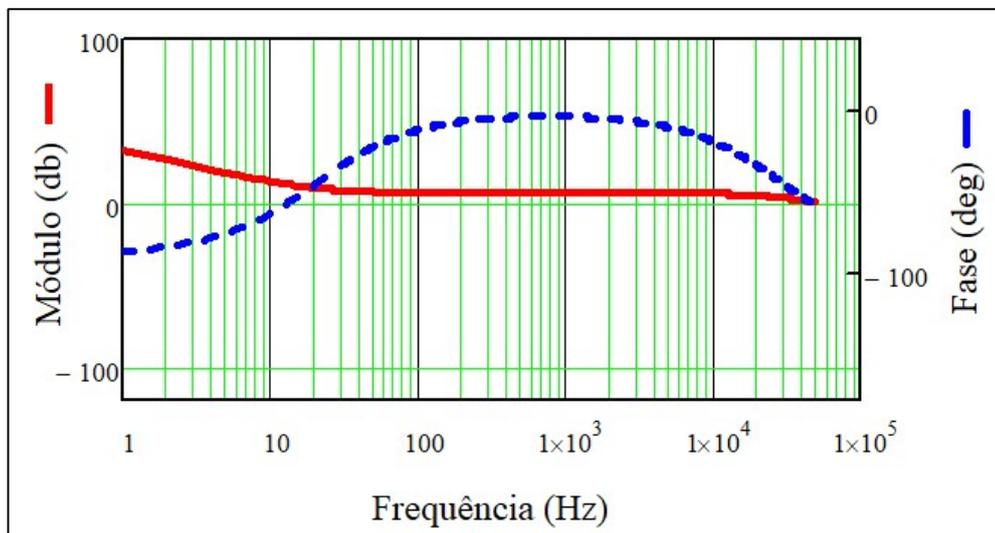
Na Equação 6, os valores do zero e do polo correspondem a:

$$2 \cdot \pi \omega_{zz1} = 125.664$$

$$2 \cdot \pi \omega_{pp1} = 1.885 \times 10^5$$

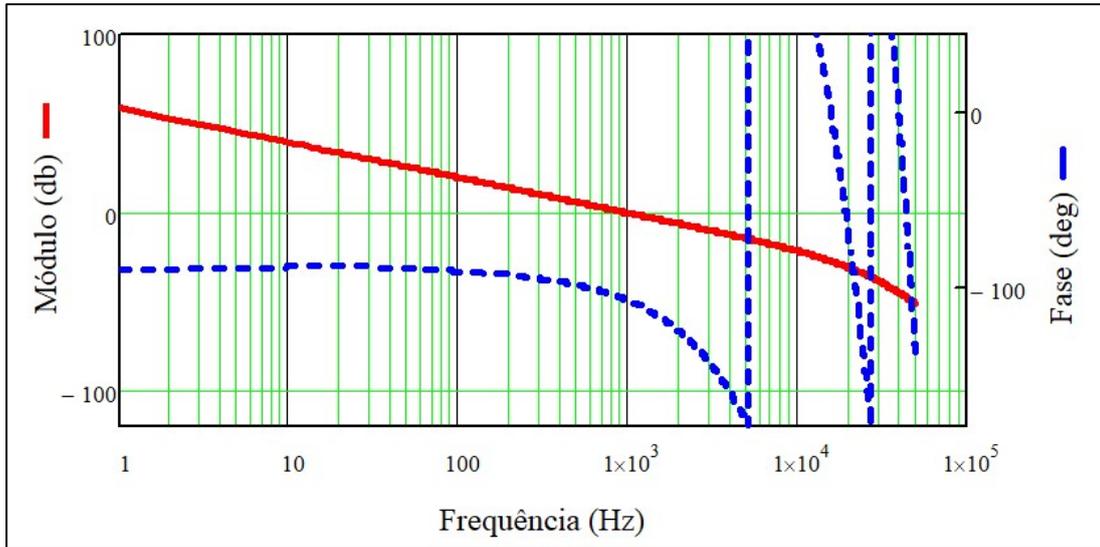
A Figura 41 apresenta o resultado do controlador e a Figura 42 ilustra o resultado da FTMA compensada. Nota-se a frequência de cruzamento em 1kHz e margem de fase de 72,5°.

Figura 41 - Diagrama de Bode do resultado do controlador



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

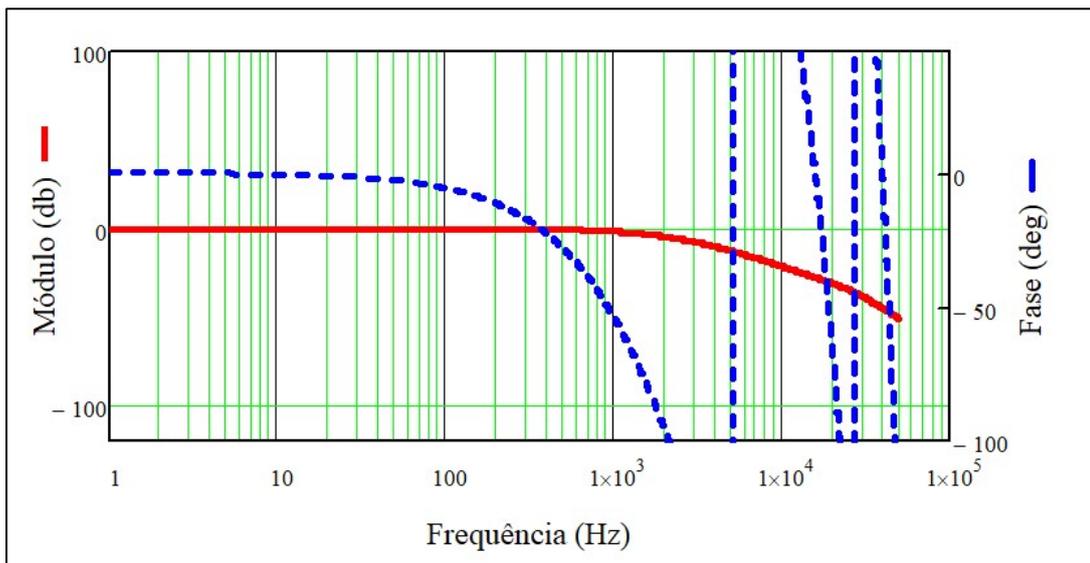
Figura 42 - Diagrama de Bode da FTMA compensada



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 43 apresenta o resultado do controle em malha fechada, onde verifica-se que os requisitos do projeto são atendidos. Nota-se que até a frequência de 1kHz não se apresentam grandes variações no ganho, porém, constata-se que acima de 100Hz já se apresenta perda de fase.

Figura 43 - FTMF do sistema de controle

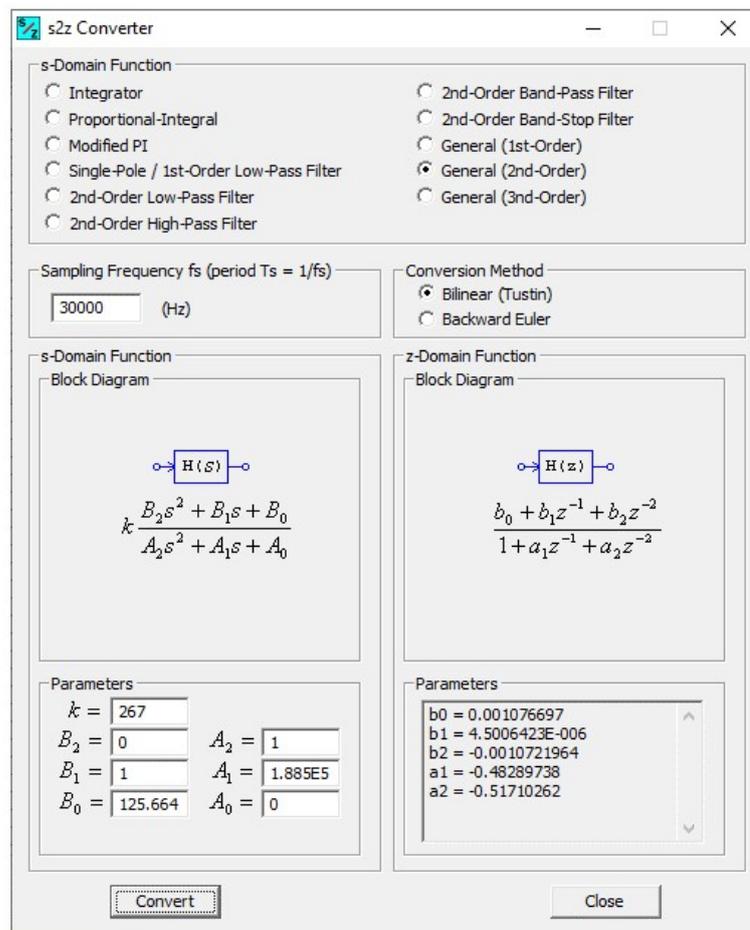


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

6.5.2.1 Discretização do controle

Para discretização do controle utilizou-se a ferramenta do software PSIM, com o método de conversão bilinear e a frequência da discretização selecionada em 30kHz. A Figura 44 representa essa função do software, onde já é possível obter os valores convertidos para aplicação no controlador dentro da própria simulação.

Figura 44 - Discretização do controle pelo software PSIM

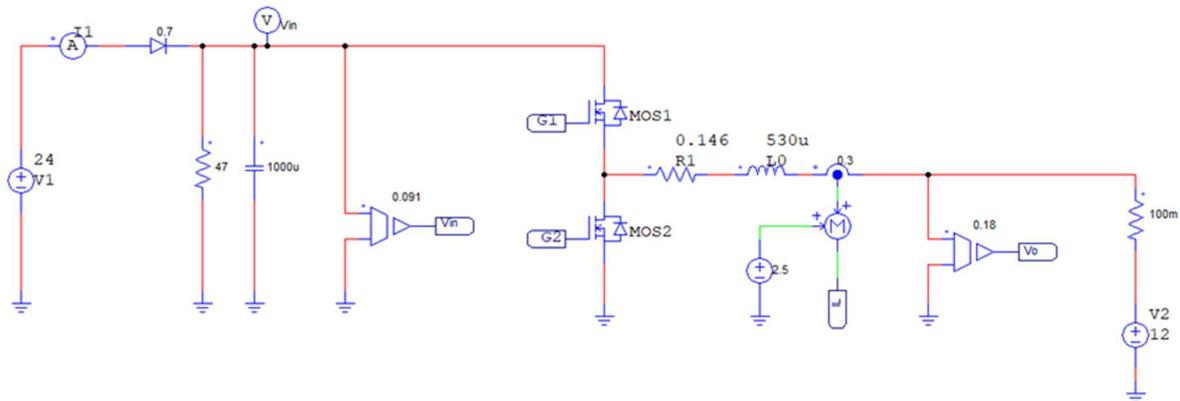


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

6.6 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Com o objetivo de validar o método de carga Reflex, utilizou-se o software PSIM para simular o funcionamento do conversor CC-CC bidirecional apresentado na Figura 45. A realização da simulação considerou os requisitos do projeto e valores dos parâmetros apresentados na seção 6.1 deste trabalho, mais especificamente na Tabela 3 e na Tabela 5 e o acionamento das chaves é feito de forma complementar.

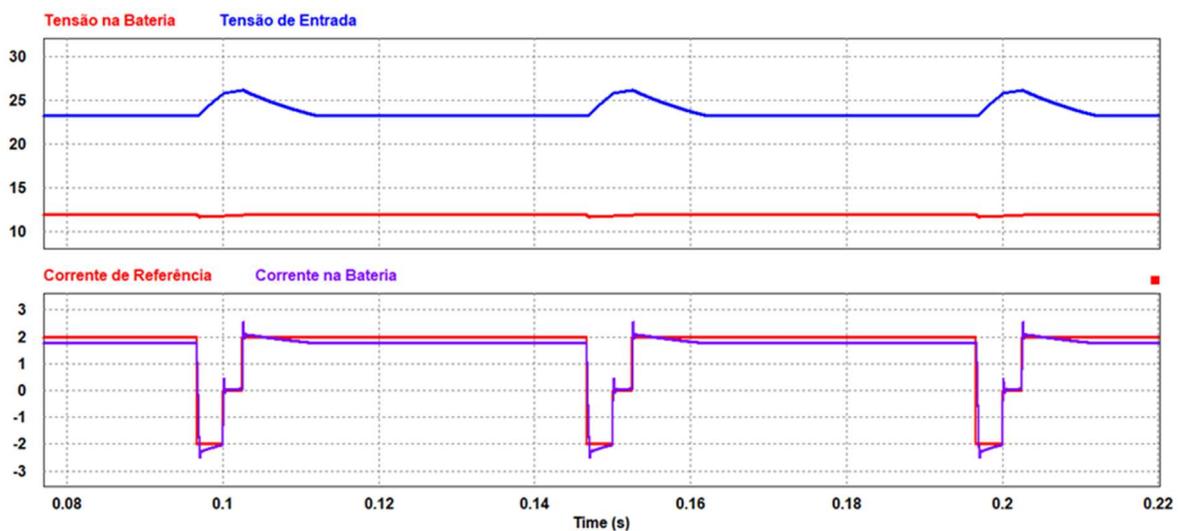
Figura 45 – Circuito simulado do conversor CC-CC bidirecional



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

A Figura 46 apresenta a simulação do método Reflex, onde é observada a tensão de entrada do sistema sofrendo uma variação no momento do pulso negativo de corrente, a tensão na bateria durante o processo de carga, a corrente de referência e a corrente na bateria com a atuação do controle do sistema. Percebe-se que a atuação do controle está atendendo as especificações do projeto, pois, ele está respondendo satisfatoriamente as três condições a que foi imposto, fazendo a corrente da bateria ir do pulso positivo ao pulso negativo e em seguida ao zero (descanso), e por fim, retornando à corrente positiva novamente para reiniciar o ciclo.

Figura 46 – Resultados da simulação do método Reflex



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios realizados em bancada. Cabe ressaltar que os resultados obtidos implicaram, previamente, na realização de ensaios que tiveram como objetivo validar os requisitos do método de carga a ser aplicado à bateria.

Para que os resultados sejam compreendidos de modo contextualizado, são descritas as especificações técnicas da bateria utilizada durante os ensaios, a validação pela aplicação do método Reflex à referida bateria e, por fim, os resultados dos ensaios associados às conclusões decorrentes da comparação com o método de carga CC-CV.

7.1 ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DA BATERIA

A bateria utilizada para os ensaios práticos apresenta as especificações descritas na Tabela 9. Trata-se de uma bateria de chumbo-ácido de 12V/9Ah que pode ser utilizada nos sistemas de UPS.

Tabela 9 – Especificações técnicas da bateria utilizada nos ensaios

Part number	BAT2120091
Número de células	6
Tensão nominal	12V
Capacidade	9Ah @ 20h até 1,75V/cel
Peso	2,47Kg ±10%
Máxima corrente de descarga	90A/5s
Resistência interna	16,5mOhm ±10%
Faixa de temperatura normal de operação	25°C
Tensão de carga de flutuação	13,5V – 13,7V
Máxima corrente de recarga recomendada	2,7A
Tensão de equalização	14,5V – 14,7V
Material do monobloco	ABS
Autodescarga	Podem ser armazenadas por até 6 meses a 25°C.

Fonte: (WEG, 2020)

7.2 ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO MÉTODO REFLEX

Com o intuito de analisar os estudos teóricos realizados sobre o método Reflex, previamente aos ensaios de testes de carga, foram realizados vários ensaios em busca do funcionamento pleno do protótipo e da validação do método.

7.2.1 Aplicação do método diretamente à bateria

O primeiro teste realizado, cujos resultados atendem aos requisitos do projeto, foram obtidos a partir da aplicação da corrente pulsada desejada à bateria, de modo a comprovar que o método Reflex poderia ser nela implementado, conforme pode ser observado na Figura 47.

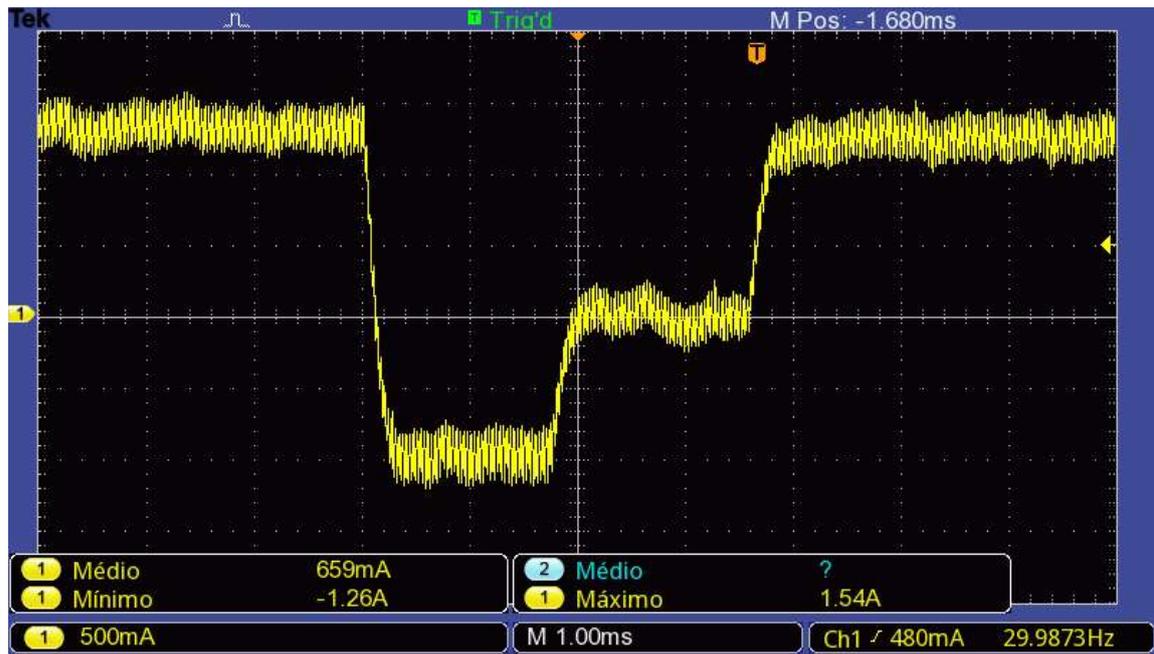


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Ao aplicar um *zoom* na forma de onda apresentada na Figura 47, é possível observar como a resposta do controle está seguindo a referência de corrente (em vermelho) de acordo com o projetado para a topologia Reflex. Esta referência faz a corrente da bateria ir do pulso positivo ao negativo e em seguida ao zero (descanso), e por fim, retornando à corrente positiva novamente.

Na Figura 48 pode-se observar que não existe sobressinal e o tempo de resposta do controle é rápido.

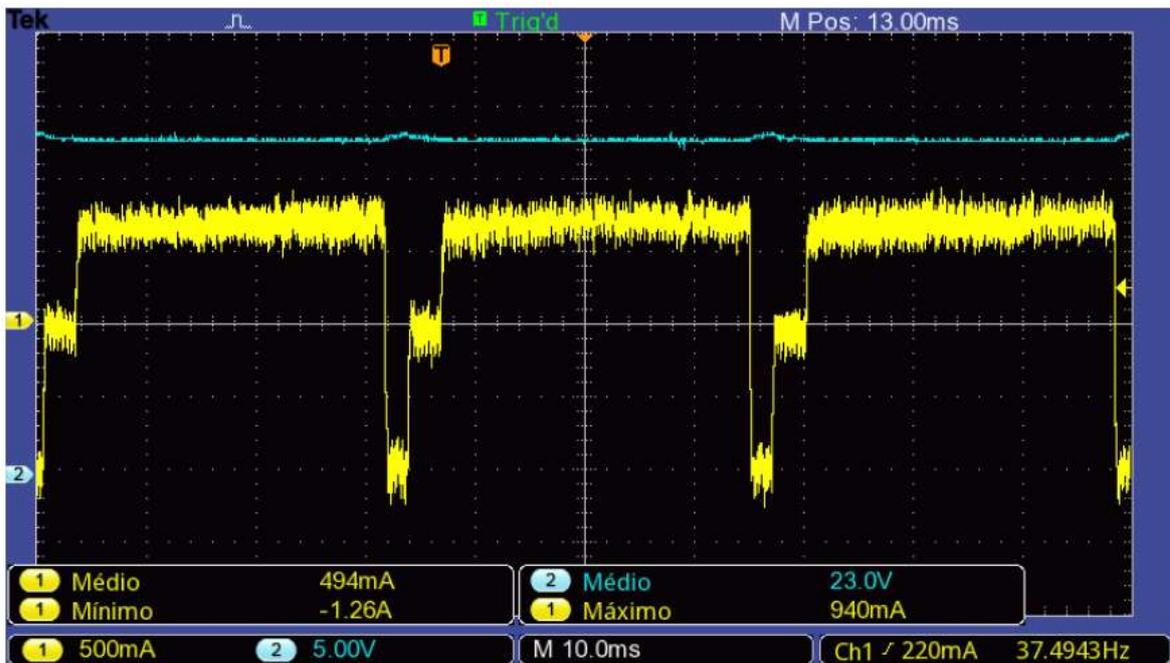
Figura 48 - Características da forma de onda de corrente para o método Reflex



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

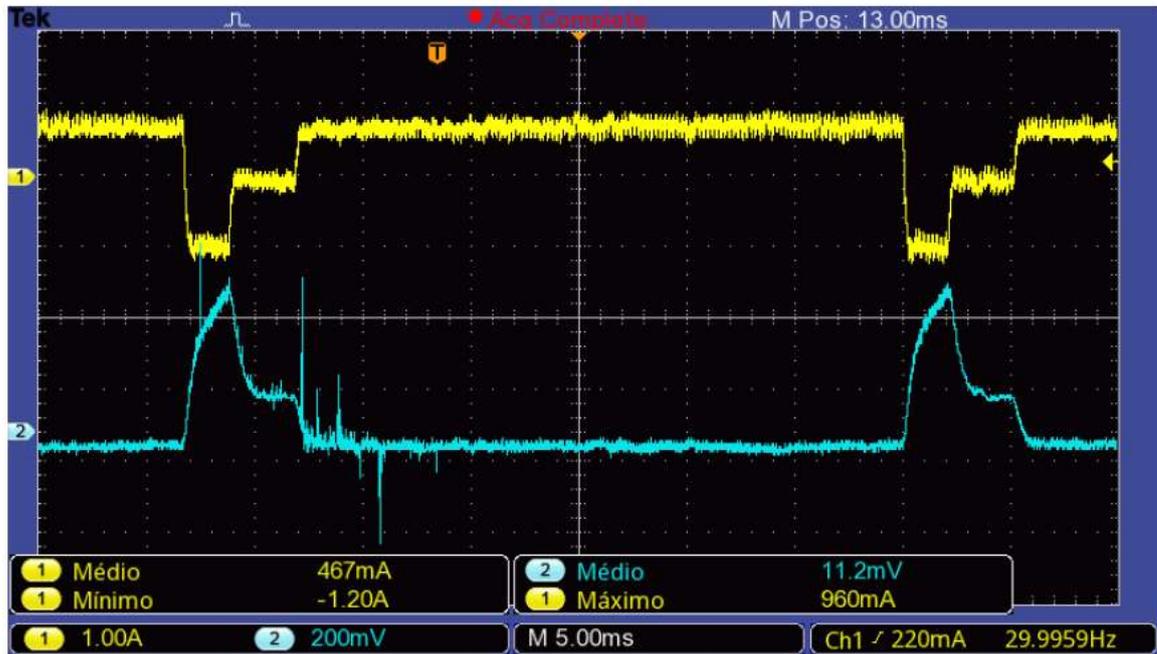
Através da Figura 49, no canal 2 do osciloscópio, constata-se a variação da tensão no barramento de entrada no instante em que é aplicado o pulso de corrente. Já, na Figura 50, onde foi utilizado o acoplamento CA conforme o canal 2 do osciloscópio, evidencia-se que esta variação de tensão atinge cerca de 500mV no instante em que é aplicado o pulso de corrente.

Figura 49 - Forma de onda da corrente do método Reflex (Canal 1) e Tensão no barramento de entrada (Canal 2)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

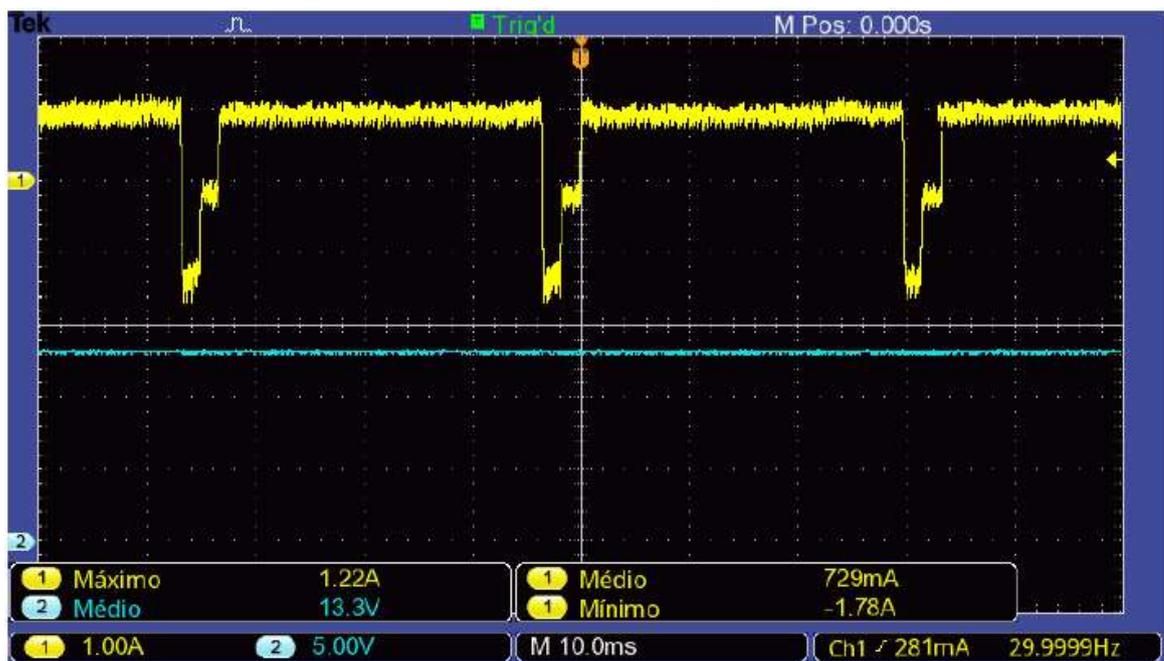
Figura 50 - Forma de onda da corrente do método Reflex (Canal 1) e Tensão de entrada medida por acoplamento c.a. (Canal 2)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A visualização da tensão da bateria através do canal 2 do osciloscópio é demonstrada na Figura 51. Esta imagem corresponde ao momento em que era aplicado o pulso de corrente Reflex à bateria. Nota-se que a tensão na bateria apresenta o valor de 13,3V.

Figura 51 - Tensão da bateria durante o pulso Reflex



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A validação do ajuste dos tempos que a corrente permanece no intervalo positivo, negativo e no zero, que é realizado através dos *trimpots*, é observada na Figura 52 – (a), (b) e na Figura 53 - (c). As diferenças observadas nos tempos são evidentes, pois, em (a) a corrente negativa permanece por um tempo inferior do que a corrente ajustada em (b). Já, em (b) a corrente permanece por um tempo inferior em zero, comparada com a corrente que foi ajustada em (c). A diferença no tempo que a corrente permanece positiva, é demonstrada por meio da comparação das formas de onda entre (a) e (b) ou (a) e (c), que também é passível de ajuste.

Estes ajustes são necessários para adequar as frequências a que o protótipo foi submetido durante os vários ensaios de carga da bateria e, ao se ajustar esses tempos, os valores médios das correntes observadas em (a), (b) e (c), conseqüentemente, também variam.

Figura 52 - Variação dos tempos dos intervalos positivo, negativo e de descanso (a) e (b)

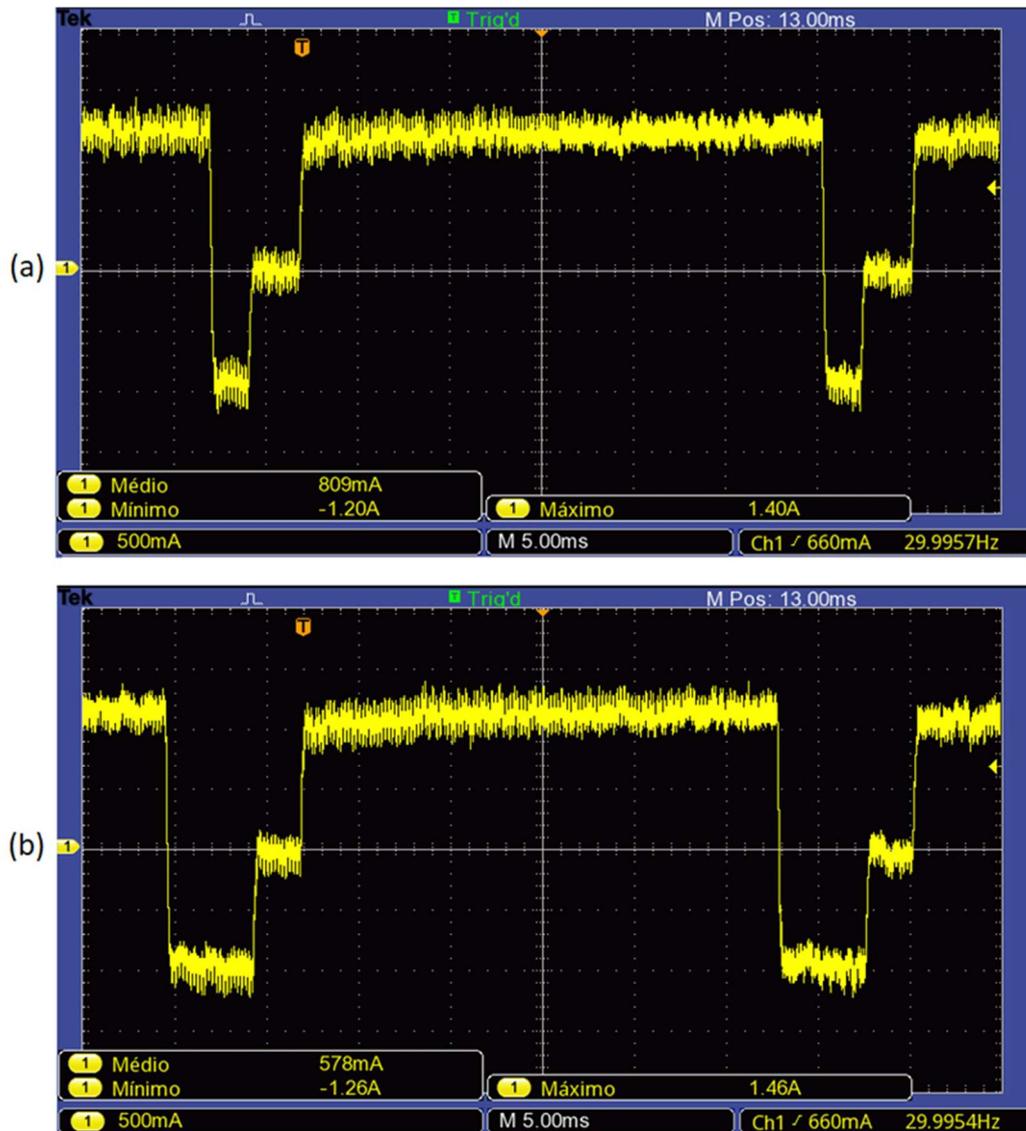
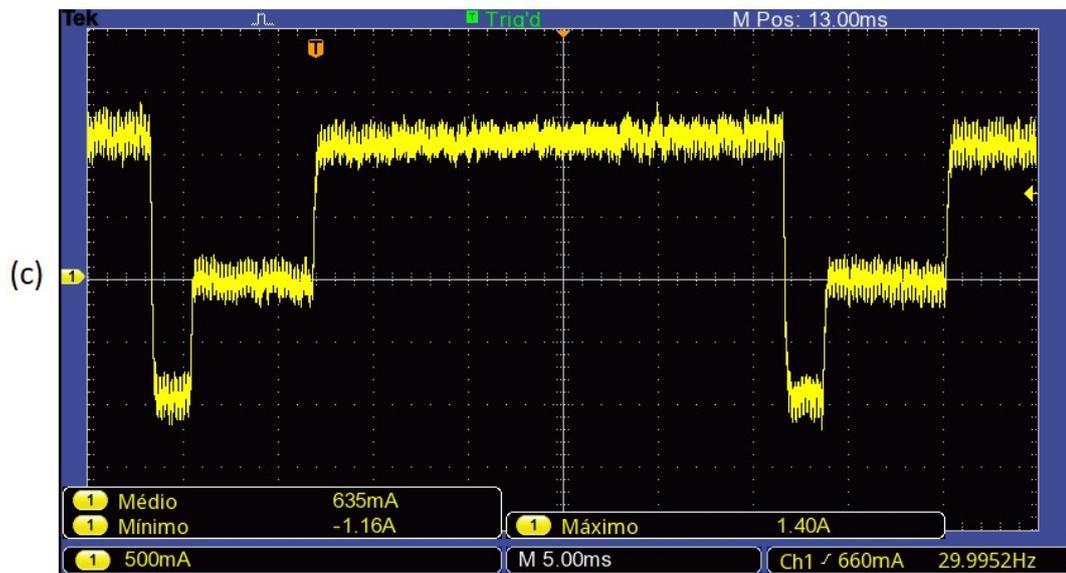


Figura 53 - Variação dos intervalos de tempos positivo, negativo e de descanso (c)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

7.3 ENSAIOS DE CARGA DA BATERIA COM O MÉTODO REFLEX

Antes da realização dos ensaios, foram buscados referenciais para executá-los com relação a frequência da corrente a ser aplicada à bateria e os tempos de cada intervalo de pulsos. Dentre os artigos estudados (CHING-MING et al., 2017) considerou a frequência de 5Hz para carga, todavia os ensaios tiveram como ponto de partida 1Hz. Os tempos dos pulsos para os ensaios consideraram também a proposta de (CHING-MING et al., 2017), assim, os ensaios foram realizados tomando-se este artigo como referência, o que se deu com o objetivo de averiguar o tempo de carga até que a bateria atingisse a tensão de flutuação. Para além destas frequências, com a intenção de encontrar o tempo mais rápido de carga e que trouxesse também maior carga acumulada na bateria, ensaios em outras frequências também foram realizados.

