



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Suélen Bampi

**Estimativa em Tempo Real do Estado de Carga em Células de Íon de Lítio
Utilizando Filtro de Kalman Estendido**

Florianópolis

2023

Suélen Bampi

**Estimativa em Tempo Real do Estado de Carga em Células de Íon de Lítio
Utilizando Filtro de Kalman Estendido**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Gierry Waltrich, Dr.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pela autora,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Bampi, Suélen
Estimativa em Tempo Real do Estado de Carga em Células
de Íon de Lítio Utilizando Filtro de Kalman Estendido /
Suélen Bampi ; orientador, Gierry Waltrich, 2023.
196 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Células de Íon de Lítio. 3.
Filtro de Kalman Estendido. 4. Estado de Carga. 5. Carga
Eletrônica. I. Waltrich, Gierry. II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica. III. Título.

Suélen Bampi

Estimativa em Tempo Real do Estado de Carga de Baterias de Íon de Lítio Usando Filtro de Kalman Estendido

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Pesquisadora Maria de Fátima Negreli Campos Rosolem, MSc.

Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações – CPQD

Prof. Joabel Moia, Dr.

Instituto Federal Santa Catarina – IFSC

Prof. André Luís Kirsten, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em engenharia elétrica obtido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Prof. Telles Brunelli Lazzarin, Dr.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Gierry Waltrich, Dr.

Orientador

Florianópolis, 2023.

*Este trabalho é dedicado a todos que acreditam no poder
transformador da ciência.*

AGRADECIMENTOS

Expresso o meu mais profundo agradecimento a minha família, fonte de auxiliou e apoio incondicional, base para minha formação pessoal. Minha família foi o alicerce para que essa jornada tivesse êxito, juntamente com Marcos Schultz que em sua amizade ao longo de todo o mestrado me fortaleceram.

Agradeço imensamente ao professor Gierrí Waltrich, que não mediu esforços para orientar, auxiliar e acompanhar o trabalho desde o início com extrema dedicação e comprometimento. Foram muitas reuniões, conversas, conhecimentos transmitidos e trocados. Obrigado pelo privilégio de ser sua orientada.

Estendo meus agradecimentos aos professores do INEP, Roberto Francisco Coelho, André Luís Kirsten, Marcelo Lobo Heldwein, Telles Brunelli Lazzarin, Denizar Cruz Martins e Samir Ahmad Mussa, por todo conhecimento transmitido. Agradeço também ao técnico Dr. Antônio Luiz Schalata Pacheco e ao secretário Diogo Duarte Luiz pela assistência na realização desta dissertação.

Agradeço imensamente a pesquisadora Maria de Fátima Negreli Campos Rosolem e aos professores, André Luís Kirsten, Joabel Moia e Lenon Schmitz, pela disponibilidade e generosidade em aceitar o pedido de contribuir, incrementar e melhorar o presente trabalho com seus conhecimentos e experiências.

Ainda agradeço aos amigos e colegas de laboratório pela ajuda, esclarecimentos, parceria e momentos de descontração: Tailan Orlando, Mateus Nava Mezaroba, Valdecir Junior de Paris, Leonardo Acosta Rodrigues, Eduardo Francisco Celli Grabovski, Luiz Fernando Marquez Arruda, Mateus de Freitas Bueno, Douglas Mendes Sotoriva, Rossano Mendes Sotoriva, William Rafael da Silva, Thiago Fonseca Rech, Nicholas Gustavo Duarte Furtado, Leonardo Augusto Bender, Ion Leandro dos Santos, Esio Eloi dos Santos Filho e em especial aos três grandes amigos: Welenton Maito Panisson, Afonso Carlos Hinkel Júnior e Caio Hudson Rodrigues Cezar.

Por fim, agradeço ao CNPq pelo financiamento integral durante o desenvolvimento desta dissertação.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”.

Isaac Newton

RESUMO

Esta dissertação apresenta uma metodologia de estimativa do estado de carga (SoC) de células de baterias de íon de lítio em tempo real. O método utiliza como ferramentas um modelo de circuito elétrico equivalente de Thévenin, com dois pares RC e o filtro de Kalman estendido (EKF), para efetuar a estimativa em tempo real. A parametrização do modelo de circuito equivalente elétrico neste trabalho é obtida por uma carga eletrônica, comumente utilizada em ensaios para obter estes modelos equivalentes. Dois tipos de ensaios de descarga são utilizados neste trabalho, um do tipo contínuo e outro do tipo pulsado. Com a descarga contínua de corrente foi definida a capacidade nominal da célula de bateria, já com o ensaio pulsado de descarga foram determinados os parâmetros do circuito elétrico equivalente. Os parâmetros dinâmicos do circuito elétrico equivalente foram definidos com emprego do método numérico de Levenberg-Marquardt. A modelagem obtida através da análise numérica é inserida em um algoritmo de estimativa do SoC desenvolvido e executado em um microcontrolador. Por fim, tendo como objetivo corroborar a metodologia proposta, são apresentados os resultados de simulação e experimentais obtidos. Nos ensaios as especificações operacionais da carga eletrônica são limitadas a uma tensão de 4,2 V e uma corrente de 90 A. Os resultados de estimativa de SoC são obtidos para uma célula de óxido de titanato de lítio de 2,3 V com capacidade nominal de 40 Ah, com a temperatura controlada por uma câmara climática durante todo o processo.

Palavras-chave: Estado de Carga, Filtro de Kalman Estendido, Modelo de Circuito Elétrico Equivalente, Carga Eletrônica, Células de Íon de Lítio.

ABSTRACT

This dissertation presents a methodology for real-time estimation of the state of charge (SoC) of lithium-ion battery cells. The method employs tools such as a Thévenin equivalent electrical circuit model with two RC pairs and the Extended Kalman Filter (EKF) to perform real-time estimation. The parameterization of the equivalent electrical circuit model in this work is obtained using an electronic load commonly used in tests to obtain these equivalent models. Two types of discharge tests are employed in this work: continuous discharge and pulsed discharge. The nominal capacity of the battery cell is determined through continuous current discharge, while the parameters of the equivalent electrical circuit are determined through pulsed discharge testing. The dynamic parameters of the equivalent electrical circuit are defined using the Levenberg-Marquardt numerical method. The resulting modeling obtained through numerical analysis is incorporated into an SoC estimation algorithm developed and executed on a microcontroller. Finally, in order to validate the proposed methodology, simulation and experimental results are presented. The operational specifications of the electronic load in the tests are limited to a voltage of 4.2 V and a current of 90 A. The SoC estimation results are obtained for a 2.3 V lithium titanate oxide cell with a nominal capacity of 40 Ah, with temperature controlled by a climatic chamber throughout the process.

Keywords: State of Charge, Extended Kalman Filter, Equivalent Electric Circuit Model, Electronic Load, Lithium-Ion Battery Cells.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Histórico da evolução dos acumuladores eletroquímicos.	15
Figura 1.2 – Gráfico de Ragone com várias tecnologias de acumuladores eletroquímicos.	17
Figura 1.3 – Esquema simplificado da operação de uma célula de íon-lítio.	18
Figura 1.4 – Estrutura atômica do grafite e átomos de lítio.	19
Figura 1.5 – Estruturas cristalinas dos eletrodos positivos LCO – LMO – LFP.	21
Figura 1.6 – Características de desempenhos para diferentes tecnologias de células íon de lítio.	22
Figura 1.7 – Comportamento de uma bateria íon de lítio NCM em várias tensões e temperaturas.	24
Figura 1.8 – Ilustração do estado de carga de uma célula de bateria.	25
Figura 1.9 – Curvas de carga CC-CV para duas tecnologias de células de bateria.	27
Figura 1.10 – Comportamento da capacidade da célula em diferentes taxas de descarga.	28
Figura 1.11 – Comportamento da capacidade da célula para temperatura e taxas C de descarga diferentes.	29
Figura 2.1 – Diagrama de estimação de SoC por modelo de dados.	31
Figura 2.2 – Modelos de circuitos equivalentes.	32
Figura 2.3 – Modelo elétrico de circuito equivalente com dois pares RC completo.	33
Figura 2.4 – Modelo de circuito equivalente com dois pares RC: características químicas. ...	34
Figura 2.5 – Comportamento de histerese em células de bateria.	35
Figura 2.6 – Constantes de tempo de curto e longo prazo da resposta de degrau.	36
Figura 2.7 – Modelo elétrico de circuito equivalente com dois pares RC simplificado.	36
Figura 2.8 – Capacidade de descarga em função da tensão na célula para diferentes tecnologias de células de íon de lítio.	39
Figura 2.9 – Metodologia de obtenção da curva <i>VOC - SoC</i>	40
Figura 2.10 – Tipos de ensaios pulsados.	42
Figura 2.11 – Perfil de tensão (a) e corrente (b) de um pulso de descarga e modelo de circuito com um par RC simplificado (c).	43
Figura 2.12 – Ensaio pulsado de tensão (a) e corrente (b) e comportamento transitório representado por um conjunto de pontos (c).	44
Figura 2.13 – Gráfico de impedâncias obtidos por EIS.	46
Figura 2.14 – Ilustração método contagem de Coulomb.	47
Figura 2.15 – Ilustração método SoC por análise da tensão <i>Voc</i>	48

Figura 2.16 – Ilustração método SoC espectroscopia de impedância.	48
Figura 2.17 – Ilustração método SoC baseado em dados.	49
Figura 2.18 – Ilustração método SoC baseado em modelo.	49
Figura 2.19 – Algoritmo do filtro de Kalman.	50
Figura 2.20 – Função de densidade de probabilidade Normal/Gaussiana.	52
Figura 2.21 – Algoritmo do filtro de Kalman destaque do erro de covariância.	54
Figura 2.22 – Algoritmo do filtro de Kalman destaque da atualização dos estados.	56
Figura 2.23 – Algoritmo do filtro de Kalman destaque da matriz do ganho de Kalman.	57
Figura 2.24 – Algoritmo do filtro de Kalman destaque da atualização do erro de covariância.	61
Figura 2.25 – Carga resistiva conectada a bateria.	64
Figura 2.26 – Circuito dissipador de corrente ativo básico (a) e Característica tensão-corrente do transistor MOSFET (b).	65
Figura 2.27 – Circuito dissipador de corrente ativo com amplificador diferencial.	65
Figura 2.28 – Circuito carga ativa com medição de corrente.	66
Figura 2.29 – Topologias básicas de conversores CC-CC não isolados.	67
Figura 3.1 – Diagrama obtenção dos dados por carga eletrônica ativa para estimativa do SoC.	69
Figura 3.2 – Projeto esquemático da carga eletrônica ativa.	70
Figura 3.3 – Resistor cerâmico de detecção 5 W.	74
Figura 3.4 – Módulo ESP32.	76
Figura 3.5 – Ilustração do módulo ADS1115 (a), módulo mini <i>SDcard</i> (b) e módulo <i>display</i> Oled (c).	77
Figura 3.6 – Circuito de aquisição de tensão.	78
Figura 3.7 – Célula cilíndrica LTO-66160H-2.3V40Ah.	79
Figura 3.8 – Circuito de teste: modelo de circuito equivalente da célula.	81
Figura 3.9 – Perfil inserido na fonte de corrente linear particionada.	81
Figura 3.10 – Circuito de teste: implementação do filtro de Kalman estendido.	82
Figura 4.1 – Circuito carga eletrônica ativa simulado.	83
Figura 4.2 – Resultado simulado em alguns elementos da carga eletrônica ativa.	84
Figura 4.3 – Tensão <i>VGS</i> para 3 sinal de tensão de controle.	84
Figura 4.4 – Tensão <i>VGS</i> MOSFET módulo 1 com corrente de 5,502 A.	85
Figura 4.5 – Tensão <i>VGS</i> MOSFET módulo 1 com corrente de 9,95 A.	86

Figura 4.6 – Tensão <i>V_{GS}</i> MOSFET módulo 1 com corrente de 20,33 A.	86
Figura 4.7 – Placa de ensaios e testes.	87
Figura 4.8 – Relação de corrente obtida por instrumentação <i>versus</i> circuito de aquisição de corrente.	88
Figura 4.9 – Gráfico da tensão no circuito de tensão <i>versus</i> tensão instrumental (a) e Gráfico da corrente instrumental <i>versus</i> tensão de controle (b).	88
Figura 4.10 – Resposta de tensão do sensor ACS713LCTR-30A-T para aplicações de corrente.	90
Figura 4.11 – Comportamento tensão-corrente na célula obtido pelo circuito de ensaios e testes.	90
Figura 4.12 – Imagens termográficas da placa de ensaios e teste para corrente de descarga de ~20 A, ~40 A, ~60 A e ~80 A.	92
Figura 4.13 – Correntes experimentais em cada um dos 4 módulos.	93
Figura 4.14 – Bancada experimental de ensaios e testes.	93
Figura 4.15 – Carga da célula com 20 A em temperatura ambiente.	95
Figura 4.16 – Carga da célula com 5 A em temperatura ambiente.	95
Figura 4.17 – Diagrama do código de ensaios executado na placa de testes e ensaios.	96
Figura 4.18 – Correntes de descarga de ~40 A em temperaturas de -5°C, 5°C, 15°C, 25°C, 35°C e 45°C.	97
Figura 4.19 – Curvas de descarga de tensão na célula para ~40 A e temperaturas de -5°C, 5°C, 15°C, 25°C, 35°C e 45°C.	97
Figura 4.20 – Capacidade da célula em regime 1C para -5°C, 5°C, 15°C, 25°C, 35°C e 45°C.	98
Figura 4.21 – Comportamento dinâmico no período de repouso da célula LTO-66160H-2.3V40Ah.	99
Figura 4.22 – Descarga pulsada com 6 e 10 intervalos.	100
Figura 4.23 – Ensaio com 5 minutos de descarga, corrente de ~18 A e temperatura de 5°C.	100
Figura 4.24 – Ensaio com 5 minutos de descarga, corrente de ~18 A e temperatura de 15°C.	100
Figura 4.25 – Ensaio com 5 minutos de descarga, corrente de ~18 A e temperatura de 25°C.	101
Figura 4.26 – Ensaio com 5 minutos de descarga, corrente de ~18 A e temperatura de 35°C.	101

Figura 4.27 – Ensaio com 5 minutos de descarga, corrente de ~18 A e temperatura de 45°C.	101
Figura 4.28 – Pontos experimentais e equações V_{oc} obtidas numericamente.	102
Figura 4.29 – Comportamento dinâmico das equações numéricas de V_{oc} para temperaturas 5°C, 15°C, 25°C, 35°C e 45°C.	103
Figura 4.30 – Pontos associados aos pulsos de repouso 1 e 3 com aproximação numérica. .	104
Figura 4.31 – Parâmetros R_s , R_1 , C_1 , R_2 e C_2 para as temperaturas de 5°C, 15°C, 25°C, 35°C e 45°C.	105
Figura 4.32 – Comparação entre a tensão nos terminais da célula obtida no sensor do circuito e a estimada pelo método EKF.	106
Figura 4.33 – Erro relativo entre tensão circuito equivalente e tensão estimada via simulação.	107
Figura 4.34 – SoC de referência e estimado pelo método EKF.	107
Figura 4.35 – Erro relativo entre referência e estimado pelo método EKF.	107
Figura 4.36 – Diagrama do código implementado no módulo ESP32 para estimativa do SoC.	109
Figura 4.37 – Perfil de descarga da corrente na célula.	110
Figura 4.38 – Comparação entre a tensão nos terminais da célula obtida no sensor e a estimada pelo método EKF.	110
Figura 4.39 – Erro relativo entre tensão nos terminais da célula e a estimada pelo método EKF.	111
Figura 4.40 – Tensão estimada para V_2	112
Figura 4.41 – Tensão estimada para V_1	112
Figura 4.42 – SoC de referência e estimado pelo método EKF.	112
Figura 4.43 – Pontos capturados no <i>display</i> Oled na estimativa em tempo real do SoC pelo EKF.	113
Figura 4.44 – Perfil de carga/descarga atual da célula e voltagem da célula a uma temperatura de 30°C.	113
Figura 4.45 – Referência SoC (equação de Coulomb) e SoC estimado pelo método EKF (algoritmo com um SoC inicial de 65%).	114
Figura 4.46 – Referência SoC (equação de Coulomb) e SoC estimado pelo método EKF (algoritmo com um SoC inicial de 50%).	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Aplicações das baterias de íon de lítio.....	23
Tabela 3.1 – Definição de componentes carga eletrônica.	78
Tabela 3.2 – Especificações técnicas da célula LTO-66160H-2.3V40Ah.	80
Tabela 4.1 – Equações de ajustes dos circuitos da placa de ensaios e testes.....	89
Tabela 4.2 – Coeficientes das equações V_{oc} para diferentes temperaturas.	103
Tabela 4.3 – Tabela de parâmetros para temperatura de 25 °C.	104
Tabela 4.4 – Faixas de atuação das tabelas de dados por temperatura.	108
Tabela 5.1 – Tabela de parâmetros para temperatura de 5 °C.	134
Tabela 5.2 – Pontos retirados das acomodações de V_{oc} em 5 °C.	134
Tabela 5.3 – Tabela de parâmetros para temperatura de 15 °C.	136
Tabela 5.4 – Pontos retirados das acomodações de V_{oc} em 15 °C.	136
Tabela 5.5 – Pontos retirados das acomodações de V_{oc} em 25 °C.	138
Tabela 5.6 – Tabela de parâmetros para temperatura de 35 °C.	139
Tabela 5.7 – Pontos retirados das acomodações de V_{oc} em 35 °C.	140
Tabela 5.8 – Tabela de parâmetros para temperatura de 45 °C.	141
Tabela 5.9 – Pontos retirados das acomodações de V_{oc} em 45 °C.	142

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

VE	Veículo Elétrico
SoC	<i>State of Charge</i>
SI	Sistema Internacional
C	Taxa de descarga/carga
LTO	<i>Lithium Titanate Oxide</i>
LCO	<i>Lithium Cobalt Oxide</i>
NMC	<i>Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide</i>
NCA	<i>Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide</i>
LMO	<i>Lithium Manganese Oxide</i>
LFP	<i>Lithium Iron Phosphate</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
EC	<i>Ethylene Carbonate</i>
PC	<i>Propylene Carbonate</i>
DMC	<i>Dimethyl Carbonate</i>
EMC	<i>Ethyl Methyl Carbonate</i>
DEC	<i>Diethyl Carbonate</i>
EIS	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i>
SEI	<i>Solid Electrolyte Interface</i>
LUT	<i>Lookup Table</i>
EKF	<i>Extended Kalman Filter</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PTH	<i>Pin Through Hole</i>
MIPS	<i>Million Instructions Per Second</i>
ADC	<i>Analog Digital Converter</i>
DAC	<i>Digital Analog Converter</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

η	Eficiência de carga da célula ou eficiência coulômbica
Δt	Taxa de amostragem
t	Tempo contínuo
R_1	Resistência de polarização eletroquímica
C_1	Capacitância de polarização eletroquímica
R_2	Resistência de polarização de concentração
C_2	Capacitância de polarização de concentração
V_{OC}	Tensão de circuito aberto
SoC	Estado de carga
R_s	Resistência interna da célula de bateria
C_n	Capacidade da célula de bateria
R_0	Resistor de auto-descarga
V_{cell}	Tensão do terminal da célula de bateria
I_{cell}	Corrente de carga e descarga da célula de bateria
V_1	Tensão sobre o primeiro par RC
V_2	Tensão sobre o segundo par RC
I_{R1}	Corrente sobre resistência R_1
I_{C1}	Corrente sobre resistência C_1
τ	Variável de integração
a	Coefficiente de estados
b	Coefficiente de entradas
k	Tempo discreto
x_{k-1}	Vetor de estado
y_k	Vetor de observação
A_k	Matriz de transição de estado
B_k	Matriz de entradas
C_k	Matriz de observação
u_k	Vetor de entradas do sistema
ω_k	Vetor de ruído do sistema
ϑ_k	Vetor de ruído de observação

N	Normal
Q_k	Covariância do sistema
R_k	Covariância do sistema de observação
σ	Desvio padrão
var	Variância
E	Operador média
σ_{x1}	Desvio padrão do estado 1
σ_{x2}	Desvio padrão do estado 2
σ_{x3}	Desvio padrão do estado 3
$\hat{x}_{k k-1}$	Vetor de estado médio
z_k	Vetor de observação médio
P_k	Erro de covariância
e_k	Erro entre o sistema medido e a seu valor médio
T	Matriz transposta
Ψ_k	Correção proporcional
K_k	Ganho de Kalman
η_k	Erro entre o sistema medido e a sua média corrigida
I	Matriz identidade
cov	Covariância
T_r	Traço matriz
S_k	Termo auxiliar
$\xi_k^{\{x1\}}$	Variável aleatória gaussiana estado 1
$\xi_k^{\{x2\}}$	Variável aleatória gaussiana estado 2
$\xi_k^{\{x3\}}$	Variável aleatória gaussiana estado 3
I_1	Corrente circulante na malha 1
I_2	Corrente circulante na malha 2
C	Capacitância genérica
R	Resistência genérica
V^+	Tensão na entrada não inversora do amplificador
V^-	Tensão na entrada inversora do amplificador

V_{gs}	Tensão diferencial entre referências
V_{in}	Tensão de entrada do controle
V_s	Tensão sobre resistor de detecção
R_{sense}	Resistor de detecção
$V_{control}$	Tensão de entrada de controle da carga eletrônica
$V_{Rcurrent}$	Tensão sobre o segundo resistor do divisor resistivo
$V_{I(sensor)}$	Tensão medida para conversão em corrente da célula de bateria
$V_{V(sensor)}$	Tensão medida para conversão em tensão da célula de bateria
P_{carga}	Potência total na carga
I_{carga}	Corrente de carga
N	Número de circuitos de dissipação de corrente
P_{sense}	Potência dissipada nos resistores de detecção
P_{mosfet}	Potência dissipada no MOSFET
$R_{\theta JC}$	Resistência térmica da junção ao invólucro
$P_{D(max)}$	Dissipação máxima de potência
$P_{R_{sense}}$	Potência dissipada no resistor de detecção
$V_{GS(th)}$	Tensão limite do <i>gate</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	15
1.1	PROPOSTA DO TRABALHO E OBJETIVOS.....	30
1.1.1	Objetivos específicos do trabalho	30
1.2	JUSTIFICATIVA	30
2	ANÁLISE DE FERRAMENTAS E TÉCNICAS DE ESTIMAÇÃO DE SOC	31
2.1	MODELAGEM DE BATERIAS DE ÍON DE LÍTIO	31
2.1.1	Modelo elétrico de circuito equivalente Thévenin	33
2.1.1.1	<i>Obtenção da equação Voc</i>	38
2.1.1.2	<i>Parametrização do modelo de circuito equivalente.....</i>	41
2.2	MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE SOC	46
2.2.1	Contagem de Coulomb	46
2.2.2	Tensão de circuito aberto	47
2.2.3	Espectroscopia de impedância eletroquímica	48
2.2.4	Métodos baseados em dados	48
2.2.5	Métodos baseados em modelos	49
2.2.5.1	<i>Filtro de Kalman Estendido</i>	50
2.3	CARGA ELETRÔNICA	63
2.3.1	Carga Resistiva.....	64
2.3.2	Carga ativa	64
2.3.3	Conversores CC-CC	67
2.4	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	67
3	PROJETOS DOS SISTEMAS DE ENSAIOS E TESTES	69
3.1	PROJETO DO CIRCUITO DA CARGA ELETRÔNICA ATIVA	70
3.1.1	MOSFET de potência	71
3.1.2	Resistor de detecção	73

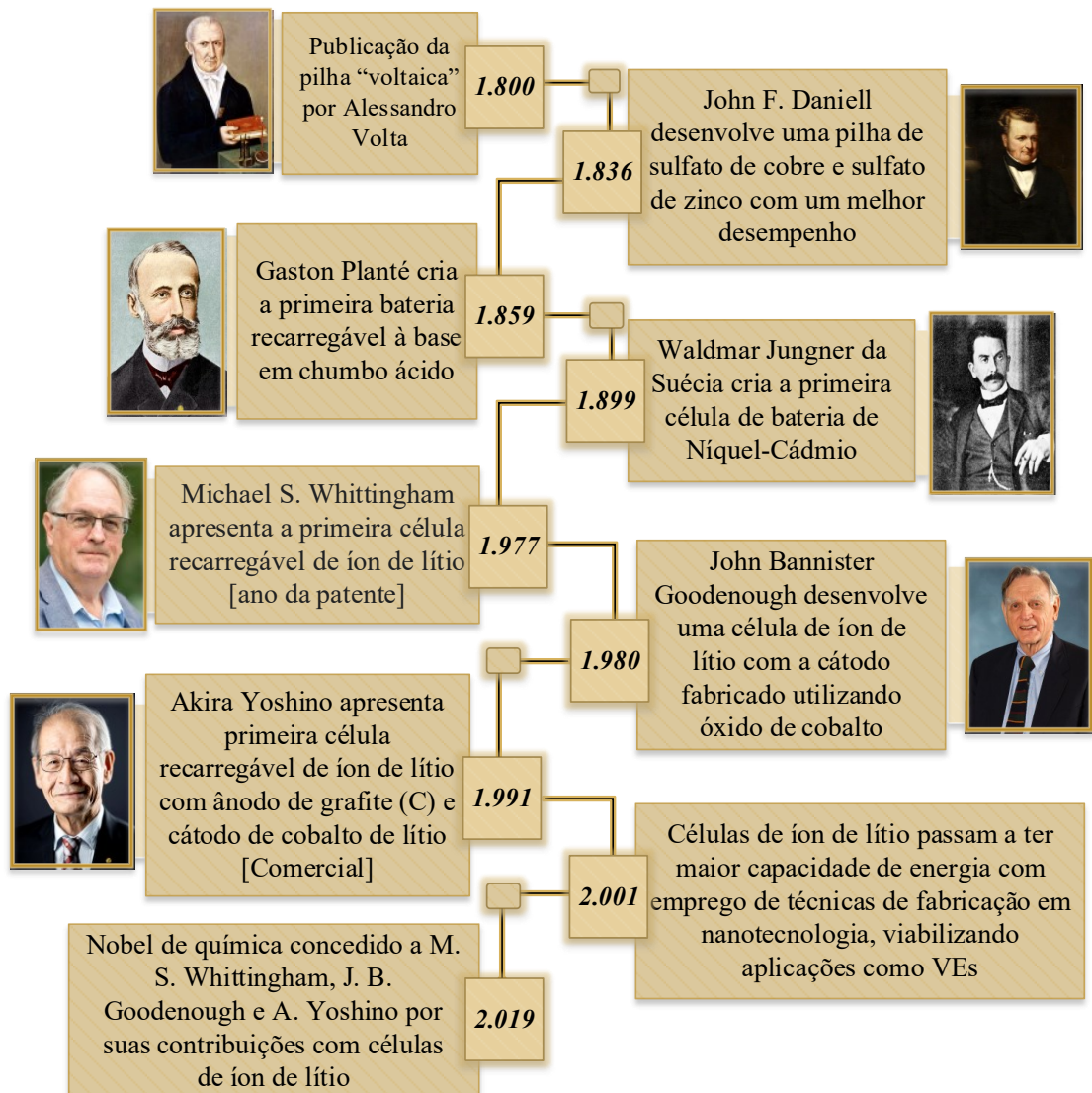
3.1.3	Amplificador operacional.....	74
3.1.4	Dispositivo de gerenciamento.....	76
3.2	ESPECIFICAÇÃO DA CÉLULA DE ÍON DE LÍTIO E DOS ENSAIOS	79
3.3	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CIRCUITO EQUIVALENTE.....	80
3.4	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	82
4	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAIS	83
4.1	PLACA DE ENSAIOS E TESTES	83
4.2	MODELO DE CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE.....	94
4.3	ESTIMATIVA DO SOC	106
4.3.1	Resultados de simulação para estimativa do SoC	106
4.3.2	Resultados experimentais para estimativa do SoC	110
5	CONCLUSÃO	115
	REFERÊNCIAS	117
	APÊNDICE A – DEDUÇÕES MATEMÁTICAS E ANÁLISE DE CIRCUITOS	122
	APÊNDICE B – DADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	134
	APÊNDICE C – ESQUEMÁTICO ELÉTRICO CARGA ELETRÔNICA.....	144
	APÊNDICE D – CÓDIGOS IMPLEMENTADOS.....	148

1 INTRODUÇÃO GERAL

Células de baterias convertem energia química em energia elétrica. As células consistem em eletrodos positivos e negativos e em um eletrólito. É a reação química entre os eletrodos e o eletrólito que gera eletricidade CC. No caso de baterias secundárias ou recarregáveis, a reação química pode ser revertida ao inverter a corrente e a bateria pode ser recarregada (LARMINIE; LOWRY, 2012).

A jornada de evolução dos acumuladores eletroquímicos iniciada com as primeiras pilhas desenvolvidas por Alessandro Volta em 1.800 até as atuais tecnologias a base de lítio são apresentadas na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Histórico da evolução dos acumuladores eletroquímicos.



Fonte: Adaptado de Dresch (2010) e Zorzetto (2018).

É notável a evolução nas últimas três décadas das tecnologias que englobam as baterias de íon de lítio e seu número cada vez maior de aplicações. As células de íon de lítio possuem uma ampla diversidade de formas e tamanhos, e com significativas variações nas suas características elétricas e de desempenho (VIGERSTOL, 2017).

Os motivos para o crescente número de aplicações das baterias de lítio se dão pelas características de menor impacto ambiental, serem mais leves e compactas, possuírem elevada densidade de energia, menor taxa de manutenção, maior número de ciclos de carga e descarga, menor taxa de auto descarga (1% - 2% por mês), menor tempo para ser recarregada e tensão de circuito aberto mais elevada.

Então mesmo apresentando desvantagens como sensibilidade a altas temperaturas, custo elevado, risco de instabilidade térmica e elevado custo de reciclagem, a tecnologia de lítio ocupa cada vez mais espaços com relação a baterias de chumbo-ácido (Pb-Acid), níquel-ferro (NiFe), níquel-cádmio (NiCd), níquel-hidreto metálico (NiMH) e sódio-enxofre (NaS) (CANTANE; ANDO JUNIOR; HAMERSCHMIDT, 2020).

Algo importante de compreender na área de baterias são alguns termos utilizados. O termo célula de bateria, se refere às unidades eletroquímicas individuais que fornecem uma tensão característica que depende da combinação dos compostos e elementos químicos escolhidos na fabricação. Enquanto o termo bateria se refere a um grupo de células conectadas eletricamente (PLETT, 2015).

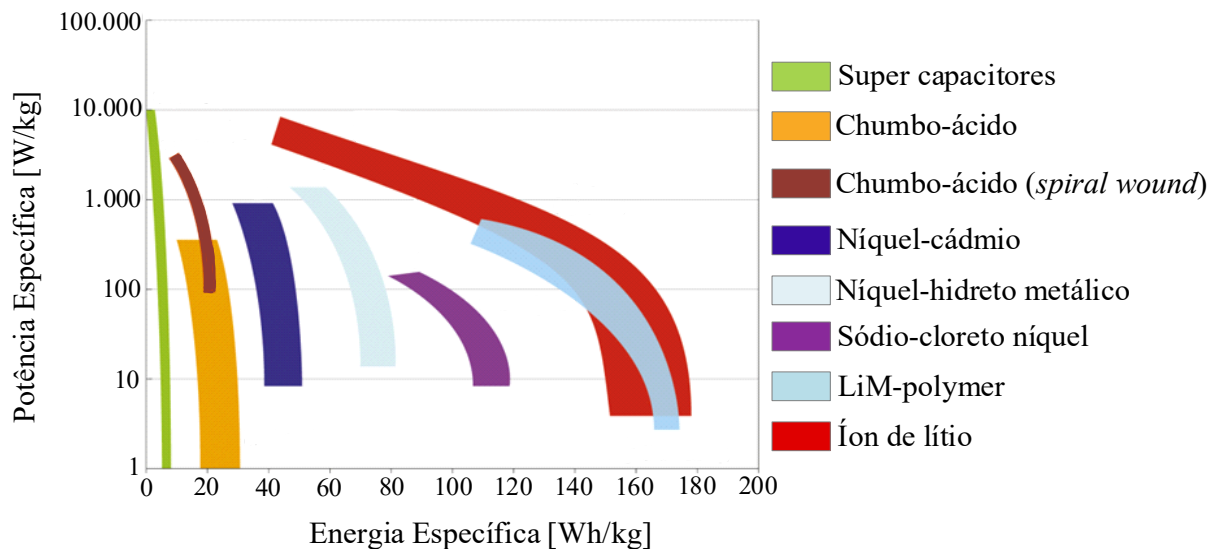
Uma célula pela norma NBR 16975 é descrita como um elemento constituído de dois grupos de placas de polaridades opostas, isolados entre si por meio de separadores e/ou distanciadores, imersos no eletrólito dentro do vaso que os contém. Célula de lítio secundária: nela a energia elétrica é derivada de reações de inserção/extração de íons de lítio ou reações de oxidação/redução de lítio entre eletrodo negativo e eletrodo positivo (ABNT, 2021).

Outras duas designações importante associadas às células são, a energia específica e a densidade de energia. A energia específica infere a quantidade máxima de energia armazenada por unidade de peso, enquanto a densidade de energia infere a quantidade máxima de energia armazenada por unidade de volume. Em geral, densidades de energia e energias específicas mais elevadas são obtidas usando elementos químicos mais reativos. A desvantagem é que produtos químicos mais reativos tendem a ser menos estáveis e podem exigir precauções especiais de segurança.

Células de diferentes fabricantes com químicas de células similares e construções similares podem apresentar desempenho diferente. A construção da célula também é

importante, uma vez que o excesso de material de embalagem diminui as densidades de energia. Na Figura 1.2 é apresentado o gráfico de Ragone, que apresenta a energia específica de várias tecnologias de acumuladores eletroquímicos em função da potência específica (VIGERSTOL, 2017).