É importante ressaltar que, neste estudo, não houve a implementação da etapa de manutenção da tensão de flutuação na bateria, pois o foco estava em realizar a descarga para mensurar o tempo que ela levaria para ser descarregada. No entanto, presume-se que, caso a etapa de manutenção da tensão de flutuação fosse aplicada por um determinado tempo, a carga armazenada na bateria poderia ser possivelmente maior, mas acrescentaria mais tempo ao processo de carga.

Outro aspecto a ser considerado refere-se ao fato de que os ensaios se deram em baterias novas, o que, neste momento, justifica a não realização da etapa de equalização no processo de carga. Tal escolha pressupõe que, em baterias novas, as células internas encontram-se com as

tensões balanceadas, pois elas não passaram por vários processos de carga, descarga ou descargas profundas antes de sua utilização nos ensaios, o que tornaria necessária a equalização.

Durante os ensaios, realizou-se o monitoramento da temperatura da bateria no seu terminal negativo, conforme estudo desenvolvido por (LAZZARIN, 2006), assim como também no corpo da bateria. Esta medição foi realizada para acompanhar a variação da temperatura no terminal e do grupo de células internas.

Os ensaios de carga foram executados a temperatura ambiente de 25°C, e após a realização de cada um, a bateria era descarregada com resistência constante através de uma carga resistiva de 20Ω. Esse procedimento foi realizado para averiguar quanto tempo se levaria até atingir a tensão mínima do conjunto de células internas, observando-se para que não ultrapassassem a tensão limite, o que ocasionaria uma descarga profunda da bateria. O tempo de descarga evidenciaria também o quanto a bateria armazenou de carga com o ensaio realizado em cada um dos métodos. Em relação ao tempo de descarga, tomando como referência pesquisa realizada por (TAVARES, 2015), o método de descarga ainda é considerado como o que resulta na estimativa do estado de carga mais confiável.

Antes de se iniciar cada processo de carga, a bateria era descarregada, apresentando um aumento na temperatura dos elementos internos, e, por isso, era necessário esperar um tempo de estabilização da temperatura em 25°C para se iniciar um novo processo de carga. Esse período de estabilização era necessário uma vez que, se fosse iniciado logo após o processo de descarga, a indicação das temperaturas do terminal e do corpo da bateria não corresponderiam ao real aumento da temperatura durante o processo de carga, podendo comprometer o estudo. Por esse motivo os ensaios foram intercalados entre duas baterias.

Nas próximas seções serão apresentados os dados de cada ensaio realizado. Eles referem-se a medição das temperaturas, a curva da tensão da bateria durante o processo de carga e os tempos dos pulsos em cada um dos ensaios realizados pelo método Reflex e, para efeitos de comparação, também pelo método CC-CV.

7.3.1 Ensaios de carga com o método Reflex com nível de corrente em 0,1C

Foram realizados sete ensaios com o nível de corrente em 0,1C, nos quais foram utilizadas, respectivamente, as seguintes frequências: 1Hz, 3Hz, 5Hz, 10Hz, 20Hz, 40Hz e 80Hz. Na sequência serão descritos os resultados destes ensaios.

No primeiro ensaio realizado, foi aplicada a corrente média de 900mA para carga (10% da corrente nominal da bateria – equivalente a 0,1C) a uma frequência de 1Hz. Os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso foram ajustados conforme a Tabela 10.

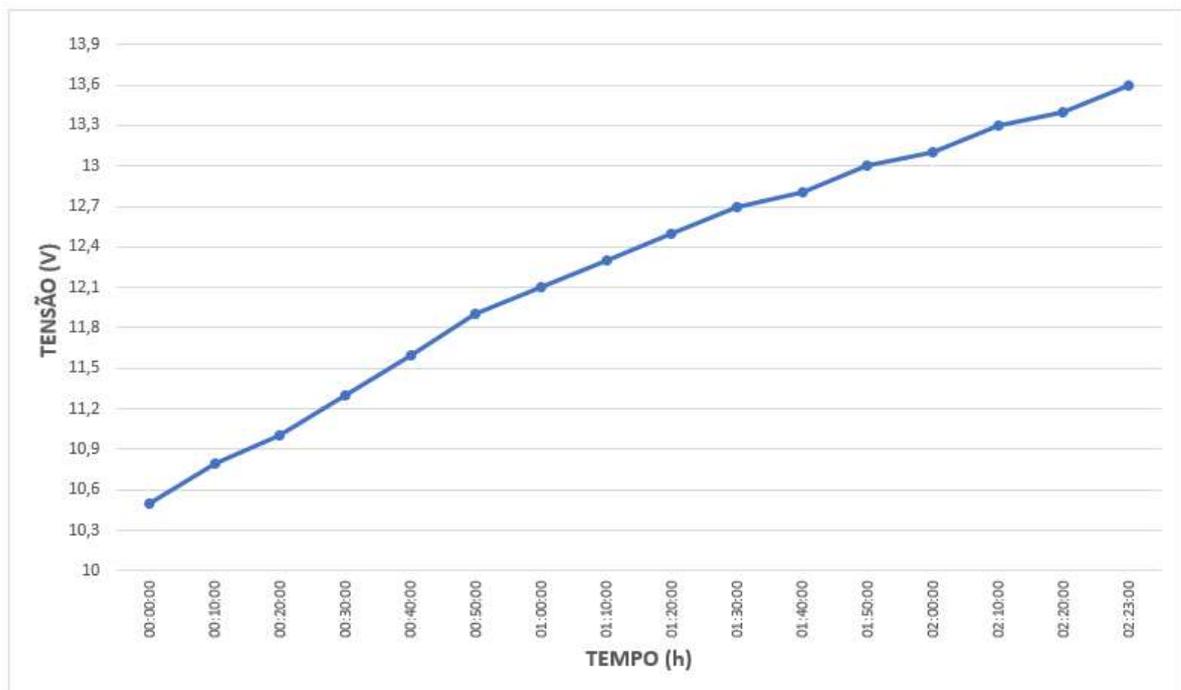
Tabela 10 - Tempo dos pulsos para carga da bateria com o método Reflex em 1Hz e nível de corrente em 0,1C

Intervalo	Tempo
IPP	700ms
IPN	150ms
ID	150ms

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

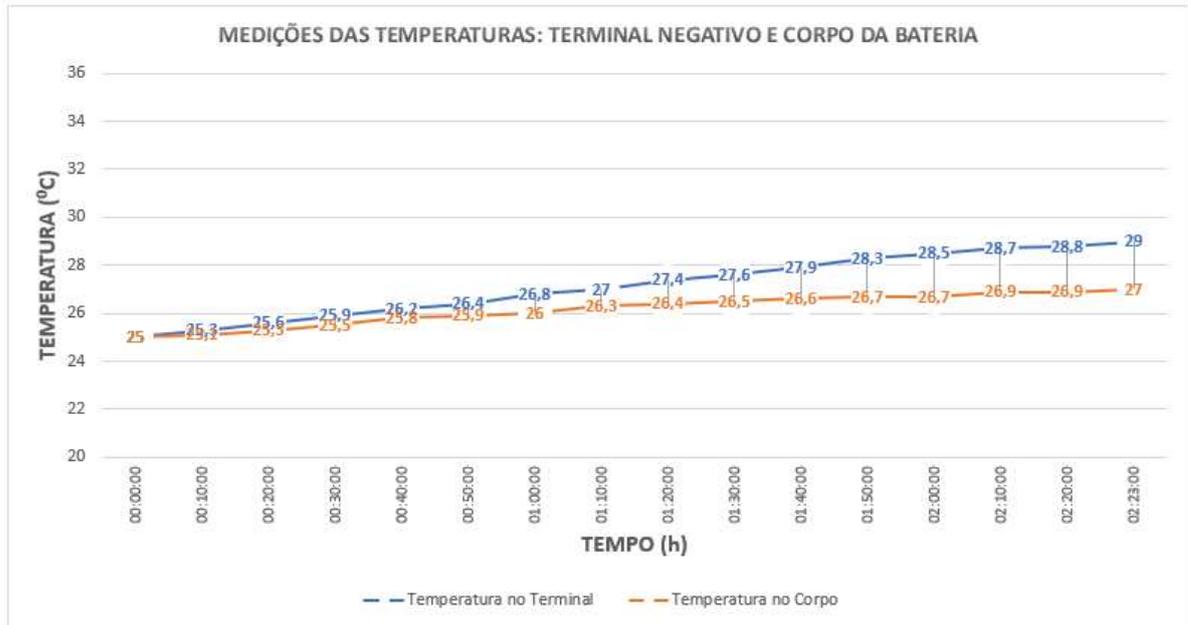
A Figura 54 apresenta o gráfico de carga da bateria para a frequência de 1Hz, onde a bateria levou 2h23min para atingir a tensão de flutuação e a Figura 55 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante este tempo. O processo de descarga levou 2h02min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 54 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 1Hz e nível de corrente em 0,1C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 55 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 1Hz e nível de corrente em 0,1C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

O segundo ensaio considerou a frequência de 3Hz. Os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso foram ajustados conforme a Tabela 11.

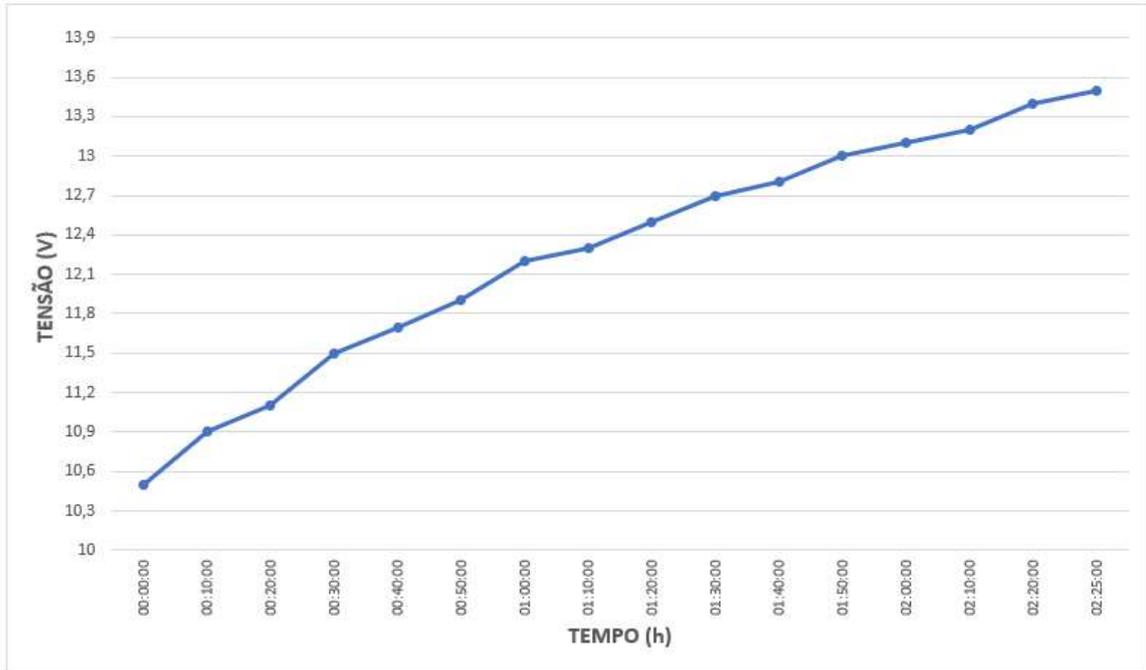
Tabela 11 - Tempo dos pulsos para carga da bateria com o método Reflex em 3Hz e nível de corrente em 0,1C

Intervalo	Tempo
IPP	233ms
IPN	50ms
ID	50ms

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

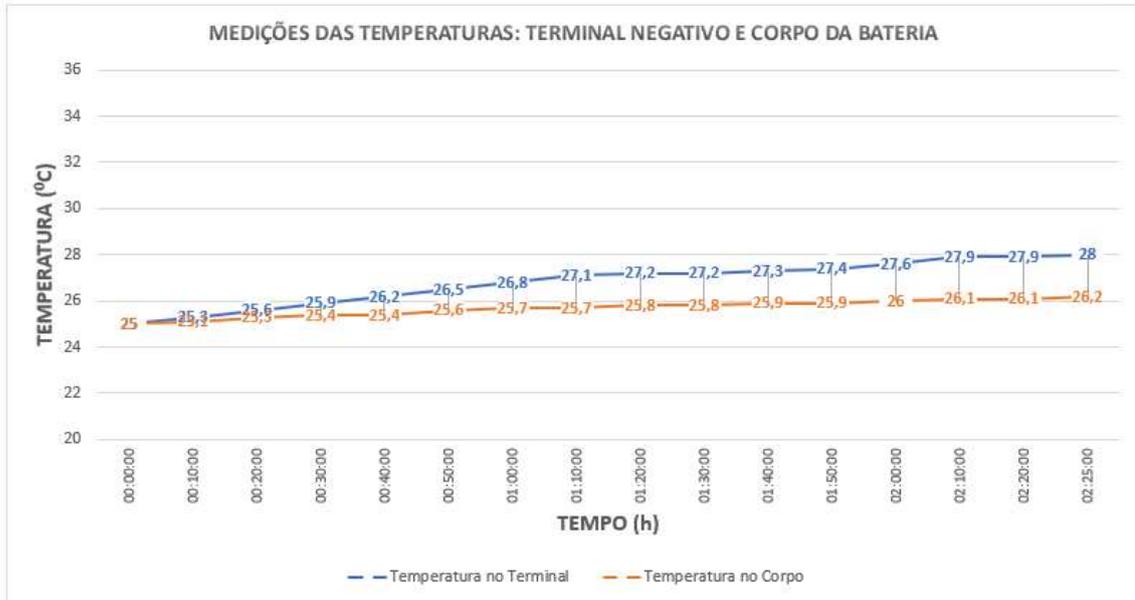
A Figura 56 apresenta o gráfico de carga da bateria para a frequência de 3Hz, onde a bateria levou 2h25min para atingir a tensão de flutuação e a Figura 57 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante este tempo. O processo de descarga levou 2h04min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 56 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 3Hz e nível de corrente em 0,1C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 57 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 3Hz e nível de corrente em 0,1C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

No terceiro ensaio realizado, foi aplicada a corrente média de 900mA para carga a uma frequência de 5Hz. Os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso foram ajustados conforme a Tabela 12.

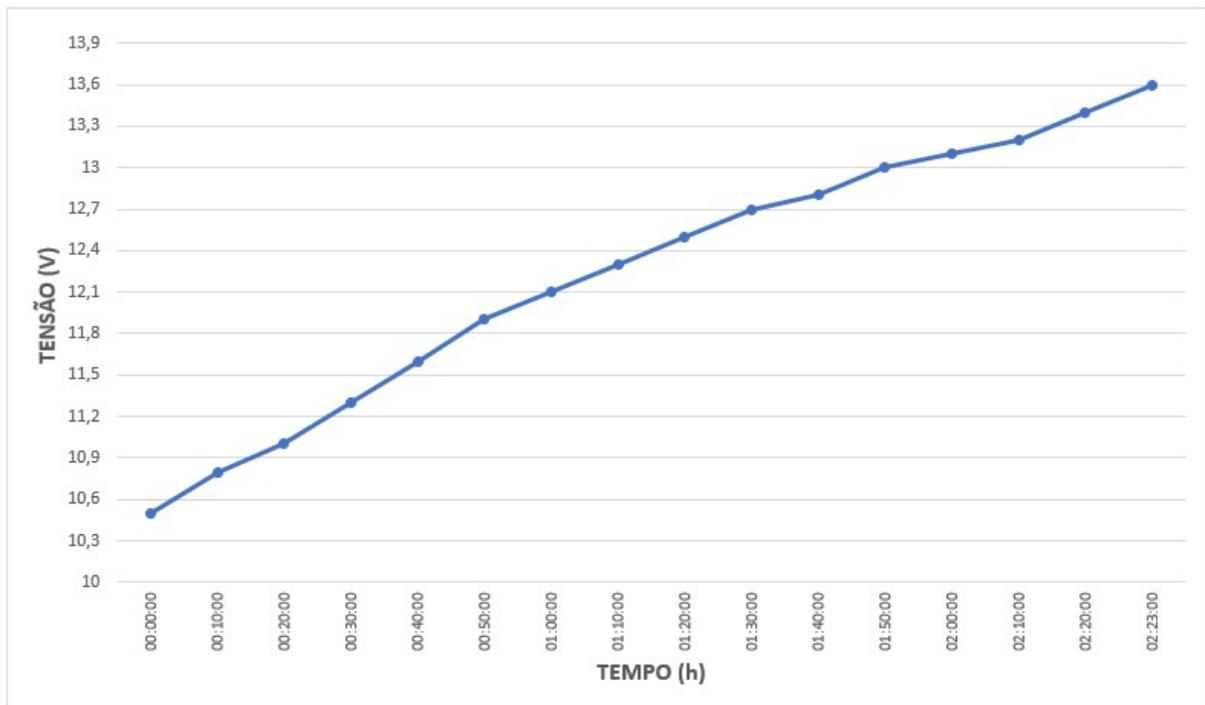
Tabela 12 - Tempo dos pulsos para carga da bateria com o método Reflex em 5Hz e nível de corrente em 0,1C

Intervalo	Tempo
IPP	140ms
IPN	30ms
ID	30ms

Fonte: Baseado em (CHING-MING et al., 2017)

A Figura 58 apresenta o gráfico de carga da bateria para a frequência de 5Hz, onde a bateria levou 2h23min para atingir a tensão de flutuação.

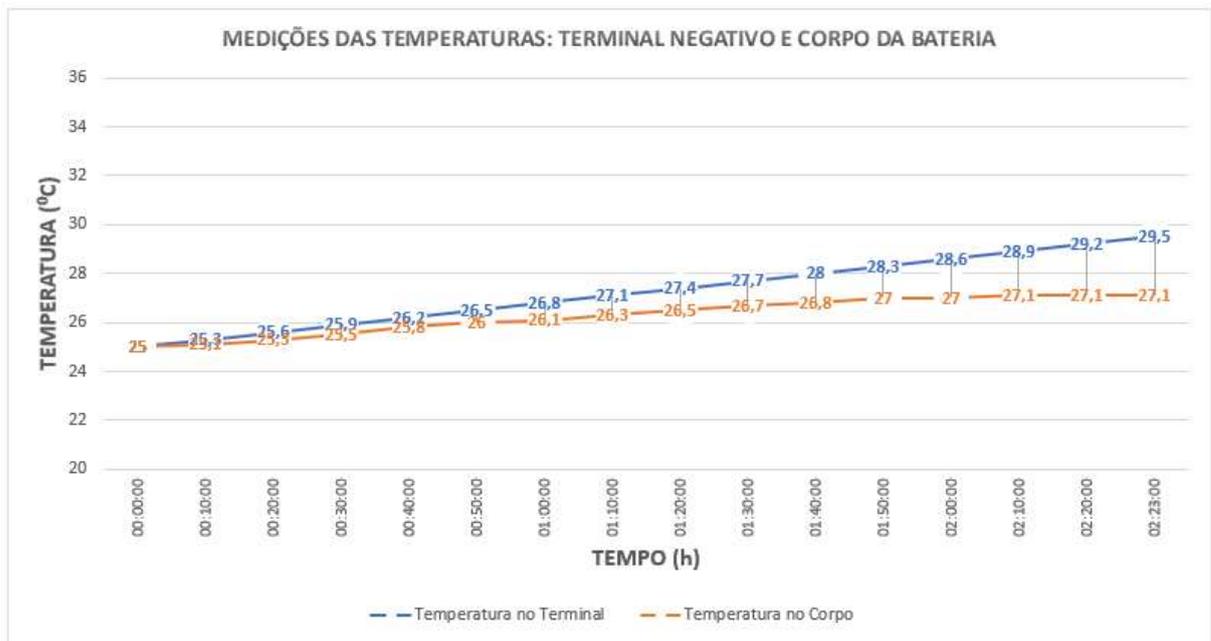
Figura 58 – Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 5Hz e nível de corrente em 0,1C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 59 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante este tempo. O processo de descarga levou 1h58min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 59 – Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 5Hz e nível de corrente em 0,1C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

O quarto ensaio considerou a frequência de 10Hz. Os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso foram ajustados conforme a Tabela 13.

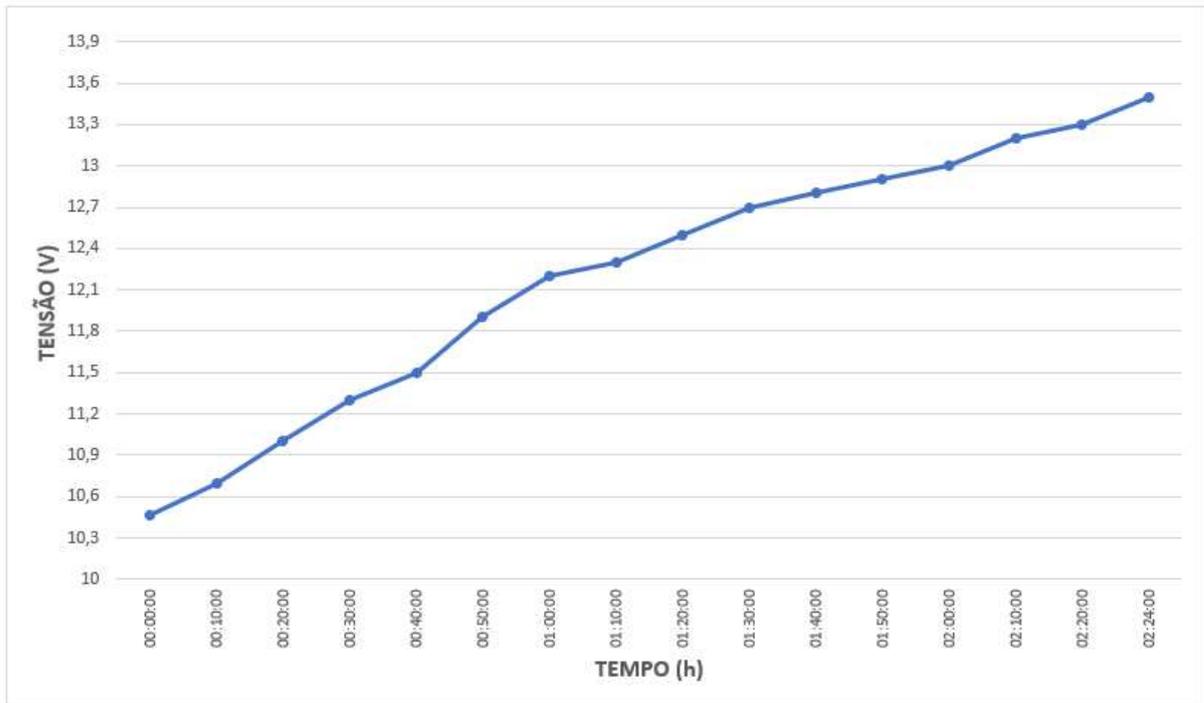
Tabela 13 - Tempo dos pulsos para carga da bateria com o método Reflex em 10Hz e nível de corrente em 0,1C

Intervalo	Tempo
IPP	70ms
IPN	15ms
ID	15ms

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

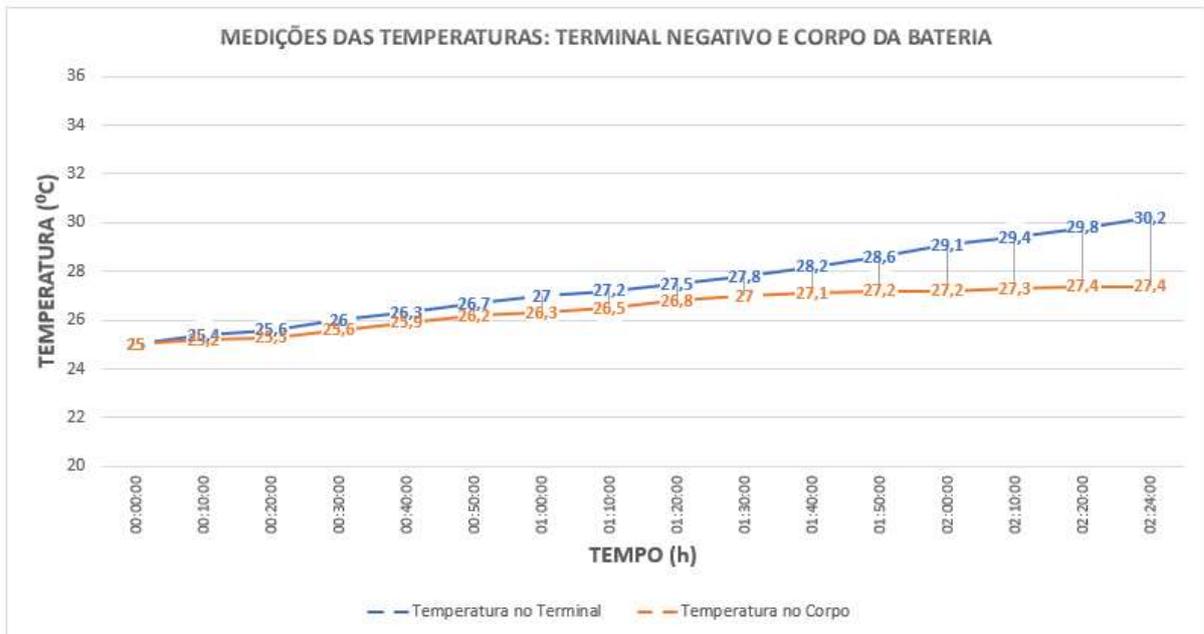
O gráfico de carga da bateria para a frequência de 10Hz é apresentado na Figura 60, onde a bateria levou 2h24min para atingir a tensão de flutuação e a Figura 61 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante este tempo. O processo de descarga levou 1h55min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 60 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 10Hz e nível de corrente em 0,1C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 61 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 10Hz e nível de corrente em 0,1C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

No quinto ensaio realizado foi aplicada a frequência de 20Hz. Os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso foram ajustados conforme a Tabela 14.

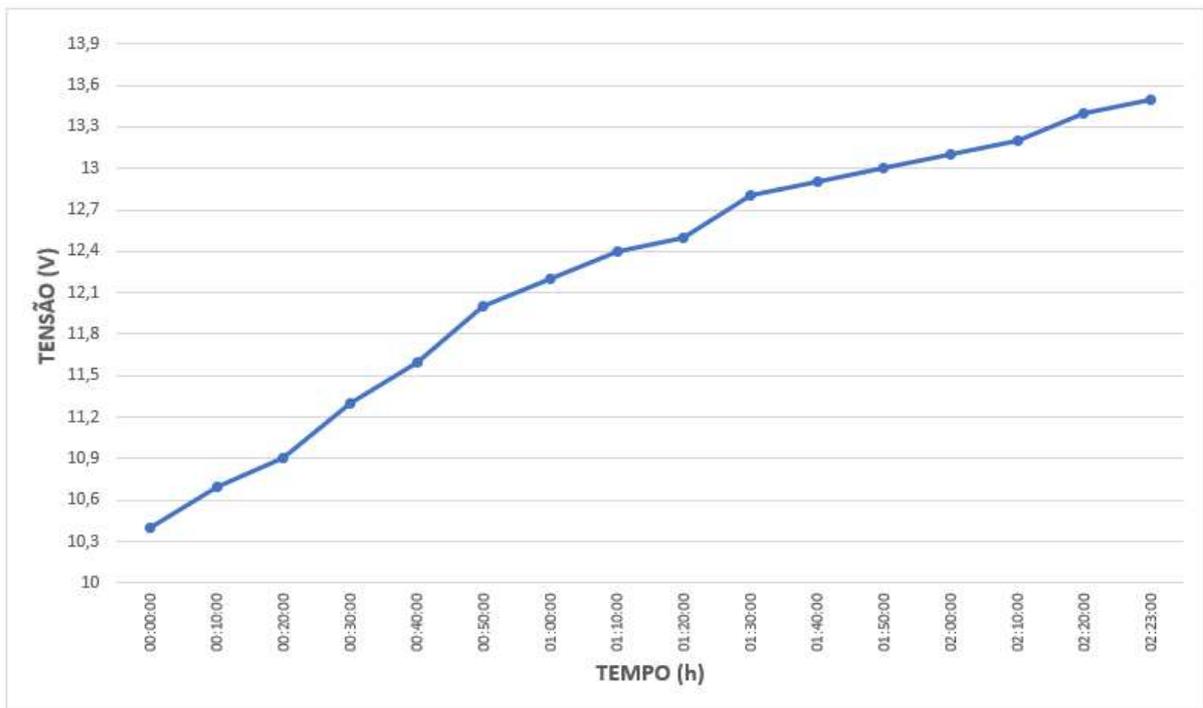
Tabela 14 - Tempo dos pulsos para carga da bateria com o método Reflex em 20Hz e nível de corrente em 0,1C

Intervalo	Tempo
IPP	35ms
IPN	7,5ms
ID	7,5ms

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 62 apresenta o gráfico de carga da bateria para a frequência de 20Hz. Nesta frequência a bateria levou 2h23min para atingir a tensão de flutuação.

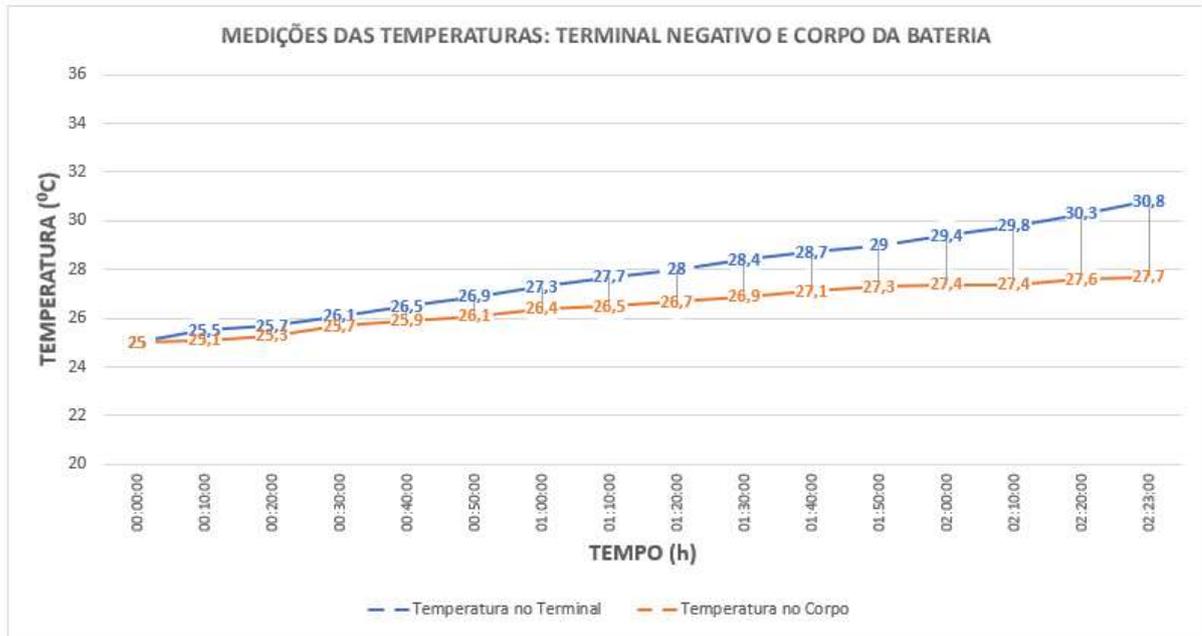
Figura 62 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 20Hz e nível de corrente em 0,1C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Na Figura 63 tem-se ilustrada a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante este tempo. O processo de descarga levou 1h51min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 63 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 20Hz e nível de corrente em 0,1C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A frequência de 40Hz foi aplicada no sexto ensaio. Os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso foram ajustados conforme a Tabela 15.

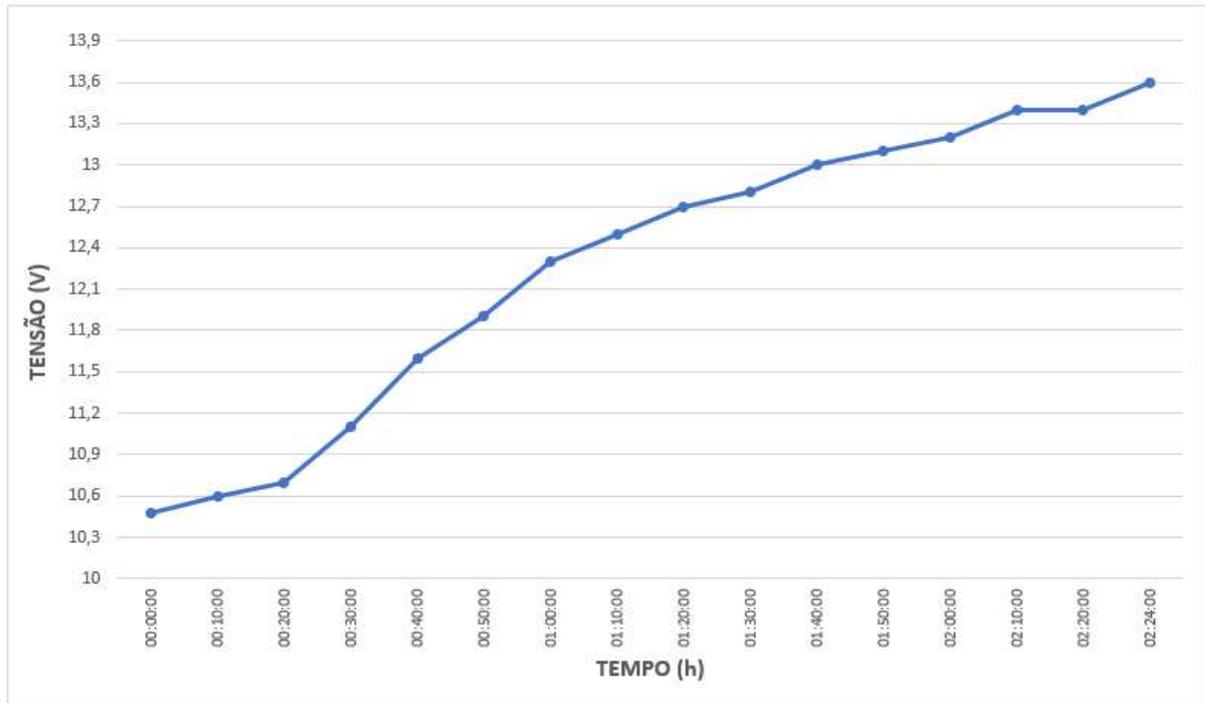
Tabela 15 - Tempo dos pulsos para carga da bateria com o método Reflex em 40Hz e nível de corrente em 0,1C

Intervalo	Tempo
IPP	17,5ms
IPN	3,75ms
ID	3,75ms

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

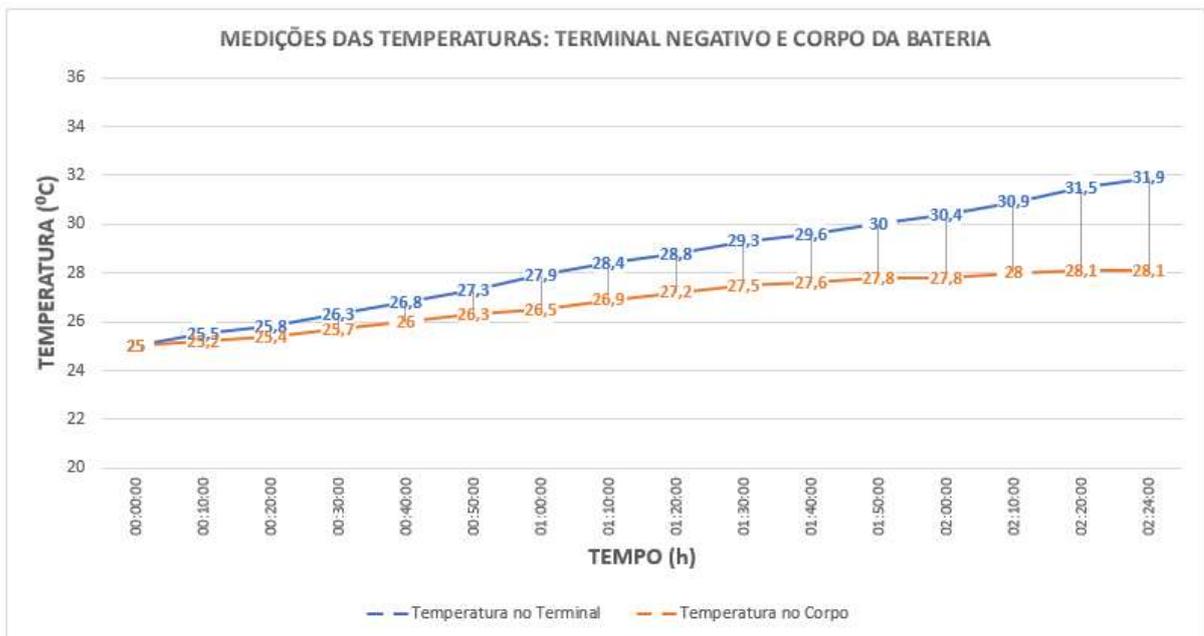
A Figura 64 apresenta o gráfico de carga da bateria para a frequência de 40Hz, onde a bateria levou 2h24min para atingir a tensão de flutuação. A Figura 65 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante o tempo levado pela bateria para atingir a tensão de flutuação. O processo de descarga levou 1h49min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 64 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 40Hz e nível de corrente em 0,1C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 65 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 40Hz e nível de corrente em 0,1C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Para o sétimo e último ensaio realizado com a corrente média inicial de 900mA, foi aplicada a frequência de 80Hz, os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso ajustados conforme a Tabela 16.

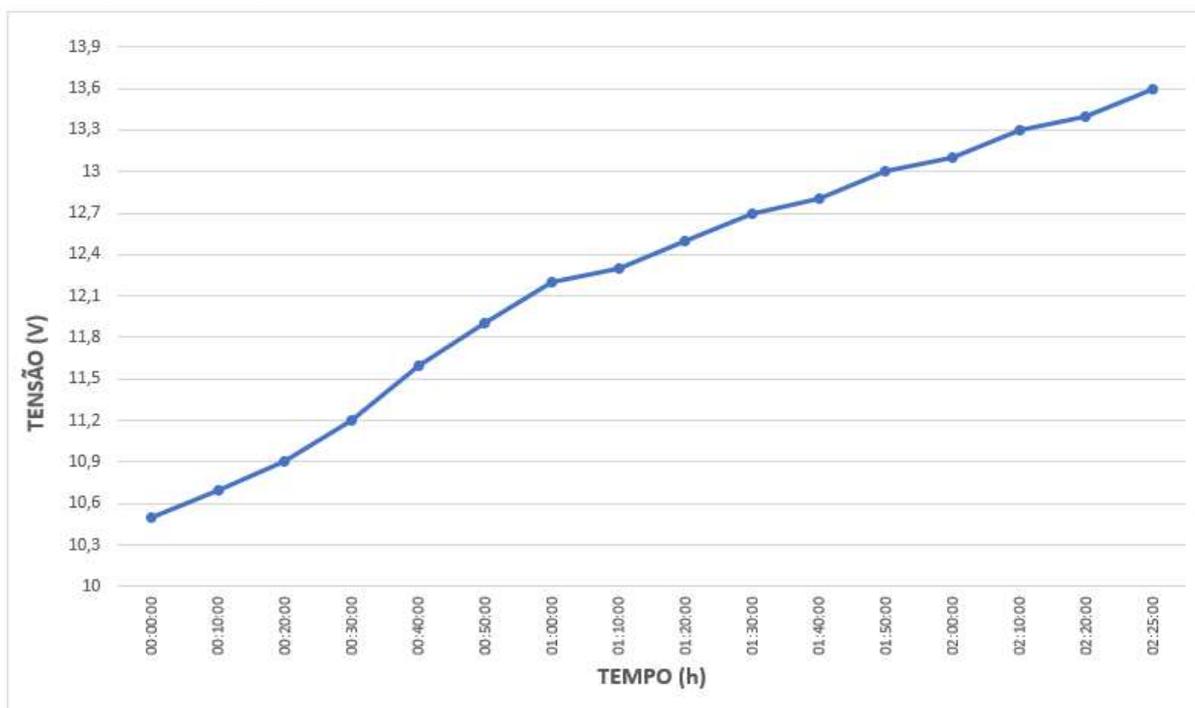
Tabela 16 - Tempo dos pulsos para carga da bateria com o método Reflex em 80Hz e nível de corrente em 0,1C

Intervalo	Tempo
IPP	8,75ms
IPN	1,875ms
ID	1,875ms

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

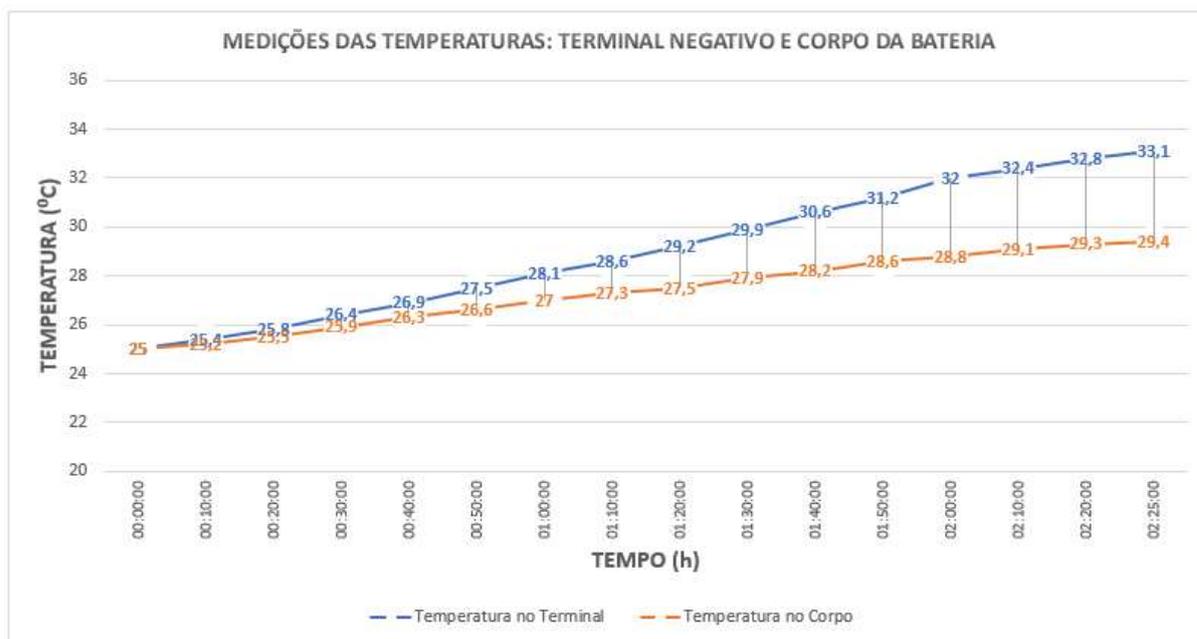
A Figura 66 apresenta o gráfico de carga da bateria para a referida frequência, onde a bateria levou 2h25min para atingir a tensão de flutuação e a Figura 67 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante este tempo. O processo de descarga levou 1h46min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 66 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 80Hz e nível de corrente em 0,1C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 67 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 80Hz e nível de corrente em 0,1C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

7.3.2 Ensaios de carga com o método Reflex com nível de corrente em 0,15C

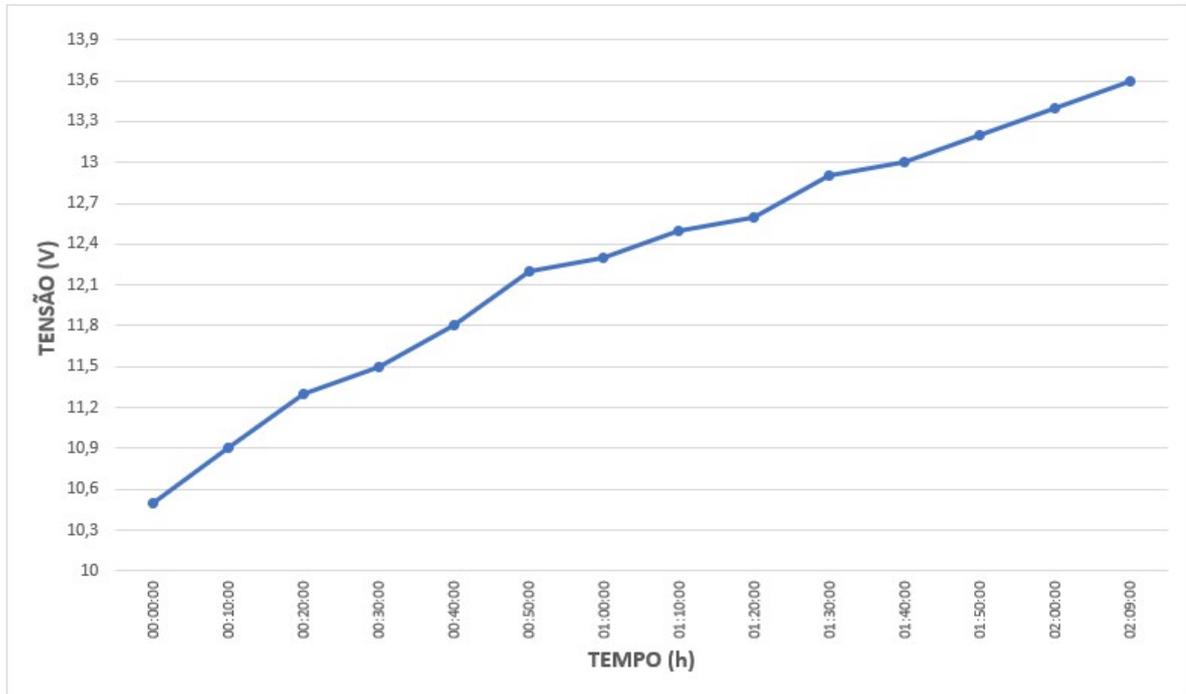
Nesta seção são apresentados os resultados de sete ensaios com o nível de corrente em 0,15C. Para os ensaios foram utilizadas as mesmas frequências aplicadas nos ensaios com o nível de corrente em 0,1C.

No primeiro ensaio realizado, foi aplicada a corrente média de 1,35A para carga (15% da corrente nominal da bateria – equivalente a 0,15C) a uma frequência de 1Hz. Os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso foram ajustados conforme a Tabela 10.

A Figura 68 apresenta o gráfico de carga da bateria para a frequência de 1Hz, onde a bateria levou 2h09min para atingir a tensão de flutuação e a Figura 69 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante este tempo.

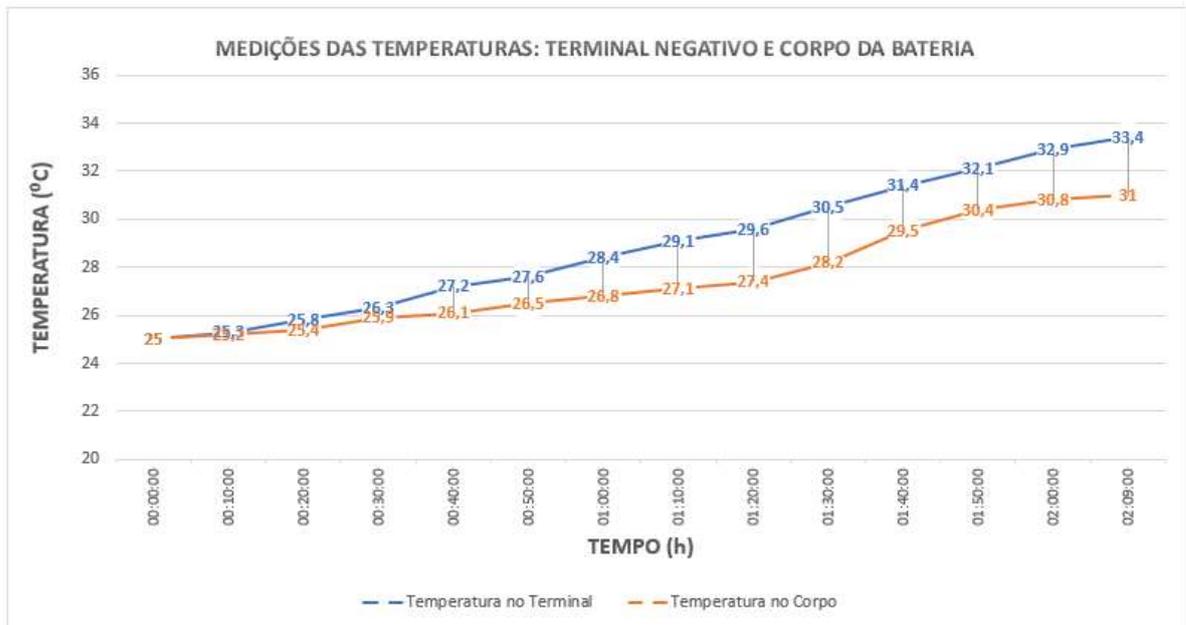
Neste primeiro ensaio, o processo de descarga levou 2h01min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 68 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 1Hz e nível de corrente em 0,15C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 69 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 1Hz e nível de corrente em 0,15C

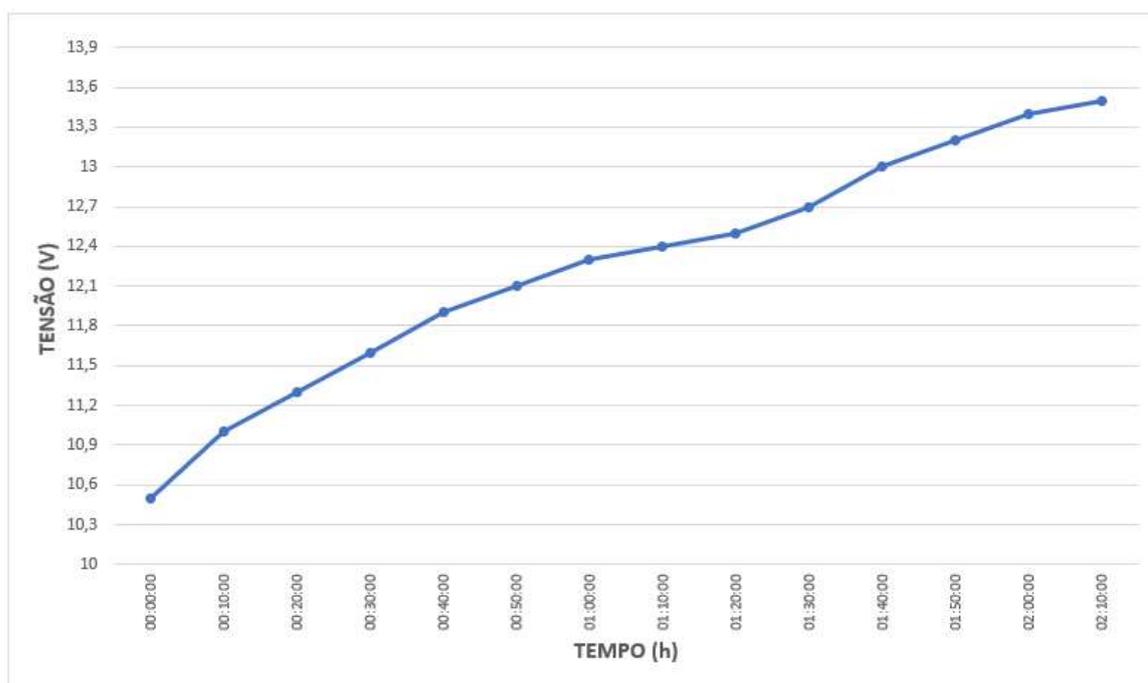


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

O segundo ensaio considerou a frequência de 3Hz. Os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso foram ajustados conforme a Tabela 11.

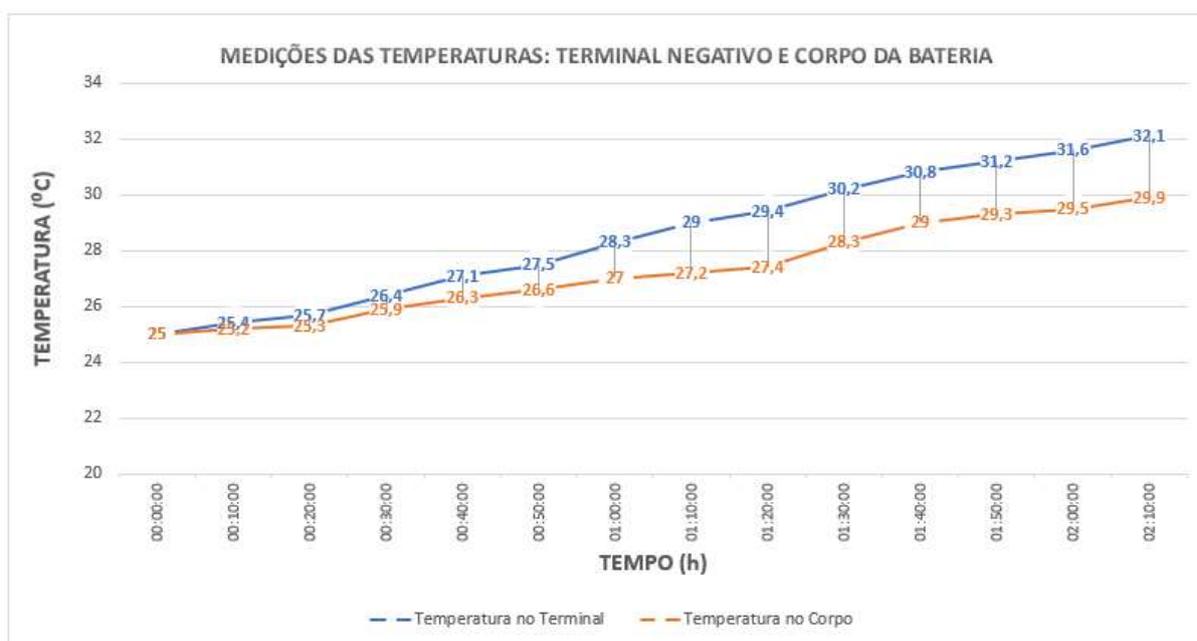
A Figura 70 apresenta o gráfico de carga da bateria para a frequência de 3Hz, onde a bateria levou 2h10min para atingir a tensão de flutuação e a Figura 71 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante este tempo. O processo de descarga levou 2h05min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 70 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 3Hz e nível de corrente em 0,15C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 71 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 3Hz e nível de corrente em 0,15C

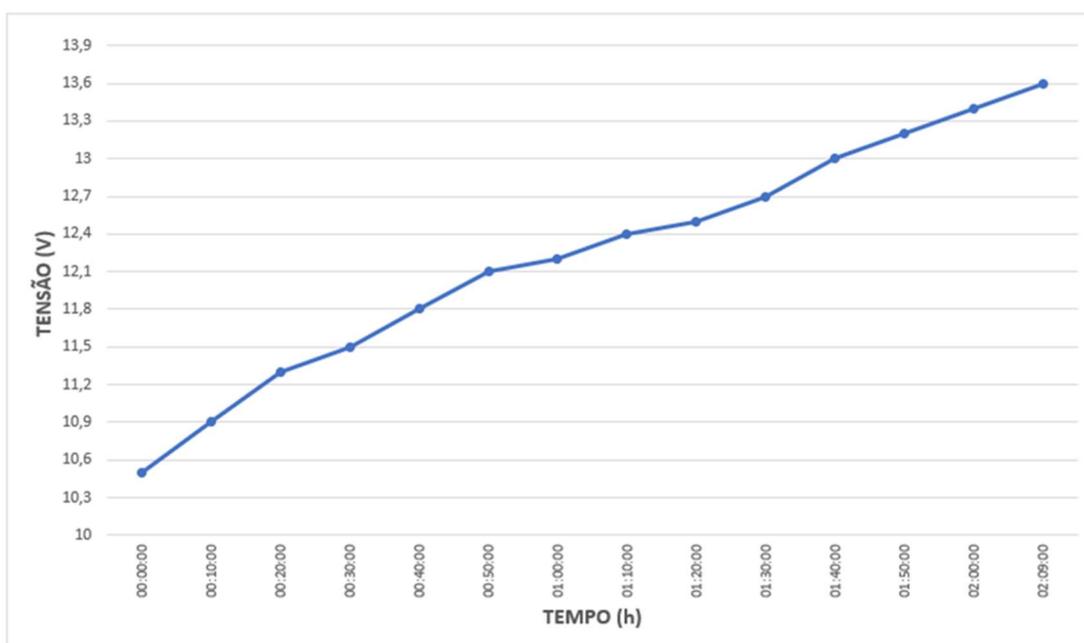


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

No terceiro ensaio realizado, a frequência de 5Hz foi aplicada e os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso foram ajustados conforme a Tabela 12.

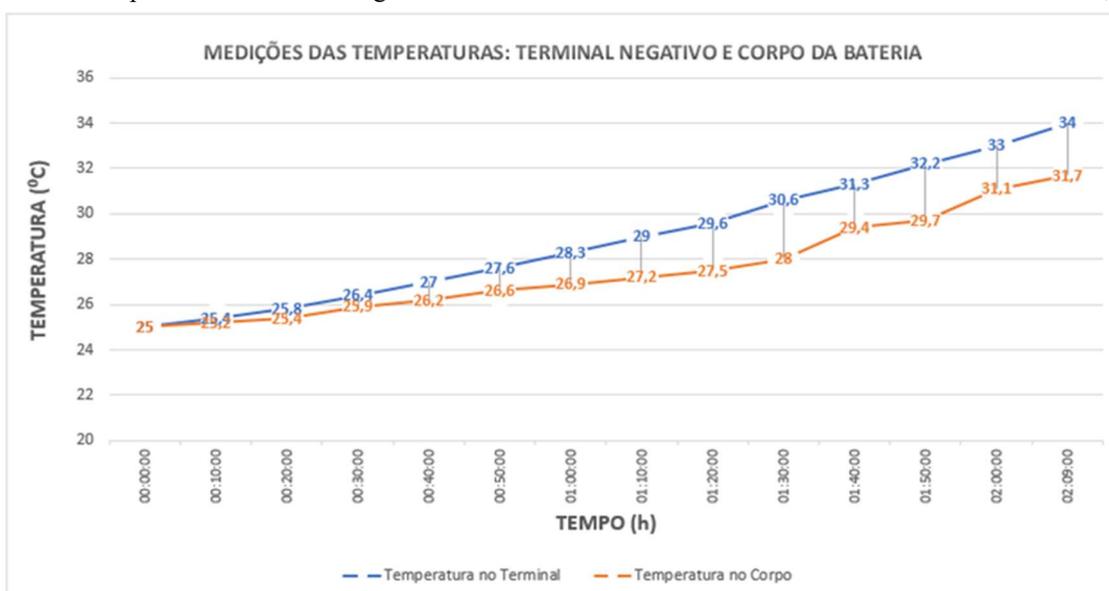
A Figura 72 apresenta o gráfico de carga da bateria, onde se observa que ela levou 2h09min para atingir a tensão de flutuação e a Figura 73 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante este tempo. O processo de descarga levou 1h55min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 72 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 5Hz e nível de corrente em 0,15C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 73 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 5Hz e nível de corrente em 0,15C

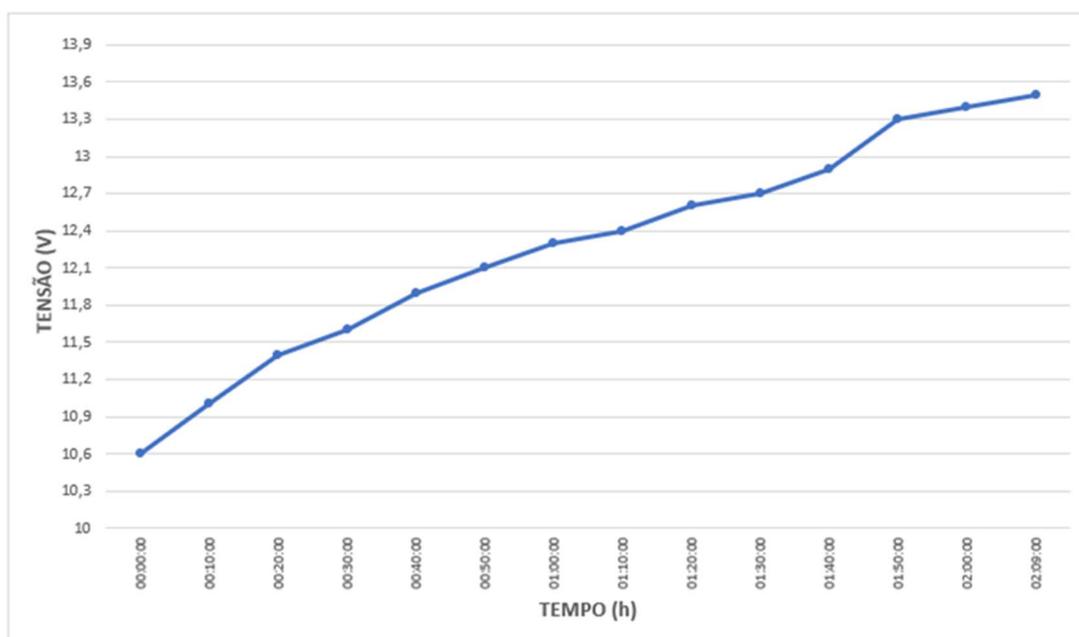


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

No quarto ensaio foi aplicada uma frequência de 10Hz, com os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso ajustados conforme a Tabela 13.

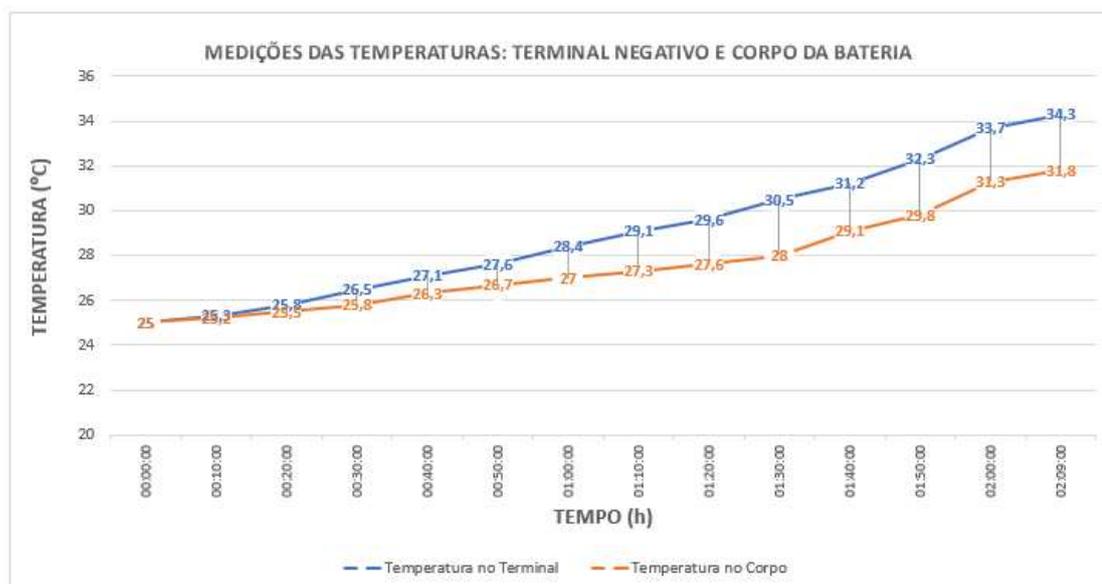
A Figura 74 apresenta o gráfico de carga da bateria para a frequência de 10Hz, com a bateria necessitando de 2h09min para atingir a tensão de flutuação. A variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante este tempo é ilustrada na Figura 75. O processo de descarga levou 1h49min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 74 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 10Hz e nível de corrente em 0,15C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 75 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 10Hz e nível de corrente em 0,15C

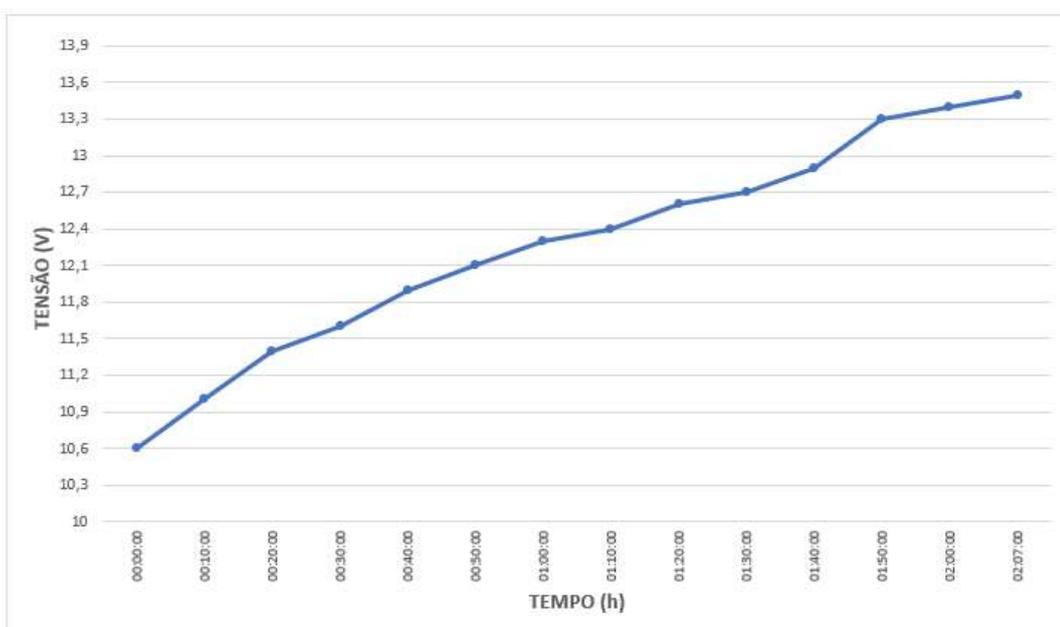


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

O quinto ensaio realizado considerou uma frequência de 20Hz. Os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso foram ajustados conforme a Tabela 14.