Figura 1.2 – Gráfico de Ragone com várias tecnologias de acumuladores eletroquímicos.



Fonte: Adaptado de Lemon e Miller (2013).

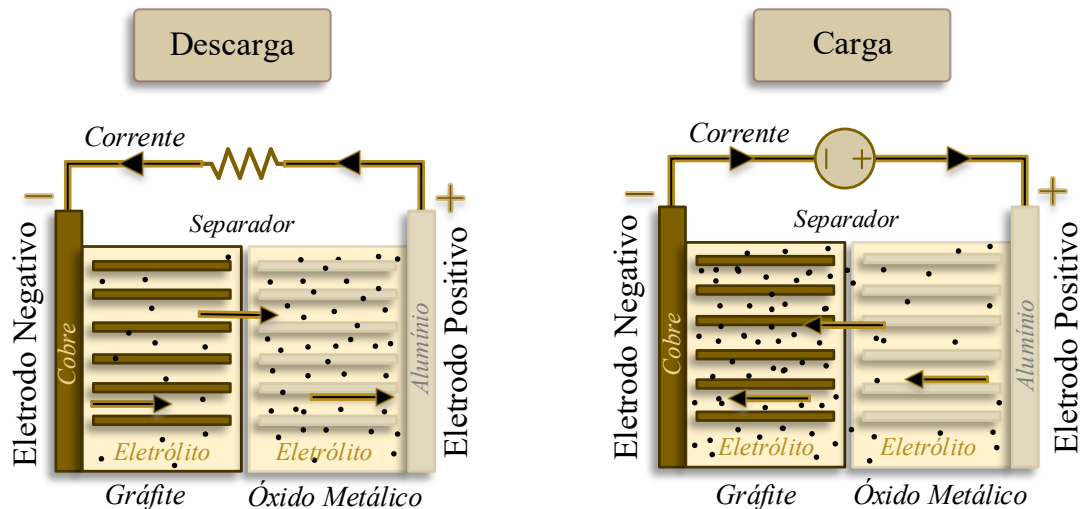
As células de íon de lítio são compostas por vários componentes principais. Estes incluem um eletrodo negativo, um eletrodo positivo, o eletrólito e um separador. As células de íon de lítio funcionam de maneira diferente das células eletroquímicas, que operam por reações de redução-oxidação, situação onde mudam quimicamente as espécies reagentes nas superfícies dos eletrodos.

O lítio na forma iônica, por si só, não reage com os materiais do eletrodo. Sendo os íons de lítio absorvido do eletrólito e inserido na estrutura cristalina do material do eletrodo, ou ainda, sendo expelido do material do eletrodo para o eletrólito, dependendo da direção do fluxo de corrente. Este tipo de reação é denominado de intercalação, onde os íons de lítio sofrem processos de inserção e desorção dos materiais anódicos e catódicos.

Um esquema simplificado da operação de uma célula de íon de lítio é apresentado na Figura 1.3, onde os eletrodos negativo e positivo são representados por materiais com estruturas cristalinas no formato de camadas (barras horizontais). O íon de lítio, representado como pequenas esferas, pode ser adicionado ou removido dos espaços entre as camadas.

Dentro dos eletrodos, o lítio iônico é armazenado como átomos independentes de carga neutra. O elétron de valência de cada átomo de lítio é compartilhado muito fracamente com átomos vizinhos na estrutura cristalina. Portanto, o lítio não está fortemente ligado a uma estrutura química definida, possuindo na realidade alta mobilidade no meio. O íon de lítio pode entrar e sair da superfície dos eletrodos, de forma a difundir-se dentro da estrutura cristalina aberta e estratificada para equalizar a sua concentração nos espaços vazios dos eletrodos.

Figura 1.3 – Esquema simplificado da operação de uma célula de íon-lítio.



Fonte: Adaptado de Plett (2015).

Durante a descarga, átomos de lítio na superfície do eletrodo negativo perdem elétrons, que são transportados pelo circuito externo, e se tornam íons de lítio positivos, Li^+ , que saem da estrutura cristalina do eletrodo e se dissolvem no eletrólito. Pode-se escrever,



Por outro lado, íons de lítio próximos à superfície do eletrodo positivo recebem elétrons do circuito externo, e os átomos de lítio resultantes, com carga neutra, entram na estrutura cristalina do eletrodo. Pode-se escrever,

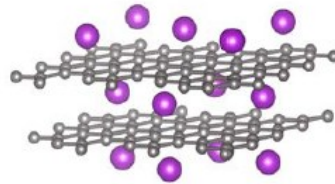


O processo é completamente reversível. Assim, os íons de lítio migram de um eletrodo para o outro durante o processo de carga e a descarga. O mecanismo de intercalação é muito mais suave do que uma reação eletroquímica, portanto, as células de íon de lítio têm uma vida útil muito mais longa do que outros tipos de baterias recarregáveis.

A seguir é descrito os materiais comumente utilizados como eletrodos, eletrólitos e separadores em células de íon de lítio.

Eletrodo negativo: Atualmente, a grande maioria das células comerciais de íon de lítio utiliza algum tipo de grafite (C_6). O grafite é composto por múltiplas camadas de grafeno, nas quais estruturas hexagonais de C_6 estão fortemente ligadas entre si. As camadas de grafeno são empilhadas soltas umas sobre as outras, mantidas juntas apenas por forças de *Van der Waals* fracas; o íon de lítio intercala entre essas camadas, conforme Figura 1.4, onde as esferas roxas representam os átomos de lítio.

Figura 1.4 – Estrutura atômica do grafite e átomos de lítio.



Fonte: Plett (2015).

Também utilizado como eletrodo negativo tem-se o titanato de lítio ($Li_4Ti_5O_{12}$, conhecido como óxido de titanato de lítio ou LTO – *Lithium Titanate Oxide*), que permite uma recarga muito mais rápida, sem ocorrência de reações secundárias indesejáveis, em comparação com o grafite. A supressão das reações secundárias também resulta em um incremento na vida útil das células, para dezenas de milhares de ciclos de carga/descarga. No entanto, o uso de LTO também resulta em uma redução de cerca de 1,4 V na tensão da célula em relação a uma célula equivalente com um eletrodo negativo de grafite, o que leva a uma menor densidade de energia.

Eletrodo positivo: existe uma variedade muito maior de materiais utilizados como eletrodos positivos para células de íon de lítio, em relação aos materiais usados nos eletrodos negativos. Geralmente este material é composto por óxidos metálicos de lítio.

A primeira bateria recarregável de íon de lítio utilizou o óxido de cobalto de lítio (Li_xCoO_2 , também conhecido como LCO – *Lithium Cobalt Oxide*). A Figura 1.5(a) ilustra a estrutura LCO, onde as esferas azuis representam átomos de cobalto, as esferas vermelhas representam átomos de oxigênio e as esferas roxas representam átomos de lítio. Nesse material os átomos de lítio no LCO atuam como pilares na estrutura, mantendo as camadas de óxido de cobalto separadas. Se muito lítio for removido, então a estrutura cristalina colapsa e o lítio não

pode mais entrar por entre as camadas. Para evitar esse colapso, apenas cerca da metade da capacidade teórica é utilizável.

O LCO é comumente usado em células de íon de lítio para equipamentos eletrônicos portáteis, pois enfrenta alguns problemas quando dimensionado para células maiores, como aplicações veiculares. O principal empecilho diz respeito ao próprio elemento base, já que o cobalto é um metal raro, tóxico e caro, além de ser mais propenso a avalanche térmica (risco de explosão, fogo) que os demais materiais usados no eletrodo positivo.

O níquel pode ser utilizado para substituir o cobalto, resultando em maior densidade de energia (maior tensão com mesma capacidade), porém a célula resultante não é muito estável termicamente (tende a incendiar). O alumínio e o manganês também podem ser utilizados, resultando em propriedades um pouco diferentes. Frequentemente, é utilizada uma combinação de metais de transição. Por exemplo, um eletrodo de óxido de lítio níquel manganês cobalto (NMC – *lithium Nickel Manganese Cobalt oxide*), que mantém a estrutura estratificada e possui propriedades dos três metais constituintes ou uma combinação no eletrodo de níquel, cobalto e alumínio (NCA – *lithium Nickel Cobalt Aluminum oxide*).

Outra opção é o óxido de manganês de lítio ($\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$, ou LMO – *Lithium Manganese Oxide*), como um composto de intercalação alternativo. O óxido de manganês forma cristais octaédricos, como ilustrado na Figura 1.5(b), onde o manganês é representado como esferas azuis, o oxigênio como esferas vermelhas e o lítio como esferas roxas. Esta estrutura é conhecida como *Spinel*.

Uma característica pertinente dessa estrutura é que ela é vazada, permitindo o movimento dos íons de lítio de frente para trás, da esquerda para a direita e de cima para baixo. Esses graus de liberdade facilitam a movimentação dos íons de lítio dentro da estrutura, diminuindo a resistência da célula. O LMO se apresenta como um bom substituto dado que é mais barato e seguro do que o LCO, dispondo de densidades de armazenamento de energia muito semelhantes a este. No entanto a bateria com este eletrodo apresenta uma vida cíclica baixa em relação ao NMC ou NCA.

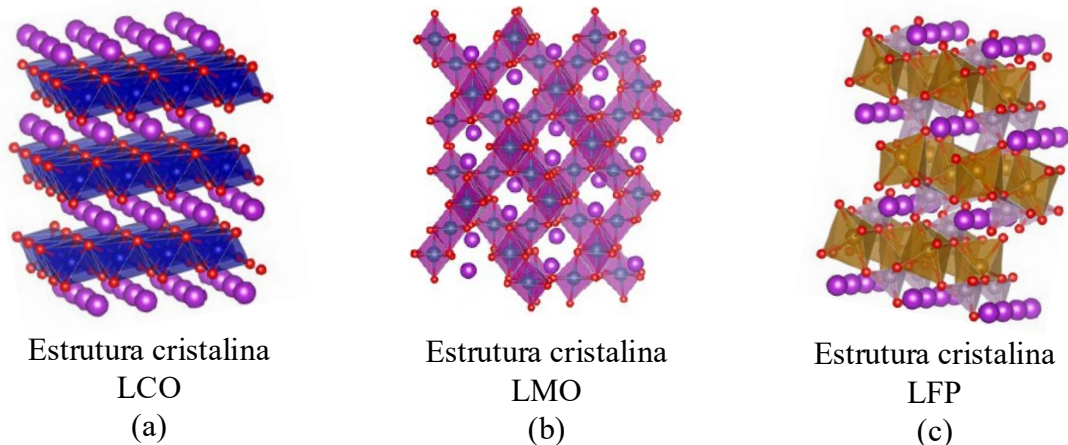
Um último material comum para eletrodos positivos é o ferro fosfato de lítio (Li_xFePO_4 , ou LFP – *lithium iron phosphate*). Na ilustração da estrutura cristalina da Figura 1.5(c), conhecida como Olivina, o ferro é representado por esferas marrons, o fósforo por esferas cinzas, o oxigênio por esferas vermelhas e o lítio por esferas roxas. Nesse material o lítio só pode se mover em espaços lineares unidimensionais, o que torna esse material bastante

resistivo. Para compensar essa alta resistência, o tamanho das partículas do eletrodo é geralmente muito pequeno, minimizando o comprimento de difusão.

O LFP é bastante popular devido ao baixo custo do material, baixa toxicidade e perfil de tensão muito estável. Porém, produz uma tensão celular mais baixa, cerca de 0,5 V menor do que outros materiais comuns de eletrodos positivos, e, portanto, também possui uma densidade de energia mais reduzida. A quantidade de lítio em massa no LFP também é menor, resultando em energias específicas mais baixas. Uma característica marcante da bateria LFP é sua elevada vida cíclica e também a menor predisposição a avalanche térmica.

Na Figura 1.6 é apresentado um compilado das principais características de desempenhos de diferentes tecnologias de eletrodo de células íon de lítio, como densidade de energia, potência específica, vida útil, segurança, performance e custo.

Figura 1.5 – Estruturas cristalinas dos eletrodos positivos LCO – LMO – LFP.

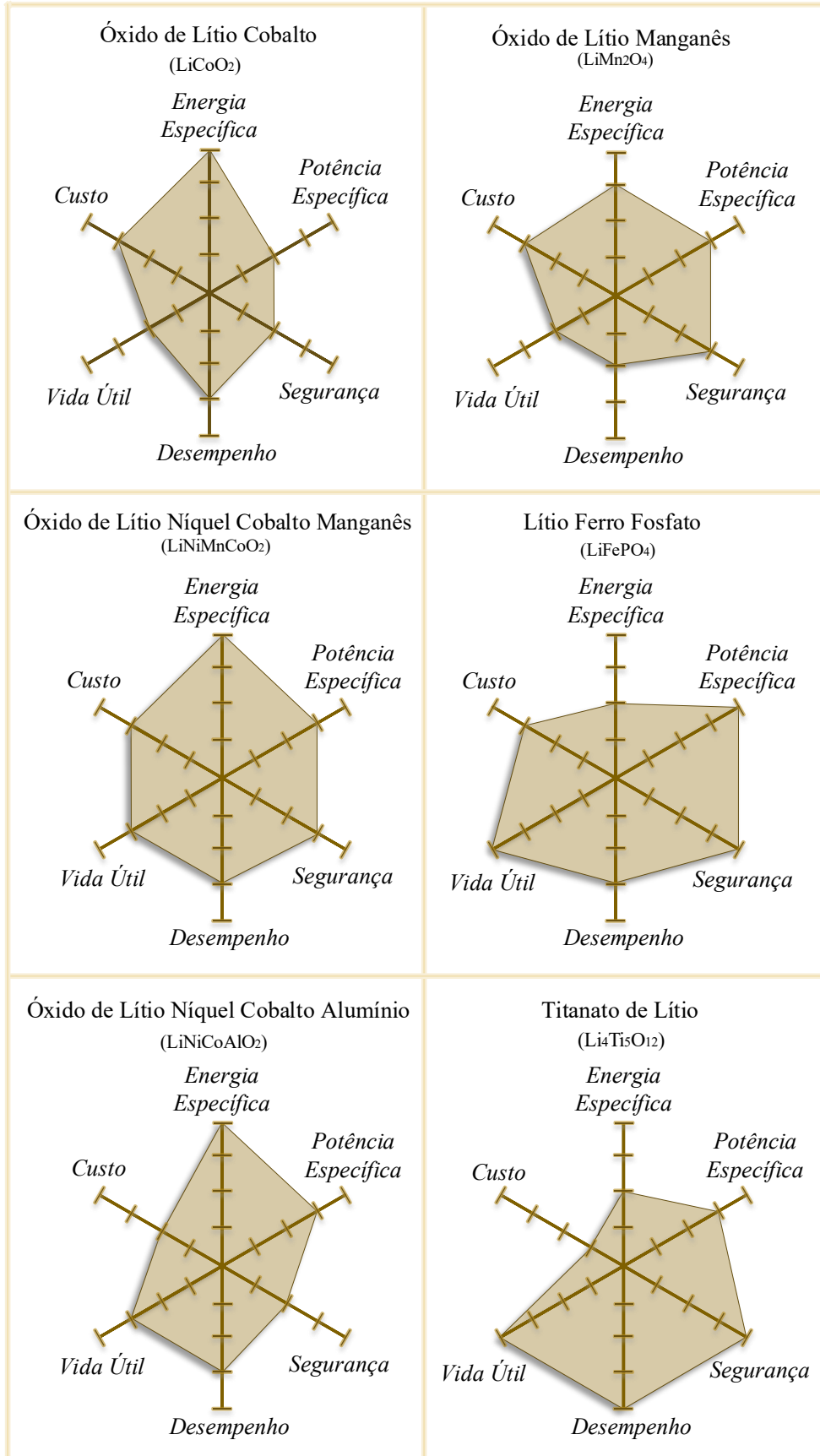


Fonte: Plett (2015).

Separador: em uma célula de íon de lítio é uma membrana permeável com orifícios grandes o suficiente para permitir a passagem dos íons de lítio sem impedimentos, mas pequenos o suficiente para que as partículas do eletrodo negativo e positivo não entrem em contato através dos orifícios, o que causaria um curto-circuito na célula, logo, ele também é um isolante elétrico.

Eletrólito: é o meio que conduz os íons entre os eletrodos. Ele é constituído por um sal, um ácido ou uma base dissolvidos em um solvente. Como o lítio reage violentamente com a água, o eletrólito em uma célula de íon de lítio é composto por solventes orgânicos não aquosos, além de um sal de lítio, e atua puramente como um meio condutor iônico, não participando da reação química. O sal mais comumente utilizado é o hexafluorofosfato de lítio

Figura 1.6 – Características de desempenhos para diferentes tecnologias de células íon de lítio.



Fonte: Adaptado de Battery University (2021a).

(LiPF₆), que se dissocia no solvente em Li⁺ e PF₆⁻. Outras opções de sais incluem LiBF₄ e LiClO₄. Os solventes comuns incluem *ethylene carbonate* (EC), *propylene carbonate* (PC), *dimethyl carbonate* (DMC), *ethyl methyl carbonate* (EMC) e *diethyl carbonate* (DEC) (PLETT, 2015).

Os solventes orgânicos decompõem-se facilmente nos eletrodos negativos durante a carga. Quando solventes orgânicos apropriados são usados como eletrólito, o solvente se decompõe na recarga inicial e forma uma camada sólida chamada de interface de eletrólito sólido entre o eletrodo negativo e o eletrólito (SEI – *Solid Electrolyte Interface*), que é eletricamente isolante e ainda fornece uma significativa condutividade iônica. Essa interface previne a decomposição posterior do eletrólito, já a partir da segunda carga. Um exemplo é o carbonato de etileno, que é decomposto quando exposto a uma tensão relativamente alta, 0,7 V em relação ao lítio, e forma uma interface densa e estável (VICENTE, 2018).

Dadas as características físico químicas das células de íon de lítio, há uma ampla aplicabilidade no mercado. Na Tabela 1.1 são apresentadas as principais utilidades dessas baterias, associadas as suas respectivas tecnologias de eletrodo.

Tabela 1.1 – Aplicações das baterias de íon de lítio.

Tecnologia	Aplicações
<i>LFP</i>	Ferramentas portáteis - Veículos elétricos (ônibus, veículos de carga) - UPS - Armazenamento de energia de grande porte
<i>NMC</i>	Armazenamento de energia - Ferramentas portáteis - Veículos elétricos
<i>LCO</i>	<i>Notebooks</i> - Câmeras digitais - <i>Smartphones</i>
<i>LMO</i>	Ferramentas portáteis - UPS - Dispositivos médicos
<i>NCA</i>	Sistemas de armazenamento - Dispositivos médicos - Veículos elétricos
<i>LTO</i>	UPS - Veículos elétricos - Iluminação pública solar

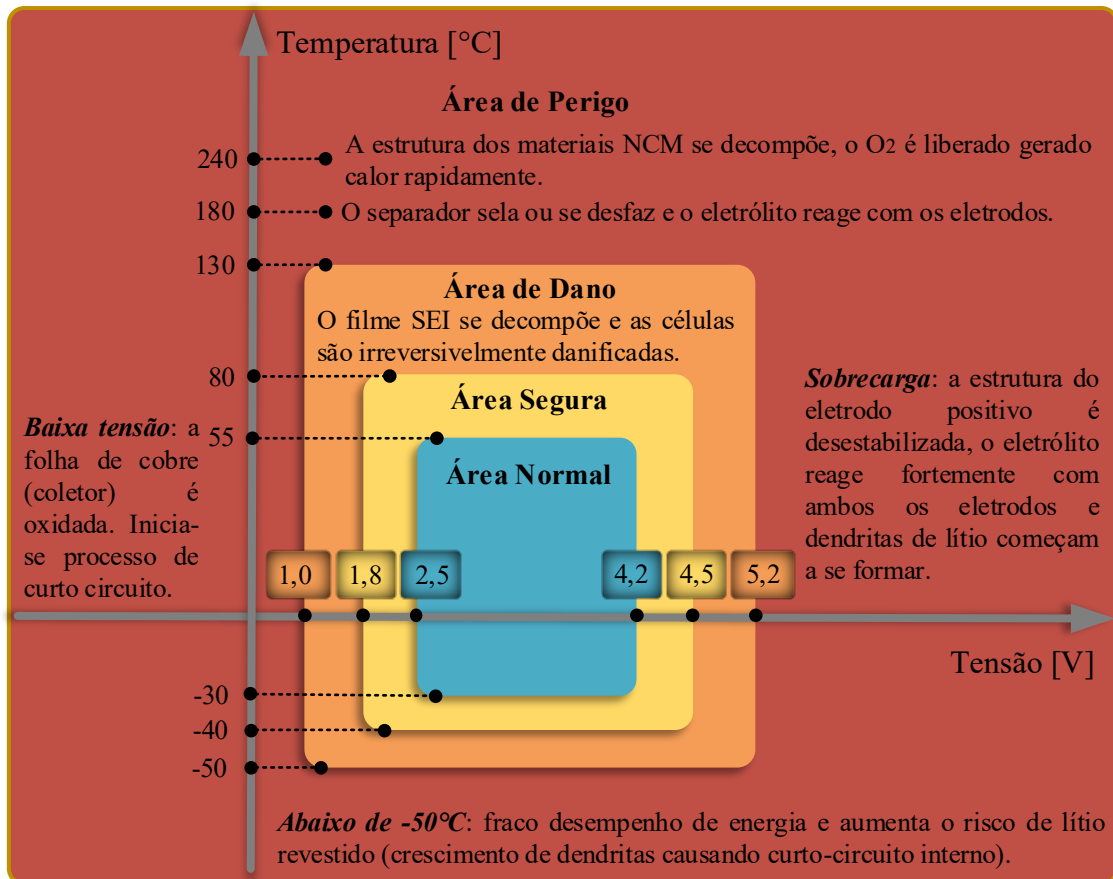
Fonte: Adaptado de Battery University (2021b).

Em todas essas aplicações se torna fundamental ter o gerenciamento ideal de energia para o funcionamento adequado das baterias. Um controle de temperatura, dado que temperaturas elevadas podem levar as células a avalanche térmica, de sobrecorrente e nos níveis de tensão das células são essenciais para qualquer emprego das baterias. No caso do nível de tensão, valores fora da faixa de operação podem causar descargas profundas ou sobrecargas, condições prejudiciais a vida útil das células que criam situações potencialmente perigosas.

Na Figura 1.7 é possível observar as diferentes classificações de áreas com relação aos valores de temperatura e tensão para uma bateria íon de lítio NCM e constatar a importância do

gerenciamento adequado das condições das células e dos muitos efeitos colaterais indesejados que surgirão sem tal controle.

Figura 1.7 – Comportamento de uma bateria íon de lítio NCM em várias tensões e temperaturas.



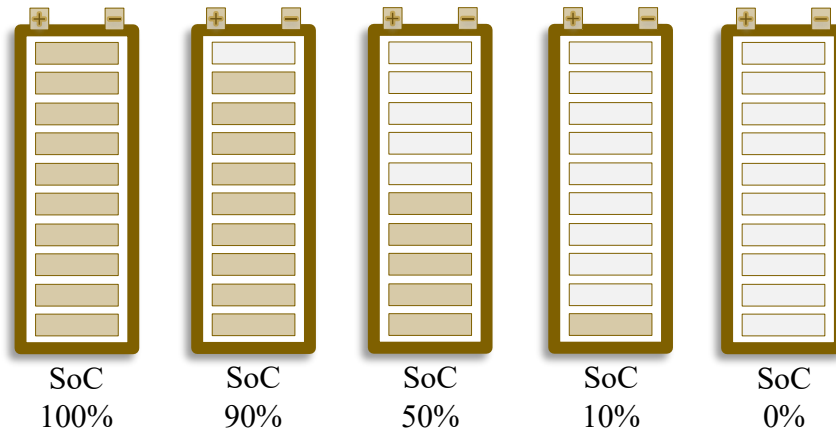
Fonte: Adaptado de Duan *et al.* (2020).

Em veículos elétricos (VEs), além das condições operacionais implícitas aos níveis tensão é preciso definir os valores de energia instantânea associados a cada célula, uma vez que isso representa a autonomia do veículo. O nível de energia instantânea está associado ao conceito de estado de carga ou estado de descarga (PILLER; PERRIN; JOSSEN, 2001).

Estado de carga do inglês “*state of charge*” (SoC) é definido como a capacidade de carga restante da célula em comparação com a capacidade de carga nominal da célula (PATTIPATI, 2011). O SoC é uma grandeza estimada indiretamente a partir de medição instrumental das grandezas da célula de bateria, como: tensão, corrente e temperatura (AYMAN, 2007).

O estado de carga é uma quantidade adimensional. Define-se o SoC de uma célula como 100% (ou 1,0) quando a célula está completamente carregada e 0% (ou 0,0) quando a célula está completamente descarregada, conforme ilustração na Figura 1.8.

Figura 1.8 – Ilustração do estado de carga de uma célula de bateria.



Fonte: Adaptado de Plett (2015).

A capacidade de carga total é representada nesse trabalho pelo símbolo C_n . O valor da capacidade total é um parâmetro do modelo da célula; ou seja, é uma constante que pode variar de célula para célula. A capacidade total tende a diminuir gradualmente à medida que a célula envelhece, devido a reações de degradação indesejadas e deterioração estrutural dos materiais dos eletrodos da célula.

As mudanças no estado de carga podem ser modeladas usando uma equação diferencial ordinária da seguinte forma,

$$\frac{dSoC(t)}{dt} = -\frac{\eta(t)I_{cell}(t)}{C_n}, \quad (1.3)$$

onde o sinal de $I_{cell}(t)$ é por convenção definido negativo na carga. Portanto, uma corrente positiva diminui o estado de carga da célula (descarga), e uma corrente negativa aumenta o estado de carga da célula (carga). Deve-se ter cuidado com as unidades: $I_{cell}(t)$ é medida em ampères, e para ser compatível, C_n deve ser convertido para ampère-segundos (ou seja, coulombs). Tanto $SoC(t)$ quanto $\eta(t)$ são adimensionais (PLETT, 2015).

O termo $\eta(t)$ descreve a eficiência de carga da célula ou eficiência coulômbica. Criar um modelo preciso da eficiência de carga da célula é uma tarefa muito desafiadora, pois seu valor depende do SoC, taxa de carga (C), temperatura e do estado eletroquímico interno da célula. No entanto, devido às altas eficiências coulômbicas das células de íon de lítio, a

suposição de que η é igual a 1, frequentemente proporciona uma fidelidade geral razoável ao modelo. Nesse trabalho sua ação é definida como igual a 1.

Integrando a relação instantânea (1.3), é possível obter uma equação agregada para uma mudança no SoC ao longo de um determinado intervalo de tempo, equação (1.4). Com SoC conhecido no tempo inicial $t_0 < t$ e a corrente conhecida entre os tempos t_0 e t .

$$SoC(t) = SoC(t_0) - \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t I_{cell}(t) dt \quad (1.4)$$

Dada a aplicabilidade em microcontroladores, é útil a representação do modelo em tempo discreto. Modelos de tempo discreto pressupõem que as entradas e saídas da célula sejam medidas ou amostradas em uma taxa regular com período de Δt segundos. Para converter a expressão (1.4) para o tempo discreto, é definido $t_0 = k\Delta t$ (período anterior) e $t = (k + 1)\Delta t$ (período atual). Assumindo que a corrente de entrada da célula é constante ao longo do intervalo de amostragem Δt , é obtido a relação (1.5) resolvendo a integral para as definições de tempo discreto.

$$SoC((k + 1)\Delta t) = SoC(k\Delta t) - \frac{\Delta t}{C_n} I_{cell}(k\Delta t). \quad (1.5)$$

Como medida de simplificação será definida uma nova notação para descrever o tempo discreto. Colchetes, "[]", serão usados para denotar um número de amostra de tempo discreto e parênteses, "()", serão usados para denotar um tempo real. Então, por exemplo, "[k]" é equivalente a "(kΔt)". Reescrevendo a igualdade (1.5) usando a notação especificada chega-se à relação (1.6).

$$SoC[k + 1] = SoC[k] - \frac{\Delta t}{C_n} I_{cell}[k]. \quad (1.6)$$

Analisando a capacidade nominal C_n presente nas equações acima com mais acurácia. Todos os fabricantes informam o valor da capacidade nominal da célula de bateria que estão colocando no mercado, pois ela determina a quantidade elétrica que uma célula pode disponibilizar para uma determinada carga. Comumente expressa em ampère-hora (Ah), a unidade de carga no Sistema Internacional (SI) é o coulomb (C), a relação entre as unidades encontra-se na Equação (1.7).

$$1 Ah = 3.600 C \quad (1.7)$$

A definição atual da capacidade nominal pode ser obtida experimentalmente, considerando a própria definição da equação (1.4). Por exemplo, com a célula de bateria completamente carregada (o mesmo é aplicável considerando o processo de carga) e efetuando

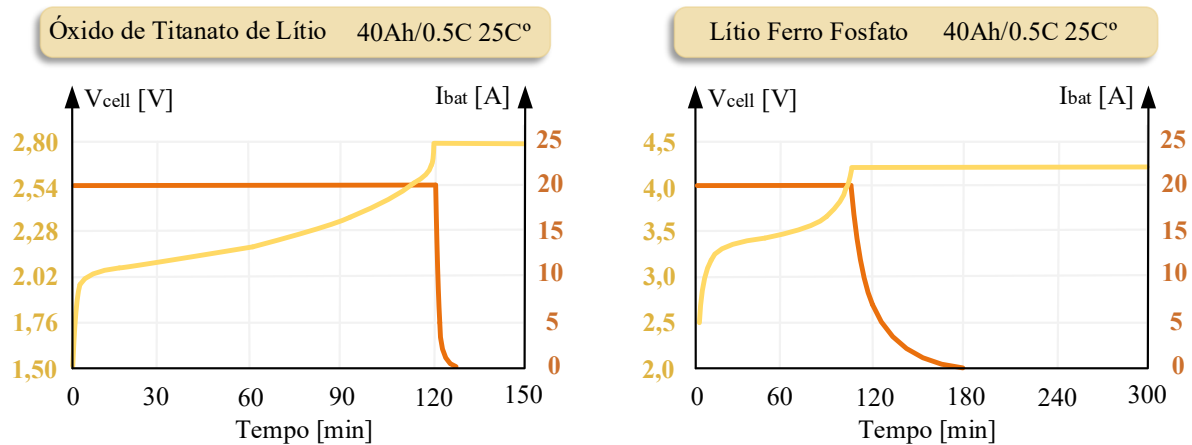
a descarga completa, a relação da contagem de Coulomb assumiria a igualdade da equação (1.8). Logo, integrando a corrente no tempo total do ensaio é obtida a capacidade nominal efetiva de uma célula ou bateria, conforme equação (1.9) (PLETT, 2015).

$$0 = 1 - \frac{1}{C_n} \int_0^t I_{cell} dt \quad (1.8)$$

$$C_n = \int_0^t I_{cell} dt \quad (1.9)$$

Para a equação (1.8) ser válida é fundamental que a célula esteja completamente carregada. Para a etapa de carga, curvas de carga como as apresentadas na Figura 1.9, precisam ser respeitadas. Tais curvas de carga são denominadas curvas CC-CV (do inglês “*Constant Current - Constant Voltage*”), isso porque, a corrente é mantida em controle constante até atingir a tensão de carga e posterior a isso, a tensão passa a ser constante até a corrente zerar (controle de tensão). Cada tecnologia de célula irá apresentar uma curva de carga CC-CV característica.

Figura 1.9 – Curvas de carga CC-CV para duas tecnologias de células de bateria.



Fonte: Adaptado de Thunder-Sky (2007) e Yinlong (2016).

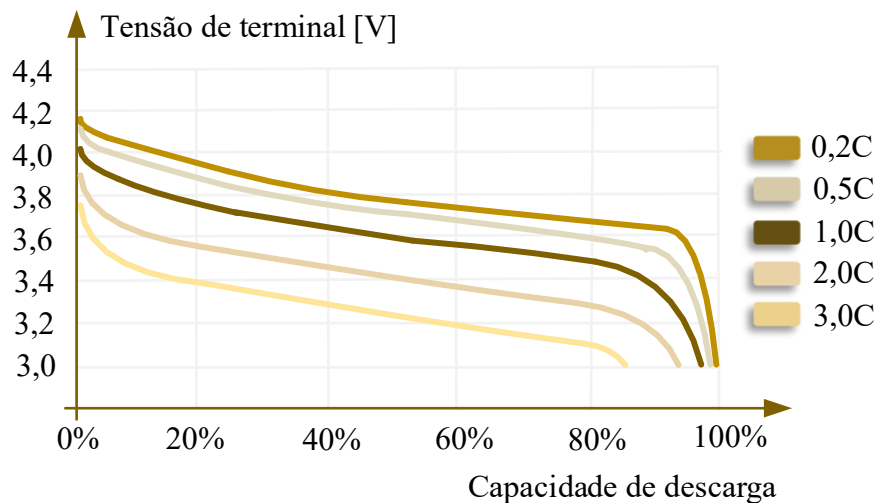
O conceito de capacidade de carga de uma célula fica mais claro supondo uma célula com uma capacidade de 10 Ah. Isso significa que a célula pode fornecer 1 A por 10 horas, ou 2 A por 5 horas ou, em teoria, 10 A por 1 hora. No entanto, na prática, essa relação teórica não funciona com essas proporções exatas para a maioria das células. É importante compreender que embora uma célula possa fornecer 1 A por 10 horas, se 10 A forem retirados dela, ela durará menos de 1 hora, pois reações secundárias indesejadas ocorreram dentro da célula a ponto de reduzir a capacidade teórica apontada. Não obstante a isso, cada fabricante estipula uma taxa

de corrente em que suas células podem ser submetidas para carga e descarga sem comprometer a integridade das células, a taxa C.