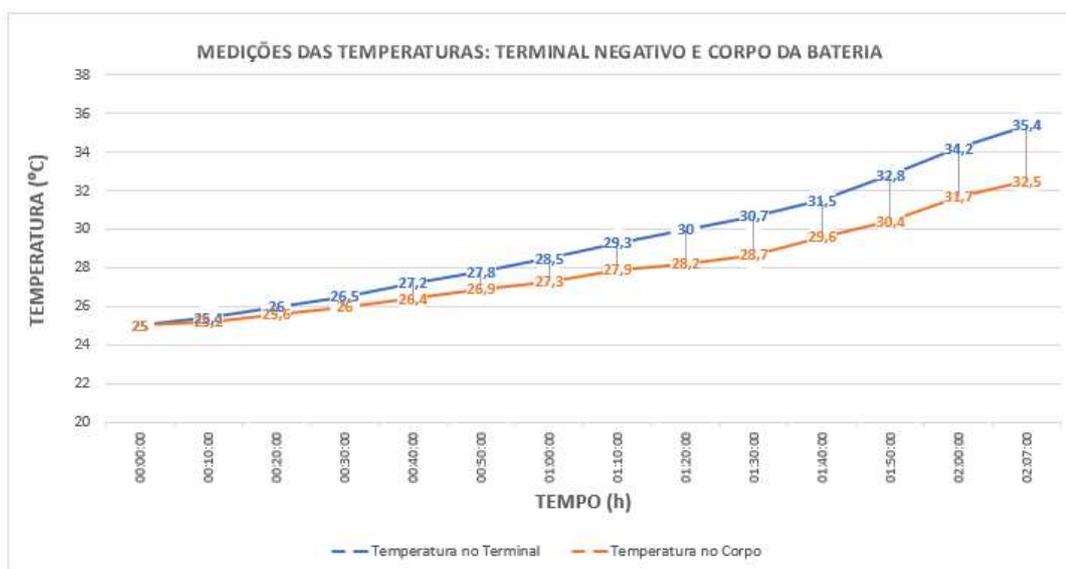
A Figura 76 apresenta o gráfico de carga da bateria para a frequência de 20Hz. Nesta frequência a bateria levou 2h07min para atingir a tensão de flutuação e a Figura 77 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante este tempo. O processo de descarga levou 1h45min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 76 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 20Hz e nível de corrente em 0,15C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 77 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 20Hz e nível de corrente em 0,15C

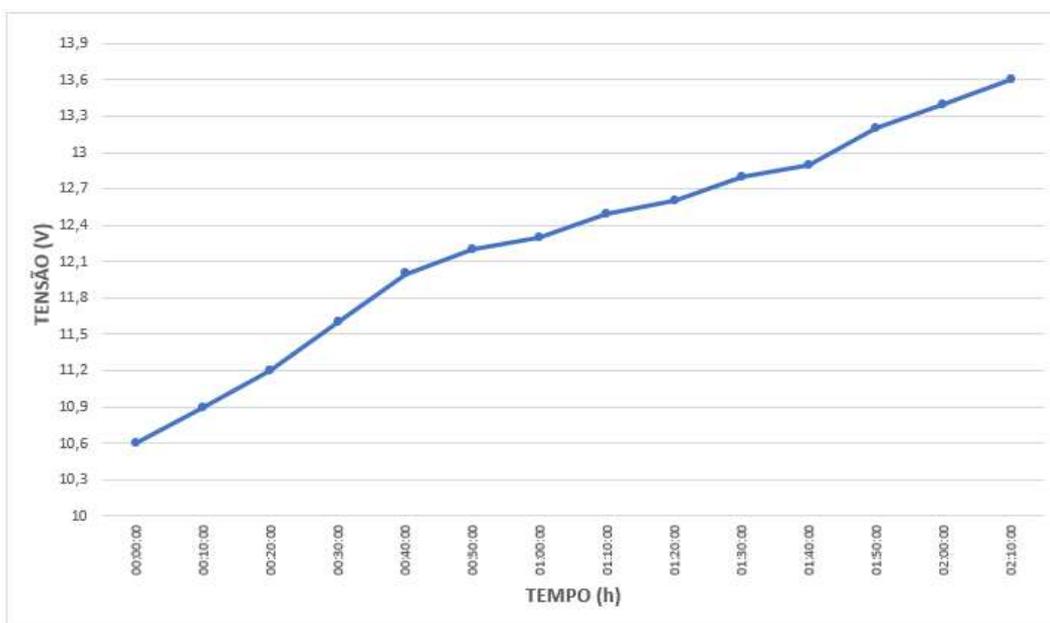


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A frequência de 40Hz foi aplicada no sexto ensaio. Os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso foram ajustados conforme a Tabela 15.

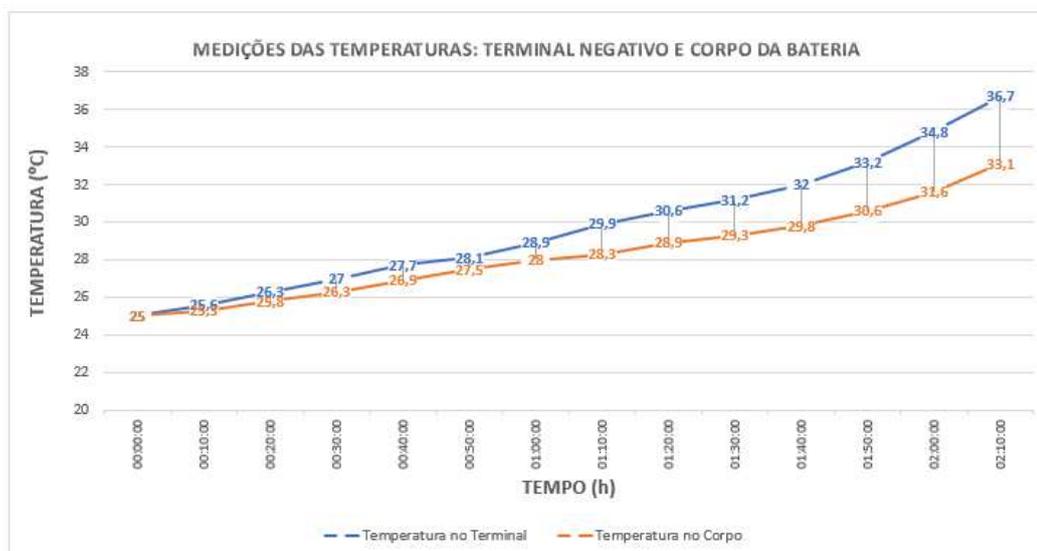
A Figura 78 apresenta o gráfico de carga da bateria para a frequência de 40Hz, onde a bateria levou 2h10min para atingir a tensão de flutuação. A Figura 79 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante o tempo levado pela bateria para atingir a tensão de flutuação. O processo de descarga levou 1h41min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 78 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 40Hz e nível de corrente em 0,15C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 79 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 40Hz e nível de corrente em 0,15C

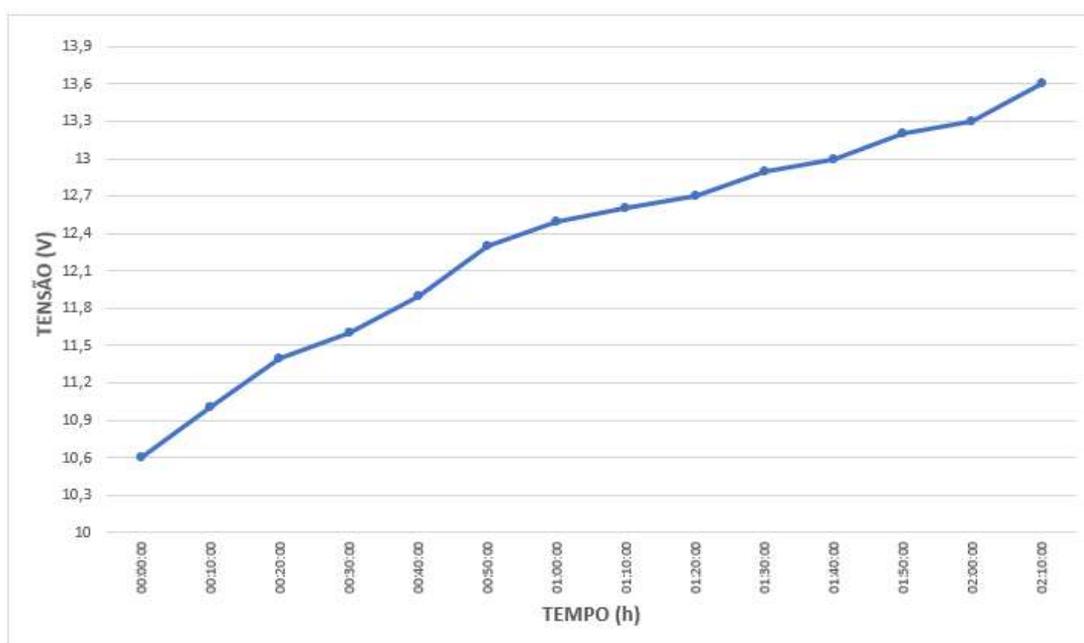


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Para o sétimo e último ensaio realizado com a corrente média inicial de 1,35A, foi aplicada a frequência de 80Hz, os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso ajustados conforme a Tabela 16.

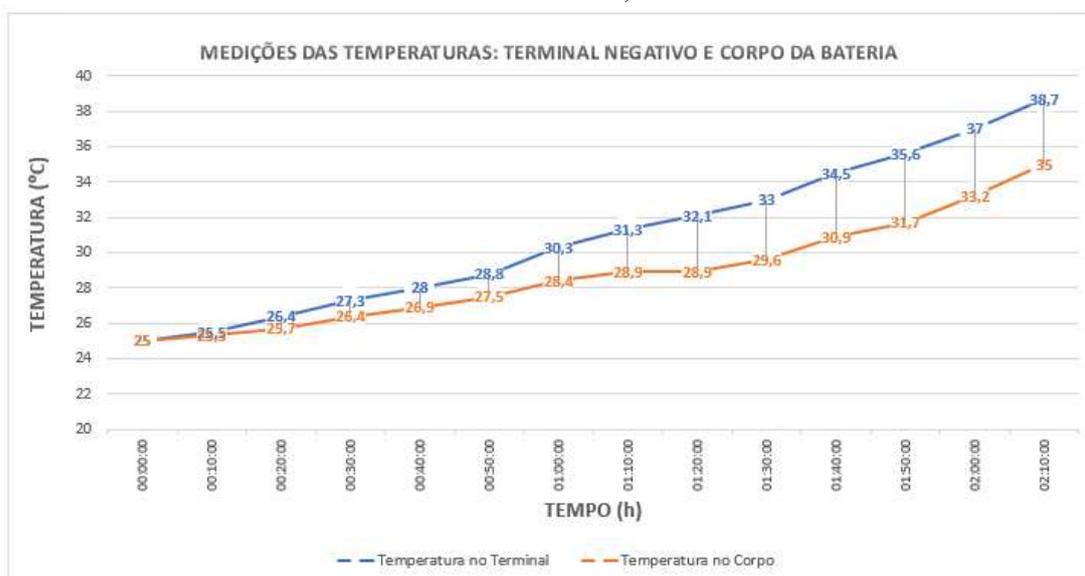
A Figura 80 apresenta o gráfico de carga da bateria para a referida frequência, onde a bateria levou 2h10min para atingir a tensão de flutuação e a Figura 81 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante este tempo. O processo de descarga levou 1h36min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 80 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 80Hz e nível de corrente em 0,15C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 81 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 80Hz e nível de corrente em 0,15C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

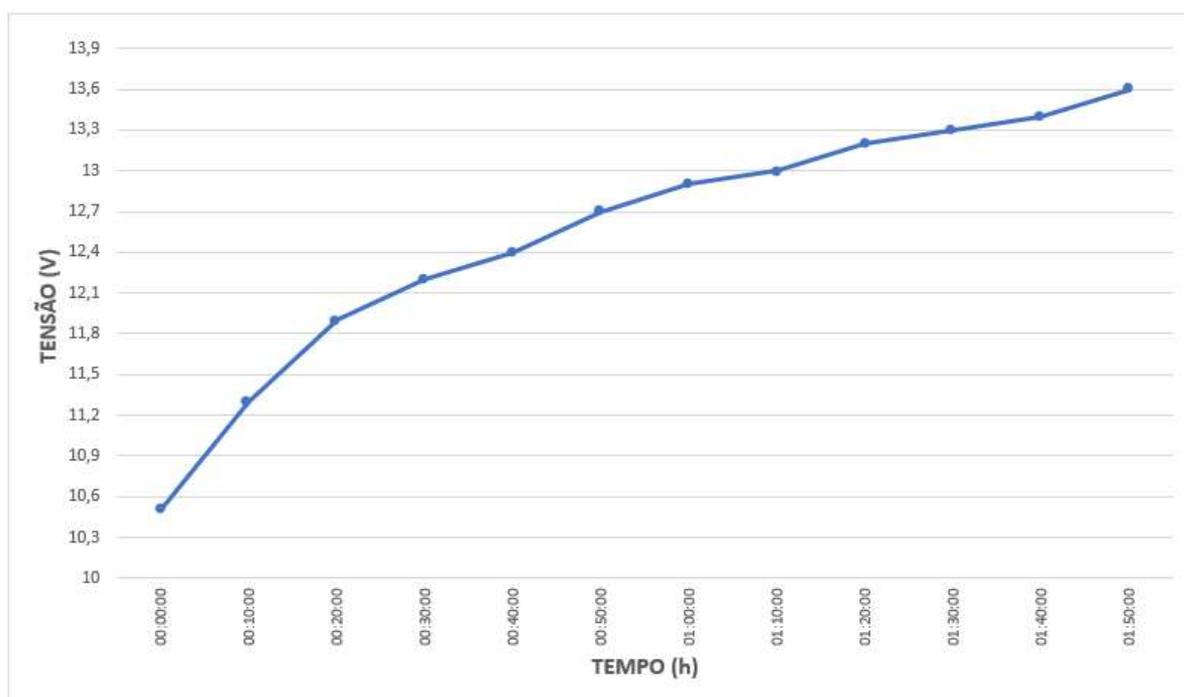
7.3.3 Ensaios de carga com o método Reflex com nível de corrente em 0,18C

Nos sete ensaios com o nível de corrente em 0,18C foram utilizadas as mesmas frequências aplicadas nos ensaios com o nível de corrente em 0,1C e 0,15C. A seguir serão descritos os resultados destes ensaios.

No primeiro ensaio realizado, foi aplicada a corrente média de 1,62A para carga (18% da corrente nominal da bateria – equivalente a 0,18C) a uma frequência de 1Hz. Os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso foram ajustados conforme a Tabela 10.

A Figura 82 apresenta o gráfico de carga da bateria para a frequência de 1Hz, onde a bateria levou 1h50min para atingir a tensão de flutuação.

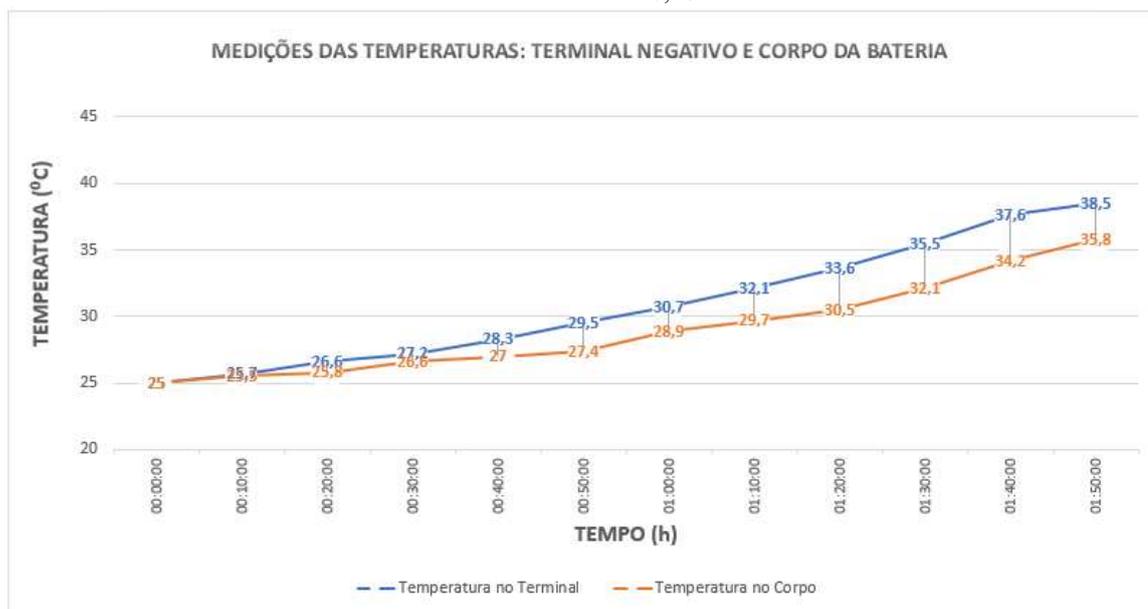
Figura 82 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 1Hz e nível de corrente em 0,18C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 83 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante este tempo. O processo de descarga levou 1h31min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 83 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 1Hz e nível de corrente em 0,18C

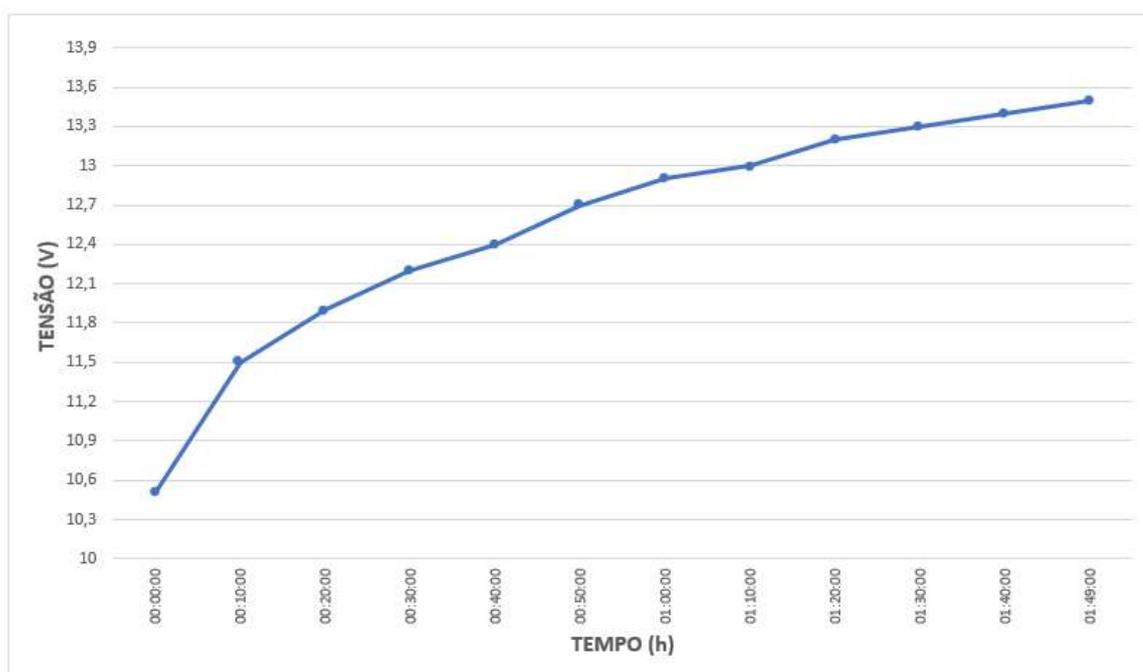


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

O segundo ensaio considerou a frequência de 3Hz. Os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso foram ajustados conforme a Tabela 11.

A Figura 84 apresenta o gráfico de carga da bateria para a frequência de 3Hz, onde a bateria levou 1h49min para atingir a tensão de flutuação.

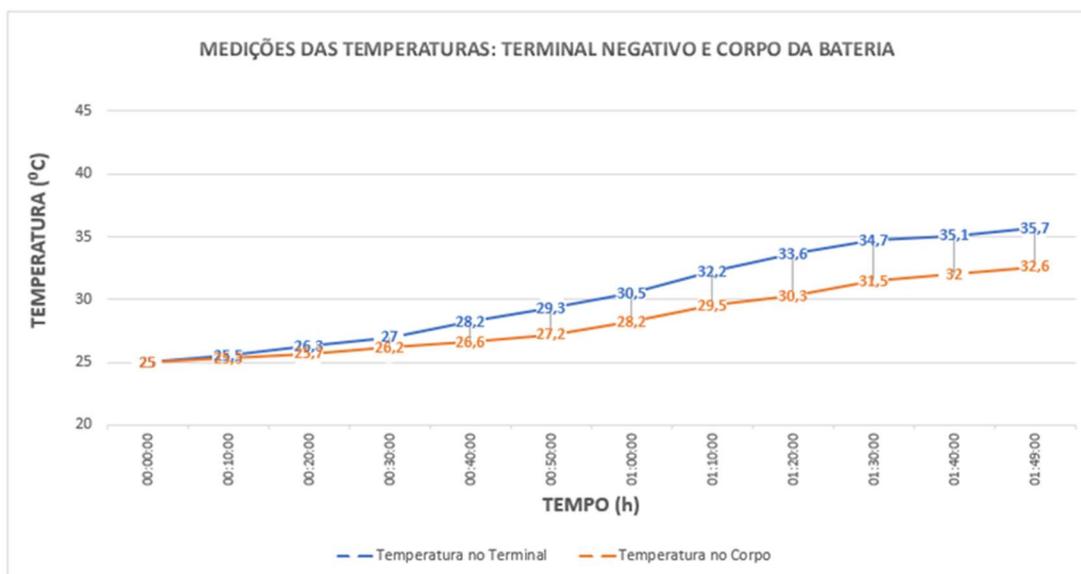
Figura 84 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 3Hz e nível de corrente em 0,18C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 85 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria. O processo de descarga levou 1h37min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

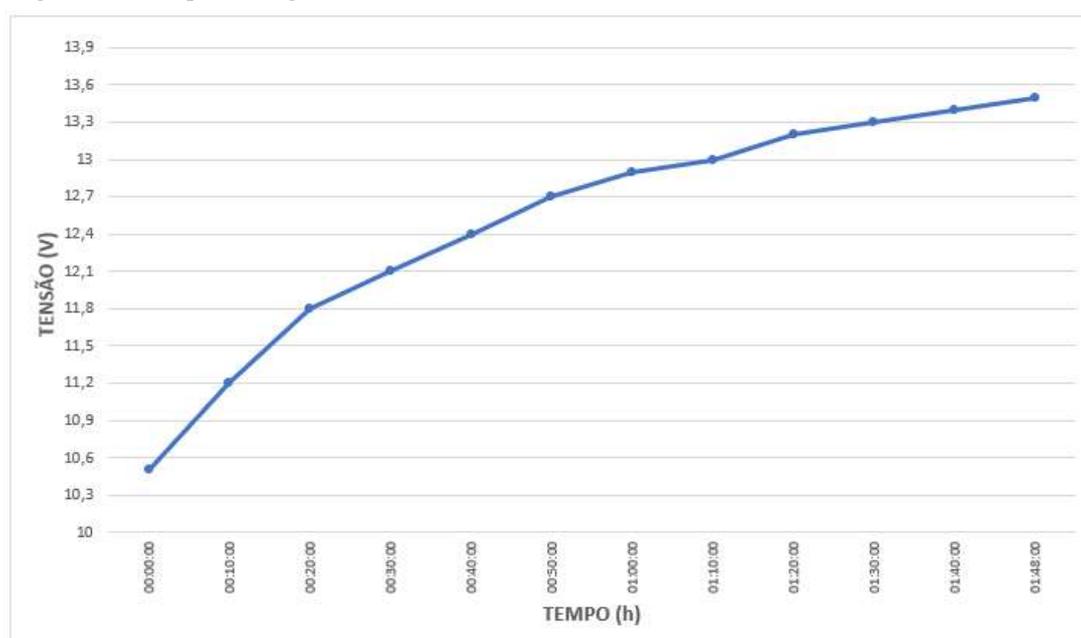
Figura 85 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 3Hz e nível de corrente em 0,18C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

No terceiro ensaio foi aplicada a corrente média de 1,62A a uma frequência de 5Hz. Os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso foram ajustados conforme a Tabela 12. A Figura 86 apresenta o gráfico de carga da bateria para a referida frequência, onde a bateria levou 1h48min para atingir a tensão de flutuação.

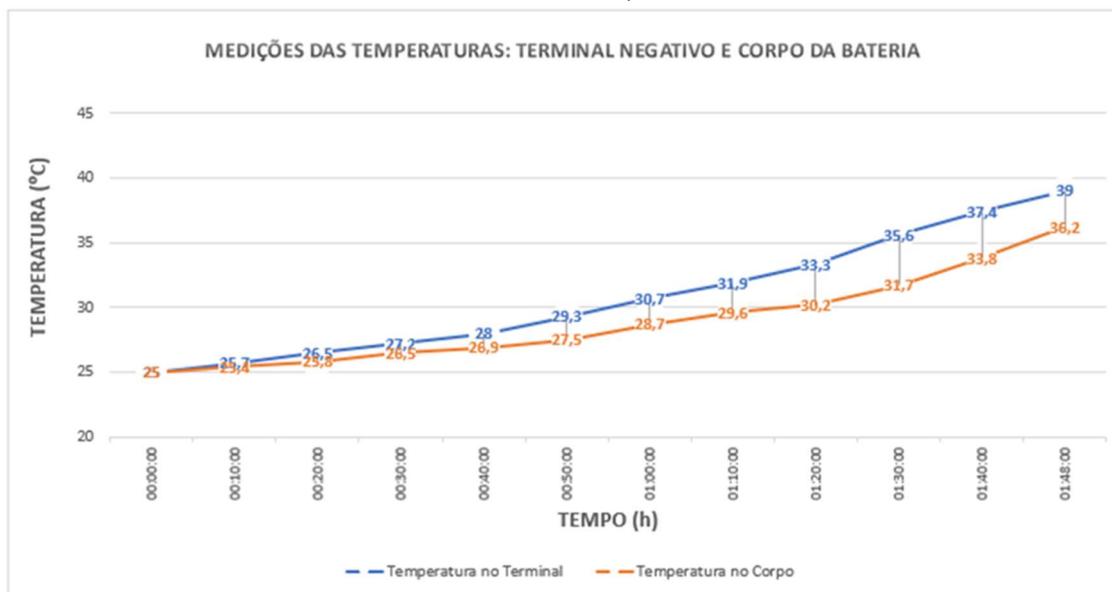
Figura 86 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 5Hz e nível de corrente em 0,18C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Na Figura 87 tem-se ilustrada a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria. O processo de descarga levou 1h27min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

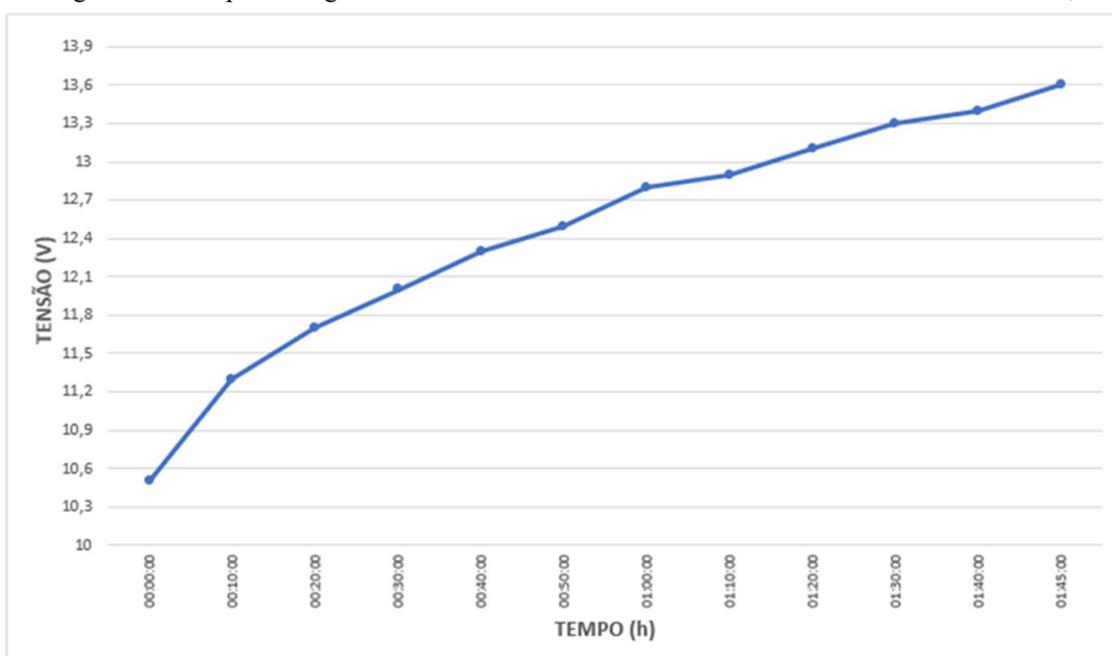
Figura 87 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 5Hz e nível de corrente em 0,18C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

O quarto ensaio considerou a frequência de 10Hz. Os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso foram ajustados conforme a Tabela 13. O gráfico de carga da bateria para a frequência de 10Hz é apresentado na Figura 88, onde a tensão de flutuação foi obtida após 1h45min.

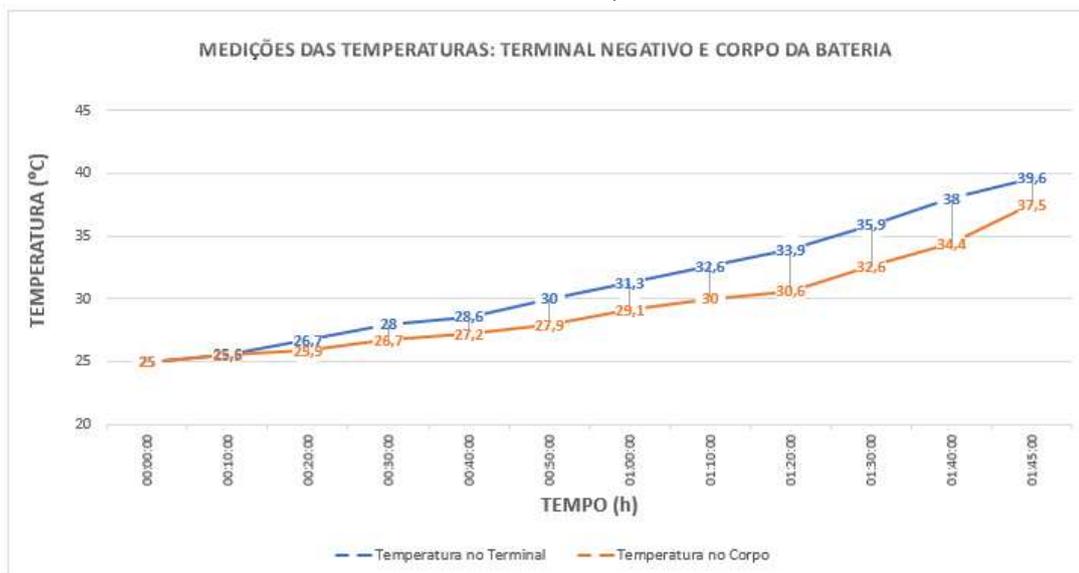
Figura 88 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 10Hz e nível de corrente em 0,18C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 89 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria. O processo de descarga levou 1h22min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

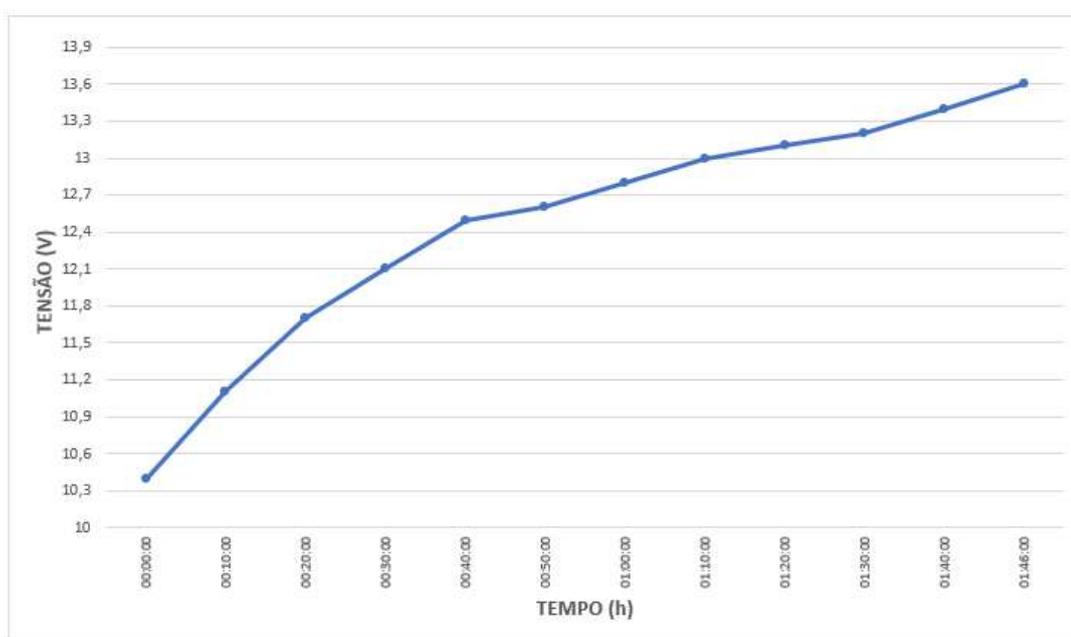
Figura 89 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 10Hz e nível de corrente em 0,18C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

No quinto ensaio foi utilizada a frequência de 20Hz, sendo os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso ajustados conforme a Tabela 14. A Figura 90 apresenta o gráfico de carga da bateria para a frequência de 20Hz. Nesta frequência a bateria levou 1h46min para atingir a tensão de flutuação

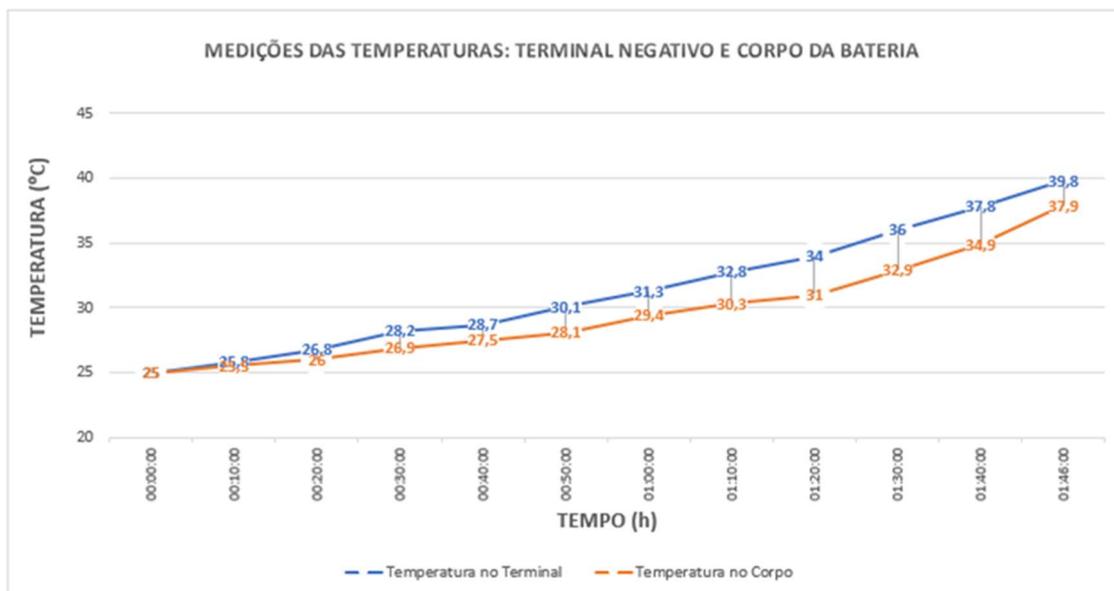
Figura 90 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 20Hz e nível de corrente em 0,18C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 91 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria. O processo de descarga levou 1h17min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

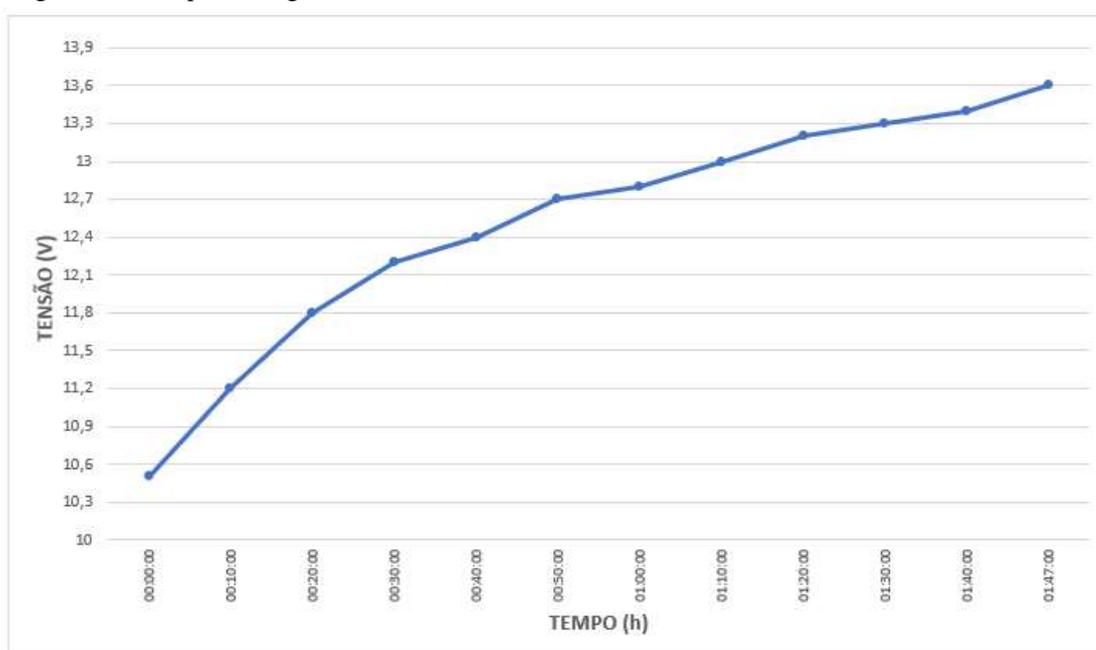
Figura 91 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 20Hz e nível de corrente em 0,18C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A frequência de 40Hz foi aplicada no sexto ensaio, com os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso sendo ajustados conforme a Tabela 15. A Figura 92 apresenta o gráfico de carga da bateria para a frequência de 40Hz, onde a bateria levou 1h47min para atingir a tensão de flutuação.

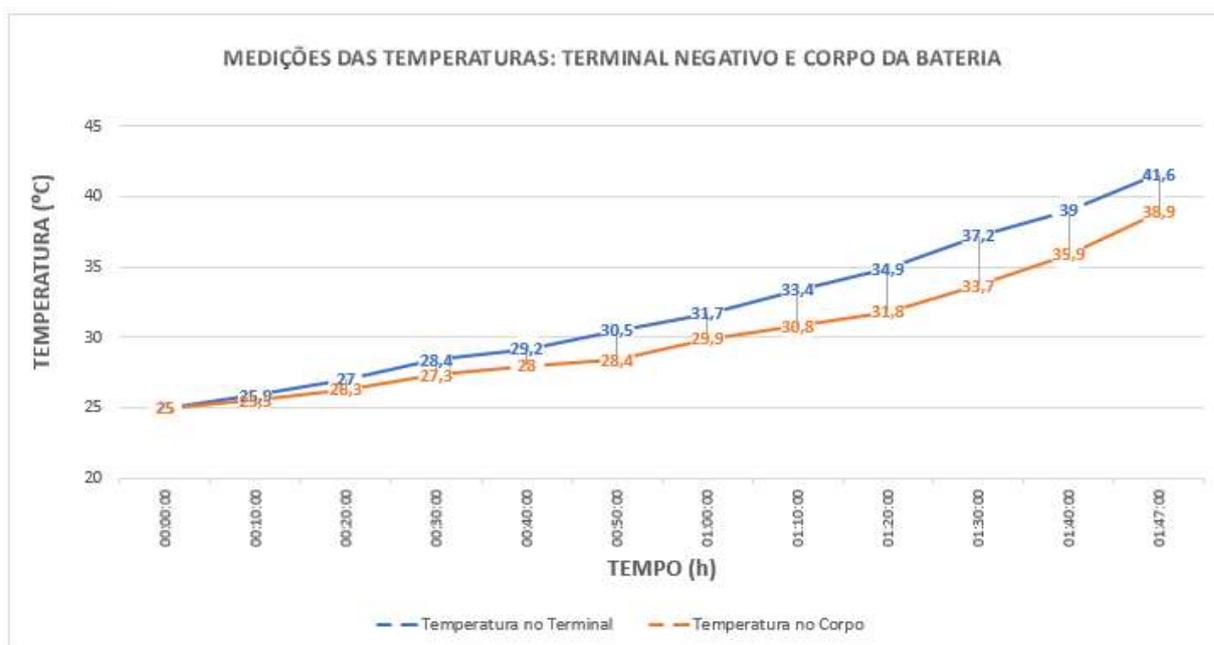
Figura 92 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 40Hz e nível de corrente em 0,18C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 93 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante o tempo levado pela bateria para atingir a tensão de flutuação. O processo de descarga levou 1h13min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 93 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 40Hz e nível de corrente em 0,18C



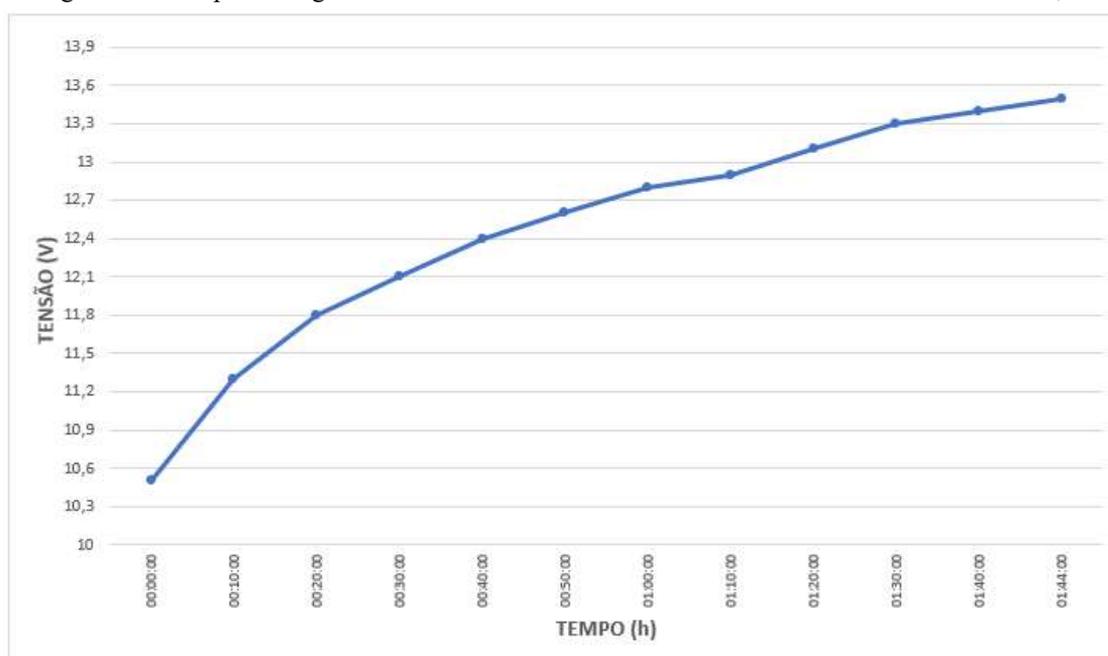
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Para o sétimo e último ensaio realizado com a corrente média inicial de 1,62A, foi aplicada a frequência de 80Hz, os tempos do intervalo de pulso positivo, negativo e de descanso foram ajustados conforme a Tabela 16.

A Figura 94 apresenta o gráfico de carga da bateria para a referida frequência, onde a bateria levou 1h44min para atingir a tensão de flutuação e a Figura 95 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante este tempo.

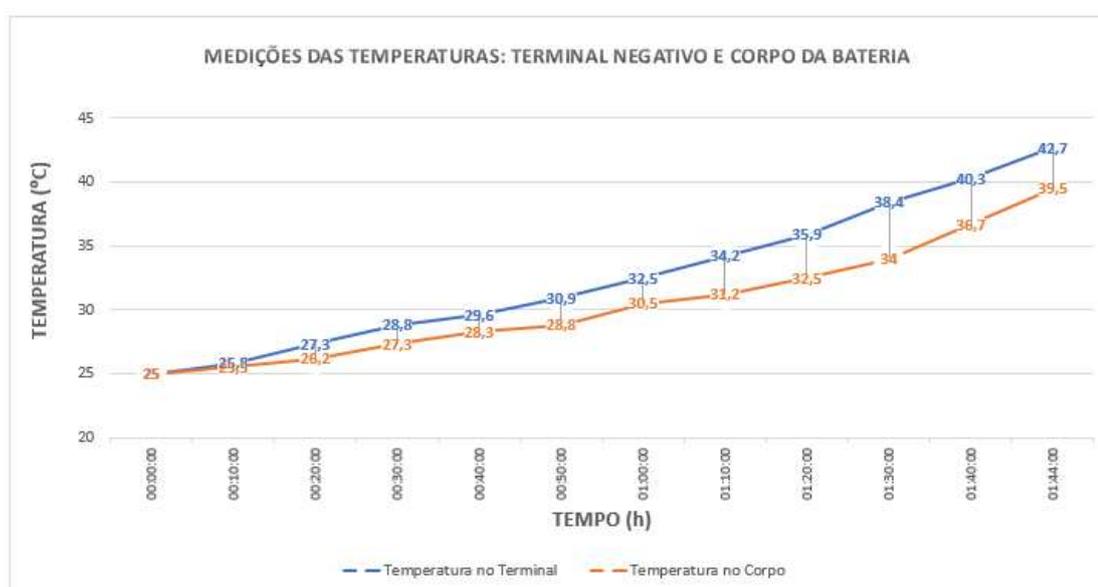
Neste ensaio, o processo de descarga levou 1h09min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 94 - Tempo de carga da bateria com o método Reflex em 80Hz e nível de corrente em 0,18C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 95 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método Reflex em 80Hz e nível de corrente em 0,18C



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

7.4 ENSAIOS DE CARGA DA BATERIA COM O MÉTODO CC-CV

Para os ensaios com o método CC-CV foi utilizado o mesmo conversor CC-CC bidirecional em corrente dos ensaios realizados com o método Reflex, no entanto, houve a modificação do controle do sistema para que, assim que a tensão da bateria atingisse os níveis de tensão de flutuação, ela permanecesse constante e a corrente fosse reduzida até o nível

mínimo de corrente de manutenção de carga. Estudos de (CRUZ, 2018), (ZANGIROLAMI, 2017) e (SAAD, 2012) descrevem as características deste método de carga mais detalhadamente.

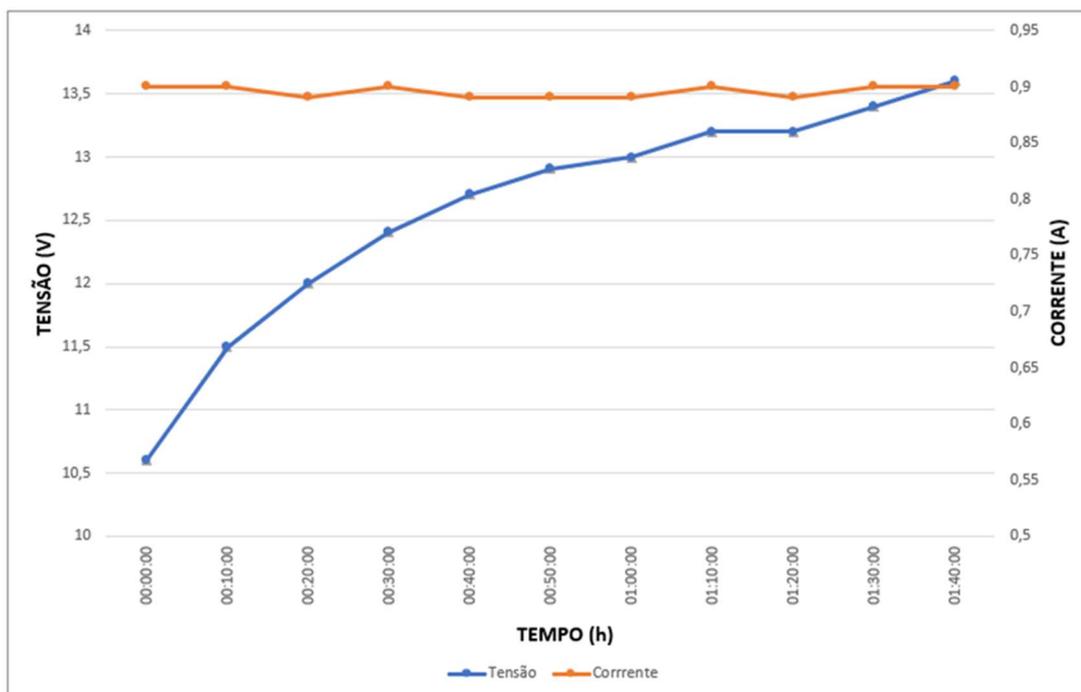
Para os ensaios com a corrente inicial de 900mA, também foi utilizada uma UPS comercial, todavia, não foi possível alterar a corrente inicial desta UPS para realização de ensaios com correntes superiores.

7.4.1 Ensaio de carga com o método CC-CV com nível de corrente em 0,1C – Parcial

Neste primeiro ensaio realizado com o método de corrente constante e tensão constante, foi aplicada a corrente inicial para carga de 900mA (10% da corrente nominal da bateria – equivalente a 0,1C). A definição desta corrente inicial de carga segue a recomendação da maioria dos fabricantes de UPS que aplicam este processo de carga. É importante ressaltar que o processo desenvolvido neste ensaio foi interrompido no momento em que a bateria atingiu a tensão de flutuação, pois, no próximo estágio seria aplicada a tensão constante e a corrente começaria a ser reduzida, seguindo características específicas deste método de carga. Por conta disso, o ensaio é descrito como parcial (P).

A Figura 96 apresenta o gráfico de carga da bateria até o instante em que ela atingiu a tensão de flutuação (13,5V). Este processo levou 1h40min.

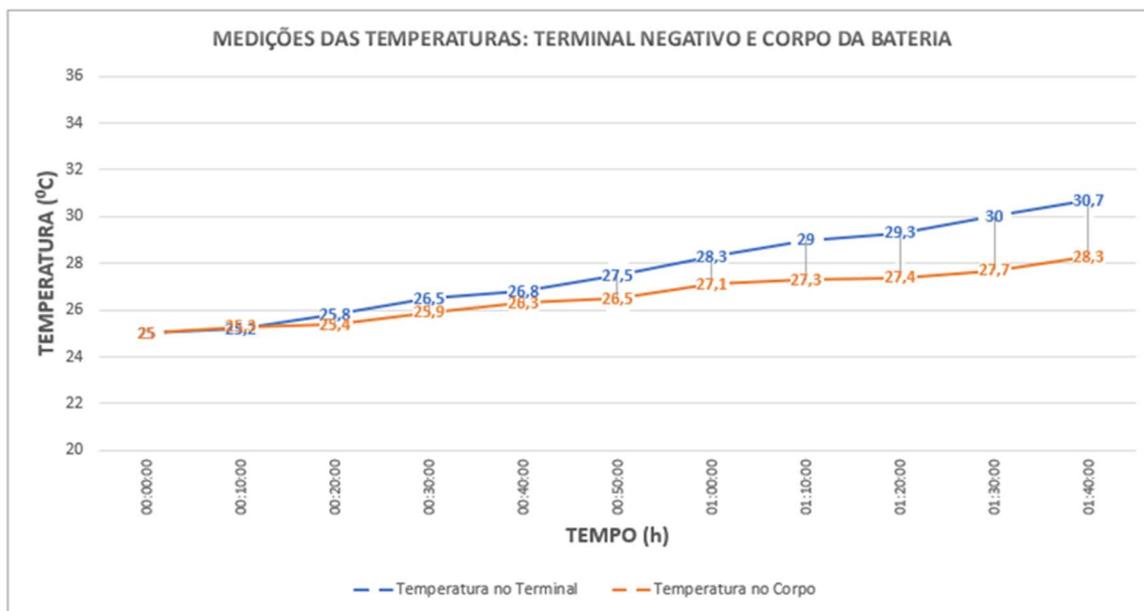
Figura 96 - Tempo de carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,1C - Parcial



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 97 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante o tempo de carga. Foi realizado o processo de descarga, que levou cerca de 1h32min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 97 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,1C - Parcial



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

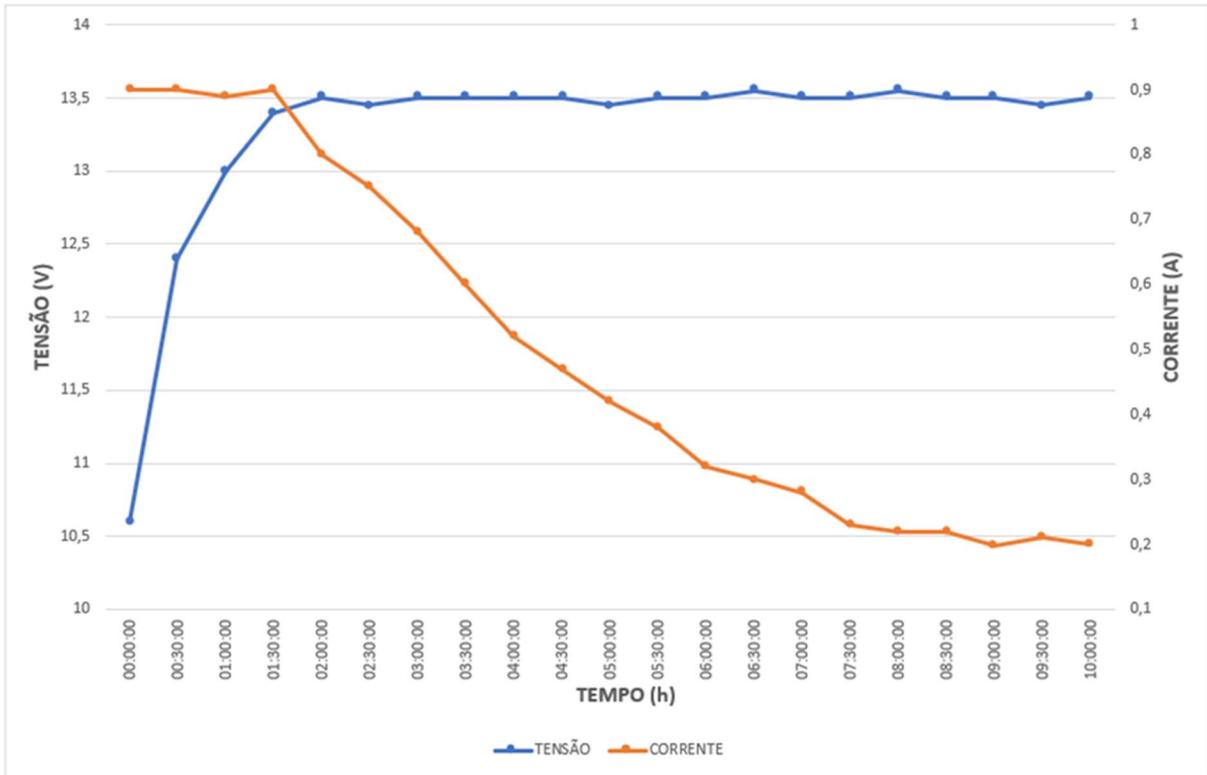
7.4.2 Ensaio de carga com o método CC-CV com nível de corrente em 0,1C – Completo

Neste segundo ensaio realizado com o método de corrente constante e tensão constante, foi aplicada também a corrente inicial para carga de 900mA. Neste ensaio o processo de carga não foi interrompido no início do intervalo de flutuação e todo ciclo de carga durou 10h. Por conta disso, o ensaio é descrito como completo (C).

A Figura 98 apresenta o gráfico de carga da bateria contemplando o processo completo de carga de 10h. Na Figura 99 pode-se observar a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante todo o processo.

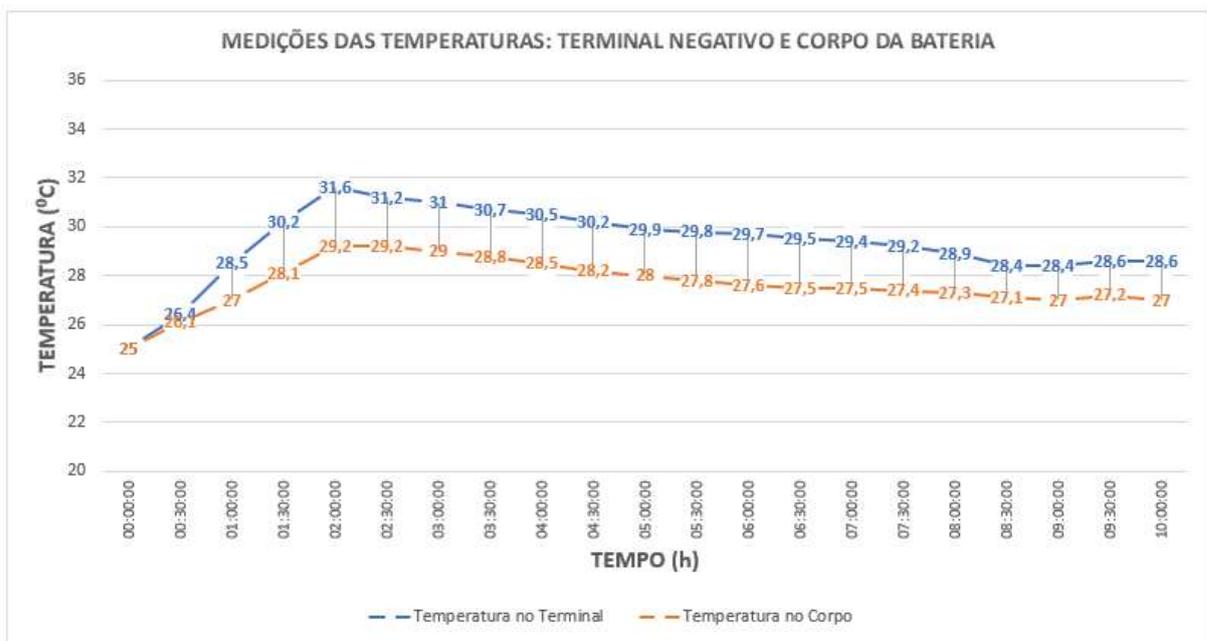
Após o processo de carga, foi realizado o processo de descarga, que levou em torno de 1h49min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 98 - Tempo de carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,1C - Completo



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 99 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,1C - Completo



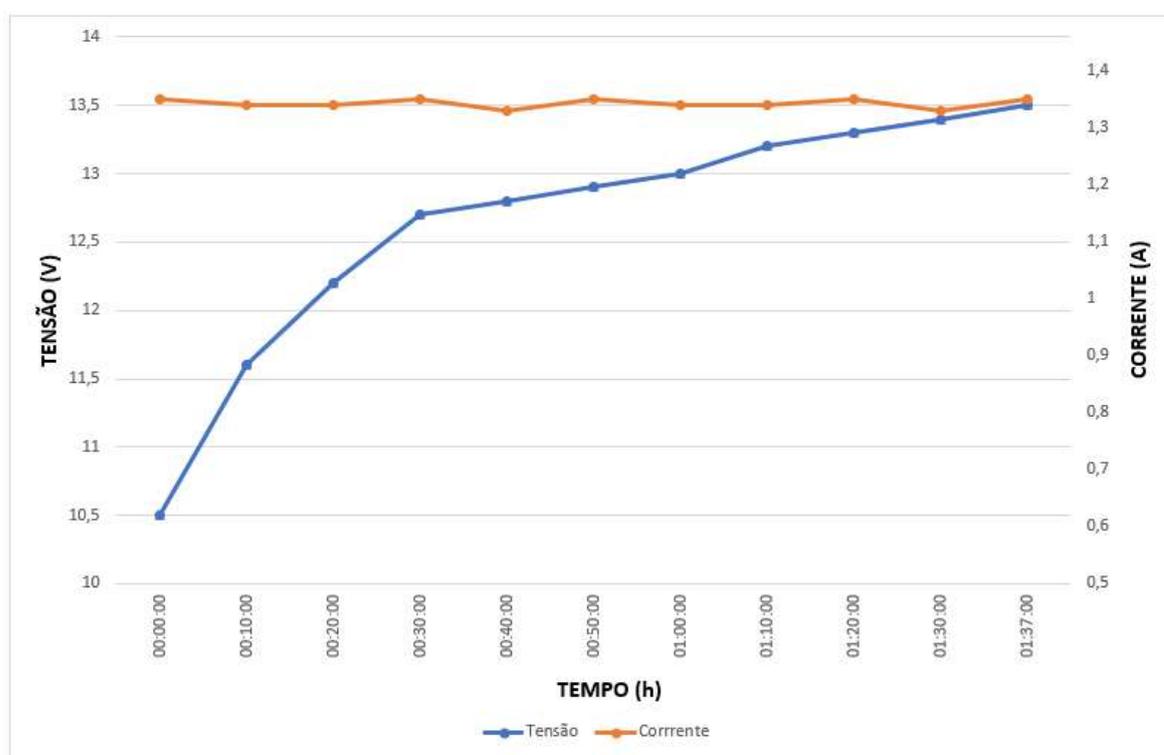
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

7.4.3 Ensaio de carga com o método CC-CV com nível de corrente em 0,15C – Parcial

Neste terceiro ensaio realizado com o método de corrente constante e tensão constante, foi aplicada a corrente inicial para carga de 1,35A (15% da corrente nominal da bateria – equivalente a 0,15C). Neste ensaio o processo de carga também foi interrompido no momento em que a bateria atingiu a tensão de flutuação.

A Figura 100 apresenta o gráfico de carga da bateria até o instante em que ela atingiu a tensão de flutuação (13,5V). Este processo levou 1h37min.

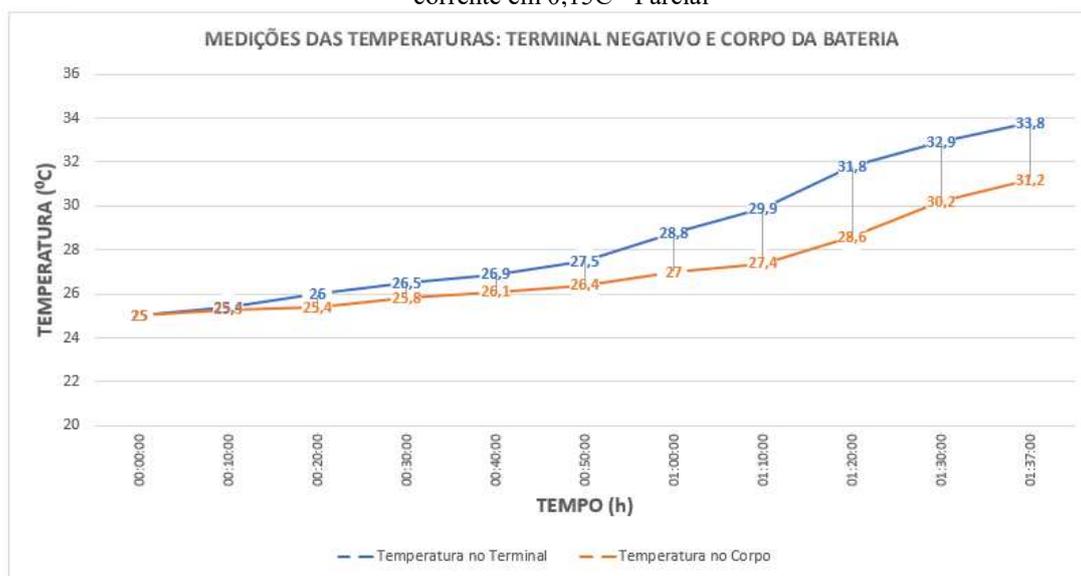
Figura 100 - Tempo de carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,15C - Parcial



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 101 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante o tempo de carga. Foi realizado o processo de descarga, que levou cerca de 1h27min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal

Figura 101 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,15C - Parcial

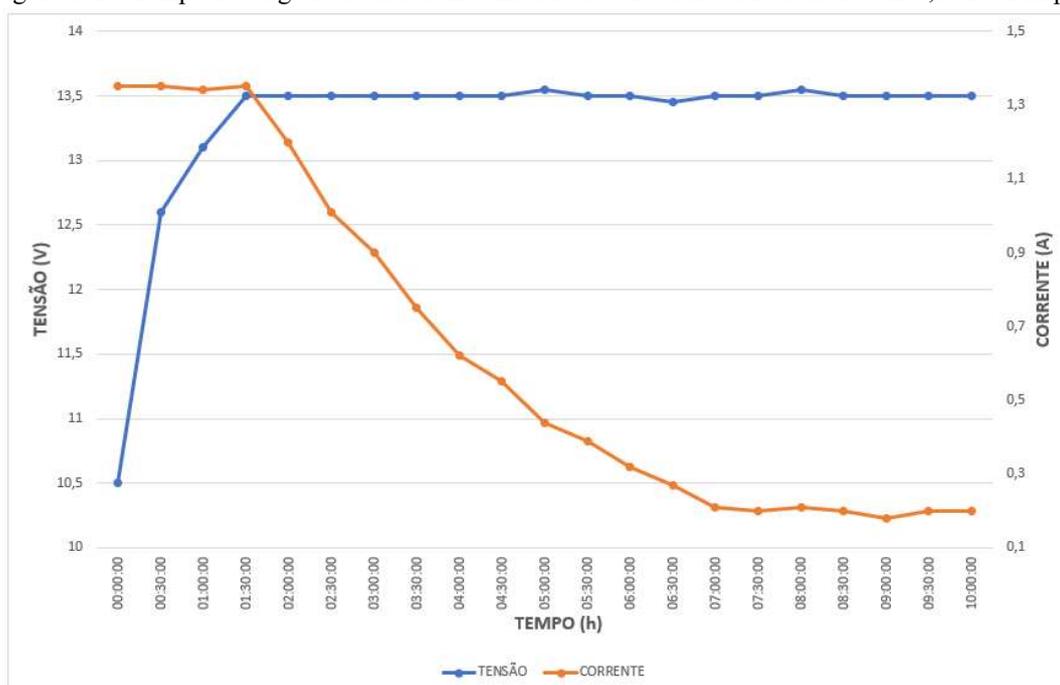


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

7.4.4 Ensaio de carga com o método CC-CV com nível de corrente em 0,15C – Completo

Neste quarto ensaio realizado com o método de corrente constante e tensão constante, foi aplicada também a corrente inicial para carga de 1,35A. E neste ensaio o processo de carga não foi interrompido e todo ciclo de carga durou 10h. A Figura 102 apresenta o gráfico de carga da bateria contemplando o processo completo de carga de 10h.