É importante não confundir a nomenclatura da taxa C associada a corrente com a unidade de carga em coulomb (C). A taxa imprime uma relação entre a corrente e a capacidade de carga nominal já definida em Ah. Por exemplo, para uma bateria de 20 Ah, a taxa de 1C equivale a carregar/descarregar a célula com uma corrente de 20 A. Se for considerado 2C a corrente associada a carga ou descarga passa a ser 40 A, ou 5 A se a taxa imposta for de 0,25C. (LARMINIE; LOWRY, 2012).

Um ponto importante a se destacar em termos de taxa C, é que a relação entre a taxa C e o tempo de descarga não é estritamente linear, principalmente por causa de elementos intrínsecos da célula e da utilização incompleta dos materiais ativos quando a célula é exercida em altas taxas. O efeito pode ser observado na Figura 1.10, para 5 taxas C diferentes (PLETT, 2015).

Figura 1.10 – Comportamento da capacidade da célula em diferentes taxas de descarga.

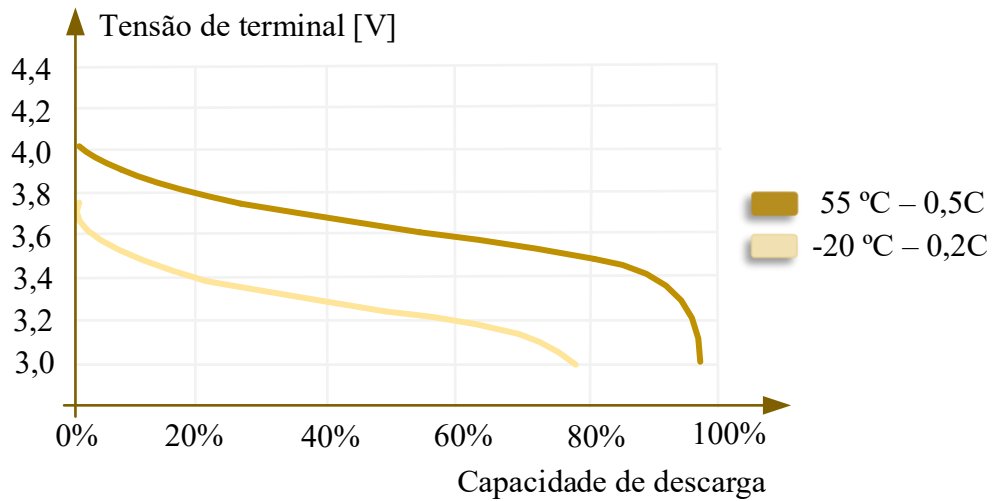


Fonte: adaptado de (EEMB, 2010).

O comportamento apresentado na Figura 1.10 foi retirado das especificações técnicas disponibilizada pelo fabricante da célula LIR18650 de Óxido de Lítio Níquel Cobalto Manganês. A célula LIR18650 possui capacidade de 2,6 Ah a 25 °C, quando carregada até 4,2 V a uma corrente de carga de 1,3 A, isto é, uma taxa de carga de 0,5C. Em análise, pode-se observar uma redução expressiva na tensão dos terminais da célula quanto maior for a corrente de descarga associada.

Para essa mesma célula de íon de lítio, tem-se na Figura 1.11, a mesma célula sendo descarregada com duas diferentes taxas C associadas a duas temperaturas diferente.

Figura 1.11 – Comportamento da capacidade da célula para temperatura e taxas C de descarga diferentes.



Fonte: adaptado de (EEMB, 2010).

Com esse ensaio, Figura 1.11, é possível identificar que além do valor de corrente associado a descarga da célula, também a temperatura tem impacto sobre o valor de tensão mensurados nos terminais. Fica evidente a perda de capacidade de descarga em termos percentuais com o aumento e diminuição da temperatura. Analisando as curvas com taxa 0,5C da Figura 1.10 e Figura 1.11, fica claro que além da perda na capacidade, o nível da tensão no terminal da célula também reduziu com a temperatura (EEMB, 2010).

Destaca-se que para células de íon de lítio a variação na capacidade com o regime de descarga é pequena, quando comparada a outras tecnologias nas mesmas condições, como chumbo-ácida por exemplo. Isso ocorre principalmente devido ao processo de reação de inserção/dessorção das células de íon de lítio.

Diferentes tecnologias de células de íon de lítio podem apresentar comportamentos variantes em relação a temperatura e corrente. Porém, é preciso compreender que toda ação estressora acaba comprometendo a vida útil da célula no decorrer dos ciclos de carga e descarga. Pode ser considerado ação estressora, temperaturas um pouco acima e abaixo de 25°C, corrente e tensão acima ou abaixo dos limites determinados pelo fabricante, choques, vibrações e umidade.

Partindo desta breve contextualização, na sequência é apresentado a proposta da dissertação, os objetos traçados a ela e sua justificativa.

1.1 PROPOSTA DO TRABALHO E OBJETIVOS

Desenvolver a implementação em tempo real da estimação do SoC de células de baterias de íon de lítio, apresentando uma alternativa para determinar o modelo de circuito equivalente por meio de carga eletrônica ativa.

1.1.1 Objetivos específicos do trabalho

- Compreender o funcionamento físico-químico e características das células de íon de lítio;
- Levantar na literatura soluções para rastreamento de SoC e modelagem das células de íon de lítio;
- Elaborar e implementar uma carga eletrônica ativa para efetuar o levantamento dos parâmetros internos que compõem o modelo de circuito equivalente da célula;
- Desenvolver um algoritmo de estimativa do SoC em tempo real;
- Validar as técnicas de modelagem e estimativa do SoC através de simulação numérica;
- Obter a estimativa do SoC por meio de experimentação em bancada, visando validar a metodologia apresentada.

1.2 JUSTIFICATIVA

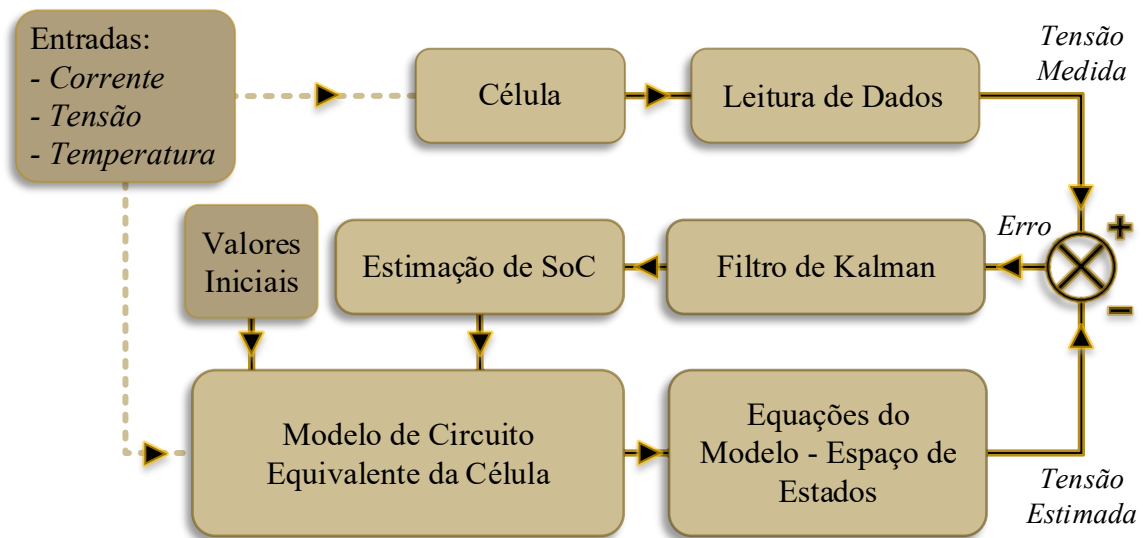
A relevância desta dissertação está em apresentar uma metodologia de estimativa de SoC de células em tempo real com baixo custo para obtenção dos parâmetros do modelo dinâmico, o que representa uma alternativa mais acessível do que equipamentos de ciclagem de baterias comerciais. A estimativa do SoC em trabalhos acadêmicos é em sua maioria simulado em *softwares*, a partir de ensaios experimentais, assim, a estimativa em tempo real é mais útil em problemas práticos.

Além disso, o trabalho busca fornecer dados de ensaios práticos de uma célula de íon de lítio de alta capacidade. Usualmente as pesquisas acadêmicas nesta área trabalham com células de bateria de baixa capacidade. Desta forma, a análise desenvolvida também pode ser aproveitada para expandir outras pesquisas na área.

2 ANÁLISE DE FERRAMENTAS E TÉCNICAS DE ESTIMAÇÃO DE SOC

Neste capítulo é apresentado uma revisão da literatura, almejando a compreensão das etapas necessárias para obter o estado de carga (SoC) em baterias íon de lítio. Apesar da revisão da literatura ser abrangente, existe um detalhamento maior dos tópicos utilizados para obtenção dos resultados desse trabalho. Ao final do capítulo busca-se a completa compreensão do diagrama da Figura 2.1.

Figura 2.1 – Diagrama de estimação de SoC por modelo de dados.



Fonte: adaptado de Xiong *et al.* (2018).

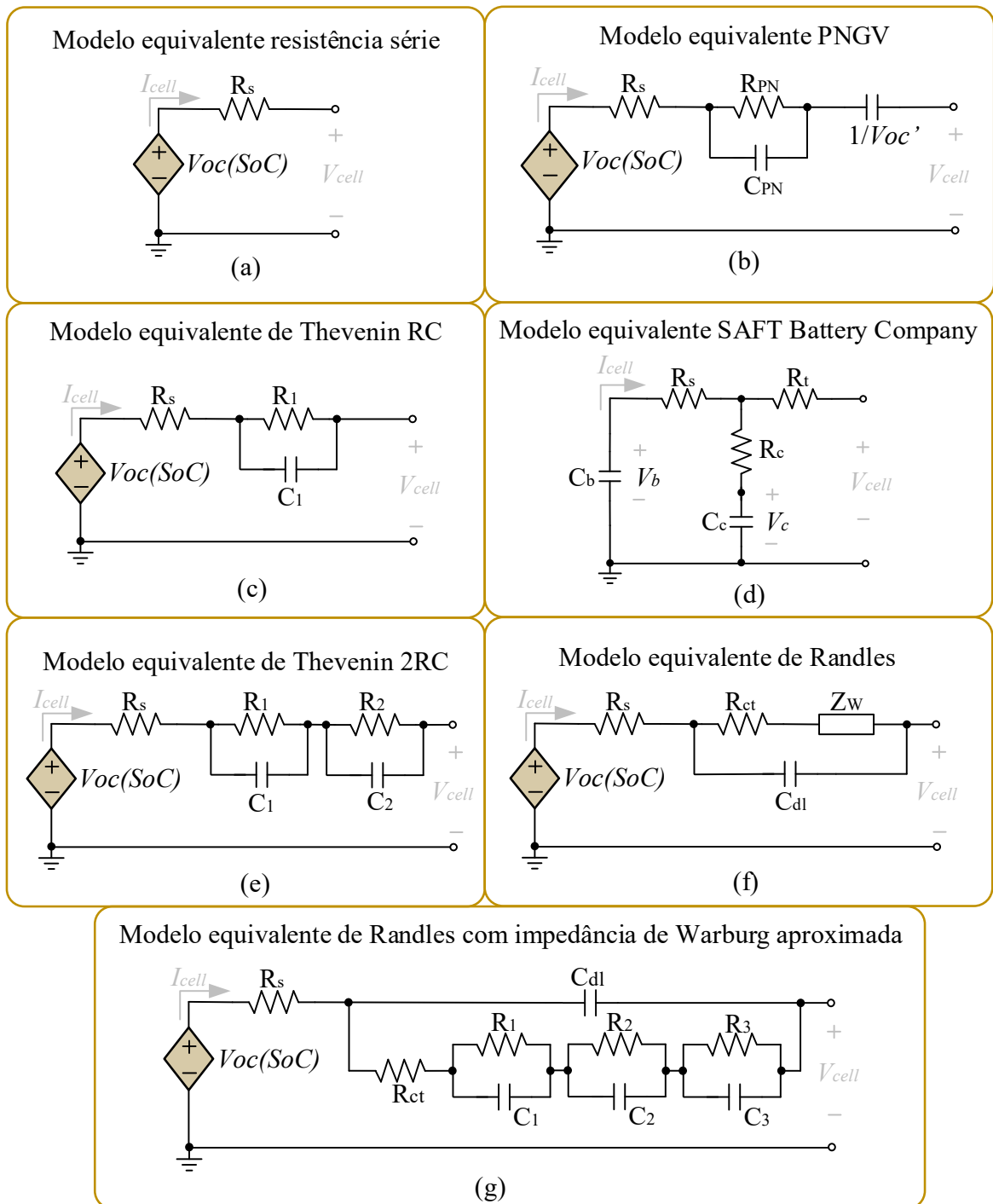
2.1 MODELAGEM DE BATERIAS DE ÍON DE LÍTIO

Um modelo preciso que represente as características da célula de bateria é essencial para a precisão da estimativa de SoC. Análises rigorosas da modelagem das reações eletroquímicas internas da bateria são alvo de algumas pesquisas. Esse tipo de modelagem é útil para os fabricantes otimizarem o *design* de suas células, mas requer uma quantidade enorme de tempo computacional e memória para resolver equações diferenciais parciais detalhadas do modelo (RAMADESIGAN *et al.*, 2012).

Da dificuldade de trabalhar com modelos tão complexos, os pesquisadores direcionaram seus esforços no desenvolvimento de modelos elétricos para representar o comportamento dinâmico da célula de bateria. Nesses modelos, a bateria é representada por um circuito elétrico com parâmetros que representam apenas alguns dos fenômenos físicos da célula (RAHIMI-EICHI *et al.*, 2013).

A acurácia dos modelos em circuito equivalente é inferior à de modelos eletroquímicos, onde o erro pode variar de 1% a 5%, entretanto a redução de complexidade associadas a um erro máximo em torno de 5% os tornam excelentes opções (CHEN; RINCON-MORA, 2006). Na literatura é possível encontrar uma grande variedade de modelos de circuito equivalente, a Figura 2.2 apresenta alguns deles (HE; XIONG; FAN, 2011).

Figura 2.2 – Modelos de circuitos equivalentes.



Fonte: Adaptado de He, Xiong e Fan (2011) e Plett (2015).

Dos exemplos de circuito equivalente, destaca-se o modelo de Randles do circuito (f), que é um modelo de impedância obtido por medição de espectroscopia de impedância eletroquímica (do inglês *electrochemical impedance spectroscopy* - EIS). O circuito equivalente (g) é uma aproximação ao circuito de Randles, visando maior facilidade de implementação (PLETT, 2015).

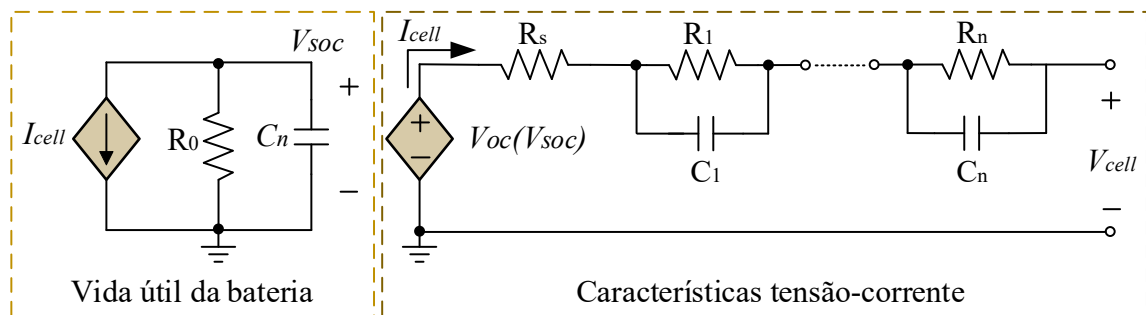
Já os circuitos equivalentes (a), (b), (c), (d) e (e) foram alvo do trabalho de He, Xiong e Fan (2011). Os pesquisadores apresentam um estudo comparativo de desempenho entre os cinco modelos, dos quais o modelo equivalente de Thévenin com dois ramos RC apresentou menor erro na estimação da tensão de terminal da célula em análise. Por apresentar um bom desempenho, esse mesmo circuito foi empregado em diversos estudos envolvendo estimativa de SoC em células de íon de lítio, como em Tang *et al.* (2011), He *et al.* (2011), Jackey *et al.* (2013), Chen *et al.* (2014), Plett (2015), Jokić, Zečević e Krstajić (2018), Fang, Li e Peng (2019), Aung *et al.* (2020) e Wang *et al.* (2021).

O subcapítulo 2.1.1 apresenta detalhes do modelo equivalente de Thévenin com dois ramos RC usado nesse trabalho.

2.1.1 Modelo elétrico de circuito equivalente Thévenin

Nos modelos baseados em Thévenin, o efeito de relaxação da bateria, principalmente causado pela difusão e pelo efeito de carga/descarga de dupla camada, é modelado por pares resistor-capacitor (RC) em paralelo. O número de pares RC utilizados é um compromisso entre a precisão e a complexidade do modelo (RAHIMI-EICHI *et al.*, 2013). Na Figura 2.3 é apresentado o circuito proposto por Chen e Rincón-Mora (2006).

Figura 2.3 – Modelo elétrico de circuito equivalente com dois pares RC completo.



Fonte: Adaptado de Chen e Rincón-Mora (2006).

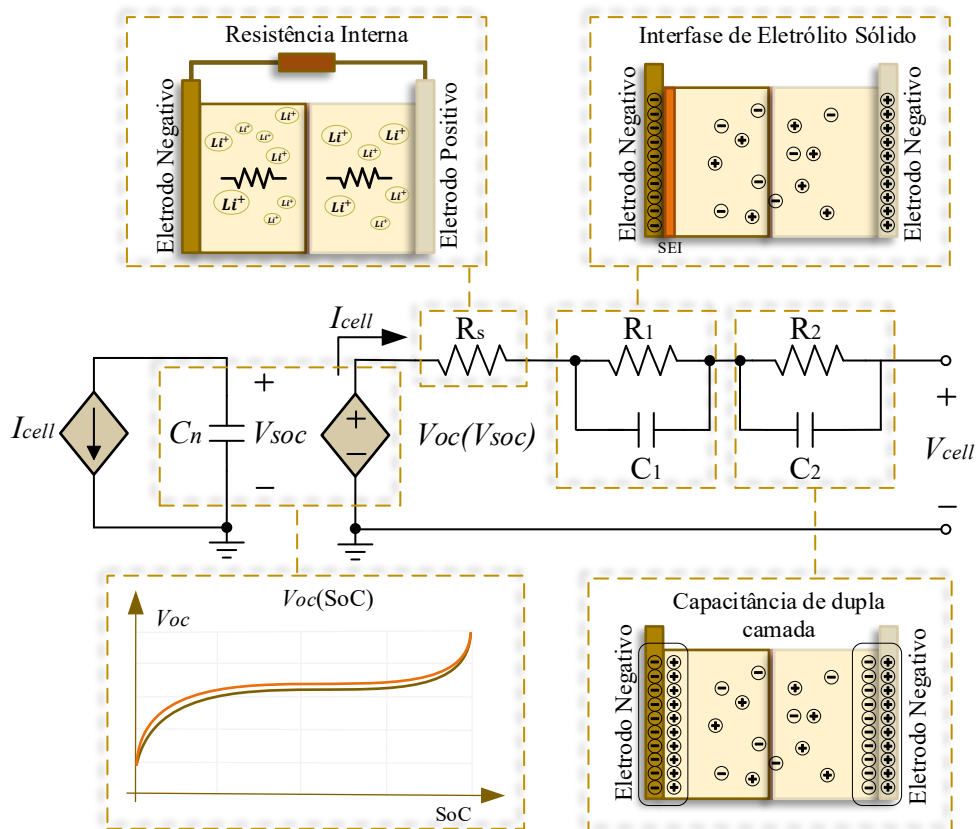
O modelo se divide em dois circuitos interdependentes, onde um caracteriza a vida útil da bateria e o outro as características de tensão e corrente. Do circuito relacionado a vida útil,

tem-se um resistor de auto-descarga R_0 que caracteriza a perda de energia por auto-descarga da bateria quando é armazenada por um longo tempo. A capacidade utilizável diminui lentamente com o tempo quando nenhuma carga está conectada a célula de bateria.

Teoricamente, R_0 é uma função de SoC, temperatura e, frequentemente, número de ciclos com uma taxa de auto-descarga de 5% ao mês. Na prática, ele pode ser até mesmo ignorado, se a célula é frequentemente utilizada. A capacitância C_n é associada a uma tensão V_{soc} que representa a capacidade da célula mediante a variação de corrente (CHEN, RINCÓN-MORA, 2006).

Para o circuito com as características de tensão e corrente, uma melhor compreensão pode ser obtida analisando a Figura 2.4. Nesse circuito a resistência de auto-descarga é ignorada.

Figura 2.4 – Modelo de circuito equivalente com dois pares RC: características químicas.

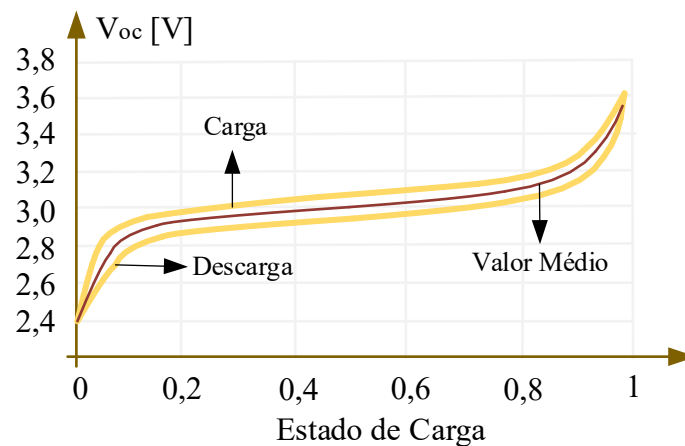


Fonte: Adaptado de Rahimi-Eichi *et al.* (2013).

O resistor em série R_s é uma resistência interna, responsável pela queda de tensão instantânea da resposta de degrau e está relacionada à resistência do eletrólito à propagação dos íons de lítio.

A tensão de circuito aberto (V_{OC}), varia para diferentes níveis de capacidade, ou seja, SoC. Uma fonte de tensão controlada por tensão ($V_{OC}(V_{SoC})$) é usada para representar essa relação. Na prática, são utilizadas tabelas experimentais de correspondência para mapear V_{OC} em função do SoC, com curvas diferentes para ciclos de carga e descarga, a fim de representar o efeito de histerese que aparece devido a processos químicos inerentes. Na prática pode ser utilizado um valor médio como forma compensatória do efeito histerese, conforme indicado na Figura 2.5 (ZHANG; CHOW, 2010).

Figura 2.5 – Comportamento de histerese em células de bateria.

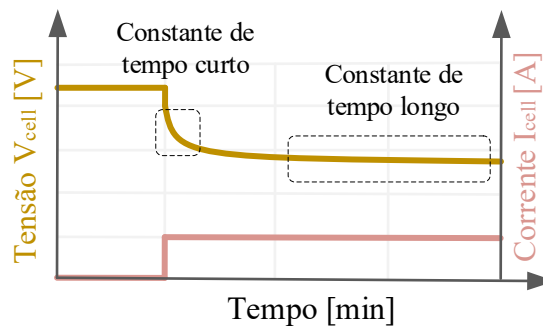


Fonte: Adaptado de He *et al.* (2011) e Plett (2015).

Os pares RC são responsáveis pelos efeitos dinâmicos nas células, associando as constantes de tempo de curto e longo prazo na resposta ao degrau, apresentada na Figura 2.6. O efeito de relaxação de curto prazo é devido a interface do eletrólito sólido (do inglês *solid electrolyte interface* - SEI) no eletrodo negativo, enquanto o efeito de relaxação de longo prazo é o resultado da formação de capacitância de dupla camada nos eletrodos negativo e positivo.

Os elementos dos ramos RCs são comumente descritos como resistência de polarização eletroquímica, R_1 , capacitância de polarização eletroquímica, C_1 , resistência de polarização de concentração, R_2 , e capacitância de polarização de concentração, C_2 . Com base em inúmeras curvas experimentais, o uso de duas constantes de tempo RC, em vez de uma ou três, é o melhor compromisso entre exatidão e complexidade. Isso, porque duas constantes de tempo RC mantêm os erros dentro de 1 mV para todos os ajustes de curvas, porém, em muitos estudos, o uso de um único par RC tem mostrado desempenho suficientemente exato (RAHIMI-EICHI *et al.*, 2013).

Figura 2.6 – Constantes de tempo de curto e longo prazo da resposta de degrau.

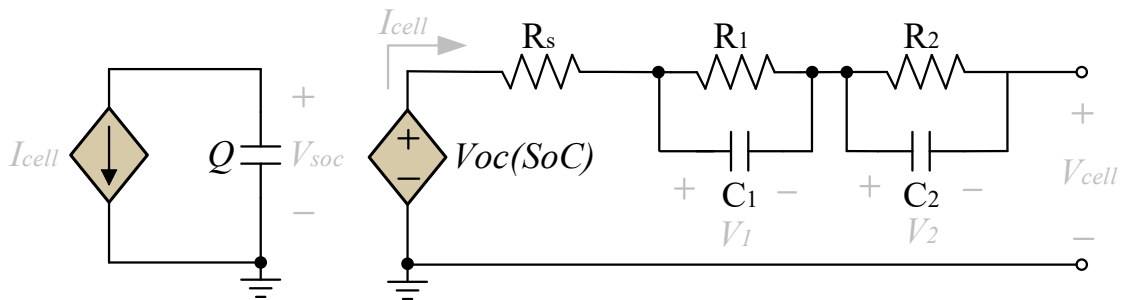


Fonte: Adaptado de Chen e Rincón-Mora (2006).

É importante ressaltar que, todos os parâmetros no modelo proposto são funções multivariáveis em função do SoC, corrente, temperatura e número de ciclos. No entanto, dentro de uma certa tolerância de erro, alguns parâmetros podem ser simplificados como funções independentes ou lineares de algumas variáveis para células de baterias específicas. Por exemplo, uma célula de baixa capacidade em uma aplicação de temperatura constante pode ignorar os efeitos da temperatura, e uma célula frequentemente utilizada pode ignorar a taxa de auto-descarga sem sofrer erros significativos (CHEN, RINCÓN-MORA, 2006).

A seguir é apresentado a análise do circuito da Figura 2.7 em termos de seus componentes elétricos.

Figura 2.7 – Modelo elétrico de circuito equivalente com dois pares RC simplificado.



Fonte: Adaptado de Chen e Rincón-Mora (2006).

A equação que descreve o estado de carga, representado a parcela do circuito de vida útil da bateria é descrita por:

$$SoC(t) = SoC_o - \frac{1}{C_n} \int_0^t I_{cell} dt . \quad (2.1)$$

A parcela que descreve as características tensão-corrente, são descritas pelas equações (2.2) e (2.3) determinadas pelas leis de Kirchhoff, onde V_{cell} é a tensão do terminal da bateria,

I_{cell} a corrente de carga ou descarga, V_1 e V_2 as tensões sobre os pares RC, I_{R1} a corrente sobre a resistência R_1 e I_{C1} a corrente sobre a resistência C_1 .

$$V_{cell} = V_{oc}(SoC) - R_s \cdot I_{cell} - V_1 - V_2 \quad (2.2)$$

A corrente que circula pela bateria pode ser descrita a partir das correntes sobre o resistor e o capacitor em paralelo, equação (2.3).

$$I_{cell}(t) = I_{R1}(t) + I_{C1}(t) \quad (2.3)$$

Onde a corrente sobre o resistor pode ser escrita como,

$$I_{R1}(t) = \frac{V_1(t)}{R_1} \quad (2.4)$$

e a corrente sobre o capacitor pode ser escrita como,

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_1(t)}{dt}. \quad (2.5)$$

Substituindo na equação (2.3), as equações (2.4) e (2.5), tem-se:

$$I_{cell}(t) = \frac{V_1(t)}{R_1} + C_1 \frac{dV_1(t)}{dt}. \quad (2.6)$$

Isolando a derivada é obtido a expressão (2.7).

$$\frac{dV_1(t)}{dt} = -\frac{V_1(t)}{C_1 R_1} + \frac{I_{cell}(t)}{C_1} \quad (2.7)$$

Para o segundo paralelo RC a mesma dedução se aplica, descrita em (2.8), dessa forma a equação é válida para representar o paralelo que descreve a transição rápida.

$$\frac{dV_2(t)}{dt} = -\frac{V_2(t)}{C_2 R_2} + \frac{I_{cell}(t)}{C_2} \quad (2.8)$$

As equações podem ser apresentadas no formato matricial de espaços de estados (2.9), e sua respectiva equação de saída (2.10).

$$\begin{bmatrix} \dot{SoC}(t) \\ \dot{V}_{c1}(t) \\ \dot{V}_{c2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_1 R_1} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C_2 R_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} SoC(t) \\ V_1(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_n} \\ \frac{1}{C_1} \\ \frac{1}{C_2} \end{bmatrix} \cdot I_{cell}(t) \quad (2.9)$$

$$V_{cell}(t) = V_{oc}(SoC(t)) + R_s I_{cell}(t) + V_1(t) + V_2(t) \quad (2.10)$$

Passando para o formato discreto, têm-se as equações (2.11) e (2.12), sendo suas deduções apresentadas no Apêndice A.

$$\begin{bmatrix} SoC[k+1] \\ V_1[k+1] \\ V_2[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\frac{-\Delta t}{C_1 R_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{\frac{-\Delta t}{C_2 R_2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} SoC[k] \\ V_1[k] \\ V_2[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-\Delta t}{C_n} \\ R_1 \left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{R_1 C_1}}\right) \\ R_2 \left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{R_2 C_2}}\right) \end{bmatrix} \cdot I_{cell}[k] \quad (2.11)$$

$$V_{cell}[k] = V_{oc}(SoC[k]) - R_s I_{cell}[k] - V_1[k] + V_2[k] \quad (2.12)$$

Uma vez definido o modelo de circuito equivalente, resta descobrir como determinar cada um dos parâmetros que o compõe. No subcapítulo 2.1.1.1 é apontada a obtenção da equação $V_{oc}(SoC)$ e no subcapítulo 2.1.1.2 a obtenção dos parâmetros R_s , R_1 , C_1 , R_2 e C_2 .

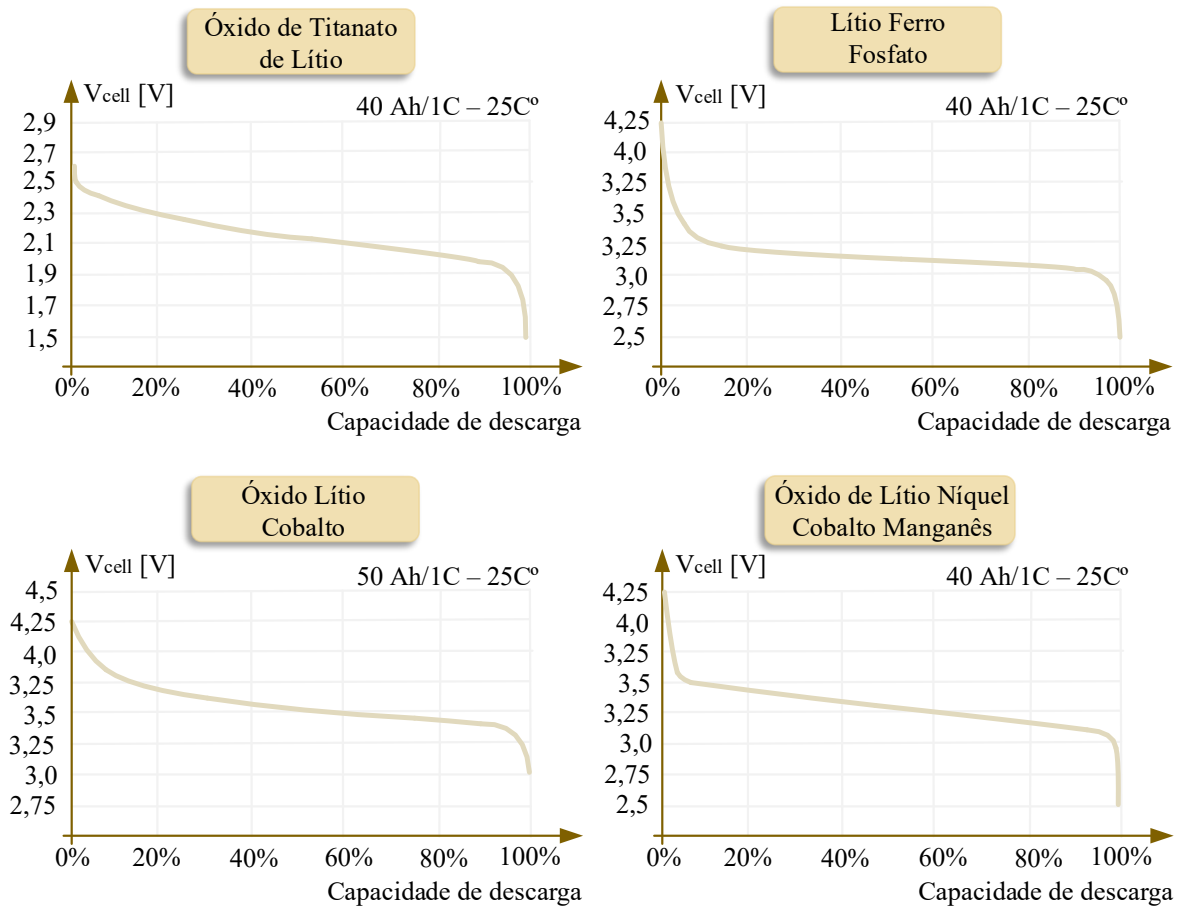
2.1.1.1 Obtenção da equação V_{oc}

A equação que descreve a tensão de circuito aberto (V_{oc}), está relacionada à capacidade da célula. Nesse subcapítulo são apresentadas duas formas de obter os valores de V_{oc} , uma por meio de carga/descarga pulsada e outra por carga/descarga contínua.