Figura 102 - Tempo de carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,15C - Completo

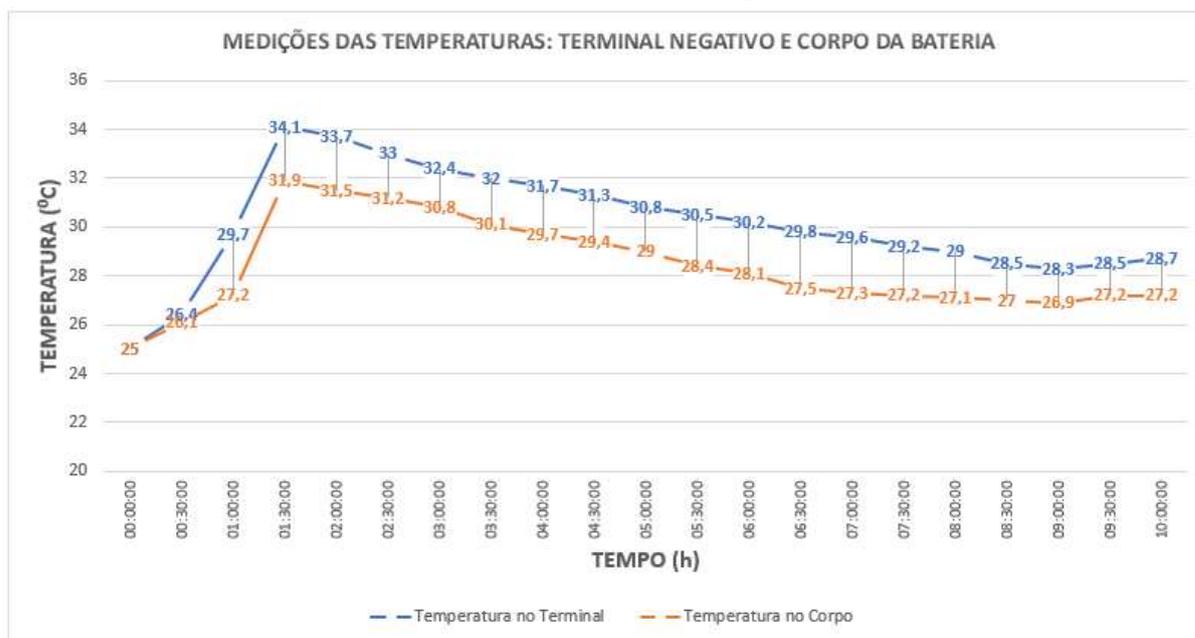


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Na Figura 103 pode-se observar a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante todo o processo.

Após o processo de carga, foi realizado o processo de descarga, que levou em torno de 1h50min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 103 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,15C - Completo



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

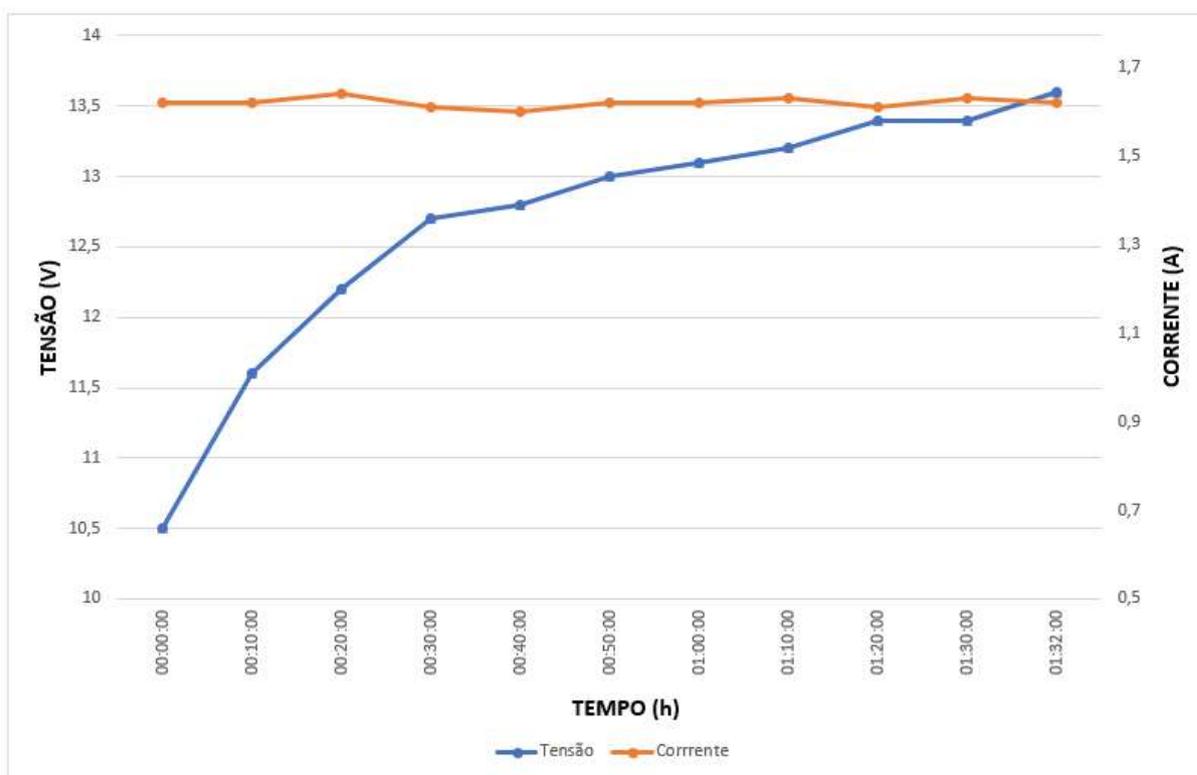
7.4.5 Ensaio de carga com o método CC-CV com nível de corrente em 0,18C – Parcial

Neste quinto ensaio realizado com o método de corrente constante e tensão constante, foi aplicada a corrente inicial para carga de 1,62A (18% da corrente nominal da bateria – equivalente a 0,18C). Neste ensaio o processo de carga também foi interrompido no momento em que a bateria atingiu a tensão de flutuação.

A Figura 104 apresenta o gráfico de carga da bateria até o instante em que ela atingiu a tensão de flutuação (13,5V). Este processo levou 1h32min, e a Figura 105 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante o tempo de carga.

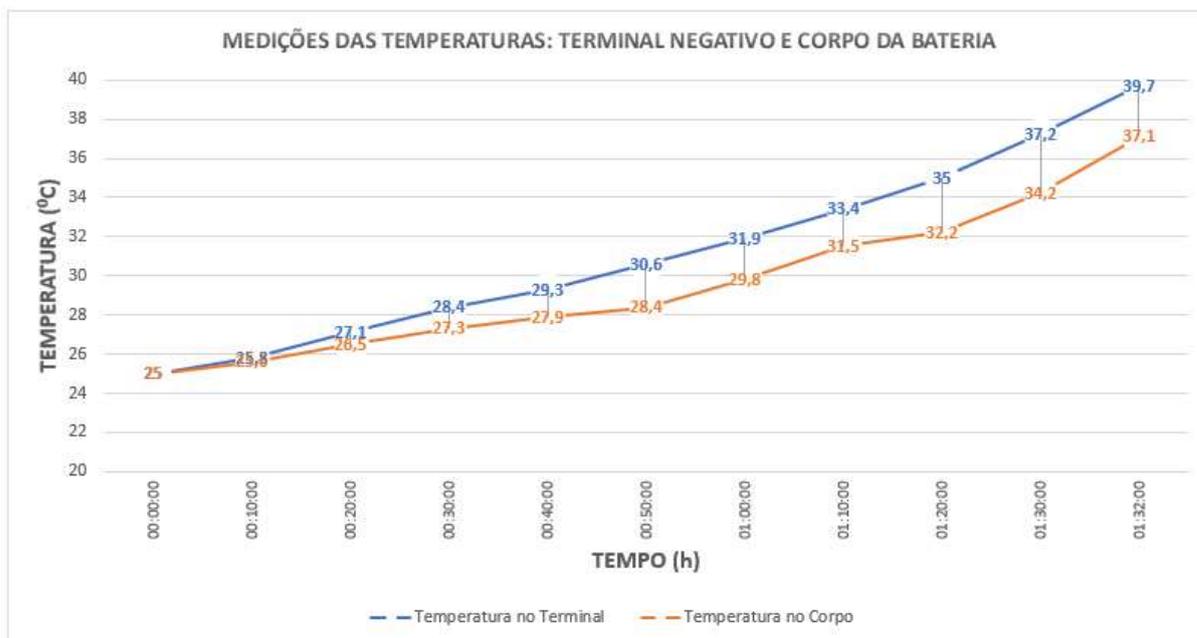
Foi realizado o processo de descarga, que levou cerca de 1h24min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 104 - Tempo de carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,18C - Parcial



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 105 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,18C - Parcial



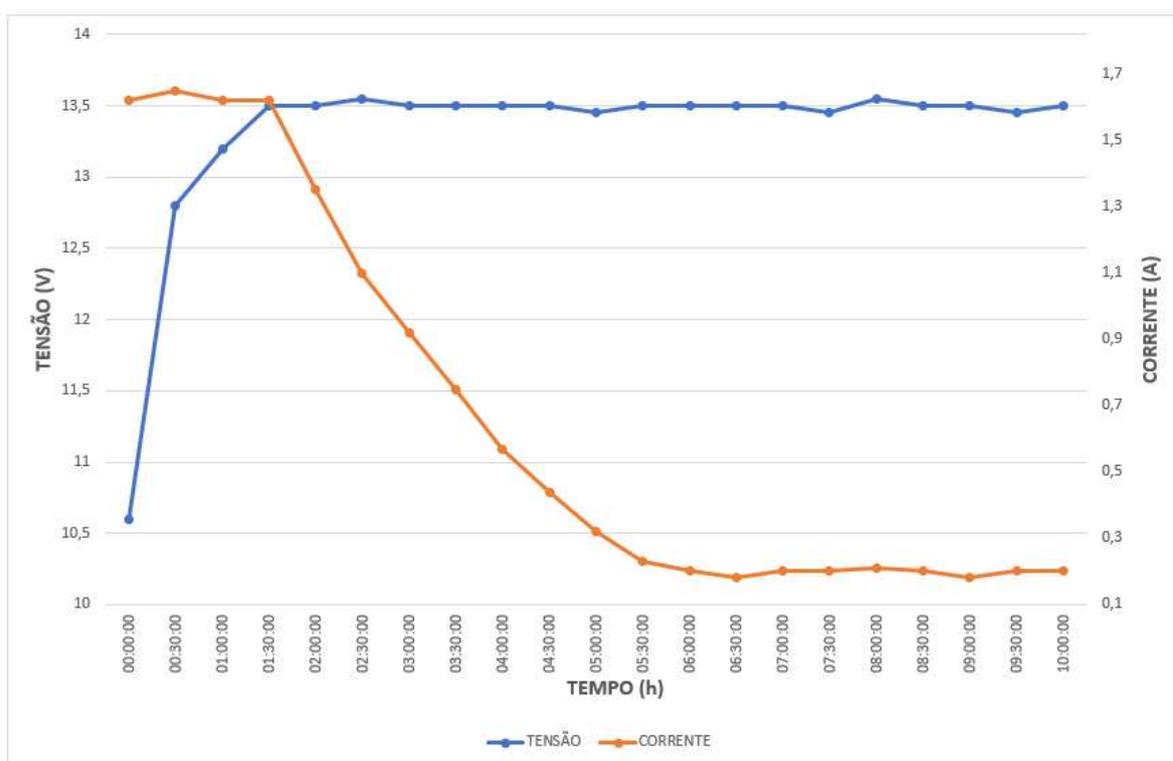
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

7.4.6 Ensaio de carga com o método CC-CV com nível de corrente em 0,18C – Completo

Neste sexto ensaio realizado com o método de corrente constante e tensão constante, foi aplicada também a corrente inicial para carga de 1,62A. Neste ensaio o processo de carga não foi interrompido e todo ciclo de carga durou 10h.

A Figura 106 apresenta o gráfico de carga da bateria contemplando o processo completo de carga de 10h.

Figura 106 - Tempo de carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,18C - Completo

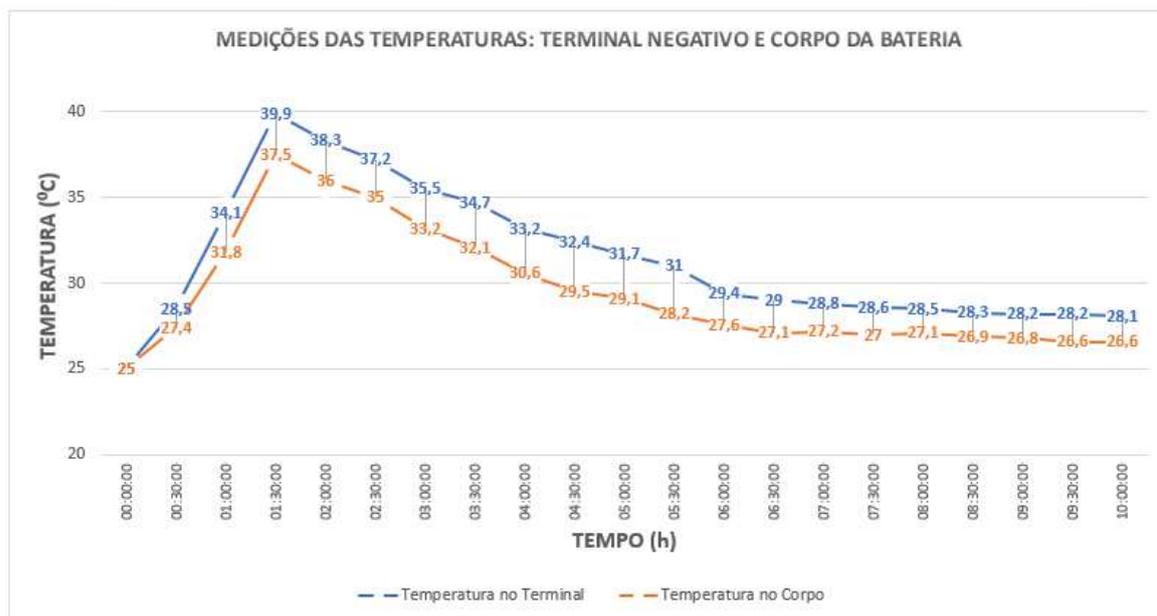


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Na Figura 107 pode-se observar a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante todo o processo.

Após o processo de carga, foi realizado o processo de descarga, que levou em torno de 1h49min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 107 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método CC-CV e nível de corrente em 0,18C - Completo



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

7.4.7 Ensaio de carga com o método CC-CV e UPS comercial – Ensaio Parcial

Neste sétimo ensaio realizado com o método de corrente constante e tensão constante, foi aplicada a corrente inicial para carga de 900mA em uma UPS comercial.

Houve o posicionamento da bateria externamente à UPS, garantindo que não haveria o comprometimento das medições das temperaturas por influência de a bateria estar enclausurada na UPS, conforme a Figura 108.

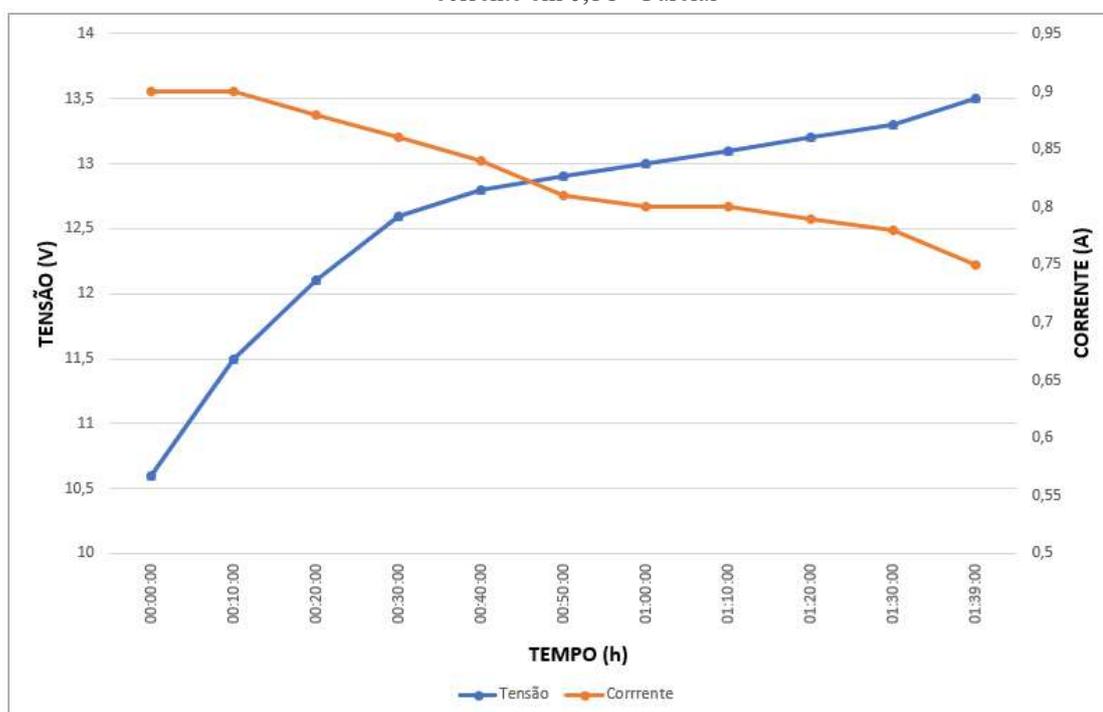
Figura 108 - UPS comercial com a bateria conectada externamente para realização dos ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

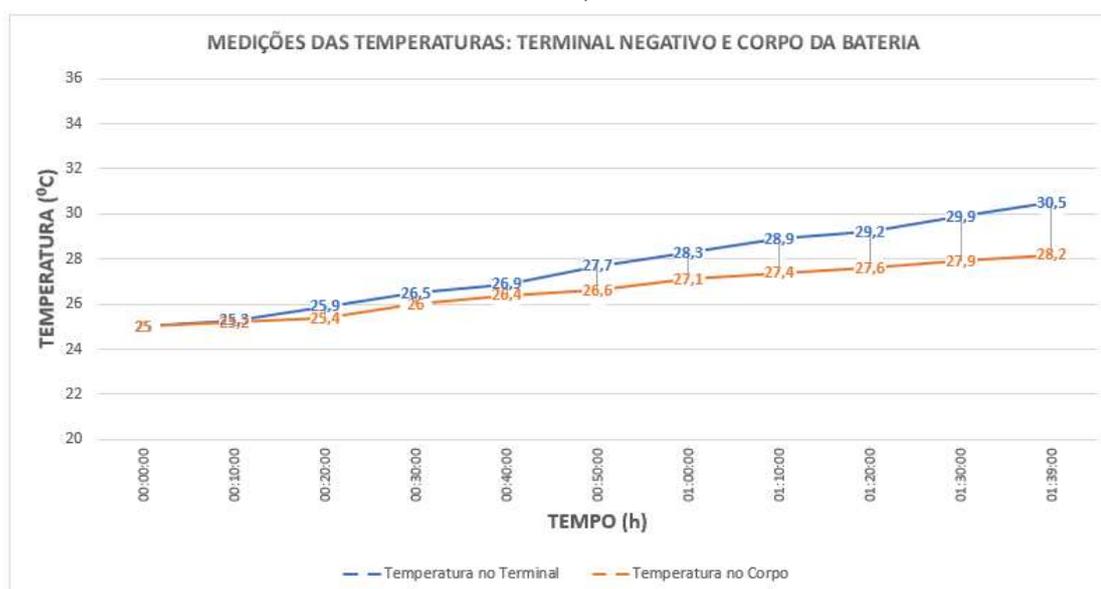
A Figura 109 apresenta o gráfico de carga da bateria até o instante em que ela atingiu a tensão de flutuação (13,5V). Este processo levou 1h39min, e a Figura 110 ilustra a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante o tempo de carga. Foi realizado o processo de descarga, que levou cerca de 1h32min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 109 - Tempo de carga da bateria com o método CC-CV na UPS comercial e nível de corrente em 0,1C - Parcial



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 110 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método CC-CV na UPS comercial e nível de corrente em 0,1C - Parcial



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

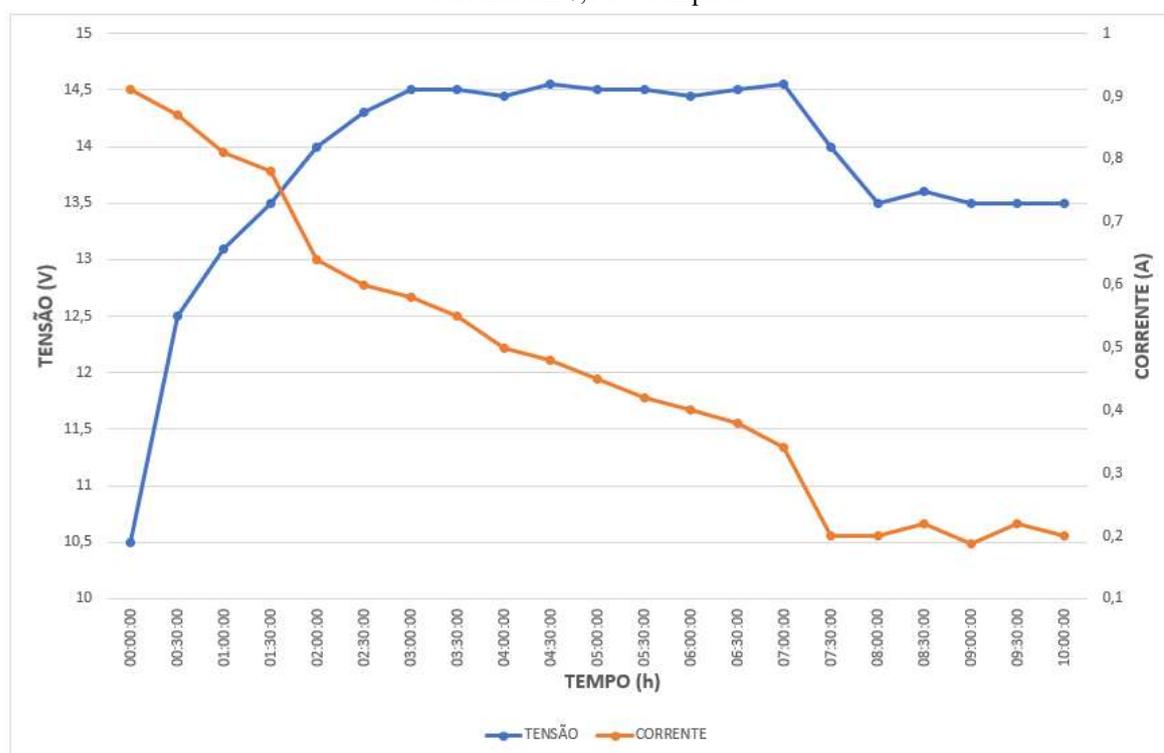
7.4.8 Ensaio de carga com o método CC-CV e UPS comercial – Ensaio Completo

Neste oitavo e último ensaio realizado com o método de corrente constante e tensão constante, também foi considerada a corrente inicial para carga de 900mA. No entanto, diferentemente do anterior, neste ensaio o processo de carga não foi interrompido.

Da mesma forma como o ensaio anterior, este ensaio foi realizado em uma UPS comercial, com a bateria posicionada externamente à UPS.

A Figura 111 apresenta o gráfico de carga da bateria contemplando o processo completo de carga de 10h.

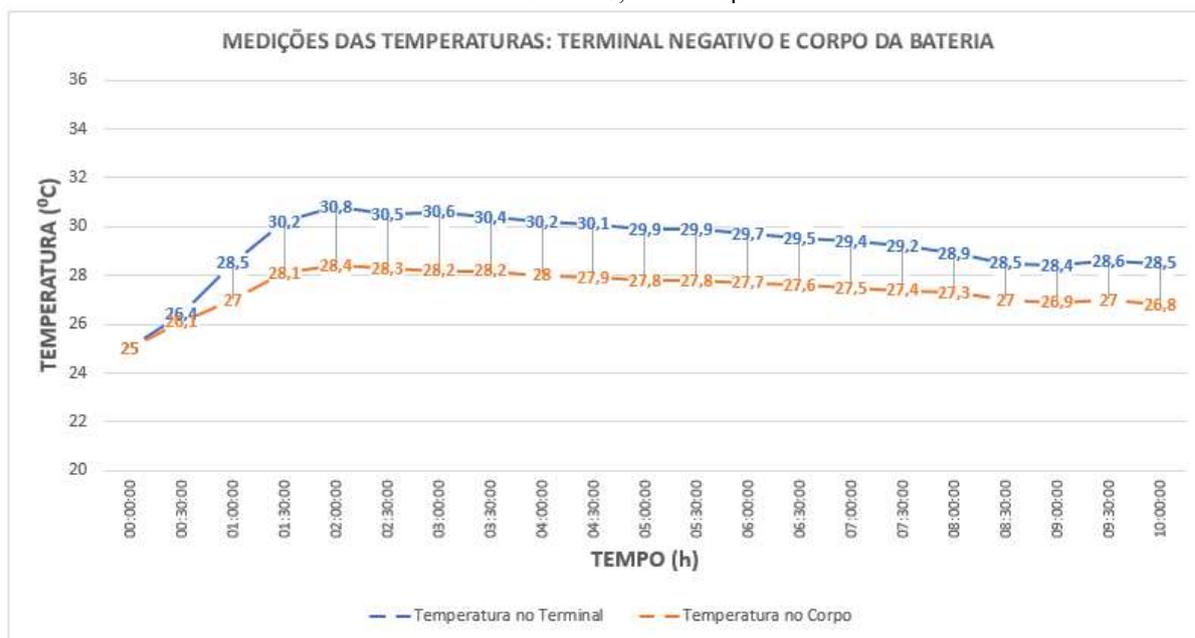
Figura 111 - Tempo de carga da bateria com o método CC-CV na UPS comercial e nível de corrente em 0,1C - Completo



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Na Figura 112 pode-se observar a variação da temperatura no terminal e no corpo da bateria durante todo o processo. Após o processo de carga, foi realizado o processo de descarga, que levou em torno de 1h48min até a bateria atingir 10,5V de tensão terminal.

Figura 112 - Temperaturas durante a carga da bateria com o método CC-CV na UPS comercial e nível de corrente em 0,1C - Completo



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

7.5 ANÁLISE DOS ENSAIOS

A operação executada pelo protótipo do carregador foi condizente aos estudos teóricos realizados, resultando em ensaios que possibilitaram uma análise prática dos métodos empregados. Em relação ao método CC-CV ensaiado com a UPS comercial, foi observado que a corrente inicial não se manteve constante até que a bateria atingisse a tensão de flutuação, ou seja, sofreu uma redução antes de atingir esta tensão. Acerca do método Reflex, foi constatado que o tempo de carga da bateria vai diminuindo de acordo com o aumento da corrente inicial o que, conseqüentemente, implica que o tempo de descarga da bateria seja mais rápido em determinadas frequências, evidenciando a baixa retenção de carga (SoC). Há de se considerar, ainda, que com o aumento da frequência (na faixa de 5Hz a 80Hz) há também um aumento da temperatura, o que pode interferir na vida útil das baterias.

Sobre os resultados obtidos com a aplicação dos dois métodos, é preciso ponderar que os ensaios foram realizados considerando um sistema de carga com apenas uma bateria. Neste sentido, ressalta-se que ensaios para a sua aplicação em bancos de baterias podem trazer resultados diferentes, mesmo que se faça uso da mesma marca e modelo de bateria. Outras variáveis necessitarão ser consideradas caso a bateria empregada já apresente algum tempo de uso. Para esta verificação há necessidade de outros ensaios serem realizados.

Cada ensaio foi repetido por duas vezes, intercalando o uso de duas baterias, o que se deu com o objetivo de validar os resultados obtidos. Para efeitos de comparação, a Tabela 17 apresenta na totalidade a síntese das informações que foram coletadas durante os diferentes ensaios, indicados por 1 e 2. Na referida tabela são destacados pela cor azul os resultados dos melhores ensaios baseados nos maiores tempos de descarga e menores tempos de carga.