Independente da metodologia ambas dependem de medição das características físicas da célula e para algumas tecnologias de células é mais difícil fazer essa aquisição. Na Figura 2.8 é exibido quatro curvas comportamentais da tensão de terminal na célula para diferentes tecnologias de células de íon de lítio, adaptadas de manuais de fabricantes. A curva V_{OC} terá um comportamento similar em termos de formato ao da tensão de terminal durante carga/descarga.

Na Figura 2.8 é possível constatar que a tecnologia de lítio ferro fosfato é a mais desafiadora em termos de precisão de tensão, pois o comportamento da tensão é muito plana entre 20% e 80% do SoC; que é a faixa de operação típica da célula. Ou seja, uma estimativa confiável de SoC requer uma medição de tensão da célula de 1-2 mV (RAHIMI-EICHI; CHOW, 2012).

Figura 2.8 – Capacidade de descarga em função da tensão na célula para diferentes tecnologias de células de íon de lítio.



Fonte: Adaptado de Thunder-Sky (2007) e Yinlong (2016).

Para obtenção da curva V_{OC} por meio de ensaio pulsado são aplicados pulsos intermitentes de carga/descarga e relaxamento da tensão e corrente, como apresentado na Figura 2.9(a) e Figura 2.9(b). A célula deve estar completamente carregada ou descarregada. Dessa forma os pontos obtidos ao final de cada período de repouso são mapeados, Figura 2.9(c). Aplicando um algoritmo numérico, é possível definir uma função que melhor se adequa aos pontos Figura 2.9(d). A equação (2.13) foi proposta por Chen e Rincón-Mora (2006), para descrever a dinâmica da tensão V_{OC} da célula de íon de lítio.

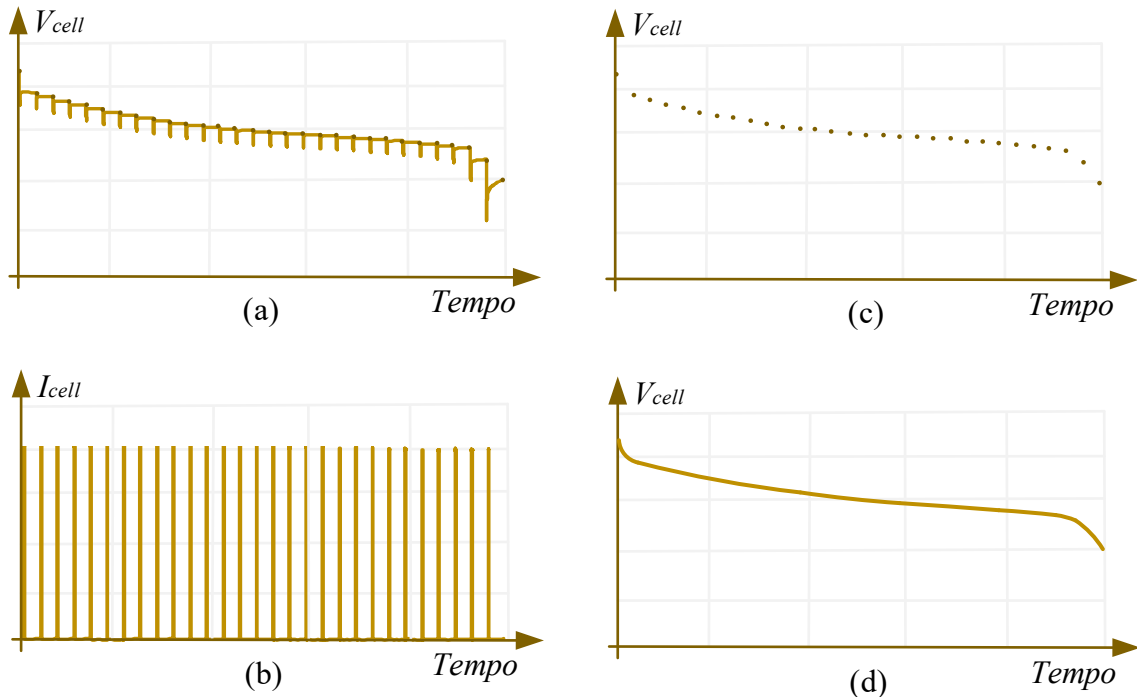
$$V_{OC}(SoC) = -a_0 e^{-a_1 SoC} + a_2 + a_3 (SoC) - a_4 (SoC)^2 + a_5 (SoC)^3 \quad (2.13)$$

A implementação de algoritmos numéricos pode ser desenvolvida em um *script*, aplicando as equações de métodos conhecidos (gradiente descendente, Gauss-Seidel, Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt) em *softwares* matemáticos ou utilizando ferramentas de *softwares*, como por exemplo, o *Curve Fitter Toolbox*TM no MATLAB®. No *Curve Fitter* são

importados os dados experimentais desejados e o ajuste pode ser feito por diversos modelos de regressão, interpolação, entre outros.

As representações destacam pulsos de descarga, no entanto o mesmo é aplicável aos pulsos de carga.

Figura 2.9 – Metodologia de obtenção da curva V_{OC} - SoC .



Fonte: Adaptado de Chen e Rincón-Mora (2006).

Já para obtenção da curva V_{OC} por meio de ensaio contínuo a célula deve estar completamente carregada. O teste consiste em uma descarga muito lenta, até atingir uma tensão mínima de operação, enquanto a tensão e a quantidade de ampère-hora descarregada são medidas continuamente. Em um processo inverso, a célula é então carregada muito lentamente até atingir uma tensão máxima de operação, enquanto são medidas de forma contínua a tensão e a quantidade acumulada de ampère-hora carregada. Este processo é mais preciso comparado ao método pulsado.

A finalidade da taxa lenta é minimizar as perdas por efeito joule nas resistências intrínsecas da célula e dessa forma, não ocorrer uma variação de temperatura na célula, além de diminuir as quedas de tensões e dinâmica sobre os elementos passivos do modelo da célula. É desejável manter a célula com uma temperatura constante durante o período de teste. Portanto, geralmente é usado uma taxa de $C/30$, o que mantém o compromisso entre a realização prática

do teste e o desejo de ter corrente zero para obter um verdadeiro equilíbrio. A conclusão prática do teste é de cerca de 60 horas; 30 horas com uma descarga de C/30, seguida de 30 horas com uma carga de C/30.

Os dados coletados permitem criar uma curva de " V_{OC} de descarga" *versus* ampère-hora de descarga e uma curva de " V_{OC} de carga" *versus* ampère-hora de carga. Com a conversão apropriada entre ampère-hora e estado de carga, obtém-se V_{OC} de carga/descarga em função do SoC (PLETT, 2015).

2.1.1.2 Parametrização do modelo de circuito equivalente

Os parâmetros do modelo de circuito equivalente são mais comumente obtidos a partir de perfis de descarga e carga de pulso, ou pulsos mistos de descarga/carga. Os pulsos mistos comumente são referidos como perfil de caracterização híbrida de pulso de potência (*Hybrid Pulse Power Characterization - HPPC*) (EUCAR, 2005; HURIA *et al.*, 2012).

A dinâmica produzida pelos pulsos é capaz de fornecer uma representação com um bom grau de fidelidade do desempenho da célula de bateria, incluindo a resposta transitória (R_1 , C_1 , R_2 e C_2). A partir dos perfis de pulso é possível preencher tabelas de dados (*LookUp Table - LUT*) podendo ser geradas em diferentes pontos de operação (temperatura, ciclos de vida, SoC, estado de saúde, corrente de carga/descarga) e assim aumentar a confiabilidade do modelo da célula (JACKEY *et al.*, 2013; HURIA *et al.*, 2012).

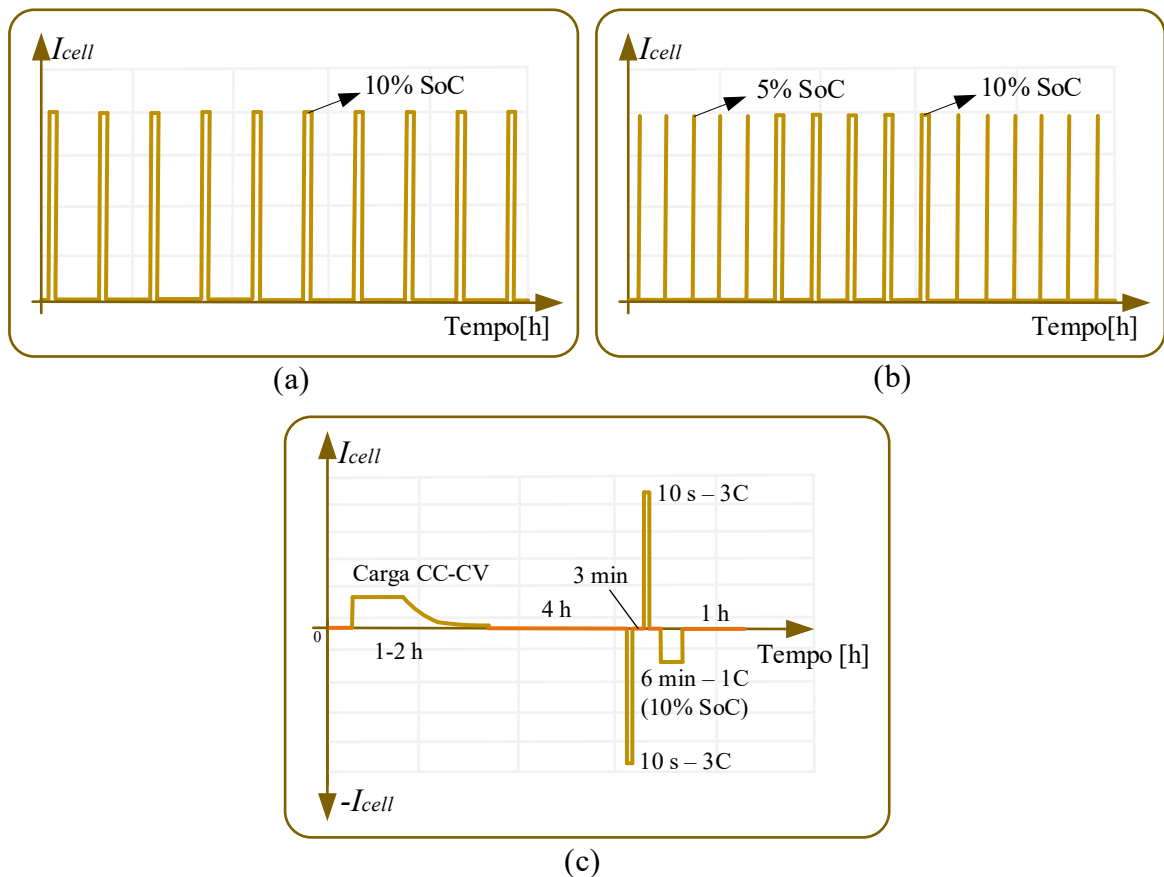
Na Figura 2.10(a) e Figura 2.10(b) são apresentadas as formas de pulsos (aplicáveis a carga e descarga) mais comuns nesse tipo de ensaio pulsado, monitorando tensão, corrente e temperatura. Os pulsos podem ser em intervalos periódicos, ou aplicados em percentuais de SoC de forma variada ao longo do ensaio (CHEN, RINCÓN-MORA, 2006; JACKEY, R.; PLETT, G.; KLEIN, 2009).

A largura do pulso de corrente é escolhida para garantir um número suficiente de "ondulações" na tensão do terminal da célula, obtendo pontos de dados suficientemente representativos. O tempo de repouso é selecionado para permitir que a tensão da célula de bateria atinja condições de estado estacionário. O tempo de estabilização, para obter-se a tensão de circuito aberto, V_{OC} , é frequentemente demorado, podendo alcançar até duas horas em algumas células (SHARKH; DOERFFEL, 2004; JACKEY *et al.*, 2013).

No trabalho de Eichi e Chow (2012) foi utilizada uma mescla intercalada de pulsos de carga/descarga durante os testes, para modelar também o efeito de histerese.

Na Figura 2.10(c) é exibido um perfil de teste HPPC, onde a célula é carregada e descarregada em condições controladas, e as medições de tensão, corrente e temperatura do terminal também são monitoradas. Para a aplicação dos perfis de teste HPPC é necessário alto controle nos tempos do teste, além da necessidade de imprimir taxas como 3C (EUCAR, 2005).

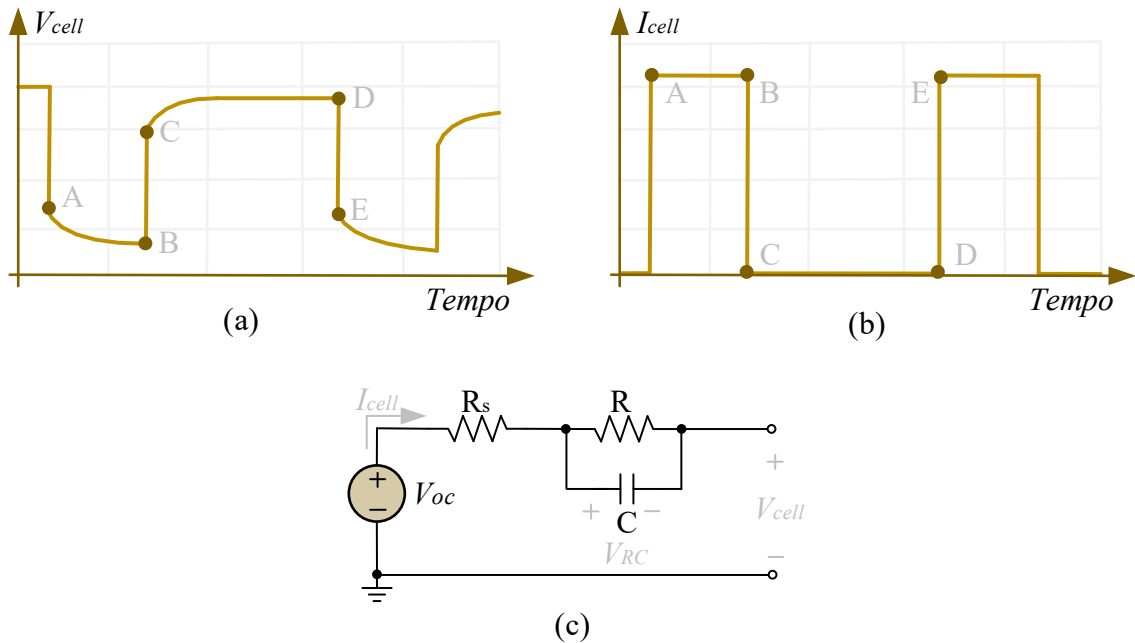
Figura 2.10 – Tipos de ensaios pulsados.



Fonte: adaptado de Jackey *et al.* (2013) e Thanagasundram *et al.* (2012).

Para um pulso de descarga ou carga de corrente, a resposta em tensão nos terminais da célula de bateria se assimila muito com a representação da Figura 2.11(a). Se o circuito equivalente contém apenas um par RC, os valores de R e C podem ser interpretados diretamente, analisando a corrente e a tensão de um pulso de descarga ou carga.

Figura 2.11 – Perfil de tensão (a) e corrente (b) de um pulso de descarga e modelo de circuito com um par RC simplificado (c).



Fonte: adaptado de Jackey *et al.* (2013).

Na Figura 2.11(a), o ponto D corresponde a tensão de circuito aberto, ponto que antecede o próximo período de descarga, ou seja, a tensão já atingiu seu estado de equilíbrio durante o repouso em que a corrente é nula.

A resistência série R_s é determinada pela lei de Ohm. É possível identificar que entre os pontos C e B da Figura 2.11, existe uma grande queda de tensão quando a corrente de descarga é aplicada, essa queda de tensão é provocada justamente pela resistência série característica da célula, calculada como apresentado na equação (2.14).

$$R_s = \frac{V_C - V_B}{I_{cell}} \quad \text{ou} \quad R_s = \frac{V_D - V_E}{I_{cell}} \quad (2.14)$$

A tensão sobre o par RC, apontada na Figura 2.11(c), poder ser descrita a partir do comportamento dinâmico genérico de um capacitor. Um capacitor irá operar como um circuito aberto quando carregado, passadas cinco constantes de tempo (τ). Isto é particularmente interessante, porque implica na circulação de corrente, depois de 5τ , apenas pela resistência R , e nessas condições por análise de malha, a equação (2.15) é válida.

$$-V_{oc} + I_{cell}(R_s + R) + V_{cell} = 0 \quad (2.15)$$

Rearranjando os termos, tem-se que a resistência em paralelo pode ser definida pela relação (2.16).

$$R = \frac{V_{oc} - V_{cell}}{I_{cell}} - R_s \quad (2.16)$$

Tendo o ponto C como a tensão inicial do capacitor usando a relação de tempo que rege um capacitor, equação (2.17), e considerando 5τ que equivale a 99,3% da acomodação transitória, C pode-se determinado conforme (2.18).

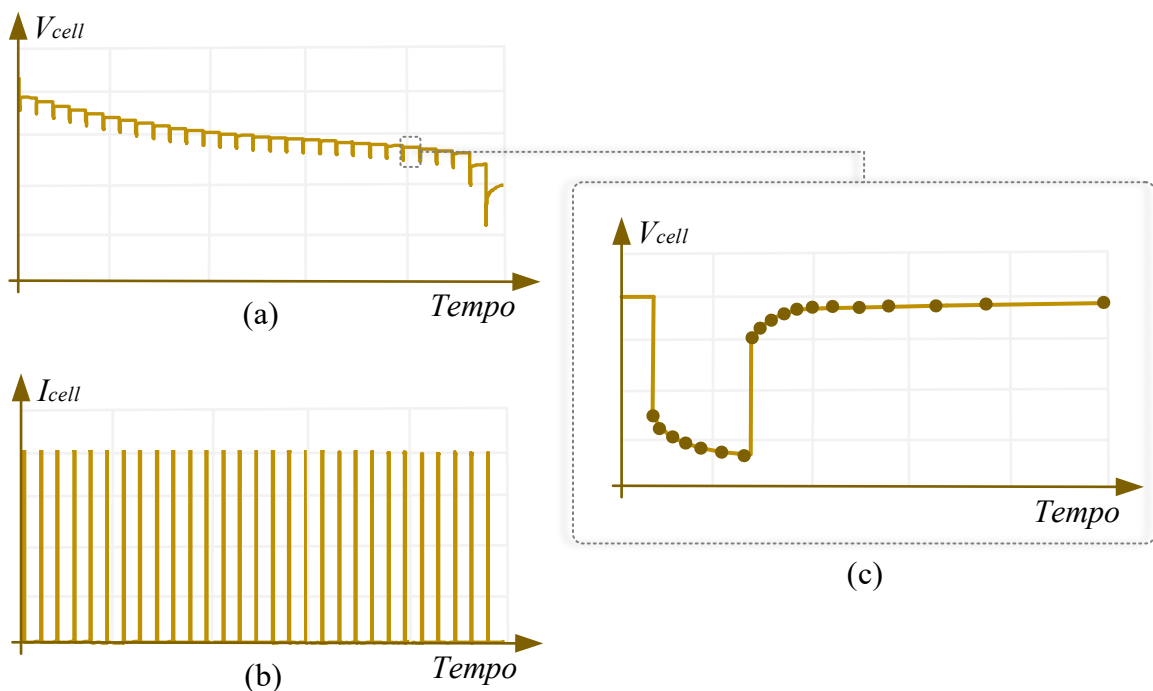
$$\tau = RC \quad (2.17)$$

$$C = \frac{\tau}{5R} \quad (2.18)$$

Já para circuitos equivalentes com dois pares RC ou mais, os parâmetros só podem ser obtidos com análise numérica, com exceção da resistência R_s que é obtida da mesma forma apresentada na equação (2.14).

Considerando agora a Figura 2.12(c), onde o comportamento transitório pode ser representado por um conjunto de pontos, são aplicáveis algoritmos numéricos para a determinação dos parâmetros em forma de coeficientes que melhor se ajustam aos pontos experimentais (SHARKH; DOERFFEL, 2004).

Figura 2.12 – Ensaio pulsado de tensão (a) e corrente (b) e comportamento transitório representado por um conjunto de pontos (c).



Fonte: adaptado de Chen e Rincón-Mora (2006).

Na obtenção da equação de V_{OC} , qualquer função que ajuste os pontos é válida, no entanto, aqui, a função precisa definir claramente os parâmetros R_1 , C_1 , R_2 e C_2 . Por análise do modelo de circuito equivalente é válida a igualdade,

$$V_{cell}(t) = V_{oc}(SoC) - R_s \cdot I_{cell}(t) - V_1(t) - V_2(t), \quad (2.19)$$

assim, também é válido afirmar que as tensões V_1 e V_2 também correspondem as tensões associadas aos capacitores C_1 e C_2 da Figura 2.7. Desta forma, é possível expressar as tensões com base nas equações que descrevem o comportamento de carga ou descarga dos capacitores (CHEN, RINCÓN-MORA, 2006). Substituindo as equações de carga/descarga dos capacitores na equação (2.19), chega-se à equação (2.20), para a carga e a equação (2.21), para a descarga.

$$V_{cell}(t) = V_{oc}(SoC) - R_s \cdot I_{cell}(t) - R_1 I_{cell} \left(1 - e^{\frac{-t}{R_1 \cdot C_1}} \right) - R_2 I_{cell} \left(1 - e^{\frac{-t}{R_2 \cdot C_2}} \right) \quad (2.20)$$

$$V_{cell}(t) = V_{oc}(SoC) - R_s \cdot I_{cell}(t) - V_1 \left(e^{\frac{-t}{R_1 \cdot C_1}} \right) - V_2 \left(e^{\frac{-t}{R_2 \cdot C_2}} \right) \quad (2.21)$$

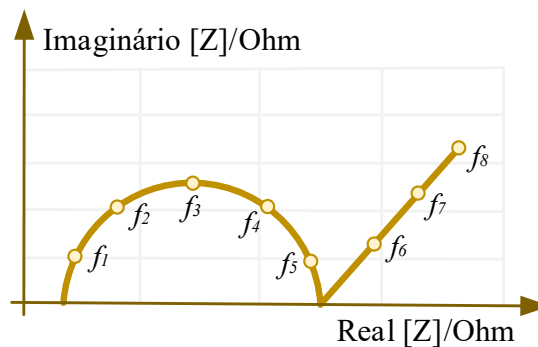
Nas equações (2.22) e (2.23), respectivamente, são descritas funções para carga e descarga com z números de pares RC.

$$V_{cell}(t) = V_{oc}(SoC) - R_s \cdot I_{cell}(t) - \sum_{z=1}^n R_z I_{cell} \left(1 - e^{\frac{-t}{R_z \cdot C_z}} \right), \quad (2.22)$$

$$V_{cell}(t) = V_{oc}(SoC) - R_s \cdot I_{cell}(t) - \sum_{z=1}^n V_z \left(e^{\frac{-t}{R_z \cdot C_z}} \right). \quad (2.23)$$

Outra forma menos comum para obtenção dos parâmetros de circuito elétrico equivalente é por meio da análise espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS). No método EIS a célula de bateria é excitada por uma série de sinais de corrente alternada (CA) de diferentes frequências e através da análise da relação entre o sinal de entrada e o sinal de saída de tensão, uma característica de impedância é obtida para cada frequência, Figura 2.13 (LEE; KIM; CHA, 2011; ZHANG *et al.*, 2017).

Figura 2.13 – Gráfico de impedâncias obtidos por EIS.



Fonte: Adaptado de Biologic (2020).

Cada célula cria um modelo de circuito equivalente específico na aplicação de EIS que melhor adequa as características apresentadas nos diagrama de impedância (LEE; KIM; CHA, 2011). Dada a complexidade envolvida na técnica de EIS é necessário equipamento especializado para boas medições, por isso, é mais comumente empregada em estudos de eletrólitos, dielétricos, eletrodeposição, eletrossíntese, corrosão e eletrolisadores (MURER; DIARD, 2019; BIOLOGIC, 2020).

2.2 MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE SOC

A obtenção de uma estimativa precisa do SoC é crucial não apenas para o gerenciamento ideal de energia, como em veículos elétricos (EVs) e *smart grid*, mas também para proteger a bateria contra descargas profundas ou sobrecargas, condições que podem prejudicar a vida útil da célula e criar situações potencialmente perigosas. No entanto, o SoC não pode ser medido diretamente nos terminais da célula. Portanto, é necessário desenvolver um algoritmo que estime o SoC, no caso de um banco de bateria, das células individuais, com base nos dados comportamentais de cada uma delas (RAHIMI-EICHI *et al.*, 2013; PILLER; PERRIN; JOSSEN, 2001).

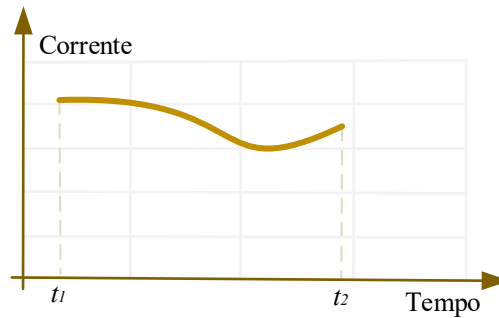
Alguns métodos de estimativa do SoC comuns na literatura são apresentados nos próximos subcapítulos.

2.2.1 Contagem de Coulomb

Diversos algoritmos e abordagens foram propostos para estimar o SoC com base nas medições disponíveis da célula. A contagem de Coulomb, também conhecida como contagem de Ah, é um dos métodos mais convencionais, nos quais a integral temporal da corrente de

terminal é utilizada para determinar a quantidade de carga liberada ou armazenada na célula, comparando-a à capacidade total de carga (NG *et al.*, 2009). A Figura 2.14 apresenta uma ilustração gráfica de seu funcionamento.

Figura 2.14 – Ilustração método contagem de Coulomb.



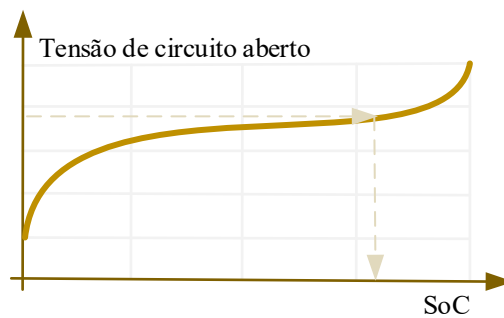
Fonte: adaptado de Plett (2015).

Embora seja de fácil implementação, esse método possui limitações, como o desconhecimento do valor inicial do SoC, além dos erros e ruídos nas leituras do sensor de corrente, que se acumulam no cálculo do SoC, afetando a exatidão da estimativa com o passar do tempo (XIONG *et al.*, 2018).

2.2.2 Tensão de circuito aberto

Medir a tensão de circuito aberto V_{oc} é outra abordagem para calcular o SoC com base na relação estática entre a V_{oc} e o SoC, conforme ilustrado na Figura 2.15. Esse método pode ser usado de forma independente ou em conjunto com a contagem de Coulomb, visando aumentar a exatidão da estimativa do SoC. No entanto, devido à dinâmica de longo prazo da célula, obter o V_{oc} requer que a célula permaneça em repouso, ou seja, sem carga ou descarga, por um período prolongado, muitas vezes de oito horas ou mais. Tal requisito inviabiliza esse método para aplicações *online*, como veículos elétricos (WINDARKO; CHOI; CHUNG, 2010; CODECA; SAVARESI; MANZONI, 2009).

Figura 2.15 – Ilustração método SoC por análise da tensão V_{oc} .

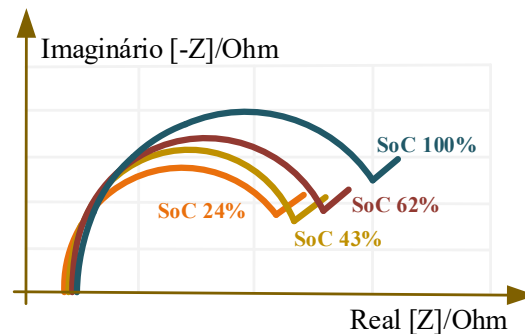


Fonte: adaptado de Windarko; Choi; Chung (2010).

2.2.3 Espectroscopia de impedância eletroquímica

De maneira semelhante, a espectroscopia de impedância eletroquímica é uma outra ferramenta utilizada para estimar o SoC (DO *et al.*, 2009). Através da EIS, é possível calcular a impedância interna da célula aplicando pequenos sinais de corrente CA com diferentes frequências. Para cada SoC será obtido uma curva de impedância semelhantes as demonstradas na Figura 2.16. Contudo, esse processo também requer um tempo considerável de geração, sendo adequado apenas para análises *offline* (LI *et al.*, 2010).

Figura 2.16 – Ilustração método SoC espectroscopia de impedância.



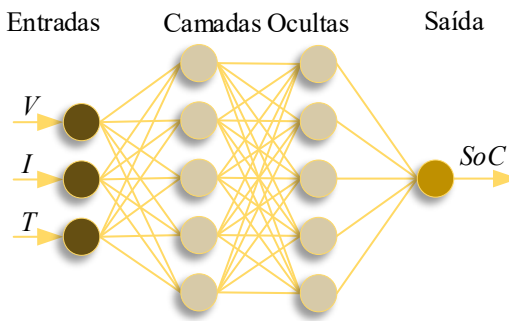
Fonte: adaptado de Meng *et al.* (2017).

2.2.4 Métodos baseados em dados

Uma das formas de determinar a estimativa do SoC muito empregada são os métodos baseados em dados, com redes neurais de aprendizagem. As redes neurais são compostas por camadas de informação. Do ponto de vista de célula, a camada de entrada é um vetor dos valores instantâneos de corrente, tensão e temperatura. A camada de saída é o valor SoC instantâneo. Ao treinar uma rede neural com os pares de entrada-saída, ela é capaz de formar um mapa não linear que modela com precisão a relação entrada-saída sem qualquer conhecimento prévio da

estrutura interna da célula, um exemplo básico de rede neural é exibido na Figura 2.17. A relação entre as camadas de entrada e saída é desenvolvida usando um número adequado de camadas ocultas, neurônios ocultos e função de ativação a depender do problema. Nesse método a estimativa é feita em tempo real (HANNAN *et al.*, 2018).

Figura 2.17 – Ilustração método SoC baseado em dados.

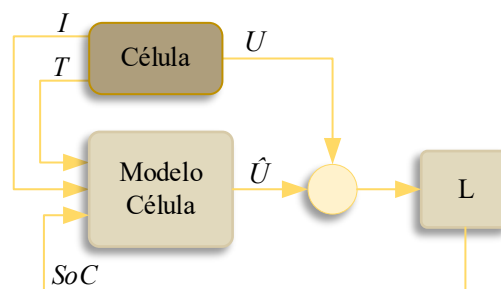


Fonte: adaptado de Hannan *et al.*, (2018).

2.2.5 Métodos baseados em modelos

Uma abordagem difundida amplamente, também em tempo real, é a estimativa de SoC baseada em modelos. A dinâmica da bateria é modelada como um sistema intrinsecamente não linear. Diversas técnicas são empregadas para projetar observadores que monitoram o SoC do sistema. Indo desde observadores simples projetados por tentativa e erro até técnicas avançadas e recursivas, como variações de filtros de Kalman (CHEN *et al.*, 2014; JOKIĆ *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2021) e observadores de modo deslizante (ZHANG; LIU; FANG, 2008). A Figura 2.18 apresenta uma estrutura base dos métodos baseados em modelo. Embora tais técnicas forneçam resultados mais exatos, todos esses métodos são projetados com base na identificação prévia dos parâmetros do modelo da bateria. Como são modelos alimentados por dados, a qualidade e a quantidade fazem a diferença (HURIA, *et al.*, 2012).

Figura 2.18 – Ilustração método SoC baseado em modelo.



Fonte: adaptado de Chen *et al.*, (2014).

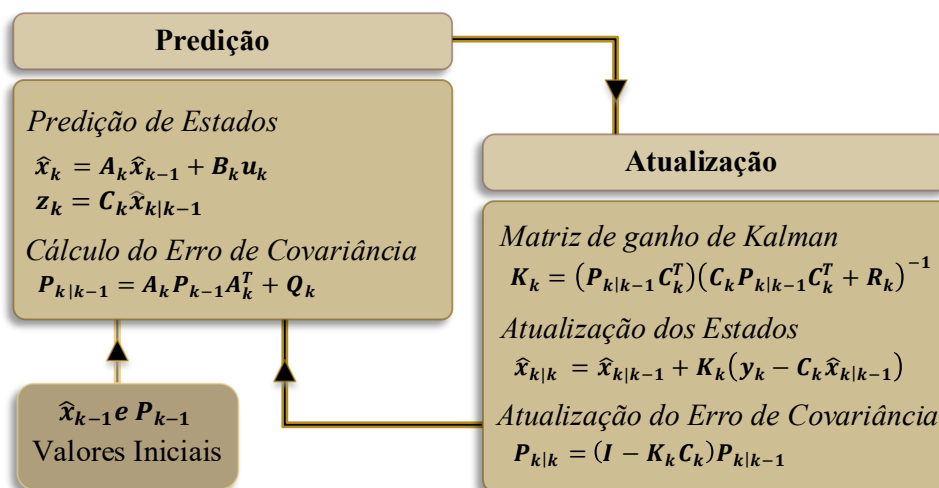
Dos métodos apresentados na literatura, optou-se nesse trabalho por implementar uma estratégia com complexidade intermediária, o filtro de Kalman estendido. Foram desenvolvidas inúmeras variações do filtro de Kalman para contornar pequenas limitações da sua versão básica, no entanto, com um cunho de revisão, optou-se por trabalhar com a versão básica e apresentar em detalhes as deduções matemáticas para obtenção da lógica deste filtro, conforme será apresentado a seguir.

2.2.5.1 Filtro de Kalman Estendido

O filtro de Kalman é aplicável em sistemas lineares dinâmicos em que há um erro entre a medição instrumental e a medida real, atuando de forma a minimizar essa diferença por meio de um ganho ajustável, recalculado a cada nova interação (KALMAN, 1960). O filtro de Kalman estendido (*Extended Kalman Filter* - EKF) funciona da mesma forma, porém é aplicável em sistemas não lineares dinâmicos, efetuando a linearização do sistema, e nas medições se for o caso, de forma que o algoritmo de Kalman original possa ser utilizado. Como é o caso das células de baterias, que são sistemas não lineares (LI *et al.*, 2015).

Na Figura 2.19, estão apresentadas as cinco equações que descrevem o comportamento do filtro, independentemente do tipo de sistema (linear/não linear).

Figura 2.19 – Algoritmo do filtro de Kalman.



Fonte: Adaptado de Kalman (1960).

O filtro é inicializado com uma aproximação dos valores da covariância e dos estados iniciais definida com base no conhecimento físico prévio do sistema. Em seguida, são executadas as duas etapas de previsão, seguidas pelas três etapas de correção. O filtro então

aguarda até o próximo intervalo de amostragem, incrementando o índice de tempo k , repetindo o processo. Estas operações são bastante simples de serem executadas por um microcontrolador.

O EKF utiliza as mesmas equações do filtro de Kalman, porém, com uma posterior linearização das equações, assim, para fins didáticos serão deduzidas as equações na sua forma linear e posteriormente apresentado sua estrutura estendida. O modelo de circuito equivalente com dois ramos RC, implica em três variáveis a serem estimadas na célula (SoC, V_1 e V_2). Sendo assim, buscou-se nas deduções associar diretamente o sistema em estudo com matrizes de ordem 3.

Seja um sistema dinâmico descrito pela representação em espaço de estados, a equação de estado do filtro de Kalman (sistemático) é definida em (2.24) e a equação de observação é definida em (2.25).

$$x_k = A_k x_{k-1} + B_k u_k + \omega_k, \quad (2.24)$$

$$y_k = C_k x_k + \vartheta_k, \quad (2.25)$$

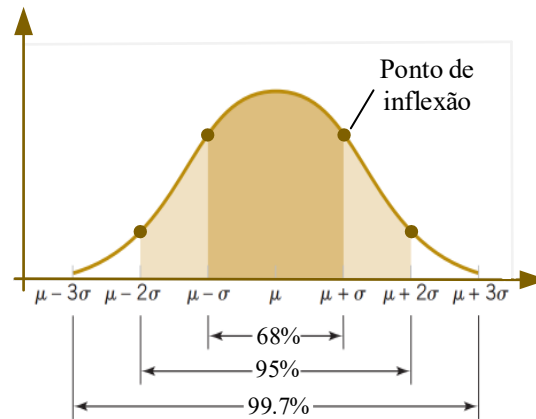
Os termos das equações anteriores são o vetor de estado (x_{k-1}), o vetor de observação (y_k), a matriz de transição de estado (A_k), a matriz de entradas (B_k), a matriz de observação (C_k), o vetor de entradas do sistema (u_k), o vetor de ruído do sistema (ω_k) e o vetor de ruído de observação (ϑ_k). Os termos ω_k e ϑ_k são assumidos como vetores de ruído branco gaussiano de média zero, positivamente definidos, simétricos e não correlacionados $\omega_k \sim N(0, Q_k)$ e $\vartheta_k \sim N(0, R_k)$; k é um índice amostrado.

O prosseguimento das deduções necessitam do entendimento de alguns conceitos básicos de estatística. Um ruído Normal é descrito por sua média gaussiana. Independentemente do tipo de distribuição de uma determinada variável aleatória (ruído), a distribuição das médias das médias dos dados converge para a distribuição Normal conforme o tamanho e o número dos eventos aumenta. Na Figura 2.20 é possível identificar o formato padrão gaussiano.

O desvio padrão (σ) informa, a partir do ponto de inflexão, a densidade de probabilidade de valores aleatórios estarem nos percentuais em torno da média estatística verdadeira (μ), ou seja, o desvio padrão informar numericamente o quanto os dados podem variar em torno da média. Por isso, a definição de desvio padrão é obtida da variância do conjunto de dados, pois a variância descreve o quão distante os valores estão da média, equação (2.26).

$$\sigma = \sqrt{\text{var}} \quad (2.26)$$

Figura 2.20 – Função de densidade de probabilidade Normal/Gaussiana.



Fonte: Adaptado de Plett (2015).

Já a covariância relaciona o grau de interdependência numérica entre duas variáveis aleatórias. Uma forma simples de entender a covariância é como um espalhamento entre a resposta do sistema (célula) e a resposta desse mesmo sistema em termos médios. A covariância do sistema (Q_k), em termos matriciais é dada pela média ou esperança (E) da multiplicação do vetor de ruído do sistema, como apresentado em (2.27). A covariância do sistema de observação (R_k) associada a medição, segue a mesma definição conforme (2.28).

$$Q_k = E\{\omega_k \omega_k^T\} = \begin{bmatrix} \sigma_{x1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{x2}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{x3}^2 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$R_k = E\{\vartheta_k \vartheta_k^T\} = \begin{bmatrix} \sigma_{x1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{x2}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{x3}^2 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

A dedução para se chegar na matriz de covariância a partir de sua definição está apresentada no apêndice A.

Uma vez que ambos os sistemas, x_k e y_k , são contaminados por ruído aleatório, será analisado como a média (E) de ambos se comporta.

Aplicando o operador de média estatística em (2.24) e (2.25), chegasse a

$$E(x_k) = E(A_k x_{k-1} + B_k u_k + \omega_k), \quad (2.29)$$

$$E(y_k) = E(C_k x_k + \vartheta_k). \quad (2.30)$$

Aplicando as propriedades do operador de média, obtém-se

$$E(x_k) = E(A_k x_{k-1}) + E(B_k u_k) + E(\omega_k), \quad (2.31)$$

$$E(y_k) = E(C_k x_k) + E(\vartheta_k). \quad (2.32)$$

Sabe-se que A_k , B_k , C_k e u_k não são variáveis aleatórias, ω_k e ϑ_k são variáveis aleatórias e x_k e y_k são contaminados por ω_k e ϑ_k , logo, também são processos aleatórios. Assim são válidas as igualdades (2.33) e (2.34).

$$E(x_k) = A_k E(x_{k-1}) + B_k u_k + E(\omega_k) \quad (2.33)$$

$$E(y_k) = C_k E(x_k) + E(\vartheta_k) \quad (2.34)$$

A média de uma variável que tem média nula, como é o caso de ω_k e ϑ_k , resulta em zero, assim, as expressões (2.33) e (2.34) equivalem as expressões (2.35) e (2.36), já descritas com a notação de circunflexo em substituição ao operador (E), que é a notação comum para média.

$$\hat{x}_k = A_k \hat{x}_{k-1} + B_k u_k \quad (2.35)$$

$$z_k = C_k \hat{x}_k \quad (2.36)$$

Como a média atual x_k só pode acontecer uma vez que a média anterior $\hat{x}_{k|k-1}$ aconteceu, pode-se adotar a notação (2.37) e (2.38).

$$\hat{x}_{k|k-1} = A_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k u_k \quad (2.37)$$

$$z_k = C_k \hat{x}_{k|k-1} \quad (2.38)$$

Com estas operações é possível concluir que a média do sistema não apresenta incertezas.

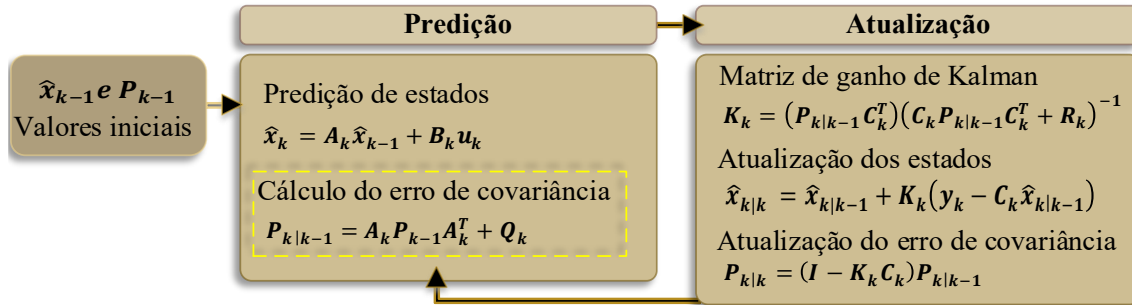
O cálculo do erro entre ambos busca indicar o grau de correção que precisa ser aplicado. Para determinar P_k , parte-se que o erro de evolução entre o sistema (x_k) e sua própria média (\hat{x}_k) pode ser descrito por (2.39), e a covariância para determinar a medida de espalhamento estatístico do erro e_k , conforme (2.40).

$$e_k = x_k - \hat{x}_{k|k-1} \quad (2.39)$$

$$P_{k|k-1} = E\{e_k e_k^T\} \quad (2.40)$$

Em que o termo $\hat{x}_{k|k-1}$ pode ser calculado considerando que a predição do \hat{x}_k atual é possível com base na predição anterior, em " $k - 1$ ". T indica matriz transposta.

Figura 2.21 – Algoritmo do filtro de Kalman destaque do erro de covariância.



Fonte: Adaptado de Kalman (1960).

Para obter a expressão clássica de P_k , será expandida a relação (2.40), sabendo que x_k e \hat{x}_k podem ser igualadas a:

$$x_k = A_k x_{k-1} + B_k u_k + \omega_k, \quad (2.41)$$

$$\hat{x}_{k|k-1} = A_k \hat{x}_{k-1} + B_k u_k. \quad (2.42)$$

Então, substituindo tais relações na equação do erro (2.39), tem-se:

$$e_k = x_k - \hat{x}_{k|k-1} = (A_k x_{k-1} + B_k u_k + \omega_k) - (A_k \hat{x}_{k-1} + B_k u_k). \quad (2.43)$$

Efetuada a subtração e pondo A_k em evidência, conclui-se que o erro e_k pode ser escrito como:

$$e_k = A_k e_{k-1} + \omega_k. \quad (2.44)$$

Considerando a equação (2.44) na equação (2.40), tem-se:

$$P_{k|k-1} = E\{(A_k e_{k-1} + \omega_k)(A_k e_{k-1} + \omega_k)^T\}, \quad (2.45)$$

ou

$$P_{k|k-1} = E\{(A_k e_{k-1} + \omega_k)(A_k^T e_{k-1}^T + \omega_k^T)\}. \quad (2.46)$$

Expandindo a multiplicação, tem-se:

$$P_{k|k-1} = E\{A_k e_{k-1} A_k^T e_{k-1}^T\} + E\{A_k e_{k-1} \omega_k^T\} + E\{\omega_k A_k^T e_{k-1}^T\} + E\{\omega_k \omega_k^T\} \quad (2.47)$$

Como mencionado, os ruídos gaussianos ω_k , apresentam média nula para qualquer período de tempo, logo,

$$E\{\omega_k^T\} = E\{\omega_k\} = 0. \quad (2.48)$$

Aplicando a definição (2.48) na igualdade (2.47), simplifica-se a expressão para

$$P_{k|k-1} = E\{A_k e_{k-1} A_k^T e_{k-1}^T\} + E\{\omega_k \omega_k^T\}. \quad (2.49)$$

Rearranjando os termos afim de facilitar a compreensão,

$$P_{k|k-1} = A_k E\{e_{k-1} e_{k-1}^T\} A_k^T + E\{\omega_k \omega_k^T\}. \quad (2.50)$$

Na relação (2.50), é possível identificar que

$$E\{e_{k-1} e_{k-1}^T\} = E\{(x_k - \hat{x}_{k|k-1})(x_k - \hat{x}_{k|k-1})^T\}, \quad (2.51)$$

que nada mais é do que a própria covariância,

$$P_{k-1} = E\{e_{k-1} e_{k-1}^T\} = E\{(x_k - \hat{x}_{k|k-1})(x_k - \hat{x}_{k|k-1})^T\}. \quad (2.52)$$

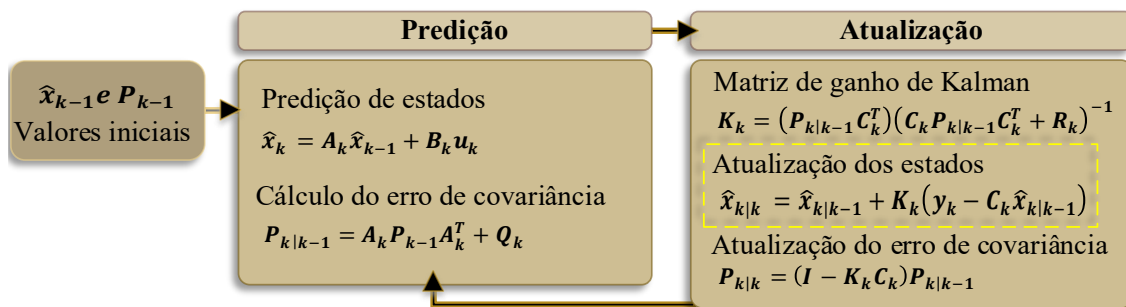
Então, a relação final para obtenção do espalhamento estatístico do erro, considerando a relação Q_k , vista anteriormente, é apresentada em (2.53).

$$P_{k|k-1} = A_k E\{P_{k-1}\} A_k^T + Q_k \quad (2.53)$$

Nota-se a interdependência da covariância do erro com ele mesmo. Outro ponto interessante de destacar é que essa equação por si só com o passar do tempo tende a aumentar o erro, uma vez que a relação Q_k positiva é somada a cada atualização. Propor um ganho capaz de fazer o erro de covariância tender a zero ($P_k \rightarrow 0$) foi a grande contribuição de Kalman.

A atualização dos estados descrita pela equação destacada na Figura 2.22, busca compensar o erro por meio de um agente corretor proporcional associada a leitura do sensor y_k e seu valor médio z_k , somando tal diferença ao valor médio estimado $\hat{x}_{k|k-1}$.

Figura 2.22 – Algoritmo do filtro de Kalman destaque da atualização dos estados.



Fonte: Adaptado de Kalman (1960).

Sendo y_k e z_k descritos pelas equações (2.54) e (2.55), respectivamente.

$$y_k = C_k x_k + \vartheta_k \quad (2.54)$$

$$z_k = C_k \hat{x}_{k|k-1} \quad (2.55)$$

O erro entre variáveis medidas e estimadas precisa ser compensado, sendo assim, uma correção Ψ_k proporcional a diferença entre y_k e z_k é aplicável, (2.56).

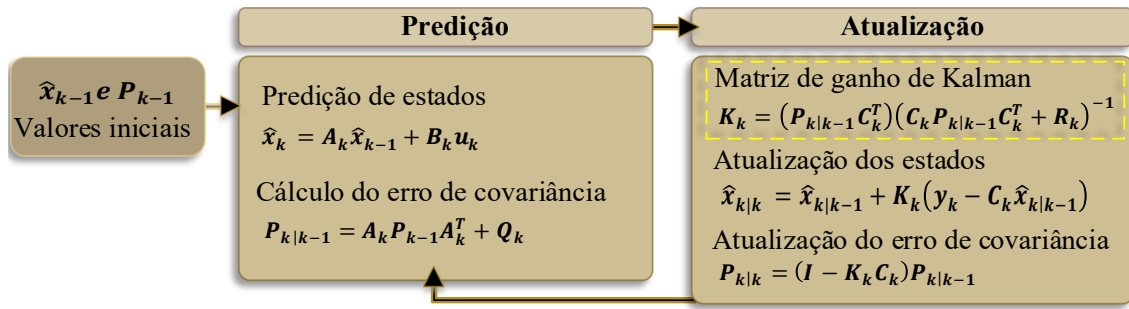
$$\Psi_k = K_k (y_k - z_k) \quad (2.56)$$

O ganho K_k responsável por eliminar os erros ϑ do sensor y_k , “movimenta” assim a média $\hat{x}_{k|k-1}$ para os verdadeiros valores de x_k do sistema obtidos em y_k , ($\vartheta \rightarrow 0$), equação (2.57).

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - z_k) \quad (2.57)$$

A equação que determina o ganho de Kalman (K_k) a cada iteração está destacada na Figura 2.23. K_k precisa garantir que a covariância (espalhamento) entre o sistema real e a média corrigida diminua com o passar do tempo k , garantido que o erro tenda a zero, $P_k \rightarrow 0$.

Figura 2.23 – Algoritmo do filtro de Kalman destaque da matriz do ganho de Kalman.



Fonte: Adaptado de Kalman (1960).

Agora, será calculado o erro de covariância entre o sistema fornecida pela medição e a média corrigida calculada. Dessa forma o erro passa a ser expresso conforme equação (2.58) e não pela relação apresentada na equação (2.39), em que se usava do valor antes da correção, $\hat{x}_{k|k-1}$.

$$\eta_k = x_k - \hat{x}_{k|k} \quad (2.58)$$

Para calcular o erro de covariância a partir da relação (2.58), é necessário começar por algumas manipulações válidas a equação de erro η_k . Começando com a substituição nesta equação pela relação (2.57), resultando em

$$\eta_k = x_k - [\hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - z_k)]. \quad (2.59)$$

Expandindo a equação de erro η_k com as relações (2.54) e (2.55), então

$$\eta_k = x_k - [\hat{x}_{k|k-1} + K_k (C_k x_k + \vartheta_k - C_k \hat{x}_{k|k-1})]. \quad (2.60)$$

Aplicando a distributiva

$$\eta_k = x_k - (\hat{x}_{k|k-1} + K_k C_k x_k + K_k \vartheta_k - K_k C_k \hat{x}_{k|k-1}). \quad (2.61)$$

Associando uma matriz identidade I aos estados,

$$\eta_k = I x_k - I \hat{x}_{k|k-1} - K_k C_k x_k - K_k \vartheta_k + K_k C_k \hat{x}_{k|k-1}. \quad (2.62)$$

Agrupando os termos x_k e $\hat{x}_{k|k-1}$:

$$\eta_k = (I - K_k C_k) x_k - (I - K_k C_k) \hat{x}_{k|k-1} - K_k \vartheta_k. \quad (2.63)$$

Sendo que a equação (2.63) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\eta_k = (I - K_k C_k)(x_k - \hat{x}_{k|k-1}) - K_k \vartheta_k. \quad (2.64)$$

Considerando a igualdade (2.39), tem-se então:

$$\eta_k = (I - K_k C_k)e_k - K_k \vartheta_k \quad (2.65)$$

Relembrando que

$$\text{cov}(e_k) = E\{e_k e_k^T\} = P_{k|k-1} \quad (2.66)$$

Onde $\text{cov}(e_k)$ é a covariância do erro e . De forma análoga, a covariância para o caso da média corrigida, tem-se:

$$\text{cov}(\eta_k) = E\{\eta_k \eta_k^T\} = P_{k|k} \quad (2.67)$$

Sendo então a covariância no caso da média corrigida

$$P_{k|k} = E\{\eta_k \eta_k^T\} \quad (2.68)$$

A substituição da expressão (2.65) se torna natural.

$$P_{k|k} = E\left\{((I - K_k C_k)e_k - K_k \vartheta_k)((I - K_k C_k)e_k - K_k \vartheta_k)^T\right\} \quad (2.69)$$

$$P_{k|k} = E\left\{((I - K_k C_k)e_k - K_k \vartheta_k)(e_k^T (I - C_k^T K_k^T) - K_k^T \vartheta_k^T)\right\} \quad (2.70)$$

Distribuindo os termos, tem-se:

$$P_{k|k} = E\left\{(I - K_k C_k)e_k e_k^T (I - C_k^T K_k^T) - (I - K_k C_k)e_k K_k^T \vartheta_k^T - K_k \vartheta_k e_k^T (I - C_k^T K_k^T) + K_k \vartheta_k K_k^T \vartheta_k^T\right\}. \quad (2.71)$$

Separando as médias,

$$P_{k|k} = E\{(I - K_k C_k)e_k e_k^T (I - C_k^T K_k^T)\} - E\{(I - K_k C_k)e_k K_k^T \vartheta_k^T\} - E\{K_k \vartheta_k e_k^T (I - C_k^T K_k^T)\} + E\{K_k \vartheta_k K_k^T \vartheta_k^T\}. \quad (2.72)$$

Retirando da média os termos,

$$P_{k|k} = (I - K_k C_k) E\{e_k e_k^T\} (I - C_k^T K_k^T) - (I - K_k C_k) E\{e_k \vartheta_k^T\} K_k^T - K_k E\{\vartheta_k e_k^T\} (I - C_k^T K_k^T) + K_k E\{\vartheta_k \vartheta_k^T\} K_k^T. \quad (2.73)$$

Como as variáveis aleatórias são descorrelacionadas, chega-se a

$$P_{k|k} = (I - K_k C_k) E\{e_k e_k^T\} (I - C_k^T K_k^T) - (I - K_k C_k) E\{e_k\} E\{\vartheta_k^T\} K_k^T - K_k E\{\vartheta_k\} E\{e_k^T\} (I - C_k^T K_k^T) + K_k E\{\vartheta_k \vartheta_k^T\} K_k^T. \quad (2.74)$$

Recapitulando as relações

$$E\{e_k e_k^T\} = P_{k|k-1}, \quad E\{\vartheta_k \vartheta_k^T\} = R_k, \quad E\{\vartheta_k\} = 0. \quad (2.75)$$

Aplicando as relações na expressão (2.74), chega-se a

$$P_{k|k} = (I - K_k C_k) P_{k|k-1} (I - C_k^T K_k^T) - 0 - 0 + K_k R_k K_k^T. \quad (2.76)$$

Expandindo a equação (2.76), obtém-se:

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - P_{k|k-1} C_k^T K_k^T - K_k C_k P_{k|k-1} + K_k C_k P_{k|k-1} C_k^T K_k^T + K_k R_k K_k^T. \quad (2.77)$$

Por definição toda matriz de covariância apresenta simetria ($P = P^T$). Então agrupando os termos comum da equação (2.77), finalmente obtém-se relação para a covariância da média corrigida $P_{k|k}$, (2.78).

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - (K_k C_k P_{k|k-1})^T - K_k C_k P_{k|k-1} + K_k (C_k P_{k|k-1} C_k^T + R_k) K_k^T \quad (2.78)$$

Sendo $P_{k|k}$ a matriz de covariância do erro η_k , que tem por característica ser o erro quadrático de η_k . Isso significa que a matriz $P_{k|k}$ tem em sua diagonal principal os erros quadráticos médios entre x_k e $-\hat{x}_{k|k}$.

Resta ainda determinar qual é o valor de K_k e para obter tal valor, Kalman valeu-se da teoria dos mínimos quadradas proposta por Carl F. Gauss. Isso porque a equação (2.78) tem no ganho de interesse K_k um comportamento quadrático ($K_k K_k^T$) que possibilita a aplicação de mínimos quadrados para solução.

Ao se constatar que o traço¹ da matriz $P_{k|k}$ possui os erros quadráticos médio de todas as variáveis envolvidas, dado que os erros são descorrelacionados, obtém-se uma função capaz de ser resolvida por mínimos quadrados. Na relação (2.79) é calculado o traço da matriz de covariância $P_{k|k}$.

$$T_r(P_{k|k}) = T_r \left[P_{k|k-1} - (K_k C_k P_{k|k-1})^T - K_k C_k P_{k|k-1} + K_k (C_k P_{k|k-1} C_k^T + R_k) K_k^T \right] \quad (2.79)$$

Sendo o traço uma operação linear, a seguinte distribuição é válida.

$$\begin{aligned} T_r(P_{k|k}) &= T_r(P_{k|k-1}) - T_r \left((K_k C_k P_{k|k-1})^T \right) - T_r(K_k C_k P_{k|k-1}) \\ &\quad + T_r(K_k (C_k P_{k|k-1} C_k^T + R_k) K_k^T) \end{aligned} \quad (2.80)$$

Como o traço de uma matriz transposta é igual à da matriz original, a equação (2.80) pode assumir a representação (2.81).

$$T_r(P_{k|k}) = T_r(P_{k|k-1}) - 2T_r(K_k C_k P_{k|k-1}) + T_r(K_k (C_k P_{k|k-1} C_k^T + R_k) K_k^T) \quad (2.81)$$

Aplicando Mínimos Quadrados, efetua-se a derivada da função de erro quadrático médio $T_r(P_{k|k})$ e encontra-se a inclinação nula, com relação à variável de interesse K_k , descrita por:

$$\frac{\partial T_r(P_{k|k})}{\partial K_k} = 0. \quad (2.82)$$

Aplicando a derivada na função (2.81), tem-se

$$\frac{\partial T_r(P_{k|k})}{\partial K_k} = -2(C_k P_{k|k-1})^T + 2K_k (C_k P_{k|k-1} C_k^T + R_k) = 0. \quad (2.83)$$

Finalmente, isolando K_k da equação (2.83), determina-se o ganho de Kalman.

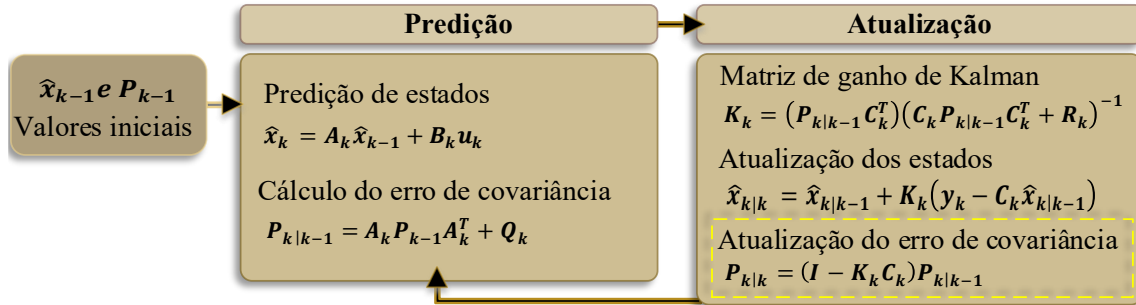
$$K_k = (P_{k|k-1} C_k^T) (C_k P_{k|k-1} C_k^T + R_k)^{-1} \quad (2.84)$$

Por meio da equação (2.84) se obtém a solução ótima que minimiza o erro η_k , apresentado na equação (2.58), ou seja, $\eta_k \rightarrow 0$ e $\hat{x}_{k|k} \rightarrow x_k$.

¹ Traço: é a soma da diagonal principal de uma matriz, onde estão todas as incertezas relativas a cada um dos estados do sistema.

Definido o ganho K_k e atualizado os estados, falta atualizar o erro de covariância, equação destacada na Figura 2.24. Essa atualização indicará ao algoritmo a redução do valor de K_k , uma vez que acompanha o erro que está corrigindo.

Figura 2.24 – Algoritmo do filtro de Kalman destaque da atualização do erro de covariância.



Fonte: Adaptado de Kalman (1960).

Partido da solução do ganho de Kalman é possível simplificar $P_{k|k}$ apresentada na equação (2.78), reescrita abaixo por conveniência textual.

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - (K_k C_k P_{k|k-1})^T - K_k C_k P_{k|k-1} + K_k (C_k P_{k|k-1} C_k^T + R_k) K_k^T \quad (2.85)$$

Dada a extensão da equação, será criado um termo auxiliar S_k que equivale ao termo (2.86). Com a utilização de S_k em relação (2.85), chega-se à expressão (2.87).

$$S_k = (C_k P_{k|k-1} C_k^T + R_k) \quad (2.86)$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - (K_k^T C_k^T P_{k|k-1})^T - K_k C_k P_{k|k-1} + K_k (S_k) K_k^T \quad (2.87)$$

Sendo válida a igualdade (2.88), então a relação (2.87) pode ser escrita conforme (2.89).

$$(C_k^T P_{k|k-1})^T = P_{k|k-1} C_k^T \quad (2.88)$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - P_{k|k-1} K_k^T C_k^T - K_k C_k P_{k|k-1} + K_k S_k K_k^T \quad (2.89)$$

Partindo da igualdade apresentada em (2.83), pode-se afirmar (2.90).

$$(C_k^T P_{k|k-1})^T = K_k S_k \quad (2.90)$$

Assim $P_{k|k}$ pode ser descrito por (2.91) e assumir a simplificação (2.92).

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k S_k K_k^T - K_k C_k P_{k|k-1} + K_k S_k K_k^T \quad (2.91)$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k C_k P_{k|k-1} \quad (2.92)$$

Finalmente, reagrupando os termos comuns, obtém-se a equação (2.93), responsável por atualizar o erro de covariância.

$$P_{k|k} = (I - K_k C_k) P_{k|k-1} \quad (2.93)$$

Como a célula de íon de lítio é um sistema não linear, significa que uma linearização precisa ser efetuada para empregar as equações deduzidas, esse processo gera o filtro de Kalman estendido (EKF). O EKF lineariza funções em torno da média e da covariância atual. Um sistema não linear pode ser descrito por um modelo de espaço de estados, apresentados nas relações (2.94) e (2.95).

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + \omega_k \quad (2.94)$$

$$y_k = h(x_k, u_k) + \vartheta_k \quad (2.95)$$

As não linearidades são aproximadas no EKF usando linearização por meio da expansão de Taylor de primeira ordem.

$$A_{k-1} = \left. \frac{\partial f(x_{k-1}, u_{k-1})}{\partial x_{k-1}} \right|_{x_{k-1}, u_{k-1}} \quad e \quad B_{k-1} = \left. \frac{\partial f(x_{k-1}, u_{k-1})}{\partial u_{k-1}} \right|_{x_{k-1}, u_{k-1}} \quad (2.96)$$

$$C_k = \left. \frac{\partial h(x_k, u_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k, u_k} \quad e \quad D_k = \left. \frac{\partial h(x_k, u_k)}{\partial u_k} \right|_{u_k, u_k} \quad (2.97)$$

onde A_{k-1} e B_{k-1} são definidas como matrizes Jacobianas de derivadas parciais de f em relação a x_{k-1} e u_{k-1} , e C_k e D_k são definidas como matrizes Jacobianas de derivadas parciais de h em relação a x_k e u_k . Assim as matrizes dos coeficientes definidas a partir das equações que descrevem a dinâmica da célula, assumem a forma apresentada em (2.98) e (2.99).

$$\begin{bmatrix} SoC[k+1] \\ V_1[k+1] \\ V_2[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\frac{-\Delta t}{C_1 R_1}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{\frac{-\Delta t}{C_2 R_2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} SoC[k] \\ V_1[k] \\ V_2[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-\Delta t}{C_n} \\ R_1 \left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{R_1 C_1}}\right) \\ R_2 \left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{R_2 C_2}}\right) \end{bmatrix} \cdot I_{cell}[k] \quad (2.98)$$

$$V_{cell}[k] = \left[\frac{\partial V_{oc}}{\partial SoC} \Big|_{SoC=SoC_k|k} \quad -1 \quad -1 \right] \begin{bmatrix} 1 \\ V_1[k] \\ V_2[k] \end{bmatrix} + [R_s] I_{cell}[k] \quad (2.99)$$

Uma vez que as características de estado e ruído de medição são consideradas no EKF, esse método de estimativa do SoC alcança forte imunidade a ruído. É importante notar que o V_{oc} da bateria pode afetar a estimativa de estado através da matriz de ganho de Kalman. A matriz de ganho K é atualizada pela matriz Jacobiana C, que é atualizada pelo V_{oc} da célula, conforme equação (2.99). Assim, a relação entre o V_{oc} da célula e o SoC desempenha um papel significativo na estimativa do SoC baseada em EKF. Como resultado, um modelo da célula inexato ou inadequado levará a estimativas irrealistas (XIONG *et al.*, 2018).

2.3 CARGA ELETRÔNICA

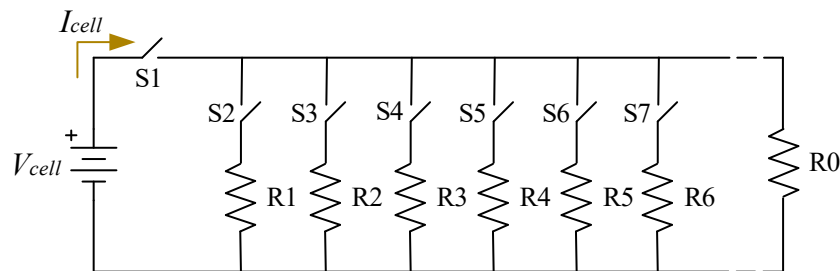
Como apresentado no item 2.1.1, os ensaios experimentais são fundamentais para determinar um bom modelo de circuito equivalente da célula de bateria em que se almeja estimar seu estado de carga. Para realizar os ensaios é necessário controlar de forma rigorosa a carga e a descarga da célula. Fontes CC de maior potência são um item básico que compõem um laboratório de eletrônica de potência, de forma que a etapa de carga pode ser efetuada com um bom desempenho por fontes. Em contrapartida, cargas com o rigor necessário para os ensaios de descarga tem disponibilidade menor.

A seguir são apresentadas as formas mais comuns de cargas que podem ser aplicadas para a descarga de células de baterias. Sendo que, para esta aplicação uma boa carga CC deve apresentar uma taxa de variação da corrente de carga (dI/dt) que seja mais alta possível, com corrente de carga precisamente ajustável, uma capacidade de dissipação de alta potência, tanto de pico quanto contínua, e uma capacidade de monitorar a corrente de carga com alta fidelidade bem como a tensão (LARSON, 2020).