Tabela 17 - Dados provenientes dos ensaios de carga dos métodos Reflex e CC-CV

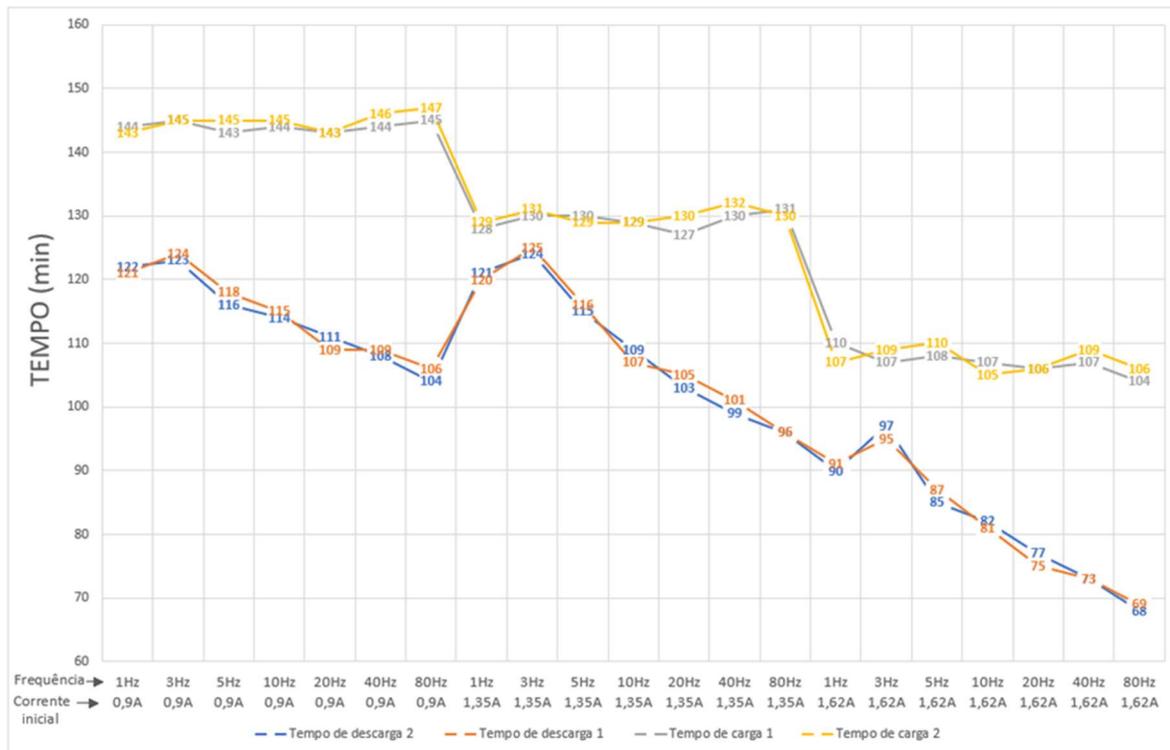
Método	Corrente inicial	Tempo de carga 1	Tempo de descarga 1	Máx. temp. terminal 1	Máx. temp. corpo 1	Tempo de carga 2	Tempo de descarga 2	Máx. temp. terminal 2	Máx. temp. corpo 2
Reflex 1Hz	900mA	2h24min	2h01min	28,7°C	26,7°C	2h23min	2h02min	29°C	27°C
Reflex 3Hz	900mA	2h25min	2h04min	28°C	26,2°C	2h25min	2h03min	28,3°C	26,3°C
Reflex 5Hz	900mA	2h23min	1h58min	29,5°C	27,1°C	2h25min	1h56min	29,1°C	26,9°C
Reflex 10Hz	900mA	2h24min	1h55min	30,2°C	27,4°C	2h25min	1h54min	29,7°C	27°C
Reflex 20Hz	900mA	2h23min	1h49min	30,7°C	27,6°C	2h23min	1h51min	30,8°C	27,7°C
Reflex 40Hz	900mA	2h24min	1h49min	31,9°C	28,1°C	2h26min	1h48min	31,2°C	27,7°C
Reflex 80Hz	900mA	2h25min	1h46min	33,1°C	29,4°C	2h27min	1h44min	32,8°C	29,1°C
Reflex 1Hz	1,35A	2h08min	2h00min	33,2°C	31,2°C	2h09min	2h01min	33,4°C	31°C
Reflex 3Hz	1,35A	2h10min	2h05min	32,1°C	29,9°C	2h11min	2h04min	32,3°C	30,2°C
Reflex 5Hz	1,35A	2h10min	1h54min	33,8°C	31,6°C	2h09min	1h55min	34°C	31,6°C
Reflex 10Hz	1,35A	2h09min	1h47min	34,6°C	32°C	2h09min	1h49min	34,3°C	31,8°C
Reflex 20Hz	1,35A	2h07min	1h45min	35,4°C	32,5°C	2h10min	1h43min	35,1°C	32,2°C
Reflex 40Hz	1,35A	2h10min	1h41min	36,7°C	33,1°C	2h12min	1h39min	36,8°C	32,5°C
Reflex 80Hz	1,35A	2h11min	1h36min	38,5°C	35,1°C	2h10min	1h36min	38,7°C	35°C
Reflex 1Hz	1,62A	1h50min	1h31min	38,5°C	35,8°C	1h47min	1h30min	38,7°C	35,7°C
Reflex 3Hz	1,62A	1h47min	1h35min	36°C	32,3°C	1h49min	1h37min	35,7°C	32,6°C
Reflex 5Hz	1,62A	1h48min	1h27min	39°C	36,2°C	1h50min	1h25min	39,3°C	36,6°C
Reflex 10Hz	1,62A	1h47min	1h21min	39,6°C	36,9°C	1h45min	1h22min	39,6°C	37,5°C
Reflex 20Hz	1,62A	1h46min	1h15min	40,2°C	37,6°C	1h46min	1h17min	39,8°C	37,9°C
Reflex 40Hz	1,62A	1h47min	1h13min	41,6°C	38,9°C	1h49min	1h13min	42°C	39,3°C
Reflex 80Hz	1,62A	1h44min	1h09min	42,7°C	39,5°C	1h46min	1h08min	42,9°C	39,4°C
CC-CV (P)	900mA	1h41min	1h31min	30,1°C	28°C	1h40min	1h32min	30,7°C	28,3°C
CC-CV (C)	900mA	10h	1h49min	31,6°C	29,2°C	10h	1h46min	31°C	28,6°C
CC-CV (P)	1,35A	1h37min	1h27min	33,8°C	31,2°C	1h36min	1h26min	33,5°C	31,8°C
CC-CV (C)	1,35A	10h	1h50min	34,1°C	31,9°C	10h	1h48min	34,3°C	32,2°C
CC-CV (P)	1,62A	1h32min	1h24min	39,7°C	37,1°C	1h33min	1h23min	39,6°C	37,1°C
CC-CV (C)	1,62A	10h	1h46min	40,2°C	37,8°C	10h	1h49min	39,9°C	37,5°C
CC-CV (P)	900mA	1h42min	1h32min	30,3°C	27,8°C	1h39min	1h32min	30,5°C	28,2°C
Comercial									
CC-CV (C)	900mA	10h	1h48min	30,8°C	28,4°C	10h	1h46min	30,7°C	28°C
Comercial									

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Os dados coletados durante os ensaios, sintetizados na Tabela 17, foram estruturados na forma de gráficos. Na Figura 113 constam os tempos de carga e descarga e na Figura 114 as temperaturas para o método Reflex. É visível a variação dos tempos de carga e temperaturas,

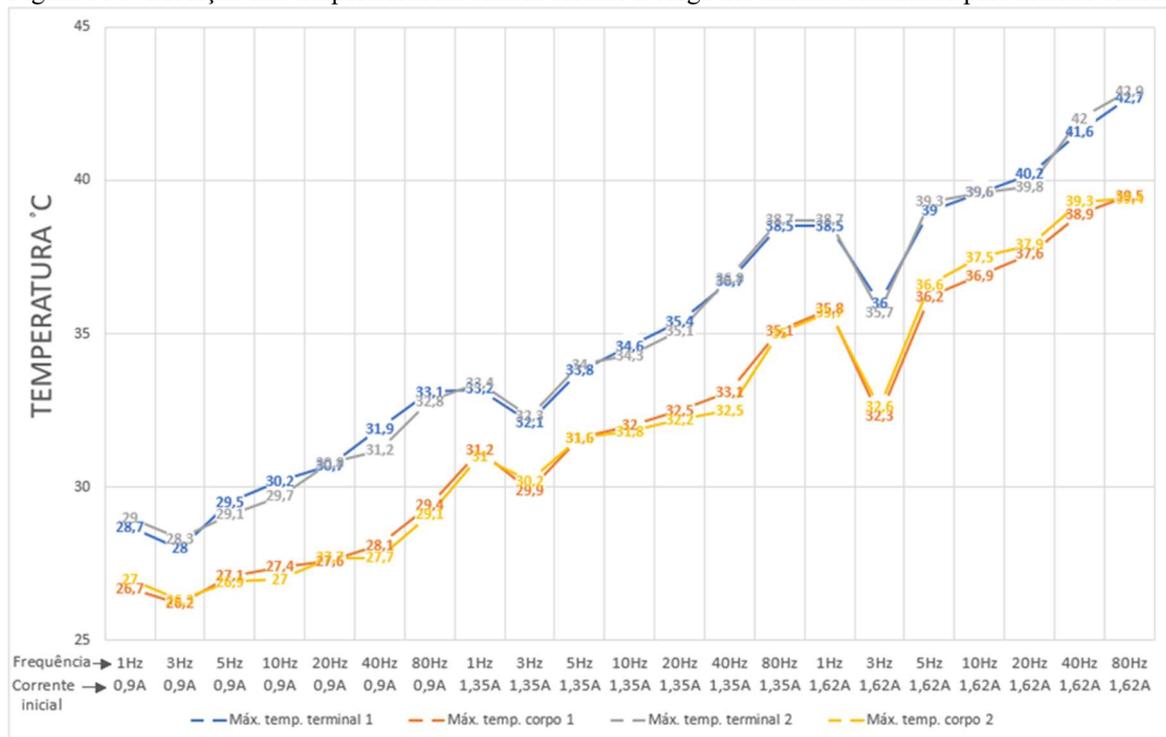
assim como o tempo que a bateria levou para ser descarregada para cada condição de corrente e de frequência aplicadas.

Figura 113 - Medição dos tempos de carga e descarga resultantes dos ensaios pelo método Reflex



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

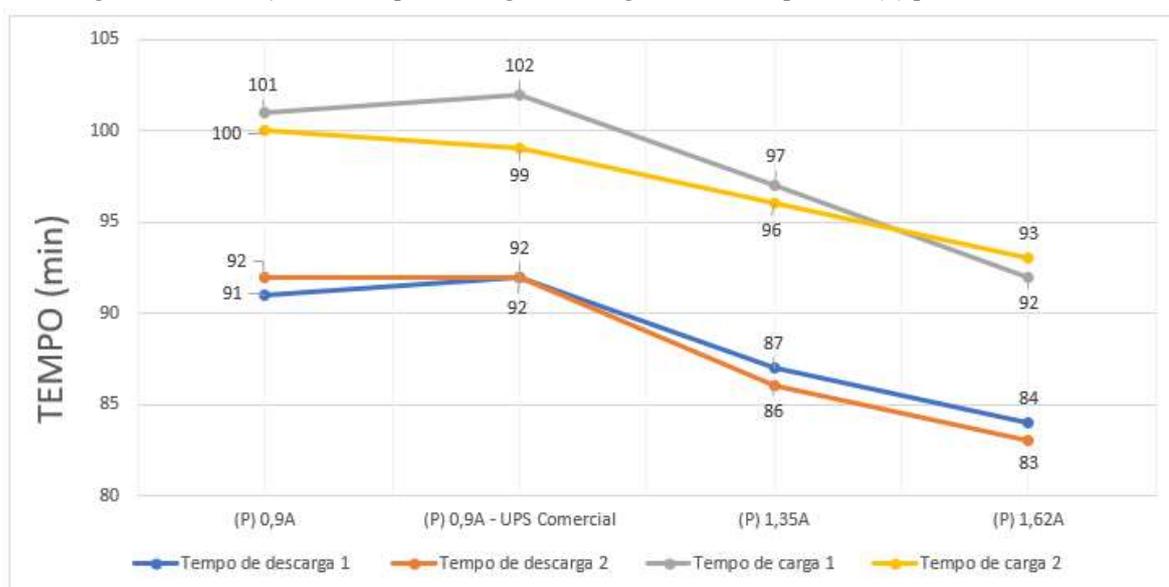
Figura 114 - Medição das temperaturas na bateria durante a carga nos ensaios realizados pelo método Reflex



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

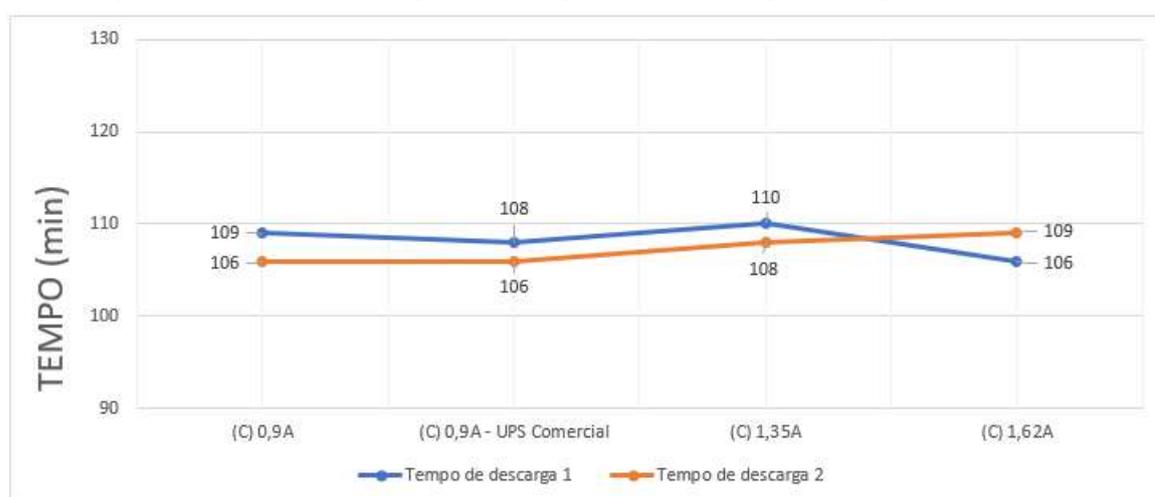
Sobre o método CC-CV, na Figura 115 são apresentados os tempos de carga e descarga para os ensaios parciais e na Figura 116 os tempos de descarga para os ensaios completos que ficaram 10h em carga. Já, a Figura 117 apresenta as temperaturas coletadas nos ensaios pelo método CC-CV, compreendendo os ensaios parciais e completos.

Figura 115 - Medição dos tempos de carga e descarga nos ensaios parciais (P) pelo método CC-CV



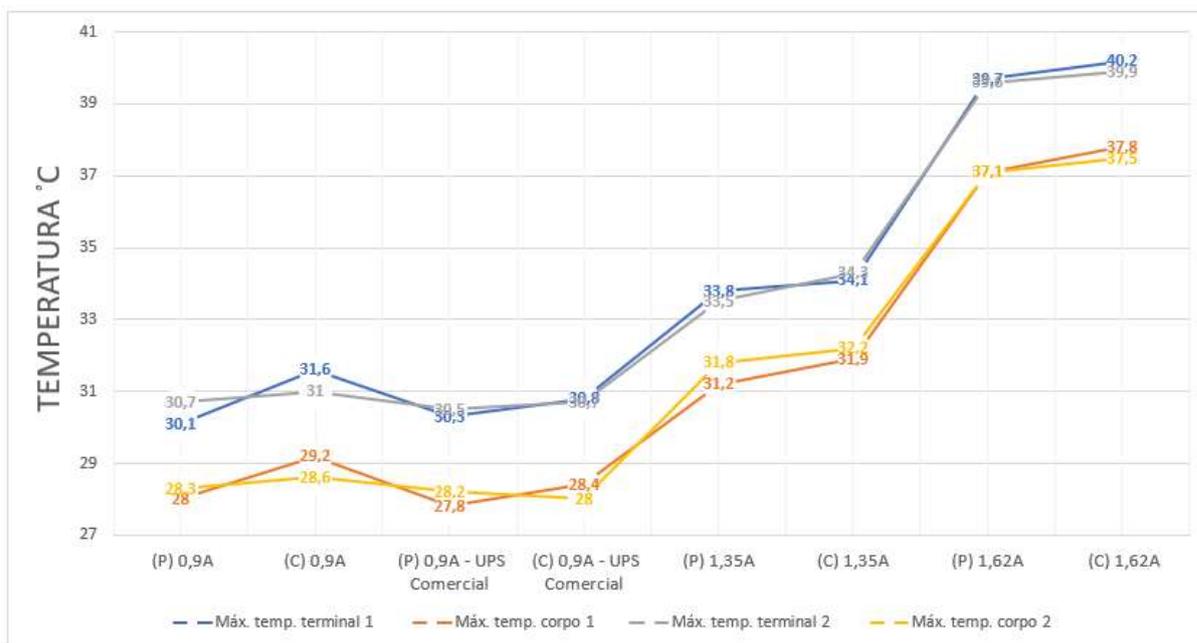
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 116 - Medição dos tempos de descarga nos ensaios completos (C) pelo método CC-CV



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 117 - Medição das temperaturas na bateria durante a carga nos ensaios realizados pelo método CC-CV parciais (P) e completos (C)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Pode ser percebido pelos gráficos que os tempos de carga e descarga com a corrente inicial de 900mA realizada pela UPS comercial e pelo conversor ficaram próximos, tanto para os ensaios parciais quanto nos completos.

Nos ensaios completos, mesmo com as diferentes correntes iniciais de carga, conforme a Figura 116 os tempos de descarga ficaram parecidos, pois, como o tempo de carga é longo, a bateria possui o tempo necessário para alcançar o estado de carga completo.

Baseado nos diferentes tempos que a bateria levou para alcançar a corrente de manutenção de carga (aproximadamente 200mA) durante os ensaios, talvez não seria necessário mantê-la por 10h consecutivas em carga, todavia, para isso, ensaios dedicados para a verificação do estado de carga deveriam ser realizados de forma online durante o processo de carga afim de averiguar se ela já atingiu o estado de carga completo.

Assim como pelo método Reflex, os ensaios parciais realizados pelo método CC-CV se observam que os tempos de carga, descarga e temperatura variam de acordo com o aumento da corrente inicial de carga que é imposta.

De um modo geral, pode ser percebido pelas curvas da Figura 113 com os resultados dos ensaios realizados pelo método Reflex, que, conforme se aumenta a corrente inicial, os tempos são reduzidos e, na Figura 114, a temperatura se eleva de acordo com o aumento da frequência imposta. No entanto, na frequência de 3Hz, embora o tempo de carga se mantenha

praticamente o mesmo comparado com as outras frequências com a mesma corrente inicial, se percebe uma maior retenção de carga pela bateria (evidenciada por um maior tempo de descarga), e, conseqüentemente uma redução da temperatura durante a carga nesta frequência.

Ao se comparar os dois extremos dos ensaios nas melhores condições de 3Hz, com a menor corrente inicial e a maior, temos as diferenças observadas conforme a Tabela 18.

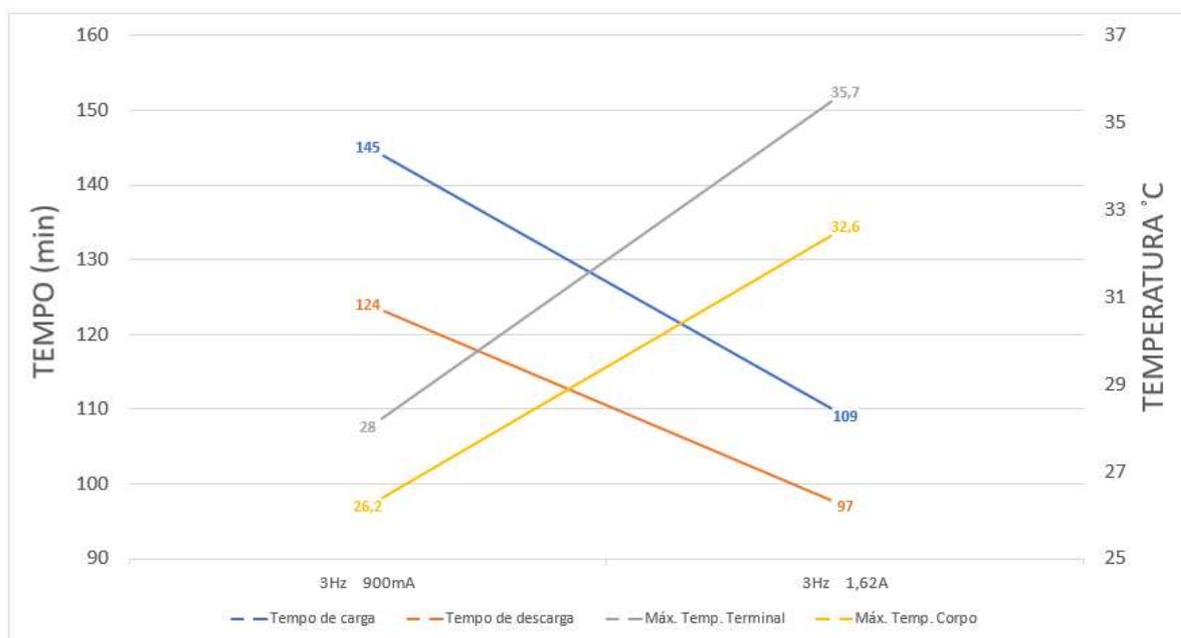
Tabela 18 - Comparação entre os ensaios pelo método Reflex dos dois extremos de correntes: 900mA e 1,62A a 3Hz

Método	Corrente inicial	Tempo de carga	Tempo de descarga	Máx. temp. terminal	Máx. temp. corpo
Reflex 3Hz	900mA	2h25min	2h04min	28°C	26,2°C
Reflex 3Hz	1,62A	1h49min	1h37min	35,7°C	32,6°C

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Através dela se percebe que com o aumento de 80% da corrente inicial, essa diferença resulta em 25% a menos no tempo de carga e cerca de 22% no tempo de descarga. Logo, as variações das temperaturas também são importantes e representam um aumento de 25% tanto na temperatura do terminal quanto na superfície do corpo da bateria. A visualização destas diferenças na forma gráfica pode ser observada também na Figura 118.

Figura 118 - Comparação entre os tempos de carga, descarga e temperaturas pelo método Reflex dos dois extremos de correntes: 900mA e 1,62A a 3Hz



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

No método CC-CV a comparação foi realizada considerando também os extremos de correntes iniciais de 900mA e 1,62A. Primeiramente, esta comparação se deu entre os dois melhores ensaios parciais, cujos dados estão dispostos na Tabela 19.

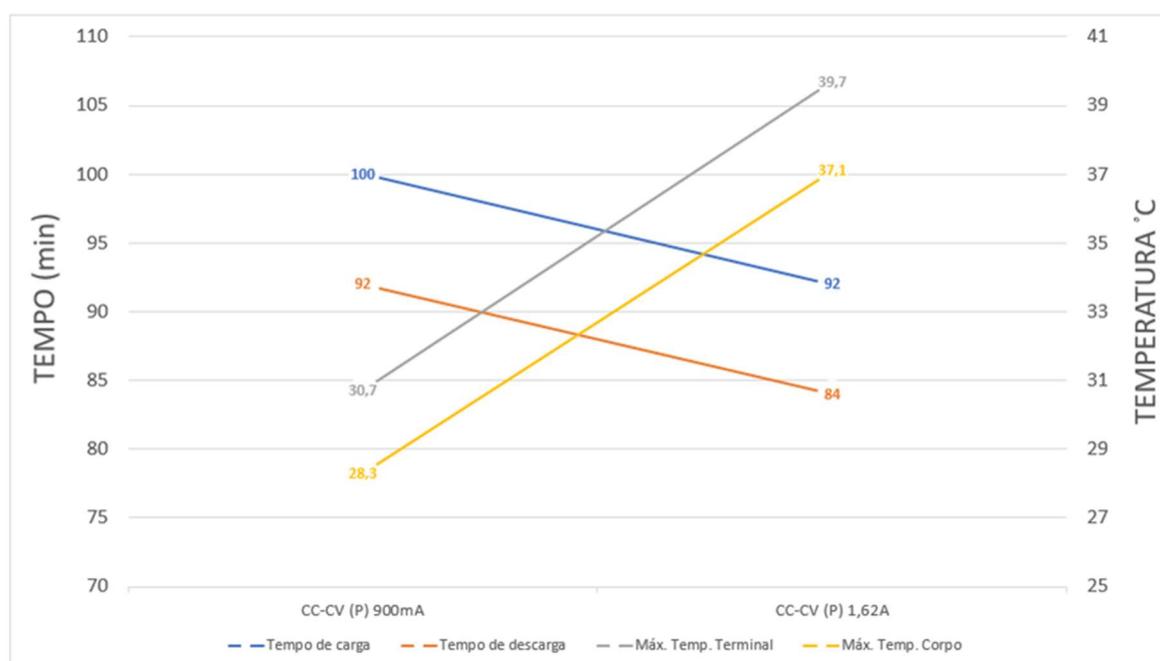
Tabela 19 - Comparação entre os ensaios pelo método CC-CV Parciais dos dois extremos de correntes: 900mA e 1,62A

Método	Corrente inicial	Tempo de carga	Tempo de descarga	Máx. temp. terminal	Máx. temp. corpo
CC-CV (P)	900mA	1h40min	1h32min	30,7°C	28,3°C
CC-CV (P)	1,62A	1h32min	1h24min	39,7°C	37,1°C

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Nos ensaios parciais se observa que com o aumento de 80% da corrente inicial, essa diferença resulta em 8% a menos no tempo de carga e cerca de 9% no tempo de descarga. Logo, as variações das temperaturas representam um aumento de cerca de 30% tanto na temperatura do terminal quanto na superfície do corpo da bateria. A Figura 119 representa graficamente estas diferenças.

Figura 119 - Comparação entre os tempos de carga, descarga e temperaturas pelo método CC-CV parciais dos dois extremos de correntes: 900mA e 1,62A



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Já, nos ensaios completos, cujos dados encontram-se na Tabela 20, com o aumento de 80% da corrente inicial, essa diferença não trouxe influência no tempo de carga, pois nestes ensaios a bateria permaneceu por 10h consecutivas para todas correntes iniciais que foram impostas e o tempo de descarga foi o mesmo para as duas condições. Porém, o contraste se verifica nas temperaturas, que representaram um aumento de cerca de 27% tanto na temperatura do terminal quanto na superfície do corpo da bateria.

Tabela 20 - Comparação entre os ensaios pelo método CC-CV Completos dos dois extremos de correntes: 900mA e 1,62A

Método	Corrente inicial	Tempo de carga	Tempo de descarga	Máx. temp. terminal	Máx. temp. corpo
CC-CV (C)	900mA	10h	1h49min	31,6°C	29,2°C
CC-CV (C)	1,62A	10h	1h49min	39,9°C	37,5°C

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Apesar de praticamente não apresentar diferenças nas temperaturas entre os ensaios parciais e completos com a mesma corrente inicial, é notória a diferença no tempo de carga. Este tempo foi superior a 8h para o ciclo completo de carga, onde mantém-se a tensão de flutuação constante na bateria até que a corrente atinja um nível mínimo para manutenção da carga. Esta diferença resultou em um tempo maior de descarga da bateria em 17 minutos para a corrente inicial de 900mA (18%), e 25 minutos para corrente inicial de 1,62A (30%) a favor dos ensaios completos de carga.

Para efeitos de comparação entre os dois métodos com as cargas realizadas com a mesma corrente inicial, a carga pelo método Reflex com a frequência de 3Hz foi a selecionada para essa comparação. Essa seleção considera o fato de que nesta frequência o método apresentou os melhores tempos, assim como temperatura inferior às demais frequências nos ensaios com a mesma corrente. Com ela foram comparadas as cargas realizadas pelo método CC-CV parciais e completas.

A Tabela 21 agrupa os dados coletados dos melhores resultados dos ensaios realizados com a corrente inicial de 900mA.

Tabela 21 - Melhores resultados dos ensaios realizados com a corrente inicial de 900mA pelo método Reflex e CC-CV

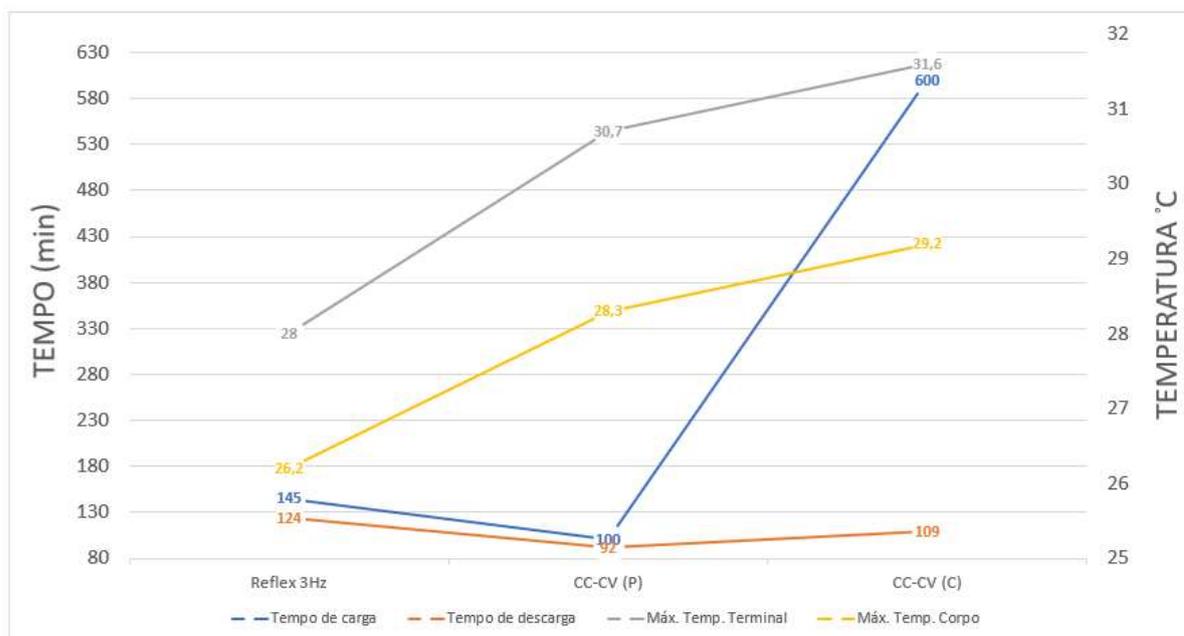
Método	Corrente inicial	Tempo de carga	Tempo de descarga	Máx. temp. terminal	Máx. temp. corpo
Reflex 3Hz	900mA	2h25min	2h04min	28°C	26,2°C
CC-CV (P)	900mA	1h40min	1h32min	30,7°C	28,3°C
CC-CV (P) Comercial	900mA	1h39min	1h32min	30,5°C	28,2°C
CC-CV (C)	900mA	10h	1h49min	31,6°C	29,2°C
CC-CV (C) Comercial	900mA	10h	1h48min	30,8°C	28,4°C

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Como os resultados dos ensaios pelo método CC-CV realizados com o conversor e com a UPS comercial ficaram muito próximos, foi adotada a comparação somente com os resultados obtidos através dos ensaios realizados com o próprio conversor.

A Figura 120 ilustra as diferenças entre a carga pelo método Reflex e CC-CV (parcial e completa) de forma gráfica para a corrente inicial de 900mA.

Figura 120 - Diferenças entre as cargas realizadas pelo método Reflex e CC-CV (parcial e completa) com corrente inicial de 900mA



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Conforme observado, o tempo de carga pelo método Reflex é superior em 45 minutos (45%) com relação ao método CC-CV parcial. No entanto, o tempo de descarga pelo método CC-CV é inferior em 32 minutos (26%), tendo de se considerar, ainda, que as temperaturas da bateria durante a carga neste método ficaram superiores em cerca de 10%.

A carga realizada pelo método CC-CV completo para esta mesma corrente, indica que esta foi superior em 7 horas e 35 minutos (314%) com relação a carga pelo método Reflex, e o tempo de descarga da bateria foi inferior em 15 minutos (12%) com as temperaturas medidas na bateria superiores também em cerca de 10%.

A Tabela 22 agrupa os dados coletados dos melhores resultados dos ensaios realizados com a corrente inicial de 1,35A.

Tabela 22 - Melhores resultados dos ensaios realizados com a corrente inicial de 1,35A pelo método Reflex e CC-CV

Método	Corrente inicial	Tempo de carga	Tempo de descarga	Máx. temp. terminal	Máx. temp. corpo
Reflex 3Hz	1,35A	2h10min	2h05min	32,1°C	29,9°C
CC-CV (P)	1,35A	1h37min	1h27min	33,8°C	31,2°C
CC-CV (C)	1,35A	10h	1h50min	34,1°C	31,9°C

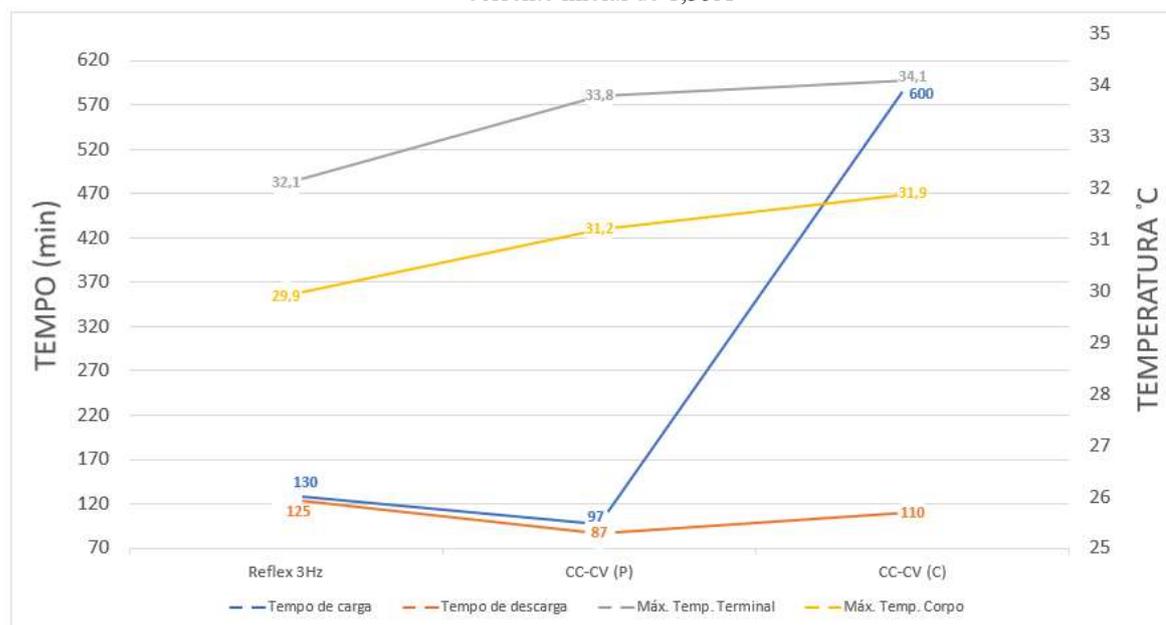
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Com esta corrente inicial se observa que o tempo de carga pelo método Reflex é superior em 33 minutos (34%) com relação ao método CC-CV parcial. No entanto, o tempo de descarga pelo método CC-CV é inferior em 38 minutos (30%), tendo de se considerar, ainda, que as temperaturas da bateria durante a carga neste método ficaram superiores em cerca de 5%.

A carga realizada pelo método CC-CV completo para esta mesma corrente, indica que esta foi superior em 7 horas e 50 minutos (361%) com relação a carga pelo método Reflex, e o tempo de descarga da bateria foi inferior em 15 minutos (12%) com as temperaturas medidas na bateria superiores em cerca de 6%.