2.3.1 Carga Resistiva

O tipo de carga mais simples é um resistor de potência. Se dimensionado e refrigerado corretamente, pode satisfazer o requisito de alta dissipação de energia e a corrente pode ser monitorada diretamente medindo a tensão através da resistência conhecida. Adicionar um interruptor em série torna possível gerar um transiente de carga. No entanto, a carga estará totalmente ligada ou completamente desligada. A taxa de variação atual não pode ser controlada nem ajustada, exemplo de carga resistiva na Figura 2.25, além das resistências sofrer variações em seu valor causadas por temperatura conforme corrente de descarga. Claramente, esta não é uma solução flexível que pode ser adaptada a uma ampla gama de requisitos de teste (DURAN *et al.*, 2008).

Figura 2.25 – Carga resistiva conectada a bateria.



Fonte: Adaptado de Duran *et al.*, (2008).

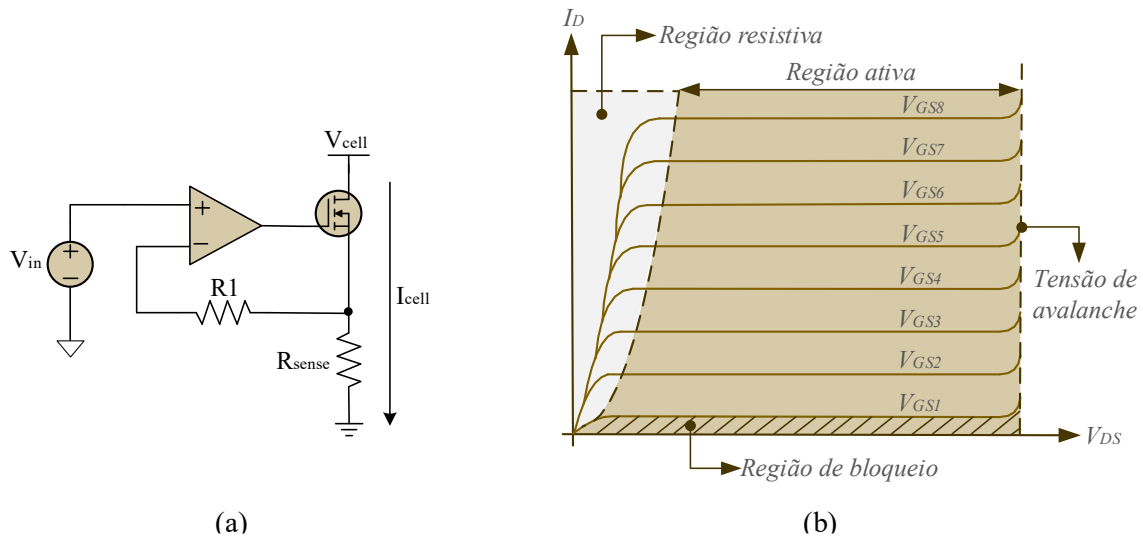
2.3.2 Carga ativa

Para fornecer carga variável e taxa de variação de corrente controlável, ou seja, a taxa na qual a corrente de carga aumenta e diminui, um circuito ativo de dissipação de corrente pode ser desenvolvido por um MOSFET operando na região linear associado a um amplificador operacional.

A topologia do circuito ativo de dissipação de corrente é mostrada na Figura 2.26(a), onde um amplificador operacional aciona o *gate* de um MOSFET de potência para estabelecer uma tensão controlada através de um resistor de detecção (R_{sense}). Isso resulta em uma corrente de carga controlada que flui do *drain* para o *source* do MOSFET e através do resistor de detecção para o terra. O MOSFET de potência adiciona ganho de corrente, mas não adiciona ganho de tensão porque está operando como um amplificador de dreno comum, também conhecido como seguidor de tensão. Analisando as características tensão-corrente de um transistor MOSFET, conforme Figura 2.26(b), é possível compreender que para cada valor de tensão *gate-source* (V_{GS}) tem-se uma corrente de *drain* associada (I_D), independente da tensão

dreno-source (V_{DS}) (desde que uma tensão mínima seja aplicada (*threshold voltage*)) (LARSON, 2020).

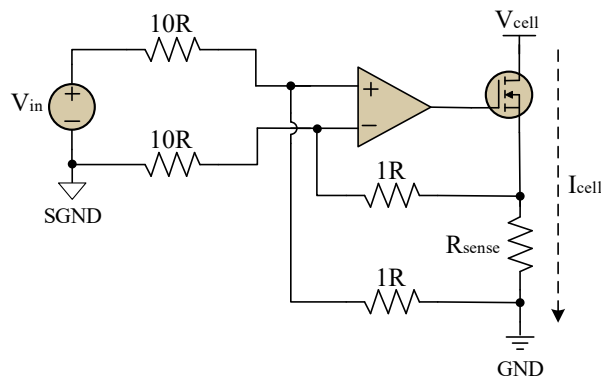
Figura 2.26 – Circuito dissipador de corrente ativo básico (a) e Característica tensão-corrente do transistor MOSFET (b).



Fonte: Adaptado de Martins (2018) e Larson (2020).

Uma implementação prática de um circuito dissipador de corrente ativo, com um MOSFET de canal N, é mostrada na Figura 2.27. Este circuito é uma junção do dissipador de corrente simples da Figura 2.26(a) e um amplificador diferencial. Essa topologia melhora a precisão considerando as diferenças dinâmicas e estáticas no potencial de terra entre o sinal de entrada (SGND) e o lado inferior do resistor de detecção (GND). A corrente de carga desenvolvida por este circuito é proporcional à tensão de um sinal de controle (V_{in}), com ganho definido pela relação entre as resistências de entrada e de ajuste de ganho (LARSON, 2020; MARTINS, 2018).

Figura 2.27 – Circuito dissipador de corrente ativo com amplificador diferencial.

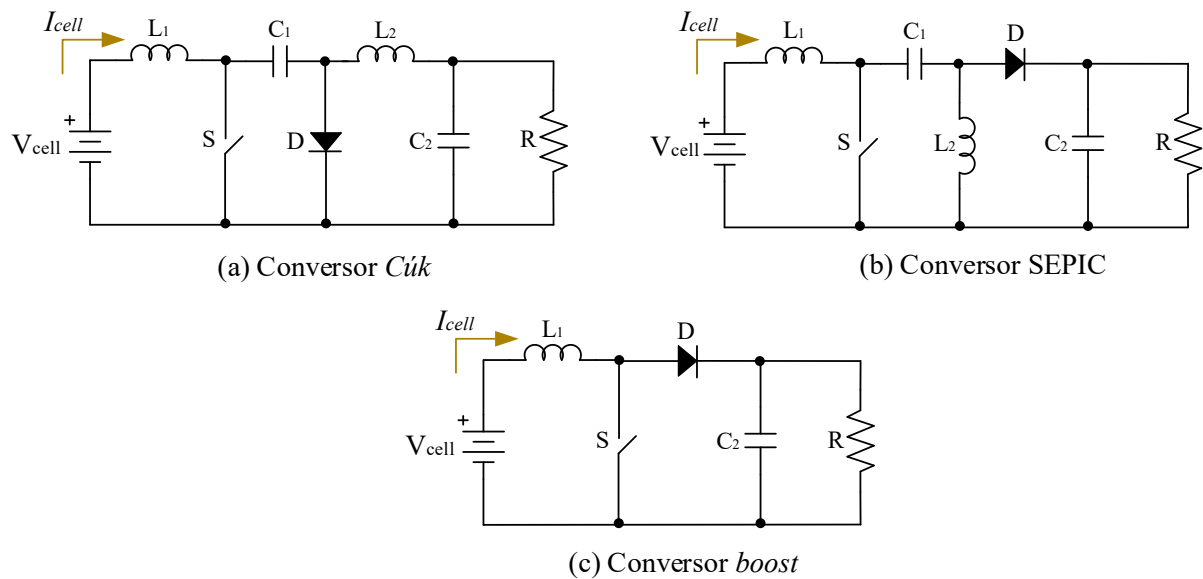


Fonte: Adaptado de Larson (2020).

2.3.3 Conversores CC-CC

Os conversores CC-CC também podem ser utilizados como carga. Todas as topologias de conversores CC-CC que apresentem características de corrente constante na entrada, devido ao indutor em série na entrada, podem ser utilizadas. Exemplos de conversores CC com essa característica são apontados na Figura 2.29 (HU *et al.*, 2014). A modelagem dos conversores é amplamente descrita na literatura como nos estudos de Martins e Barbi (2011) e Hart (2012).

Figura 2.29 – Topologias básicas de conversores CC-CC não isolados.



Fonte: Adaptado de Martins e Barbi (2011).

Dados os princípios de operação dos conversores CC-CC, existirá uma ondulação na corrente do indutor de entrada inerente ao chaveamento dos semicondutores, que impacta diretamente nas leituras de corrente e tensão. Outro ponto limitante é a tensão de operação, em ensaios com células de baterias as tensões estão abaixo de 5 V, e com as demandas de altas correntes, soluções baseadas em conversores CC-CC tornam-se muito desafiadoras (MARTINS; BARBI, 2011; DURAN *et al.*, 2011; LARSON, 2020).

2.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou uma revisão da literatura para obtenção da estimativa de estado de carga de células de íon de lítio, com foco na obtenção das equações que compreendem o filtro de Kalman estendido. Apresentando com ênfase as deduções matemáticas das equações do filtro de Kalman.

Como os métodos baseados em modelo funcionam a partir de modelagem por circuito elétrico equivalente, o capítulo também apresentou uma revisão deste tópico. Bem como, diferentes tipos de cargas complementam a revisão, dada a sua relevância na determinação dos parâmetros que compõem a modelagem da célula.

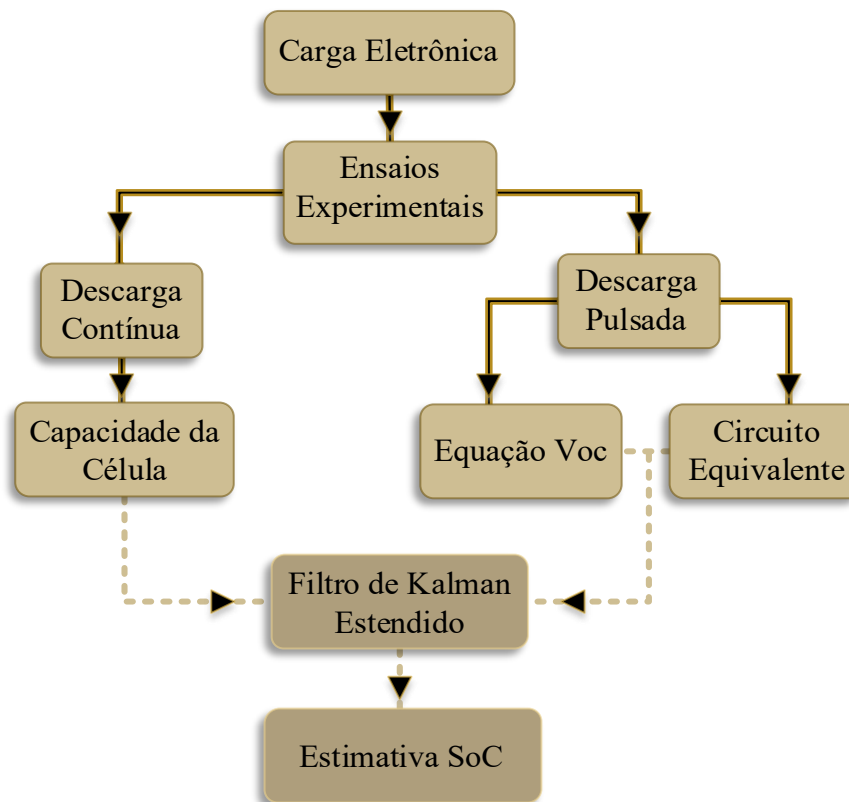
Com essa explanação, conclui-se a etapa de revisão e no próximo capítulo é apresentada a metodologia empregada na obtenção dos resultados.

3 PROJETOS DOS SISTEMAS DE ENSAIOS E TESTES

Foi definido o filtro de Kalman estendido como método de estimação do estado de carga e a determinação dos parâmetros que englobam o circuito elétrico equivalente por análise pulsada. Dessa forma, uma carga eletrônica ativa atenderá a demanda de ensaio requerido pelo método.

Dois estágios básicos são necessários para implementar a estimativa do estado de carga, utilizando EKF: a obtenção do modelo de circuito equivalente e o desenvolvimento do algoritmo de estimação. Ambos os estágios dependem diretamente de dados reais da célula. O diagrama apresentado na Figura 3.1 ilustra uma visão geral para estimar o SoC a partir dos dados coletados pela carga eletrônica ativa.

Figura 3.1 – Diagrama obtenção dos dados por carga eletrônica ativa para estimativa do SoC.



Fonte: Elaborada pela autora.

Este capítulo tem como objetivo principal o dimensionamento do circuito de ensaio da carga eletrônica ativa. Visando a implementação prática, serão definidos os circuitos auxiliares, componentes comerciais, materiais para construção do protótipo e as especificações da célula de bateria.

Também será apresentada a descrição da metodologia empregada nos ensaios experimentais e um modelo de simulação de estimativa do SoC.

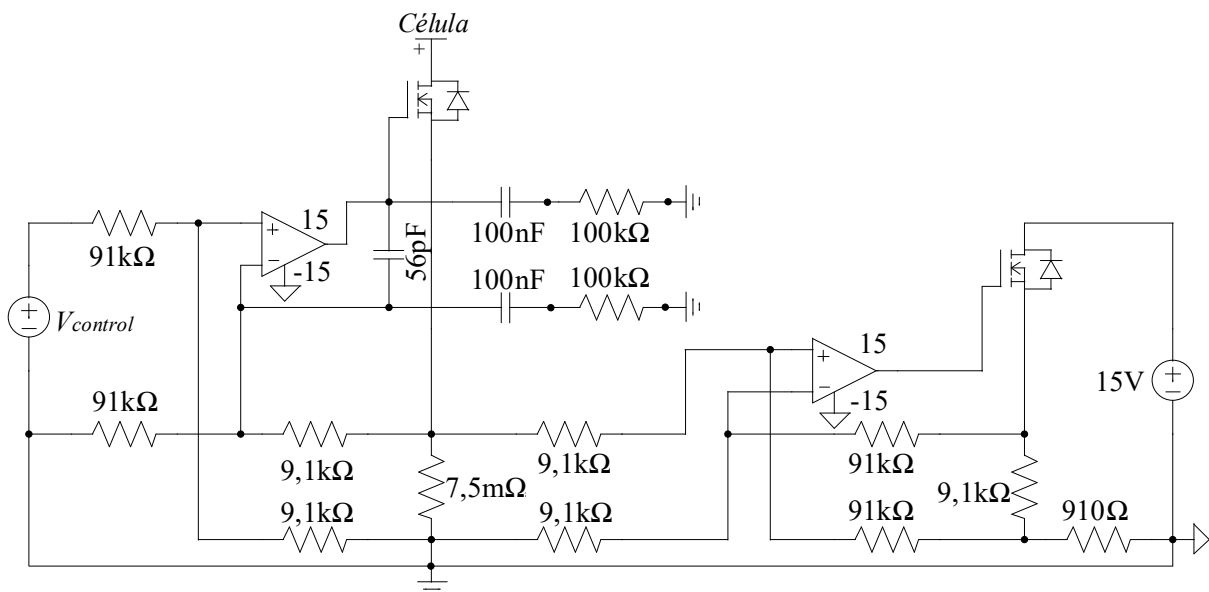
3.1 PROJETO DO CIRCUITO DA CARGA ELETRÔNICA ATIVA

Para atender os requisitos de ensaio das células de bateria cotadas, considerou-se uma tensão de operação máxima de 4,2 V e uma corrente de operação máxima de 90 A. A potência máxima associada ao projeto é de 378 W. Dentro dessa capacidade de dissipação é possível testar uma ampla gama de células.

O projeto do circuito de ensaios compartilha seu módulo de gerenciamento microcontrolado entre o circuito da carga eletrônica e outras funções. Sendo as funções, a aquisição do sinal de tensão, armazenamento de dados em cartão de memória, entrada de dados de teste por botões, *display* de *feedback* e a leitura de corrente para etapa de carga (nesta etapa o circuito inativa o circuito da carga eletrônica e opera apenas como um registrador de dados – *data logger*).

O projeto de um dos módulos para a carga eletrônica é exibido na Figura 3.2. Dada a corrente elevada de descarga visada no projeto, 4 módulos foram necessários para dissipar a potência de forma efetiva e segura. O projeto completo pode ser analisado no apêndice C. Na sequência são especificados os componentes dos módulos.

Figura 3.2 – Projeto esquemático da carga eletrônica ativa.



Fonte: Elaborada pela autora.

3.1.1 MOSFET de potência

O transistor de potência deve ser escolhido de forma a fornecer uma resposta rápida e, ao mesmo tempo, suportar alta dissipação de energia. Várias características elétricas e térmicas devem ser consideradas:

Capacitância *Gate Charge*: Para modular a corrente que flui através do MOSFET com boa estabilidade e alta largura de banda, o amplificador operacional deve ser capaz de alterar rapidamente a tensão *gate charge*. Um MOSFET com altas capacitâncias *gate-source* e *gate-drain* (Q_{GS} e Q_{GD} , respectivamente) exigirá uma corrente de acionamento mais alta para atingir a taxa de variação desejada.

Tensão *Drain-Source* (V_{DS}): deve ser alta o suficiente para suportar a tensão da célula, incluindo quaisquer picos transitórios ou superação. A maioria dos MOSFETs de potência são classificados para de 12 V, 25 V, 30 V ou mais, portanto, selecionar um MOSFET com V_{DS} dentro da faixa de tensão para testar células de bateria não é difícil. Em geral, o MOSFET deve ser escolhido com uma classificação V_{DS} que seja de pelo menos 125% da tensão a ser testada.

***Drain Current Rating* (I_D):** o valor de corrente *drain-source* do MOSFET deve ser adequada para passar a corrente de carga desejada. Quando correntes muito elevadas devem ser suportadas, o uso de uma matriz de circuitos dissipadores de corrente paralelos (módulos) facilita a dissipação de energia e os requisitos de I_D para os MOSFETs individuais.

Dissipação de potência: a capacidade de dissipar potência na forma de calor residual em um MOSFET usado em uma carga eletrônica, provavelmente é a característica mais importante. A potência total na carga (P_{carga}) é o produto entre a corrente de carga (I_{carga}) e a tensão da célula (V_{cell}):

$$P_{carga} = I_{carga} V_{cell} \cdot \quad (3.1)$$

Se N circuitos de dissipação de corrente forem operados em paralelo, cada "ramificação" de dissipador de corrente equivale a I_{carga}/N , e a potência total da carga é distribuída mais ou menos uniformemente entre as ramificações.

Uma parte dessa potência é dissipada nos resistores de detecção (P_{sense}) e essa parte varia com o valor eficaz da corrente ao quadrado, conforme equação (3.2).

$$P_{sense} = \left(\frac{I_{carga}}{N} \right)^2 R_{sense} \cdot \quad (3.2)$$

O restante da potência é dissipado no MOSFET (P_{mosfet}), então a potência total dissipada na carga é dada por:

$$P_{carga} = (P_{sense} + P_{mosfet})N. \quad (3.3)$$

E a potência dissipada no MOSFET por:

$$P_{mosfet} = \frac{P_{carga}}{N} - P_{sense}. \quad (3.4)$$

Expandido os termos, a potência dissipada no MOSFET é determinada pela relação (3.5).

$$P_{mosfet} = \frac{(I_{carga}V_{cell})}{N} - \left(\frac{I_{carga}}{N}\right)^2 R_{sense}. \quad (3.5)$$

Dissipação de calor: A capacidade de um MOSFET de dissipar o calor é resumida por dois parâmetros principais: a resistência térmica da junção ao invólucro $R_{\theta JC}$ e a dissipação máxima de potência $P_{D(max)}$.

Além das características de resistência térmica do encapsulamento do dispositivo, a temperatura máxima de junção ($T_{J(max)}$) também deve ser considerada. A maioria dos MOSFETs de potência são classificados para $T_{J(max)} = 150^\circ\text{C}$ a $T_{J(max)} = 175^\circ\text{C}$. A carga eletrônica deve ser projetada de forma que o produto da potência do MOSFET e a resistência térmica da junção ao invólucro, combinado com a temperatura máxima da superfície de montagem do dispositivo (T_c), não exceda $T_{J(max)}$:

$$P_{mosfet} < \frac{(T_{J(max)} - T_c)}{R_{\theta JC}}. \quad (3.6)$$

Dependendo da escolha de incógnitas, essa relação produz a potência máxima permitida em estado estacionário para o MOSFET, ou a temperatura máxima permitida do dissipador de calor na potência máxima desejada em estado estacionário.

Considerando o MOSFET IRFP4868PbF, nas especificações de tensão e corrente do projeto, a potência sobre a chave é descrita na equação (3.7) e a relação da dissipação de potência em relação a dissipação térmica na equação (3.8).

$$P_{mosfet} = \frac{(90 \text{ A} \times 4,2 \text{ V})}{4} - \left(\frac{90 \text{ A}}{4}\right)^2 7,5 \text{ m}\Omega = 90,70 \text{ W} \quad (3.7)$$

$$90,70 \text{ W} < \frac{(T_{J(max)} - 125^{\circ}\text{C})}{0,29^{\circ}\text{C/W}} \quad (3.8)$$

$$T_{J(max)} > 151,30^{\circ}\text{C} \quad (3.9)$$

3.1.2 Resistor de detecção

Espera-se que o resistor de detecção em um circuito dissipador de corrente ativo dissipe uma fração significativa da potência total da carga. O resistor de detecção selecionado precisa, além de suportar a corrente de carga total de cada ramificação paralela do dissipador de corrente, ser capaz de transferir o calor residual rapidamente para a placa de circuito impresso (do inglês *Printed Circuit Board* - PCB) e/ou dissipador de calor. Um bom resistor de detecção terá as seguintes características mecânicas:

- Grande área de conexão elétrica com o cobre do PCB;
- Um encapsulamento que pode ser acoplado ao resfriamento superior (o dissipador de calor) com baixa resistência térmica; e
- Elemento resistivo e materiais de encapsulamento que podem suportar altas temperaturas de operação.

Também é importante selecionar um resistor de detecção com alta precisão, pois tal precisão será estendida à leitura de corrente, usada para determinar os parâmetros do circuito elétrico equivalente. Um resistor de detecção com terminais próprios para medições e alimentação separada também ajuda a melhorar a precisão.

Ao dividir as conexões em um caminho de alta corrente e um caminho de baixa ou nenhuma corrente para detecção, a corrente sendo medida não adiciona mais queda de tensão nas conexões de detecção. Isso é comumente referido como uma conexão Kelvin ou, mais geralmente, como detecção de quatro terminais.

Para evitar a saturação do amplificador na corrente de carga máxima, o projeto deve ter uma resistência em série total ($R_{carga(min)}$) substancialmente menor que a tensão de terminal da célula de bateria dividida pela corrente máxima necessária, conforme equação (3.10).

$$R_{carga(min)} < \frac{V_{cell}}{I_{carga(max)}} < \frac{4,2 \text{ V}}{90 \text{ A}} < 45,67 \text{ m}\Omega \quad (3.10)$$

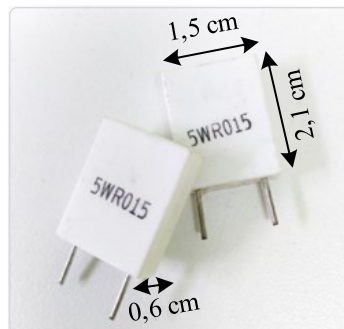
Isso permite que o amplificador operacional mantenha o MOSFET na região linear na corrente máxima demandada.

Dada a escassez de resistores de potência de precisão no mercado nacional, para o projeto da carga eletrônica foi utilizado um resistor cerâmico de 15 mΩ - 5 W, conforme Figura 3.3. Pela baixa capacidade de dissipação de potência, foi empregado dois destes resistores em paralelo para cada MOSFET de potência. Considerando a corrente que passa por um dos quatro módulos ($I_{carga(max)} = 90/4$), sendo dividida em duas nos resistores R_{sense} em paralelo ($I_{carga(max)} = 90/8$), o seguinte cálculo de potência dissipada para um R_{sense} é válido:

$$P_{R_{sense}} = (I_{carga(max)})^2 \times R_{sense} = (11,25 A)^2 \times 15 m\Omega = 1,90 W \quad (3.11)$$

Em termos de dissipação de corrente o resistor é adequado, porém é importante destacar que esses resistores não são de precisão, logo, sofrem com impacto de variação de sua resistência com o aumento da temperatura. Outro ponto a ser considerado é que são resistores do tipo PTH (*Pin Through Hole - PTH*), o que significa que se conectam eletricamente com o PCB em dois *pads* de passagem (um para cada terminal do resistor), o que limita a dissipação de calor e a superfície de contato com a solda.

Figura 3.3 – Resistor cerâmico de detecção 5 W.



Fonte: Elaborada pela autora.

3.1.3 Amplificador operacional

O amplificador operacional deve ter capacidade de saída adequada para acionar a porta do MOSFET, que apresenta uma carga capacitiva para o amplificador operacional. Largura de banda e taxa de variação de tensão também são considerações importantes ao escolher o amplificador operacional, especialmente quando é necessária uma taxa de variação de alta corrente de carga.

A carga eletrônica deve exibir uma resposta linear entre o valor de carga zero até a carga máxima, operando a partir de uma única tensão de alimentação. Assim, o amplificador operacional deve ter capacidade de operar com sinais de entrada próximos aos limites de alimentação positiva e negativa, essa característica é denominada comumente como *rail-to-rail*.

A saída *rail-to-rail* não é necessária porque o MOSFET para de conduzir quando a saída do amplificador operacional é menor que a tensão limite do *gate* $V_{GS(th)}$. No entanto, o amplificador operacional e sua alimentação devem ser escolhidos de forma que o *gate* do MOSFET possa excursionar em tensão o suficiente para atingir a corrente de carga máxima desejada. Isso significa que a tensão de saída do amplificador operacional deve ser capaz de exceder $I_{carga(max)} \times R_{sense} + V_{GS(th)}$.

Essa consideração reduz rapidamente a gama de amplificadores operacionais adequados, porque muitos dispositivos de alimentação única e de alto desempenho são limitados a +5 V de alimentação. A disponibilidade de amplificadores operacionais que podem aceitar uma tensão de alimentação de +12 V ou superior é muito menor.

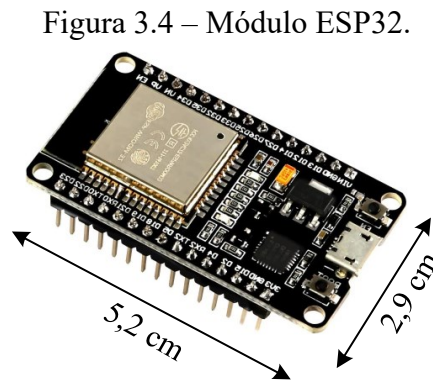
Um amplificador operacional preciso produzirá melhor exatidão à corrente de carga em relação ao sinal de controle de entrada. Baixas tensões de *offset* de entrada podem reduzir ou eliminar *offsets* na corrente de carga, particularmente quando o sinal de controle está em zero volts. Correntes de polarização de entrada baixas permitem o uso de resistências de entrada e de *feedback* mais altas no circuito do amplificador diferencial, o que, por sua vez, melhora a impedância de entrada.

Quanto ao circuito de medição ou monitoramento de corrente, o mesmo pode ser otimizado para precisão ou para velocidade e largura de banda. O primeiro é importante se a carga eletrônica for usada para medições onde a corrente de carga em estado estacionário deve ser conhecida com precisão. O último é importante para a análise da resposta transiente, onde a forma da onda da corrente de carga é crítica para a representação precisa da sua taxa de variação.

O amplificador operacional utilizado no projeto é o OP07, que é um amplificador operacional com tensão de *offset* ultrabaixa. O OP07 apresenta alta linearidade e precisão de ganho, mantidas mesmo em altos ganhos em malha fechada. Também apresenta uma ótima estabilidade ao longo do tempo com relação a variações de temperatura.

3.1.4 Dispositivo de gerenciamento

Para a carga eletrônica ativa funcionar corretamente, um sinal de tensão precisa ser aplicado, além do condicionamento dos sinais da instrumentação. Para tanto, selecionou-se o módulo ESP32, conforme Figura 3.4.



Fonte: Elaborada pela autora.

O módulo ESP32 utiliza o microcontrolador ESP32-WROOM-32D (ESPRESSIF SYSTEMS, 2022), e sua escolha foi definida a partir de seu processamento, que pode alcançar até 600 MIPS (*million instructions per second*) possui recursos como:

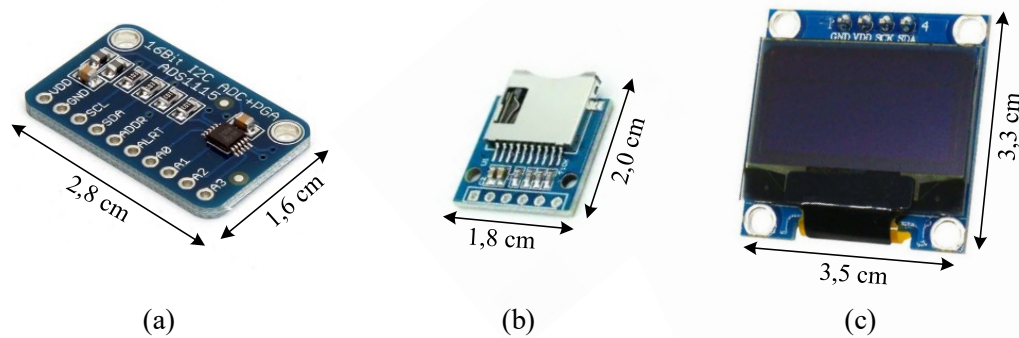
- ADC de 12 *bits*;
- DAC de 8 *bits*;
- 4 *timers* internos;
- 4 MB de memória *flash* para o armazenamento de algoritmo;
- 520 KB de memória RAM para o processamento dos vários cálculos;
- Comunicação serial, I2C e SPI;
- Portas lógicas ajustáveis;
- Dentre outros diversos recursos (*Wi-Fi, Bluetooth*, memória EEPROM externa, além de portas dedicadas para os mais diversos tipos de protocolos de comunicação).

Outra vantagem do módulo ESP32 é a facilidade de uso, dado que pode ser programado utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado do Arduino (IDE – *Integrated Development Environment*), onde diversas bibliotecas e códigos auxiliares de exemplo encontram-se disponíveis para auxílio e consulta. Além disso, o módulo é de fácil acesso e baixo custo, em comparação a outros dispositivos no mercado com características semelhantes.

O módulo ESP32 possui 2 canais ADC internos de 12 bits cada, que podem ser utilizados por diversas portas lógicas do mesmo. No entanto, existem algumas limitações para o uso dos canais de leitura analógica se alguns recursos estiverem sendo utilizados pelo microcontrolador, além de uma sensibilidade alta à ruídos e necessidade de calibração de cada canal (ESPRESSIF SYSTEMS, 2022).

Com as instabilidades relacionadas a leituras analógicas usando os ADCs internos do ESP32, optou-se pela utilização de módulos externos dedicados especificamente para esta finalidade. Os módulos utilizados são ADS1115, que são ADCs com precisão de 16 *bits*, com 4 canais de leitura de alta velocidade utilizando comunicação I2C, detalhes do módulo físico na Figura 3.5(a).

Figura 3.5 – Ilustração do módulo ADS1115 (a), módulo mini *SDcard* (b) e módulo *display* Oled (c).



Fonte: Elaborada pela autora.

Além disso, outros recursos foram adicionados a carga eletrônica. Um módulo *display* Oled 128x64, com intuito de alcançar um *feedback* constante depois da calibração dos sensores, sem a dependência de instrumentação externa constante durante os ensaios, Figura 3.5(c). O módulo Oled se comunica com o ESP32 por meio de comunicação I2C.

O tempo de execução de alguns dos ensaios são longos, de forma que o ESP32 não possui memória interna suficiente para armazenar a grande quantidade de dados. Usando um módulo mini *SDcard* com comunicação SPI, os dados são armazenados diretamente em um cartão de memória. Módulo mini *SDcard* é mostrado na Figura 3.5(b).

Um resumo de alguns dos componentes utilizados no projeto do circuito de teste é apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Definição de componentes carga eletrônica.

Componente	Especificação
MOSFET	IRFP4868PbF
Resistor de detecção	Resistor cerâmico de 15 mΩ - 5 W
Amplificador operacional	OP07
Dispositivo de gerenciamento	Módulo ESP32

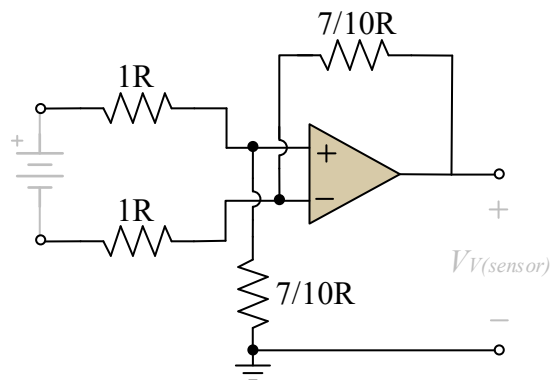
Fonte: Elaborada pela autora.

Outros componentes empregados no projeto da carga eletrônica são:

- Botões tácteis (6x6x5mm), para configurar externamente a corrente de descarga e o fracionamento do tempo de descarga (*time on - time off*) sem necessitar de alterações constantes no código para especificações de ensaios;
- Fusível de vidro de 30 A em série ao dreno do MOSFET de potência e o terminal positivo da célula, para proteger a chave de possíveis surtos de corrente;
- Sensor de corrente ACS713LCTR-30A-T, baseado em efeito Hall com capacidade de leitura de até 30 A, foi utilizado na aquisição de corrente na etapa de carga da célula por fonte;
- MOSFET IRF530 no circuito de aquisição de corrente da carga eletrônica ativa.

Além da aquisição de corrente, é fundamental, para o correto desempenho da carga eletrônica, a leitura da tensão da célula. Um circuito simples de leitura de tensão é apresentado na Figura 3.6, que nada mais é do que um amplificador operacional operando na configuração diferencial. O amplificador operacional selecionado foi o MCP6071-SOIC, que é de alta precisão e *rail-to-rail*, comumente utilizado em aplicações de condicionamento de sensores.

Figura 3.6 – Circuito de aquisição de tensão.



Fonte: Elaborada pela autora.

3.2 ESPECIFICAÇÃO DA CÉLULA DE ÍON DE LÍTIO E DOS ENSAIOS

Para os ensaios experimentais deste trabalho foi selecionada uma célula cilíndrica LTO-66160H-2.3V40Ah da *Yinlong*, ilustrada na Figura 3.7. As especificações técnicas desta célula estão contidas na Tabela 3.2.

Essa célula apresenta ambos os coletores, negativo e positivo, de alumínio. O eletrodo negativo é obviamente de titânio de lítio (LTO), enquanto o eletrodo positivo é de óxido de manganês de lítio (LMO).

Figura 3.7 – Célula cilíndrica LTO-66160H-2.3V40Ah.



Fonte: Adaptado de Yinlong (2016).

De acordo com o fabricante, mediante perfuração, exposição a fogo, sobre carga a célula não apresenta vazamento, incêndio ou explosão, logo, uma das tecnologias que apresenta melhor desempenho em termos de segurança.

Quanto aos ensaios experimentais de descarga, todos foram realizados com a carga eletrônica ativa desenvolvida, sendo os ensaios realizados com a célula completamente carregada. Antes de iniciar a descarga, isto é, entre a carga e a descarga, há um tempo de repouso de 1h. A temperatura também foi controlada, utilizando a câmara climática WK340, temperatura de operação $-70^{\circ}\text{C}/180^{\circ}\text{C}$, da Weiss Umwelttechnik GMBH.

Ensaio com descarga contínua: A célula foi descarregada de forma ininterrupta. Testes com correntes de descarga de $\sim 1\text{C}$ em temperaturas de -5°C , 5°C , 15°C , 25°C , 35°C e 45°C .

Ensaio com descarga pulsada: Realização de três ensaios com tempos e correntes diferentes. Um com corrente de descarga de $\sim 0,45\text{C}$ por 5 minutos e intervalos de descanso de 1 hora e 30 minutos. Um com descargas de corrente de $\sim 1\text{C}$ por 6 minutos e intervalos de descanso de 1 hora e 30 minutos, e um terceiro com corrente de descarga de $\sim 1\text{C}$ por 10 minutos e intervalos

de descanso de 1 hora e 30 minutos. Nos ensaios as temperaturas foram controladas em 5°C, 15°C, 25°C, 35°C e 45°C.

A recarga da célula foi efetuada por meio da fonte CC Magna-Power de 400V – 20A (LS 400- 20/380) e da fonte CC Minipa MPS 3005B de 30V – 5A, aplicando a metodologia de carga baseada na curva CC-CV.

Tabela 3.2 – Especificações técnicas da célula LTO-66160H-2.3V40Ah.

Especificação	Valor
Capacidade	40 Ah
Tensão nominal	2,3 V
Tensão de corte descarga	1,5 V
Tensão limite de carga	2,9 V
Resistência interna	$\leq 0,50 \text{ m}\Omega$
Corrente máxima de carga	400 A
Corrente máxima de descarga	400 A
Energia específica de massa	75 ~ 100 Wh/kg
Volume de energia específica	140 ~ 200 Wh/kg
Temperatura de trabalho	-50 ~ 60°C
Tempo de carga	6 ~ 15 minutos
Ciclo de vida	> 30000 vezes
Taxa de carga/descarga	6 ~ 10C
Performance baixa temperatura	-20°C carga/descarga $\geq 85\%$
Diâmetro x comprimento	66 x 161
Peso	1,22 Kg

Fonte: Adaptado de Yinlong (2016) e Gree (2016).

3.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CIRCUITO EQUIVALENTE

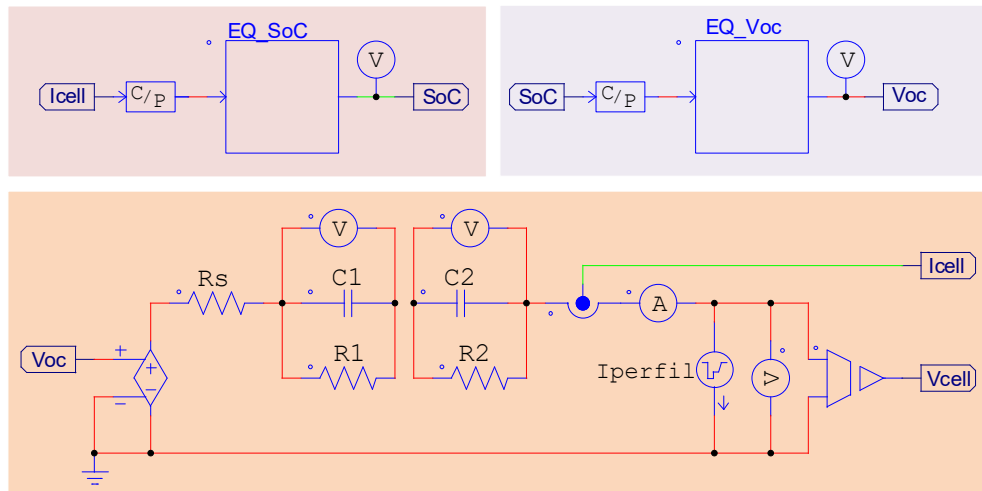
Além de ampliar o entendimento do sistema em estudo, simulações numéricas auxiliam na detecção de falhas do modelo. No desenvolvimento do algoritmo de estimação do estado de carga, é fundamental entender se os resultados obtidos nos ensaios para o circuito equivalente são representativos.

O circuito da carga eletrônica também foi simulado. O circuito é o mesmo apresentado na Figura 3.2 sendo simulado no *software* LTspice®, com os MOSFETs e amplificador

operacional definidos para o projeto. Nessa simulação é analisado e avaliado o possível desempenho dos componentes selecionadas para o projeto da carga eletrônica.

Desenvolveu-se a simulação buscando implementar a estimativa do estado de carga da célula de íon de lítio no *software* PSIM®. Os componentes do modelo de circuito elétrico equivalente são exibidos na Figura 3.8.

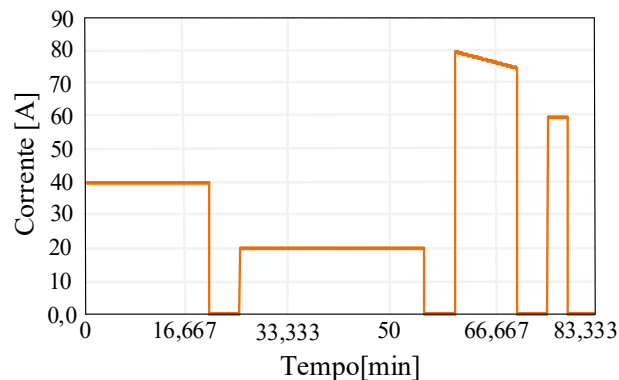
Figura 3.8 – Circuito de teste: modelo de circuito equivalente da célula.



Fonte: Elaborada pela autora.

O circuito conta com dois blocos de código C, onde são implementadas as equações de SoC por contagem de Coulomb e a equação de $V_{oc}(SoC)$. A relação $V_{oc}(SoC)$ controla a fonte de tensão controlada. A corrente que é utilizada pelo bloco C da equação do SoC é medida por um sensor de corrente. A corrente de descarga é imposta por uma fonte de corrente linear particionada. O perfil introduzido na fonte de corrente é demonstrado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Perfil inserido na fonte de corrente linear particionada.

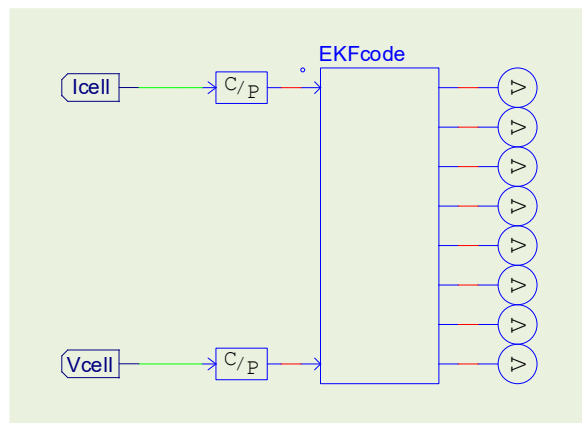


Fonte: Elaborada pela autora.

Um perfil de corrente de descarga semelhante ao da figura é executado pela carga eletrônica ativa nos testes práticos de estimativa do SoC.

Para a estimativa do estado de carga foi desenvolvido em linguagem C, as equações do EKF, conforme Figura 3.10. A simulação auxiliou no desenvolvimento do algoritmo, uma vez que foi testado inicialmente com os parâmetros e equações desenvolvidas no estudo de Chen e Rincón-Mora (2006). A obtenção dos parâmetros do circuito equivalente da célula em estudo serviu para auxiliar na definição das matrizes de covariância (Q_k e R_k) e na matriz de erro covariância P_k .

Figura 3.10 – Circuito de teste: implementação do filtro de Kalman estendido.



Fonte: Elaborada pela autora.

3.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Nesse capítulo foram apresentadas as definições de quais métodos estão sendo utilizados para obtenção da estimativa do SoC nesse trabalho. Isso englobou a definição do projeto da carga eletrônica ativa e seus componentes, a metodologia aplicada nos ensaios e as ferramentas computacionais auxiliares.

A seguir, no capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos a partir das definições de projeto e ferramentas aqui explanadas.

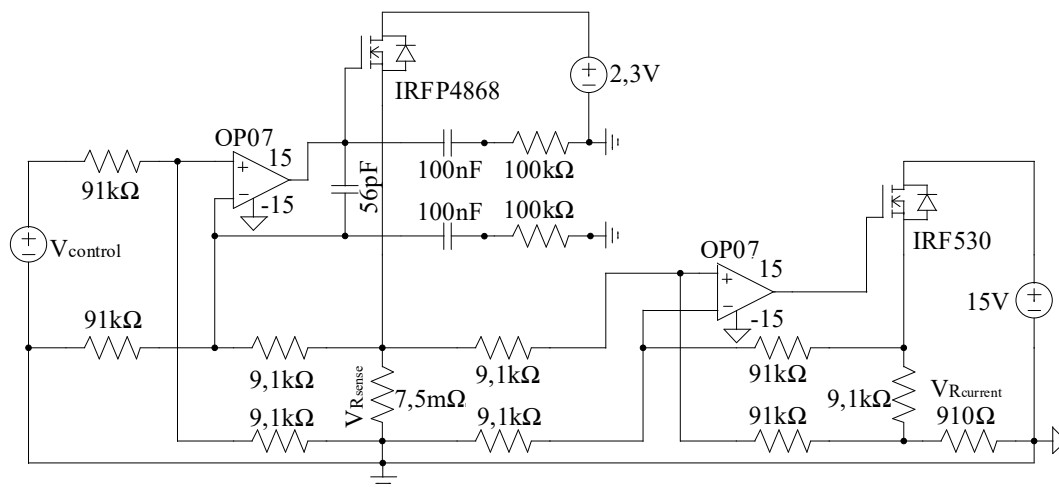
4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAIS

Este capítulo tem por objetivo exibir os resultados obtidos por meio de simulações numéricas e em banca experimental. Inicialmente são apresentados os resultados simulados e de desempenho prático da placa de ensaios e testes. Posteriormente, são expostos os resultados práticos associados aos ensaios de descarga e por fim, os resultados simulados e experimentais para a estimativa do estado de carga.

4.1 PLACA DE ENSAIOS E TESTES

O circuito mais complexo da placa de ensaios e testes é a carga eletrônica ativa, dessa forma seu circuito foi emulado no *software* LTspice®. O circuito simulado está disposto na Figura 4.1, contando apenas com um dos 4 módulos de descarga da célula. Os componentes definidos são os mesmos para o circuito físico, com a relação de resistores definida de forma que a tensão sobre o resistor de detecção fosse 10 vezes menor que a tensão de controle.

Figura 4.1 – Circuito carga eletrônica ativa simulado.

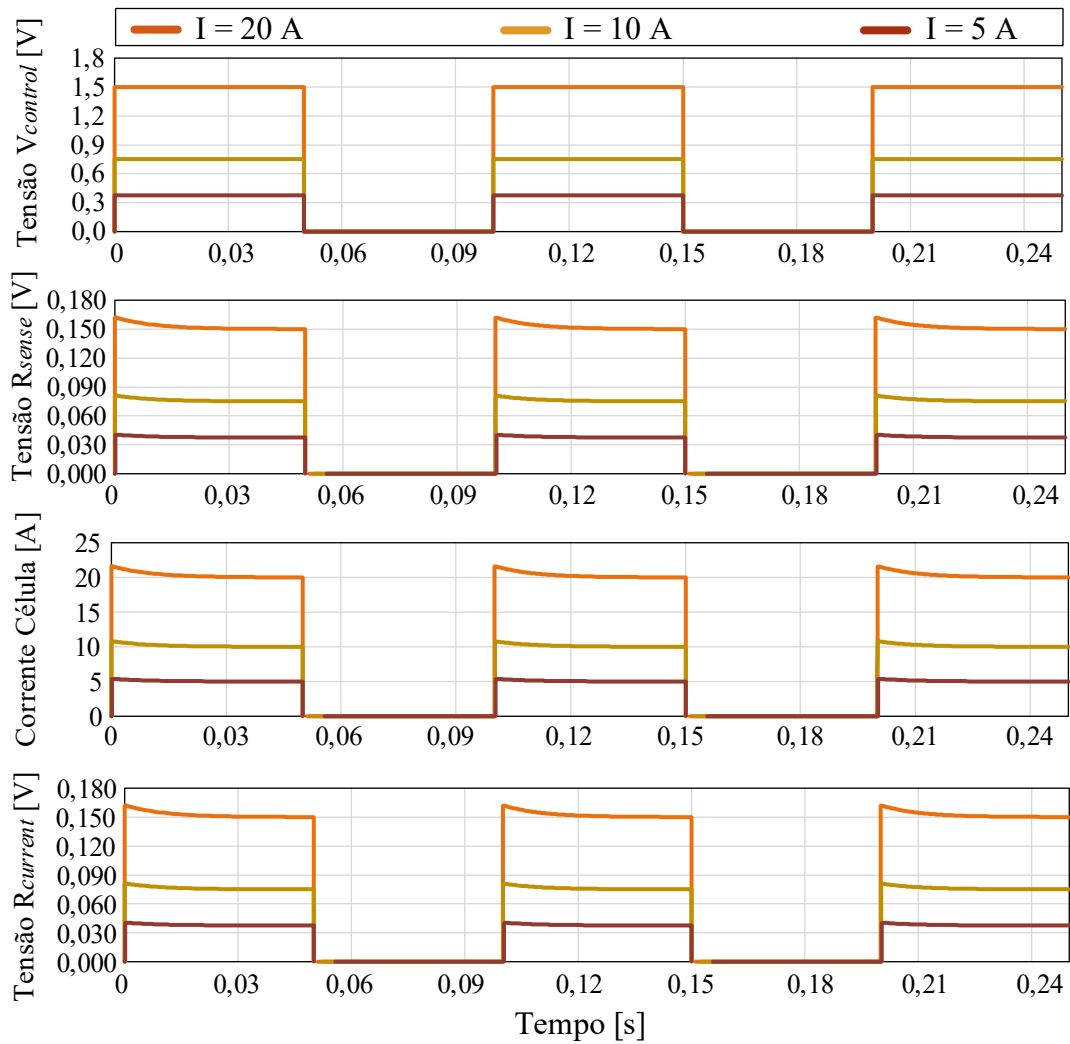


Fonte: Elaborada pela autora.

No circuito um sinal de tensão de controle foi introduzido na forma de onda retangular periódica. O comportamento mediante 3 sinal de tensão de controle distintos, obtido para a corrente sobre MOSFET de potência, a tensão sobre o resistor de detecção e a tensão sobre o resistor de leitura de corrente, são demonstrados na Figura 4.2.

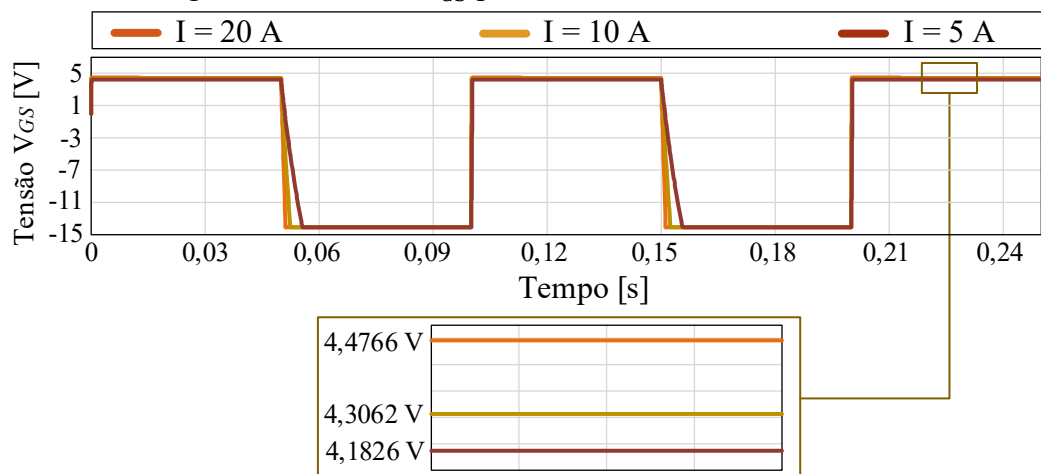
A escolha dos valores de sinal de controle não é aleatória, a soma das correntes dos 4 módulos para as tensões selecionadas resulta em 80 A, 40 A e 20 A, valores atribuídos em muitos ensaios ao longo do trabalho.

Figura 4.2 – Resultado simulado em alguns elementos da carga eletrônica ativa.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.3 – Tensão V_{GS} para 3 sinal de tensão de controle.

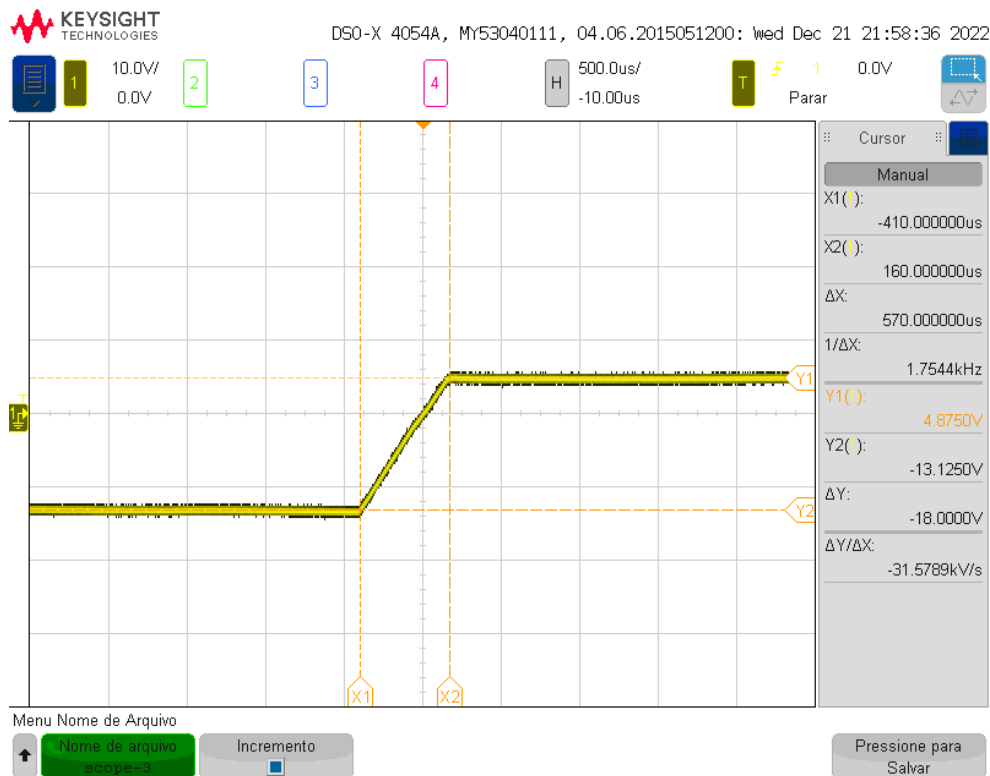


Fonte: Elaborada pela autora.

Das formas de onda obtidas na Figura 4.2 é possível observar uma pequena inércia na corrente da célula, com um tempo de acomodação em torno de 30 ms, mais preponderante na corrente de maior magnitude. As relações de tensão obtidas seguem exatamente a relação imposta pelas resistências selecionadas. Como esperado com base nos cálculos, a tensão sobre o resistor de detecção de potência, $V_{R_{sense}}$, é igual a tensão sobre o resistor de aquisição da corrente, $V_{R_{current}}$, ambas as tensões são 10 vezes menores que a tensão de controle aplicada.

Já na Figura 4.3, tem-se a forma de onda para a tensão entre o *gate* e o *source* do MOSFET. Três valores distintos são associados a cada amplitude de corrente, sendo quanto maior a tensão, maior a corrente. Na Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6, são apresentadas as tensões V_{GS} para o MOSFET IRFP4868PbF implementado em placa associado ao módulo 1 da carga eletrônica desenvolvida. Salientando que o limite de tensão V_{GS} do MOSFET IRFP4868PbF é de ± 20 V. As tensões obtidas são relativamente maiores que as simuladas, não eram esperados valores exatos, dada a grande quantidade de variáveis envolvidas em um projeto prático, mas as tensões tem o comportamento esperado em termos de acréscimo na tensão para gerar o controle na corrente de descarga.

Figura 4.4 – Tensão V_{GS} MOSFET módulo 1 com corrente de 5,502 A.



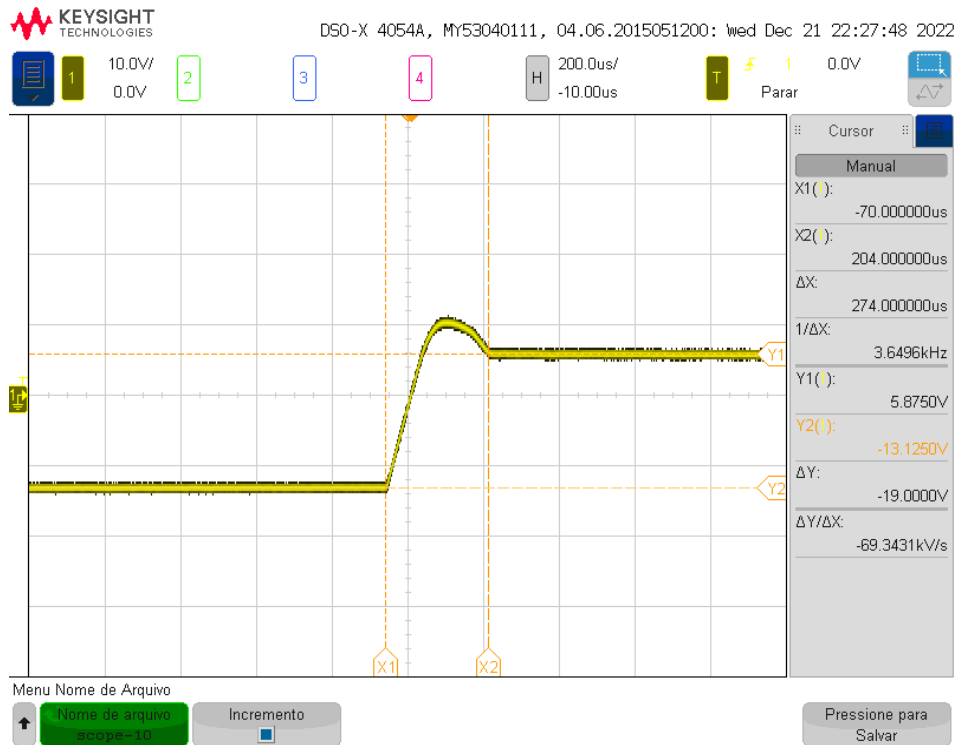
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.5 – Tensão V_{GS} MOSFET módulo 1 com corrente de 9,95 A.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.6 – Tensão V_{GS} MOSFET módulo 1 com corrente de 20,33 A.

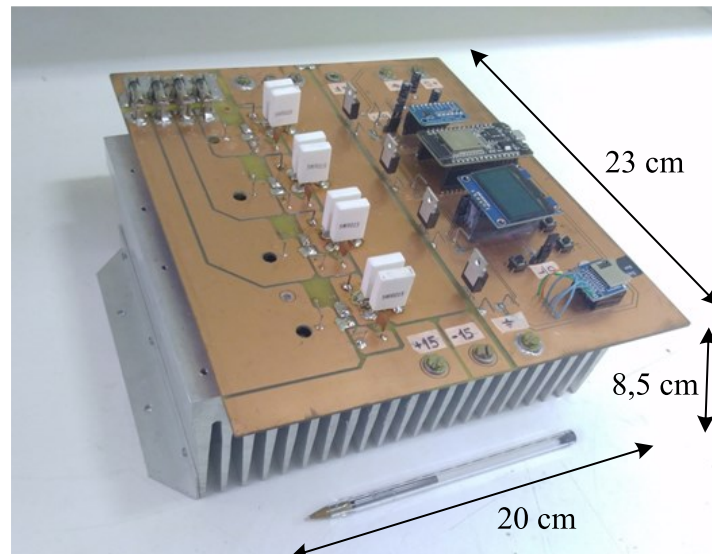


Fonte: Elaborada pela autora.

Analisando as figuras acima, percebe-se que para as correntes de 5,502 A, 9,95 A e 20,33 A, as tensões V_{GS} assumiram valores crescentes como esperado.

Concluídas as simulações da carga eletrônica, no *software Altium Designer®* foi desenvolvido a PCB do projeto completo, que consta na íntegra no Apêndice C. A versão da placa finalizada é exibida na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Placa de ensaios e testes.

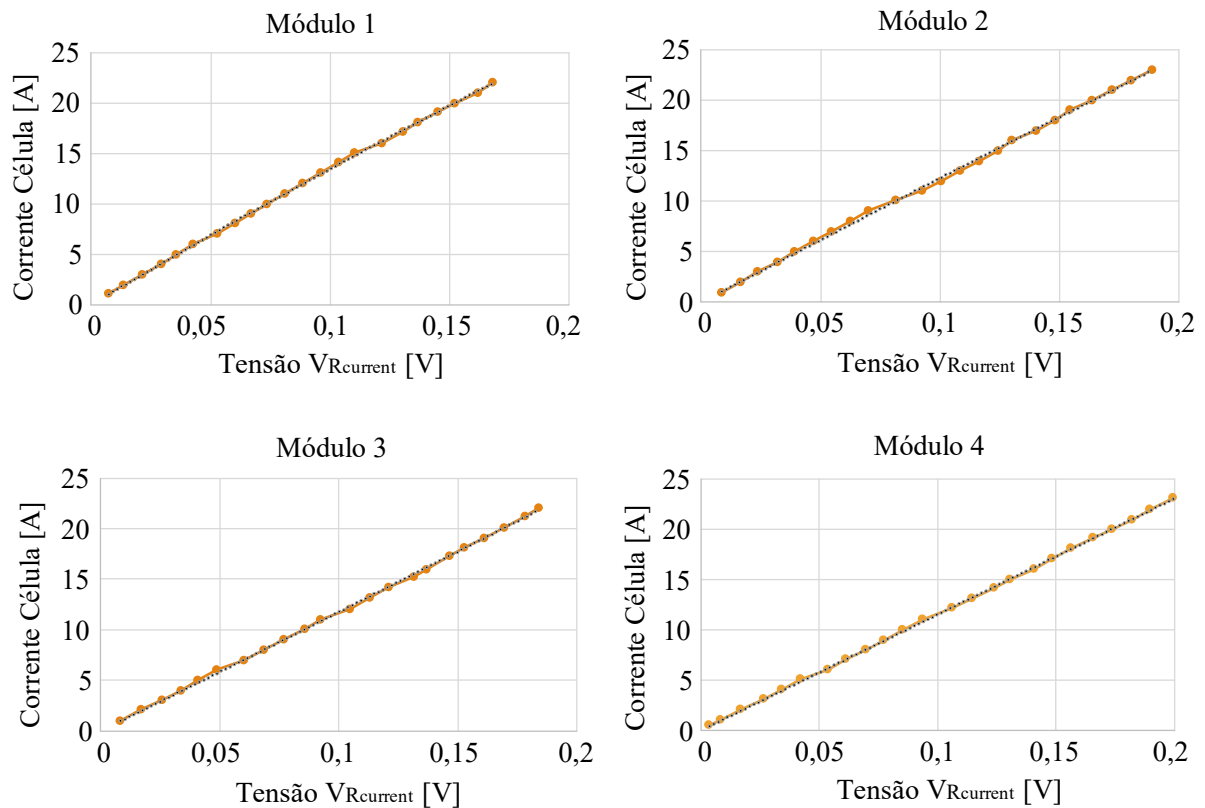


Fonte: Elaborada pela autora.

Com o projeto montado, a primeira ação foi calibrar o circuito de detecção de corrente e de tensão da célula. Essa etapa contou com um gerador de funções, uma célula, um multímetro de precisão e um osciloscópio. Com um gerador de funções configurado para produzir sinais CC, foi monitorado, por meio de pontas de prova de tensão e corrente, no osciloscópio e multímetro os valores de tensão de controle, tensão sobre o resistor de detecção, tensão sobre o resistor do circuito de aquisição de corrente e a corrente na célula. A utilização do termo instrumentação ou instrumental, aqui se refere a valores lidos por meio de multímetro de precisão (tensões) e osciloscópio (correntes).

Os valores coletados relativos à leitura de tensão no sensor de corrente em cada módulo em relação a corrente instrumental são demonstrados na Figura 4.8. Todos os valores no eixo y são de interesse para o código dos ensaios paramétricos e de estimativa, pois convertem a leitura do sensor $V_{R_{current}}$ na corrente de descarga em A associada a cada um dos 4 módulos. Os valores se mostraram relativamente lineares e sem grandes desvios nas tensões sobre os resistores de leitura de corrente.

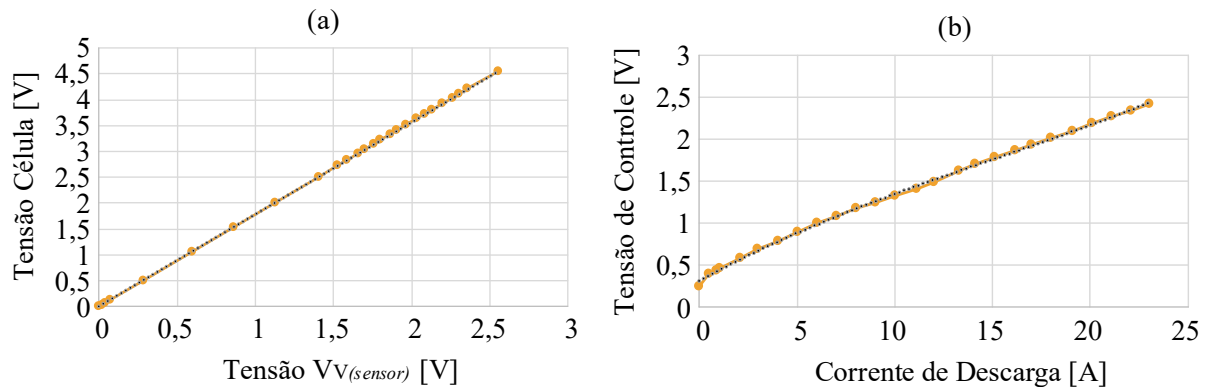
Figura 4.8 – Relação de corrente obtida por instrumentação *versus* circuito de aquisição de corrente.



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 4.9(a) tem-se os dados da tensão fornecida pelo sensor $V_{V(sensor)}$ na placa, descrito no circuito apresentado na Figura 3.6, comparada com a tensão instrumental medida nos terminais da célula. Já na Figura 4.9(b) tem-se os dados da corrente de descarga medida na célula comparada com sua respectiva tensão de controle medida.

Figura 4.9 – Gráfico da tensão no circuito de tensão *versus* tensão instrumental (a) e Gráfico da corrente instrumental *versus* tensão de controle (b).



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 4.9 a leitura do sensor na placa adequa a tensão da célula, que pode assumir um valor máximo de 5 V, para valores abaixo de 3,3 V. A tensão máxima suportada nas portas ADC do módulo ESP32 é de 3,3 V.

Com relação ao sinal de controle e a corrente de descarga associada, é possível verificar na Figura 4.9(b) que a tensão começa deslocada, pois um diodo 1N4148 de ação rápida foi inserido em série no circuito. Isso porque o módulo ESP32 liberava na porta DAC uma tensão de 72 mV, mesmo com resistor de *pull-down*, como consequência o MOSFET de potência entrava em condução com a presença de ruído.