A Figura 121 ilustra as diferenças entre a carga pelo método Reflex e CC-CV (parcial e completa) de forma gráfica para a corrente inicial de 1,35A.

Figura 121 - Diferenças entre as cargas realizadas pelo método Reflex e CC-CV (parcial e completa) com corrente inicial de 1,35A



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Tabela 23 agrupa os dados coletados dos melhores resultados dos ensaios realizados com a corrente inicial de 1,62A.

Tabela 23 - Melhores resultados dos ensaios realizados com a corrente inicial de 1,62A pelo método Reflex e CC-CV

Método	Corrente inicial	Tempo de carga	Tempo de descarga	Máx. temp. terminal	Máx. temp. corpo
Reflex 3Hz	1,62A	1h49min	1h37min	35,7°C	32,6°C
CC-CV (P)	1,62A	1h32min	1h24min	39,7°C	37,1°C
CC-CV (C)	1,62A	10h	1h49min	39,9°C	37,5°C

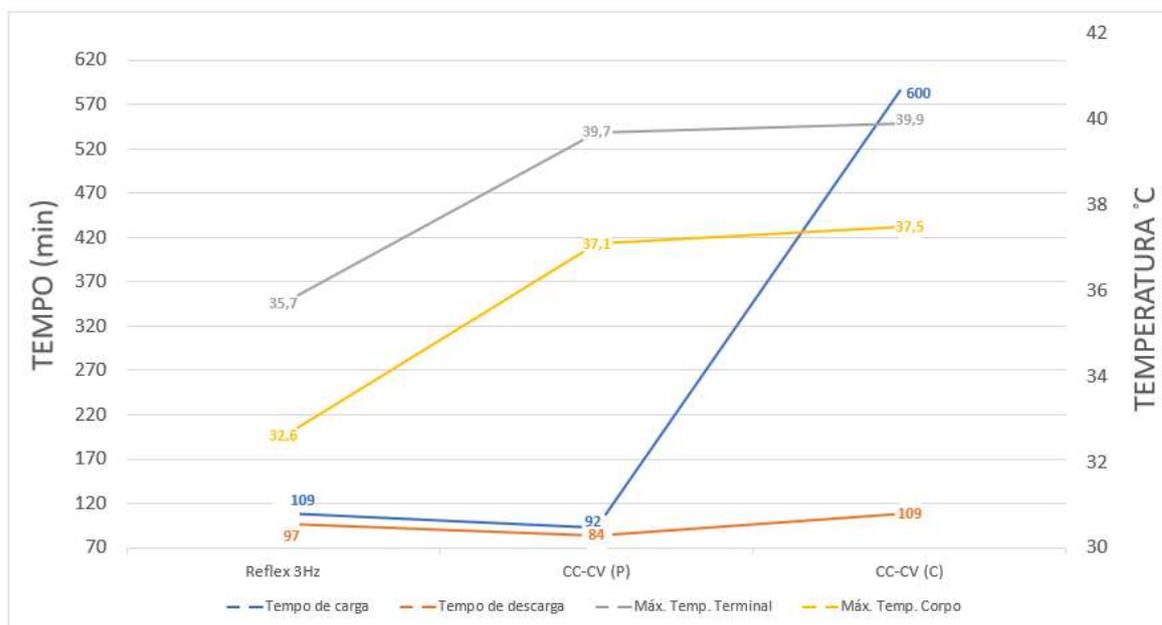
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Para esta corrente inicial o tempo de carga pelo método Reflex é superior em 17 minutos (18%) com relação ao método CC-CV parcial. No entanto, o tempo de descarga pelo método CC-CV é inferior em 13 minutos (13%), tendo de se considerar, ainda, que as temperaturas da bateria durante a carga neste método ficaram superiores em cerca de 12%.

A carga realizada pelo método CC-CV completo para esta mesma corrente, indica que esta foi superior em 8 horas e 11 minutos (450%) com relação a carga pelo método Reflex, e o tempo de descarga da bateria foi superior em 12 minutos (13%) com as temperaturas medidas na bateria superiores em cerca de 13%.

A Figura 122 ilustra as diferenças entre a carga pelo método Reflex e CC-CV (parcial e completa) de forma gráfica para a corrente inicial de 1,62A.

Figura 122 - Diferenças entre as cargas realizadas pelo método Reflex e CC-CV (parcial e completa) com corrente inicial de 1,62A



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Em uma comparação direta entre os dois métodos, levando-se em conta somente o maior tempo que a bateria levou para ser descarregada, temos que, dentre os dois ensaios do método CC-CV (parcial e completo), o ensaio completo teve este tempo superior com o setup de ensaio realizado com a corrente inicial de 1,35A. Já, pelo método Reflex, o ensaio que proporcionou o maior tempo de descarga da bateria foi na frequência de 3Hz e também com a corrente inicial de 1,35A, conforme pode ser visto na Tabela 24.

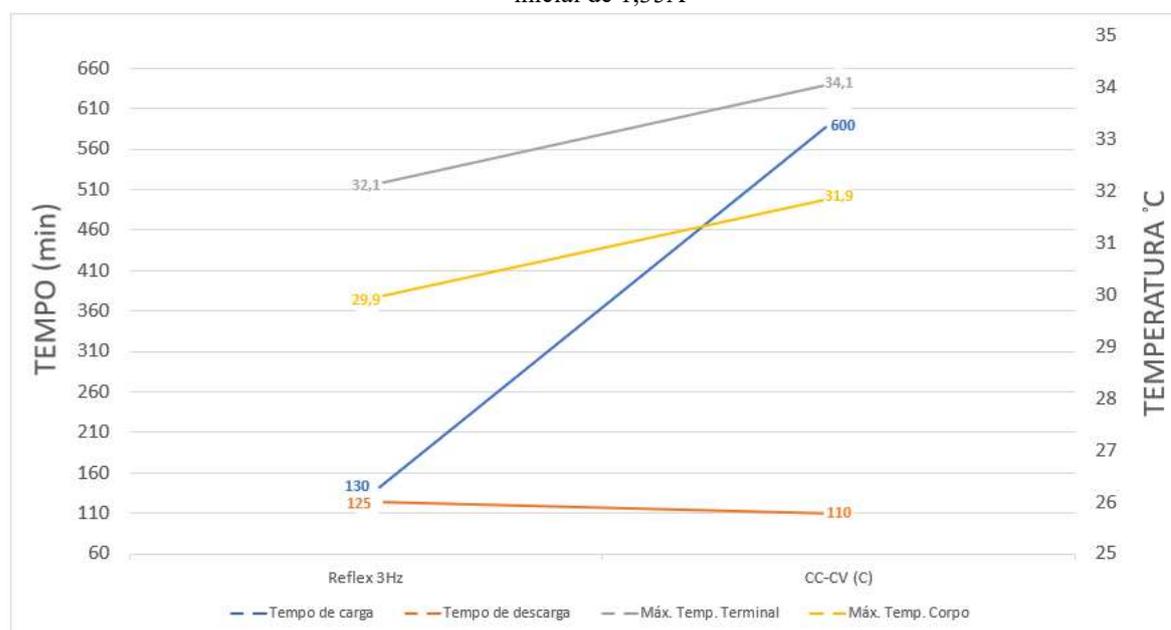
Tabela 24 - Comparação entre o método CC-CV (C) e o método Reflex a 3Hz com corrente inicial de 1,35A

Método	Corrente inicial	Tempo de carga	Tempo de descarga	Máx. temp. terminal	Máx. temp. corpo
CC-CV (C)	1,35A	10h	1h50min	34,1°C	31,9°C
Reflex 3Hz	1,35A	2h10min	2h05min	32,1°C	29,9°C

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A comparação realizada levou a constatação de uma significativa diferença no tempo de carga de quase 8h, e uma diferença de 15 minutos a mais para o método Reflex no tempo que a bateria levou para ser descarregada até que os elementos internos atingissem a tensão mínima. Ainda, no quesito temperatura, o método Reflex permaneceu ligeiramente abaixo comparado com o método CC-CV, a qual ficou em torno de 2°C inferior nas medições realizadas na bateria. A Figura 123 ilustra as diferenças verificadas entre estes dois ensaios.

Figura 123 - Diferenças entre as cargas realizadas pelo método Reflex a 3Hz e CC-CV completa com corrente inicial de 1,35A



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Embora neste estudo não tenham sido adotados métodos específicos e detalhados para medição ou estimativa do SoC, nem aplicadas a tensão de equalização e manutenção da tensão de flutuação após a bateria atingir 13,5V, verificou-se que o método Reflex se mostra condizente com as expectativas relacionadas ao carregamento da bateria. Os resultados dos ensaios evidenciaram que a retenção de carga foi, na maioria dos casos e em determinadas frequências, superior comparado ao método CC-CV.

Fazendo uma análise dos resultados obtidos durante os ensaios e realizando uma comparação com os estudos de (CHING-MING et al., 2017), utilizado como referência para obtenção dos tempos dos intervalos dos pulsos positivo, negativo e de descanso, bem como da frequência de 5Hz utilizada como base para os ensaios, o tempo de 2h13min até que o banco de baterias atingisse a tensão de flutuação, ficou equivalente ao tempo de carga aplicado com 1,35A dos ensaios apresentados neste estudo. Um diferencial do estudo realizado por (CHING-

MING et al., 2017) em relação a esta pesquisa está no fato de que estes autores regeneraram a corrente negativa para alimentar um sistema com corrente constante. Salienta-se que o protótipo apresentado por (CHING-MING et al., 2017), utilizou 4 baterias em série e uma corrente inicial de carga maior. Neste mesmo estudo não foram apresentados dados referentes a tempos de descarga e temperaturas.

8 CONCLUSÕES GERAIS

O cenário tecnológico que marca o momento atualmente vivido implica em demandas que exigem fontes de energia variadas. A dependência criada em relação a tecnologia, que vai de soluções simples utilizadas para aumentar o conforto das pessoas em seus lares a garantir a manutenção da vida em cenários hospitalares, por exemplo, exige a criação de fontes alternativas e funcionais de energia, principalmente para as situações de ausência de fornecimento de energia pela rede elétrica comercial.

As UPS caracterizam-se como uma possibilidade de suprir essa demanda. Assim, surgem estudos na área a fim de melhorar a autonomia, tempo de recarga desses sistemas e vida útil da bateria, que se configura em um dos principais componentes de uma UPS. Mesmo que as baterias de chumbo-ácido, ainda amplamente utilizadas nas UPS, apresentem limitações comparadas a outros modelos, é fato que o investimento em estudos relacionados a métodos de carga desse tipo de bateria pode agregar melhorias ao funcionamento dos produtos, bem como até resultar em diferenciais de mercado aos fabricantes desses equipamentos.

Tendo em vista essa possível contribuição, o estudo desenvolvido se configurou no estabelecimento de uma relação comparativa entre o método convencional CC-CV e o método de carga Reflex, ainda pouco explorado no desenvolvimento de UPS. A curto prazo, sabe-se que a eletrônica para a implementação do método CC-CV é mais simplificada e menos onerosa comparada ao método Reflex, todavia é preciso atentar para melhorias e benefícios possíveis de serem obtidos a médio e longo-prazo.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados possibilitaram a comparação intencionada, apresentando elementos que corroboram com a necessidade de rever a utilização dos métodos convencionais de carga. A análise feita considerou, diante dos ensaios completos de carga realizados, o melhor resultado da aplicação de cada um dos métodos, levando às constatações pontuadas a seguir.

Foi observado, na aplicação do método Reflex, que com o aumento da frequência, mais especificamente a partir de 5Hz, houve uma elevação da temperatura da bateria. Porém, nos ensaios realizados em 3Hz se observou uma redução dessa temperatura. De modo geral, nos ensaios em 1Hz, a temperatura ficou superior aos ensaios realizados com a frequência de 3Hz. Presume-se, a partir dos estudos realizados até o momento, que esta seja uma característica relacionada ao modelo elétrico da bateria, uma vez que a frequência é uma variável que exerce influência direta sobre a impedância equivalente.

No caso do método Reflex, o melhor resultado foi obtido na frequência de 3Hz e corrente de carga de 1,35A. Foi neste *setup* do ensaio que se obteve o maior valor de tempo de descarga da bateria com resistência constante de 20Ω . A comparação deste *setup* com o método CC-CV com a mesma corrente inicial reflete uma melhora substancial do tempo de carga de aproximadamente 8h, havendo ainda uma redução de 6% da temperatura da bateria e um aumento de 13,5% no tempo total de descarga.

Mesmo diante dos promissores resultados relacionados ao tempo de carga das baterias pelo método Reflex, não há como prever, a partir dos ensaios realizados, de que modo este aspecto exerce influência sobre o tempo de vida útil das baterias. Para esta verificação entende-se como necessária a realização de um processo de experimentação a longo prazo, em que seriam imprescindíveis vários ciclos de carga e descarga para uma análise pormenorizada dos elementos internos da bateria.

O recorte do estudo realizado esteve direcionado à implementação do método em fontes ininterruptas de energia, contudo, nada impede que seu uso seja ampliado a outros tipos de baterias e aplicações, que necessitem de fontes de energia armazenada.

8.1 POSSIBILIDADES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados e constatações decorrentes do estudo realizado, vislumbram-se como possibilidades para a sua continuidade em trabalhos futuros:

- Realização de ensaios com outros tempos de IPP, IPN e ID;
- Aplicação do método em temperaturas ambientes maiores e menores do que 25°C ;
- Utilização do método Reflex a partir da imposição de uma corrente média de carga até o limite máximo recomendado pela bateria;
- Manutenção de uma tensão de flutuação constante na bateria após ela atingir 13,5V, buscando garantir o seu estado de carga completo no método Reflex;
- Controle da corrente média aplicada de acordo com a temperatura da bateria;
- Realização de ensaios a longo prazo para análise do comportamento e da influência do método Reflex em relação à vida útil das baterias;
- Ensaios entre as frequências de 1Hz a 5Hz e ensaios nos intervalos entre as frequências já ensaiadas;
- Aplicação da etapa de descarga da bateria pelo método Reflex.

REFERÊNCIAS

APOLINÁRIO, M. F. **Nobreak dupla conversão monofásico isolado em alta frequência com tensão de entrada bivolt e potência de 1 Kva, baseado no conceito de circuito multi-ports**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2017. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/23481>>. Acesso em: 13 jun. 2019.

BARBI, Ivo; FONT, Carlo H.; ALVES, Ricardo L. **Projeto físico de indutores e transformadores**. Florianópolis: UFSC, 2002.

BEKIAROV, S.B.; STOYAN, A. E. **Uninterruptible Power Supplies: classification, operation, dynamics, and control**. APEC. Décima-sétima Conferência e Exposição Anual de Eletrônica de Potência Aplicada do IEEE, mar. 2002. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/989305>>. Acesso em: 13 jun. 2019.

BOSCH. **Manual De Baterias Bosch**. São Paulo, 2007 [Online]. Disponível em: <http://br.bosch-automotive.com/media/parts/download_2/baterias/Manual_de_Baterias_Bosch_6_008_FP1728_04_2007.pdf>. Acesso em: 18 maio 2019.

CARDOSO, R. T., **Método de Carga para Banco de Baterias em Fontes Ininterruptas de Energia que Busca Garantir o Estado de Carga Completa: Corrente Pulsada Modificado**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/8576>>. Acesso em: 09 jun. 2019.

CARLETTE, L. P.; SANTOS, C. G. **Modelagem de bateria de chumbo-ácido para aplicação no software CASEE**. GT2Energia. Jul.2017. Disponível em: <<http://encurtador.net/azAJ8>>. Acesso em: 08 jun. 2018.

CARNEIRO, R. L. et al. Aspectos Essenciais das Baterias Chumbo-Ácido e Princípios Físico-Químicos e Termodinâmicos do seu Funcionamento. **Revista Virtual de Química**, jun. 2017. Disponível em: <<http://rvq.s bq.org.br/imagebank/pdf/CarneiroNoPrelo.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

C&D TECHNOLOGIES. **Charging of valve regulated lead acid batteries**. 2012. Disponível em: <https://www.cdtechno.com/pdf/ref/41_2128_0212.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2020.

CHAGAS, M.W.P. **Novas Tecnologias para Avaliação de Baterias**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado Profissionalizante em Desenvolvimento de Tecnologia do IEP/LACTEC, Curitiba/PR, 2007. Disponível em: <<http://www.lactec.org.br/menu-capacitacao/dissertacao-marcos-wilson-pereira-chagas/>>. Acesso em: 08 jun. 2019.

CHEN, L. R. A Design Of An Optimal Battery Pulse Charge System By Frequency-Variied Technique. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 54, n. 1, p.398-405, feb. 2007. Disponível em: < encurtador.com.br/vOTU1>. Acesso em: 08 set. 2020.

CHEN, L.R. et al. Projeto de um conversor bidirecional baseado em reflexo com função de recuperação de energia . **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 55, n.8, p. 3022-3029, 2008. Disponível em: < <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.918609>> . Acesso em: 19 set. 2020.

CHIH-CHIANG, H.; MENG-YU, L. A study of charging control of lead-acid battery for electric vehicles, **ISIE'2000. Proc. 2000 IEEE Int. Symp. Ind. Electron**, vol. 1, p.135–140, 2000. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/930500>>. Acesso em: 18 jul. 2020.

CHING-MING, L. et al. A Reflex-Charging Based Bidirectional DC Charger for Light Electric Vehicle and DC-Microgrids. **Proc. of the 2017 IEEE Region 10 Conference (TENCON)**, Malaysia, p. 5-8, November, 2017. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/8227876>>. Acesso em: 17 dez. 2020.

CHUANG, C. Y.; WANG, J. B. A multiphase battery charger with pulse charging scheme, **31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society**, p. 1-6, 2005. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/1569084>>. Acesso em 13 out. 2020.

CRAL. **Baterias Cral, a bateria nota 10**. Empresa certificada InMetro. Bauru, SP. Disponível em: <<http://cral.com.br/>>. Acesso em: 08 jan 2021.

CRUZ, Lucas Martinez da. **Desenvolvimento de um Carregador de Bateria Chumbo-Ácido Selada 12V-5Ah Microcontrolado**. Trabalho de conclusão de curso de Graduação apresentado à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), PR, 2018. Disponível em: < <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/13594/1/carregadorbateriamicrocontrolado.pdf>>. Acesso em: 11 maio 2021.

DUGAN, R.; et al. **Electrical Power Systems Quality**. McGraw-Hill Professional Publishing, 2012.

FAN, S. Y.; CHANG, G. K.; TSENG, S. Y. A reflex charger realized by multi-interleaved Buck-Boost converters, **6th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2011**, p.1215–1220, Pequim, 2011. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/5975771>>. Acesso em: 23 ago. 2020.

FUENTES, Rodrigo C.; PINHEIRO, Humberto. Uma nova topologia de UPS monofásica não isolada baseada em conversores Boost. **Eletrônica de Potência**, v. 5, n. 2, nov. 2000, SOBRAEP - Associação Brasileira de Eletrônica de Potência. Disponível em: < <https://sobraep.org.br/site/uploads/2018/05/rvol5no2p1.pdf>>. Acesso em: 11 maio 2021.

GRAND VIEW RESEARCH. **Lead Acid Battery Market Size & Trend Analysis By Product (SLI, Stationary, Motive), By Construction Method (Flooded, VRLA), By Application (Automotive, UPS, Telecommunication, Electric Bikes, Transport Vehicles), By Region, And Segment Forecasts.** 2014. [Online]. Disponível em:

<<http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/lead-acid-battery-market>>. Acesso em: 02 nov. 2018.

GUERRERO, J.M.; DE VICUNA, L. G.; UCEDA, J. Uninterruptible power supply systems provide protection. **IEEE Ind. Electron. Mag.**, v. 1, n. 1, p. 28-38, Spring 2007, vol. v. 1, nº 1, pp. p. 28-38, 2007. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/4154605>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

IEEE STANDARDS ASSOCIATION. **IEEE 1184-2006** - Guia IEEE para baterias para sistemas de fonte de alimentação ininterrupta. Mar. 2006. Disponível em: < <https://standards.ieee.org/standard/1184-2006.html>>. Acesso em: 28 out. 2020.

JAMPEETHONG, P; KHOMFOI, S. An EV quick charging station using a pulse frequency current control technique, **2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)**, pp. 1-5, 2015.

KARVE, S. Three of a kind, **IEE Review**, vol. 46, pp. 27-31, 2000. Disponível em: < https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ir_20000204>. Acesso em: 28 jun. 2019

LAZZARIN, T. B. **Estudo e implementação de um carregador de baterias com uma técnica de avaliação de sua vida útil.** Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSC, Florianópolis/SC, 2006. Disponível em: < <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/103148>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

LEÃO, J.F.A. et al. **Lead-Acid Battery Modeling and State of Charge Monitoring.** Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/224125611_Lead-Acid_Battery_Modeling_and_State_of_Charge_Monitoring>. Acesso em: 12 jun. 2019.

LIANG, T. J. et al. Implementation of a regenerative pulse charger using hybrid Buck-Boost converter, **4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems**, v.2, p. 437-442, 2001. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/975355>>. Acesso em: 28 jun. 2020.

LINDEN, D.; REDDY, T. B.; **Linden's Handbook of Batteries.** 3. ed. New York: McGraw-Hill Professional Ed., 2001. Disponível em: <<http://dl.icdst.org/pdfs/files/b334382400c223631bea924f87b0a1ba.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2019.

LORENCETTI, E. J. **Sistema de gerenciamento ativo de equalização de energia em Banco de baterias usando conversor CC-CC bidirecional modular.** Dissertação apresentada ao

curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre Engenheiro Eletricista. Joinville, 2018. Disponível em: <<http://sistemabu.udesc.br/pergamumweb/vinculos/000057/00005787.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2020.

MOURA. **Acumuladores Moura S.A.** 2019. Disponível em: <www.moura.com.br>. Acesso em: 13 jun. 2019.

NGUYEN, T; BUSHNELL, L. **Advanced Battery Charging Techniques: Pulse-Charging in Large-Scale Applications – Design of Divide and Conquer Technique for High-Capacity Batteries**, p.1-6, 2003. Disponível em: <encurtador.com.br/akP16>. 15 nov. 2020.

OENING, T. **Estudo e implementação de sistema de gerenciamento de baterias de lítio.** Trabalho de conclusão do curso de Bacharel em Engenharia Elétrica submetido ao Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville/SC, 2017.

OLIVEIRA, A. F. **Modelagem, Parametrização e Otimização de Baterias Chumbo-Ácido em Aplicações Ferroviárias via Análise de Big Data.** Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, 2016. Disponível em: <http://www.ufjf.br/eletrica_energia/files/2016/11/TCC_ARTHUR-OLIVEIRA-Final.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2019.

PANASONIC INDUSTRIAL. **Charging Methods: Methods of Charging the Valve Regulated (Sealed) Lead-Acid Battery**, 2005, p. 19-24. Disponível em: <<http://industrial.panasonic.com/cdbs/www-data/pdf/ACD4000/ACD4000PE4.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2020.

PINHEIRO, L. G. **Sistema de alimentação ininterrupta controlado por processador de sinais digitais.** Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Eletrônica - Curso Superior de Tecnologia em Sistemas Digitais. Florianópolis, 2007.

PRAISUWANNA, C.; KHOMFOI, S. A Quick Charger Station for EVs Using a Pulse Frequency Technique. 2013 **IEEE Energy Conversion Congress and Exposition**, Denver, CO, 2013, p. 3595-3599. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6647174>>. Acesso em: 14 set. 2020.

ROCHA, W. G. B.; RECH, C. **Método analítico e automatizado para modelagem de baterias.** In: XXIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA), 2020, Santa Maria. Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA), 2020, p. 1-8.

SAAD, M. D. **Controlador de carga e descarga de baterias.** Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, 2012. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/20880/20880.PDF>>. Acesso em: 13 jun. 2019.

SCHNEIDER ELETRIC. **Quais os tipos de Nobreak existentes no mercado?** Abr. 2017. Disponível em: < <https://blog.se.com/br/gestao-de-infra-estrutura/2017/04/12/tipos-de-nobreaks/>>. Acesso em: 14 jan. 2021.

SCHUCH, L. et al. Análise e projeto de um conversor bidirecional PWM de alto desempenho para interface entre o barramento CC e o banco de baterias. **Eletrônica de Potência**, v. 9, n. 1, jun. 2004, SOBRAEP - Associação Brasileira de Eletrônica de Potência. Disponível em: <<https://sobraep.org.br/site/uploads/2018/06/rvol9no1p1.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2021.

SERÔDIO, P. M. S. B. e. **Desenvolvimento de um Conversor CC-CC Bidirecional Interleaved para Testes de Baterias de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO₄)**. Dissertação submetida na Universidade do Minho para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrônica e de Computadores. Portugal, 2018. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/59476/1/68568+Dissertacao_Mestrado_GEPE_UMinho_68568_vfinal.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2020.

SÖLTER, W. A new international UPS classification by IEC 62040-3, **24th Annual International Telecommunications Energy Conference**, Montreal, Quebec, Canada, 2002, p. 541-545. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/1048709?arnumber=1048709>>. Acesso em: 17 out. 2019.

SVOBODA, V.; DOERING, H.; GARCHE, J. **The influence of fast charging on the performance of VRLA batteries**. Journal of Power Sources, v. 144, n.1, p. 244-254, 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775305000029>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

SYLVESTRIN, G. R. **Desenvolvimento de um sistema embarcado adaptável para o gerenciamento de bateria utilizando tecnologias abertas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2020. Disponível em: <<http://tede.unioeste.br/handle/tede/5113>>. Acesso em: 07 jan. 2021.

TEXAS INSTRUMENTS. **TMS320F28335 Experimenter Kit**. Disponível em: <<https://www.ti.com/tool/TMDSDOCK28335>>. Acesso em: 10 jan. 2021.

WEG. **Bateria 12 V** – Visão geral do produto. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Critical-Power/Residencial/Baterias/Bateria-Seladas-VLRA---12-V/Bateria-12-V/p/MKT_WDC_BRAZIL_CRITICAL_POWER_BATTERY_12V>. Acesso em: 07 dez. 2020.

ZANGIROLAMI, R. T., **Sistema de Alimentação Ininterrupta de Energia CC de Baixa Potência – Dimensionamento e Controle**. Trabalho de conclusão de curso de Graduação apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, 2016. Disponível em: < <http://www.ufjf.br/engenhariaeletrica/files/2017/08/TCC-UPS-Thales-Ribeiro-Zangirolami-Secretaria-Eletrica.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2019.

ANEXO A – CATÁLOGO BATERIA 12V 9Ah – BAT 0090122



Bateria 12 V 9 Ah - BAT 0090122

Especificações

Código SAP	13714063
Part number	BAT2120091
Número de células	6
Tensão nominal	12 V
Capacidade	9 Ah @ 20h até 1,75 V/cel
Peso	2,47 kg ±10%
Máxima corrente de descarga	90 A/5s
Resistência interna	16,5mΩhm ±10%
Faixa de temperatura normal de operação	25 °C
Tensão de carga de flutuação	13,5 V - 13,7 V
Máxima corrente de recarga recomendada	2,7 A
Tensão de equalização	14,5 V - 14,7 V
Material do monobloco	ABS
Autodescarga	Podem ser armazenadas por até 6 meses a 25 °C. Para altas temperaturas, o tempo de intervalo será menor.



Dimensões (mm)

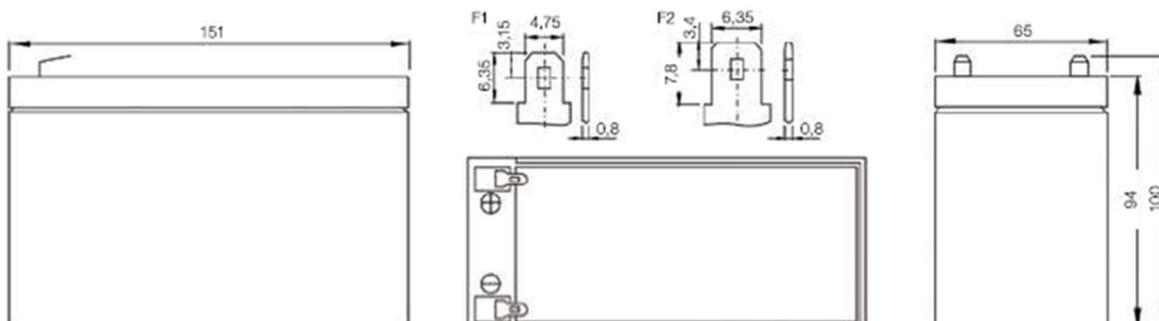


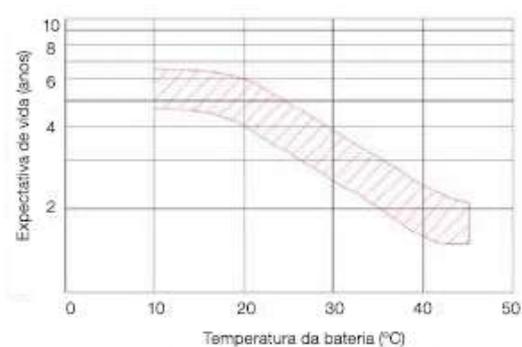
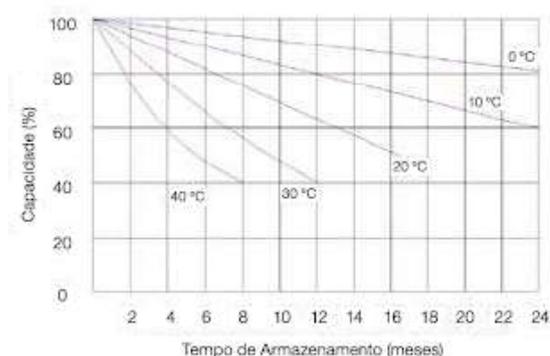
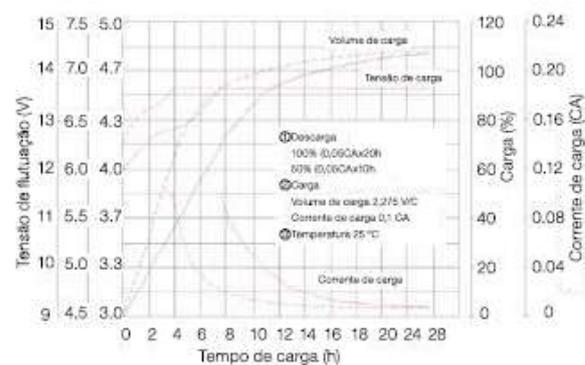
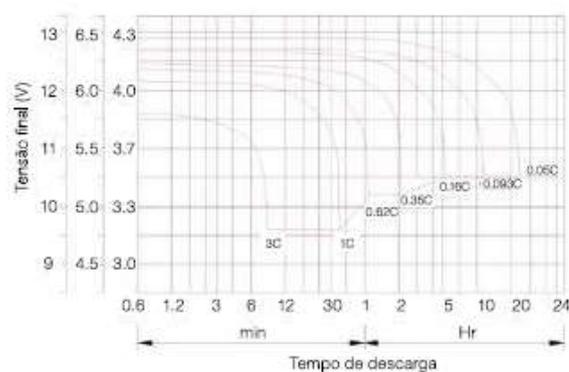
Tabela de Descarga à Corrente Constante (A) a 25 °C

Tensão	Tempo							
	5min	10min	15min	30min	1h	3h	5h	10h
1,60 V	35,10	23,27	17,17	9,936	5,741	2,462	1,600	0,870
1,65 V	33,60	22,58	16,72	9,717	5,634	2,420	1,560	0,860
1,70 V	32,10	21,87	16,13	9,429	5,494	2,350	1,510	0,850
1,75 V	30,56	20,49	15,36	9,051	5,308	2,290	1,470	0,840
1,80 V	27,85	18,99	14,37	8,562	5,067	2,220	1,400	0,820

Tabela de Descarga à Potência Constante (W) a 25 °C

Tensão	Tempo						
	5min	10min	15min	30min	1h	3h	5h
1,60 V	61,42	40,15	30,46	18,32	10,90	4,77	3,24
1,65 V	60,77	39,99	30,29	18,18	10,81	4,74	3,21
1,70 V	58,45	38,81	29,47	17,74	10,57	4,67	3,17
1,75 V	55,59	37,36	28,47	17,21	10,27	4,57	3,12
1,80 V	51,53	35,22	27,01	16,44	9,85	4,44	3,04

Nota: todos os valores mencionados são valores médios.

Efeito da Temperatura na Vida Útil (em Flutuação)**Características de Armazenamento****Curva Característica de Carga****Curva Característica de Descarga****Fatores de Capacidade com Diferentes Temperaturas**

Bateria	12 V	-20 °C	-10 °C	0 °C	5 °C	10 °C	20 °C	25 °C	30 °C	40 °C	45 °C
Bateria AGM	12 V	46%	66%	76%	83%	90%	98%	100%	103%	107%	109%

Corrente de Descarga x Tensão de Descarga

Tensão final de descarga (V/elemento)	1,75 V	1,70 V	1,60 V
Corrente de descarga (A)	(A) ≤ 0,2 C	0,2C < (A) ≤ 1,0 C	(A) ≥ 1,0 C