O uso deste diodo implicou em tensões de controle maiores do que as calculadas teoricamente para obter as correntes respectivas. Isso resulta também em uma limitação na aplicação de tensões de controle que resultem em correntes abaixo de 4 A (limitação abaixo de 1 A por módulo), como pode ser comprovado na Figura 4.8, onde há falta de valores para correntes próximas a zero.

Com o comportamento coletado, foi utilizado uma planilha de dados para definir equações que melhor ajustassem os pontos. Os resultados são encontrados na Tabela 4.1.

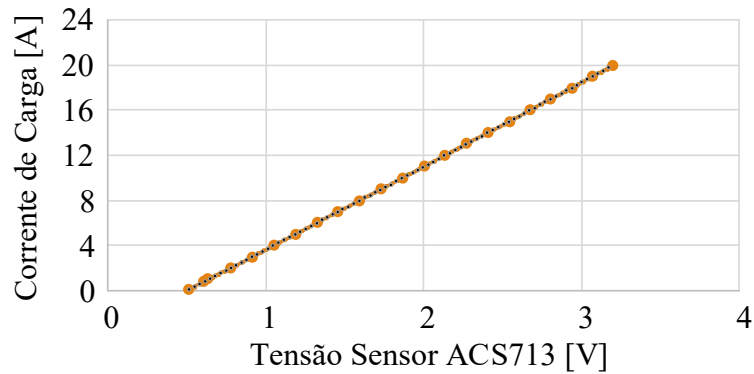
Tabela 4.1 – Equações de ajustes dos circuitos da placa de ensaios e testes.

Parâmetro	Equação
Corrente no Módulo 1	$I_1 = -61,019I_{bat}^2 + 140,5I_{bat}$
Corrente no Módulo 2	$I_2 = -15,149I_{bat}^2 + 124,18I_{bat}$
Corrente no Módulo 3	$I_3 = 12,865I_{bat}^2 + 116,32I_{bat}$
Corrente no Módulo 4	$I_4 = 0,1929I_{bat}^2 + 115,31I_{bat}$
Tensão na Célula	$V_{bat} = 1,7873V_{sensor} + 0,0007$
Tensão de controle	$V_{control} = 0,00007I_{bat}^3 - 0,003I_{bat}^2 + 0,1272I_{bat} + 0,3184$
Sensor de Corrente Carga	$I_{carga} = 0,0679V_{sensor}^2 + 7,1468V_{sensor} + 3,5753$

Fonte: Elaborada pela autora.

Também consta na Tabela 4.1 a equação obtida para o sensor de corrente ACS713LCTR-30A-T, utilizado na leitura da corrente para a etapa de carga, que exibiu o mesmo comportamento informado pelo fabricante.

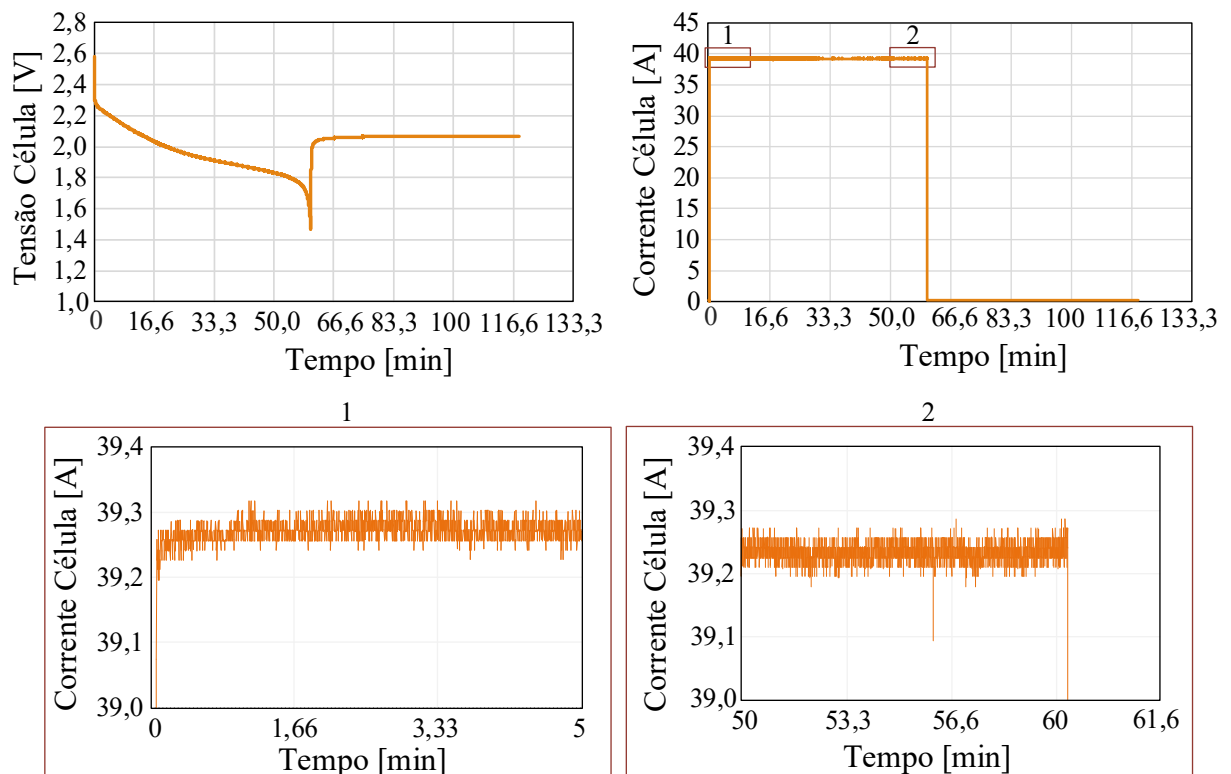
Figura 4.10 – Resposta de tensão do sensor ACS713LCTR-30A-T para aplicações de corrente.



Fonte: Elaborada pela autora.

As equações de ajuste levantadas com base nas medições práticas foram implementadas no módulo ESP32 e dessa forma o circuito de ensaios ficou operacional. Observa-se na Figura 4.11 o comportamento para um ciclo de descarga da tecnologia de célula (LTO) considerada no trabalho.

Figura 4.11 – Comportamento tensão-corrente na célula obtido pelo circuito de ensaios e testes.



Fonte: Elaborada pela autora.

As medições de tensão apresentaram uma boa estabilidade, com os valores oscilando em torno de 10 mV. Já para as aquisições de corrente, os valores são mais elásticos. Na Figura 4.11, apresentou-se com uma variação entorno de 110 mA, entre a janela 1 e 2 para o ensaio. Em alguns ensaios a amplitude atingiu 1 A, principalmente causado por questões construtivas de solda nos resistores de detecção, que por aquecimento passam a medir a corrente com maior amplitude, quando comparada com a medição instrumental, implicando na reconstituição do ensaio.

Nenhum efeito transitório foi passível de identificação nos ensaios, como os encontrado para a corrente em simulação. O módulo ESP32 só consegue executar todas as funções e cálculos associados ao projeto em um tempo mínimo de 100 ms entre as aquisições.

Uma última análise feita no projeto do circuito desenvolvido, consistiu na análise térmica, por meio da câmera térmica FLIR SC655. As imagens termográficas para quatro valores de corrente de descarga (~20 A, ~40 A, ~60 A e ~80 A), são encontrados na Figura 4.12.

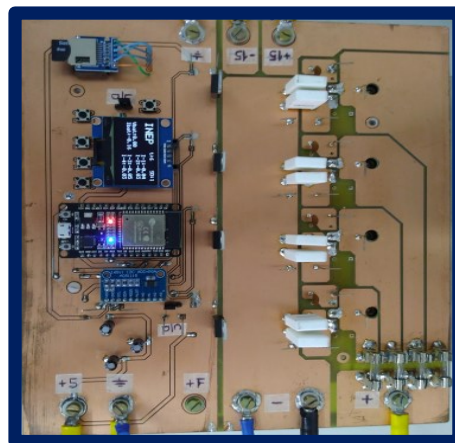
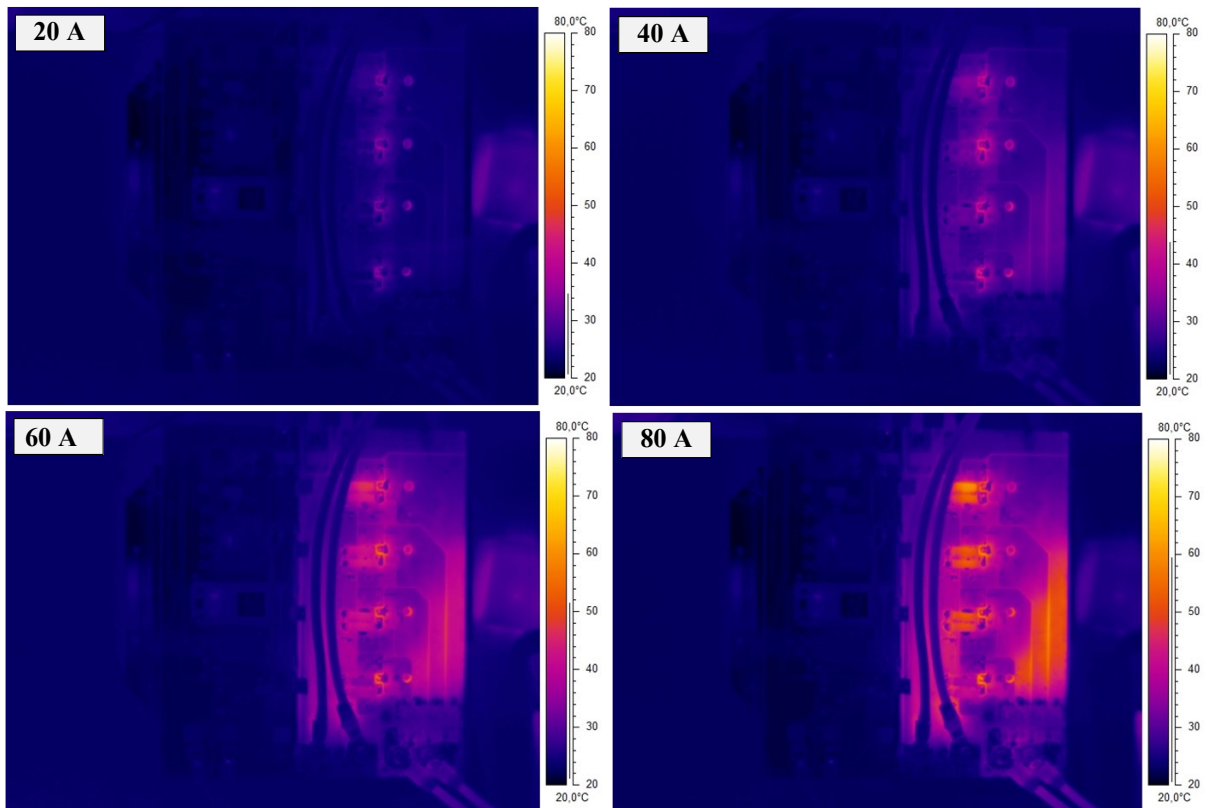
As análises térmicas possibilitaram alguns ajustes que melhoraram o desempenho da carga eletrônica, a identificação de soldas frias e a presença de mal contato nos suportes dos fusíveis.

Para correntes maiores gera-se maior aquecimento, uma vez que se está dissipando maior potência. Fica evidente pela imagem térmica que as trilhas de potência poderiam ser desenhadas com um *layout* melhor.

A utilização dos fusíveis na placa em cada módulo de potência também impediu uma distribuição de corrente uniforme entre os quatro módulos, uma vez que o circuito mais próximo às conexões com a célula apresenta menor impedância associada. O efeito é visível na Figura 4.13, cuja soma das correntes resultou no valor de corrente apresentado na Figura 4.11. Sendo o módulo 1 o mais próximo da conexão com a célula e o módulo 4, o mais distante.

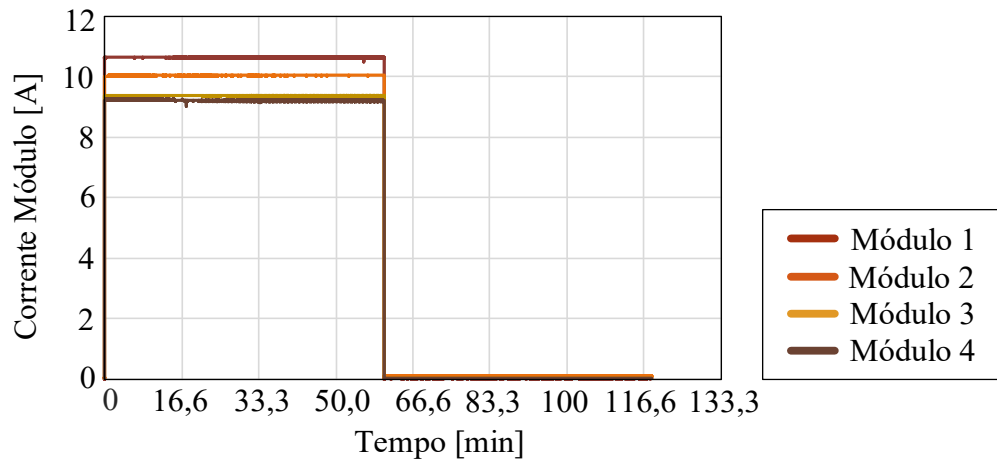
Finalizados os testes de desempenho e ajustes na placa de ensaios e testes, avançou-se para a etapa de ensaios nas células. A bancada experimental é exibida na Figura 4.14, e é composta pela placa de circuito desenvolvida, com ventilação forçada, fontes externas de alimentação, equipamentos de instrumentação (osciloscópio e multímetros de precisão), duas células de baterias e uma câmara climática.

Figura 4.12 – Imagens termográficas da placa de ensaios e teste para corrente de descarga de ~20 A, ~40 A, ~60 A e ~80 A.



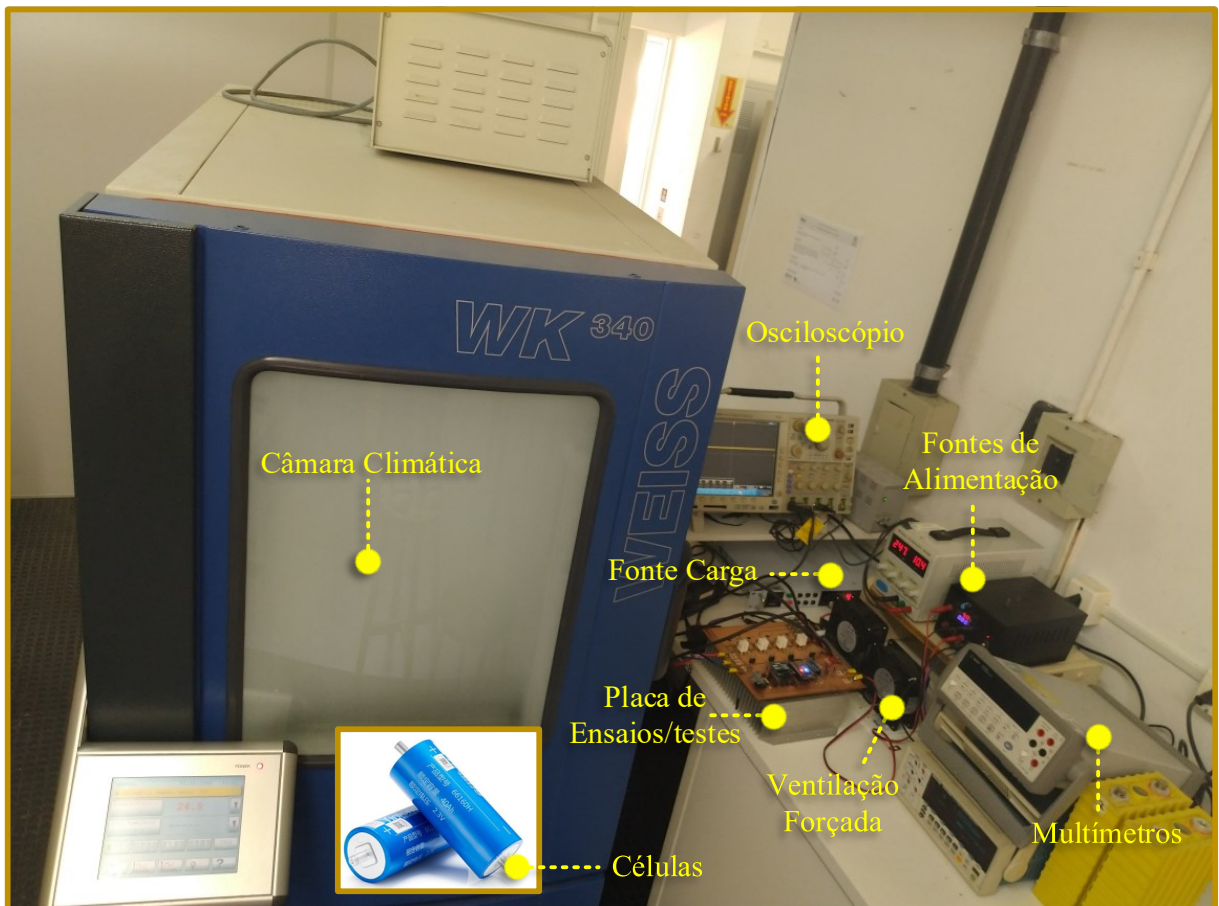
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.13 – Correntes experimentais em cada um dos 4 módulos.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.14 – Bancada experimental de ensaios e testes.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.2 MODELO DE CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE

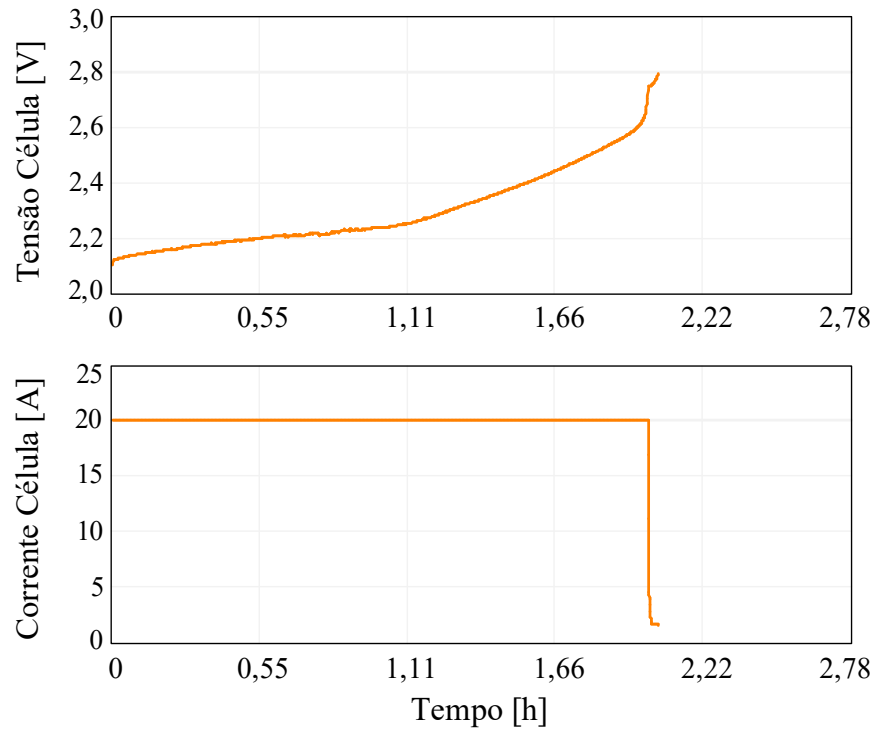
O circuito elétrico equivalente de Thévenin com dois pares RC será usado como modelo dinâmico da célula. Sendo considerado para a definição dos parâmetros $V_{oc}(SoC)$, R_s , R_1 , C_1 , R_2 e C_2 , os ensaios com carga/descarga contínua e com carga/descarga pulsada. A execução envolveu uma fonte CC (carga) e o circuito da carga eletrônica ativa (descarga).

Na etapa de carga, a fonte CC utilizada apresentou instabilidade no controle de sua corrente e antes da conclusão do projeto estava inutilizável. Advindo disso, o ensaio com corrente pulsada foi impactado diretamente. Sendo assim, os resultados apresentados não contemplam o efeito de histerese que aparece na tensão de circuito aberto. Dessa forma, a estimativa do SoC foi validada utilizando apenas os parâmetros definidos pela etapa de descarga. Salienta-se que, em um cenário de carga e descarga ininterrupto, estimar o estado de carga a partir apenas de funções de V_{oc} associadas a descarga, implicaria em imprecisões na etapa de carga com o tempo o que impactaria na estimativa. Motivo esse pelo qual é comum utilizar o valor médio entre as duas curvas.

A fonte CC utilizada na carga da célula foi a Magna-Power de 400 V – 20 A (LS 400-20/380). No entanto, o controle em corrente para aplicar a metodologia da curva CC-CV, não apresentou estabilidade, dada a tensão nominal da célula ser de 2,3 V. Assim sendo, a etapa CV foi concluída conectando a célula em uma fonte CC de 30 V – 5 A (Minipa MPS 3005B). As cargas obtidas com cada uma das fontes estão demonstradas na Figura 4.15 e na Figura 4.16.

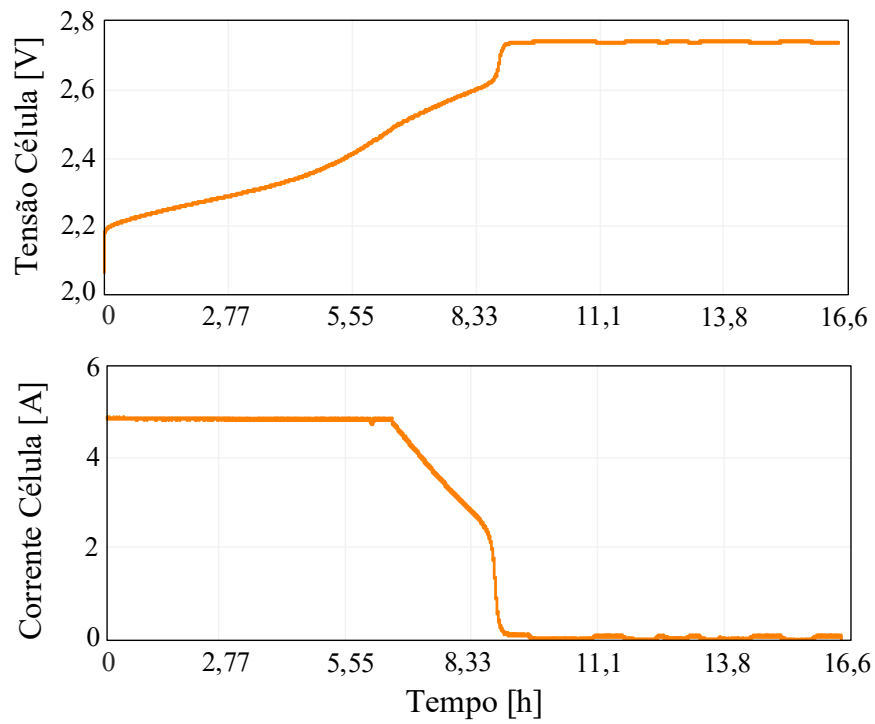
Com relação à etapa de descarga, o código embarcando no ESP32 para os ensaios está disposto no diagrama da Figura 4.17. A definição das condições de teste (corrente e período *on-off*) é realizada de forma externa, através de botões, assim os ensaios podem ser rapidamente definidos, sem a necessidade de passar novamente ao módulo ESP32 o código com as diretrizes para um novo ensaio. O código está disponível do Apêndice D.

Figura 4.15 – Carga da célula com 20 A em temperatura ambiente.



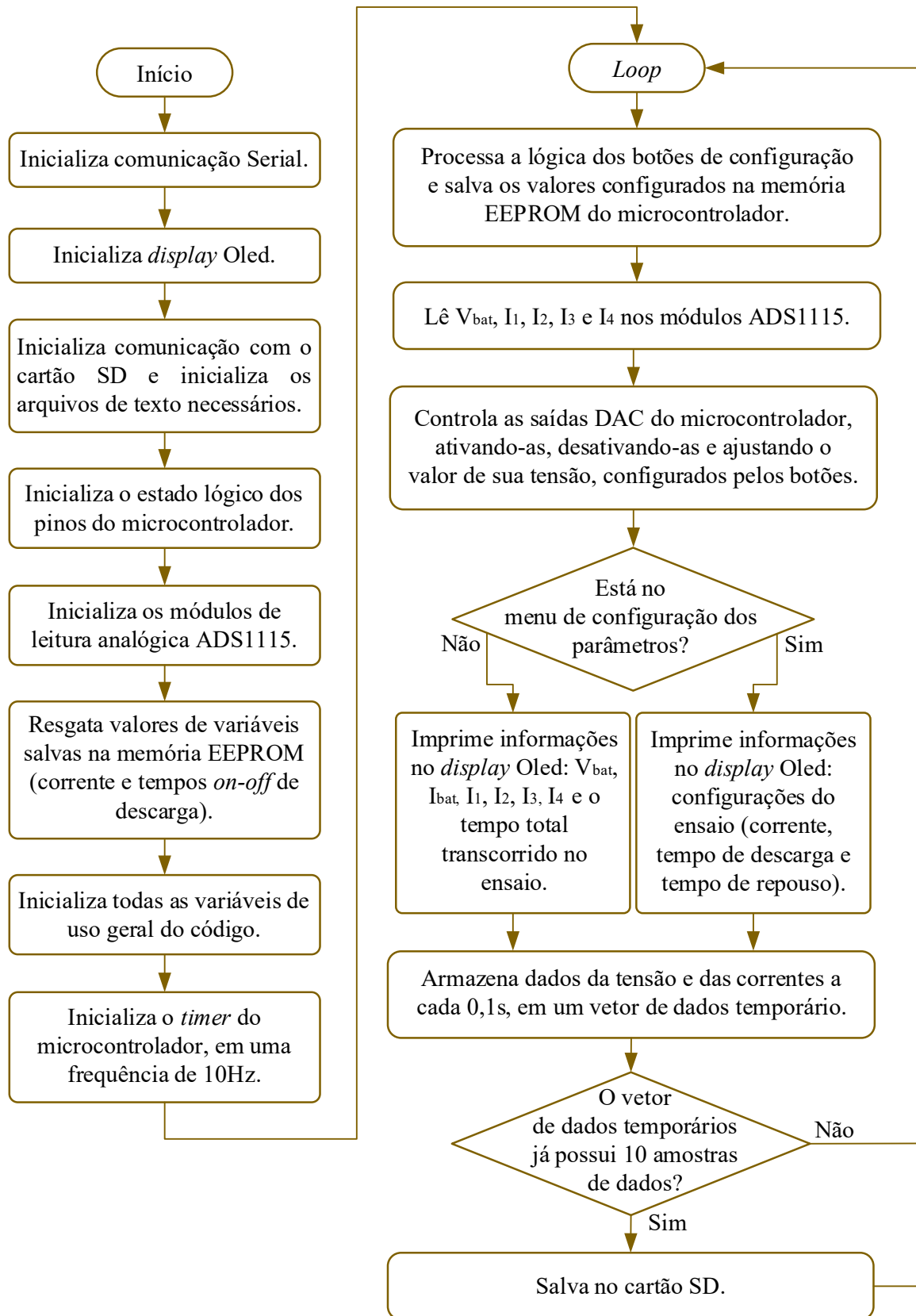
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.16 – Carga da célula com 5 A em temperatura ambiente.



Fonte: Elaborada pela autora.

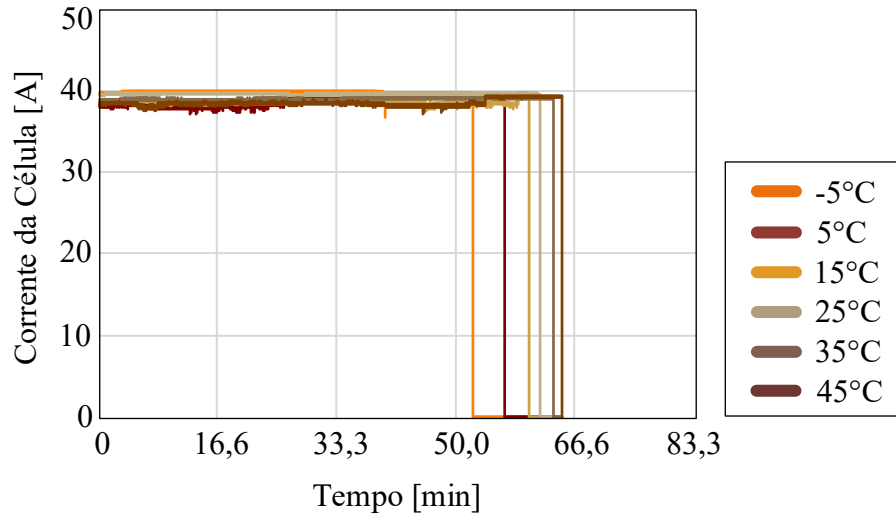
Figura 4.17 – Diagrama do código de ensaios executado na placa de testes e ensaios.



Fonte: Elaborada pela autora.

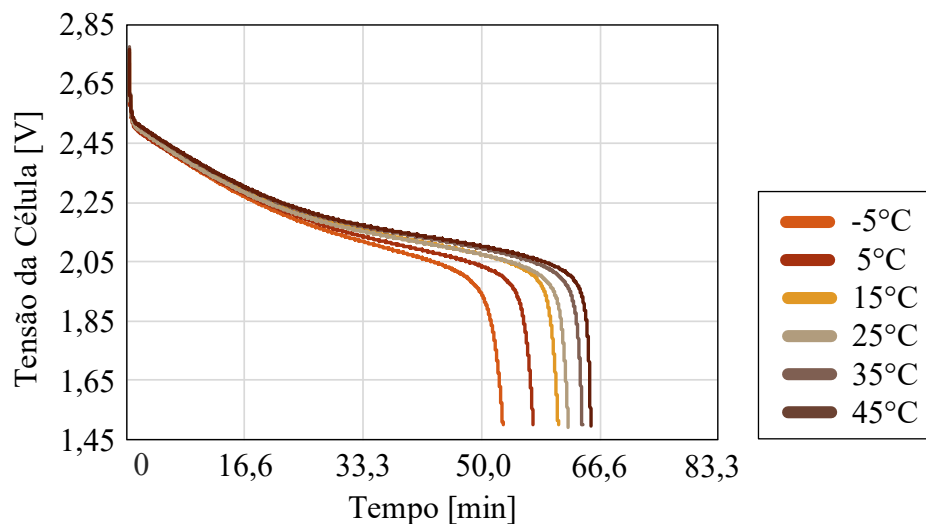
As curvas de correntes e tensões nos terminais da célula, com descarga de corrente de aproximadamente 40 A, são apresentadas na Figura 4.18 e Figura 4.19, respectivamente.

Figura 4.18 – Correntes de descarga de ~40 A em temperaturas de -5°C, 5°C, 15°C, 25°C, 35°C e 45°C.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.19 – Curvas de descarga de tensão na célula para ~40 A e temperaturas de -5°C, 5°C, 15°C, 25°C, 35°C e 45°C.



Fonte: Elaborada pela autora.

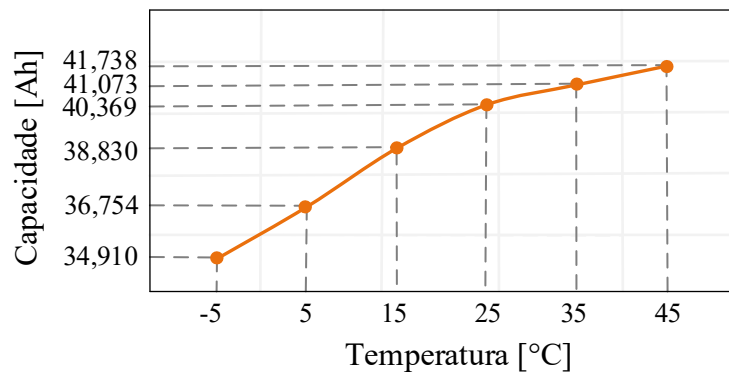
É perceptível a redução da capacidade da célula com temperatura abaixo de 25°C. Destaca-se também o aumento no tempo de descarga, nos ensaios com temperaturas mais elevadas. Ambos comportamentos comuns nas células de íon de lítio devido a velocidade das reações de carga e descarga sofrerem influência da temperatura. Em temperaturas inferiores a

25°C ocorre uma diminuição da velocidade das reações, diminuindo a mobilidade iônica e com valores superiores a 25°C tem-se um aumento da velocidade das reações, ou seja, maior mobilidade dos íons. Salientando que o ganho de capacidade atual submetendo a célula a temperaturas maiores impacta diretamente na sua vida útil, ou seja, a quantidade de ciclos será reduzida.

Em termos de nível de tensão da célula, não é observável um efeito de redução muito elevado na sua amplitude para temperaturas maiores como era esperado. Outros estudos também apresentam inconsistências com relação à tensão e à temperatura, e no catálogo do fabricante essa análise em múltiplas faixas térmicas não é fornecida. Porém, um fator a ser considerado, está relacionado com a corrente, que não apresenta exatamente a mesma amplitude em todos os ensaios, o que poderia impactar diretamente na tensão.

Apesar dos desvios na amplitude da corrente da célula, a obtenção da capacidade para cada temperatura não foi prejudicada. Na Figura 4.20 são apresentados os valores numéricos de capacitância para um regime de 1h de um 1C, calculados para cada uma das temperaturas consideradas. Para determinar a capacidade nominal em células de íon de lítio a taxa de descarga é de 0,2C, o que totaliza 5h para a descarga completa.

Figura 4.20 – Capacidade da célula em regime 1C para -5°C, 5°C, 15°C, 25°C, 35°C e 45°C.



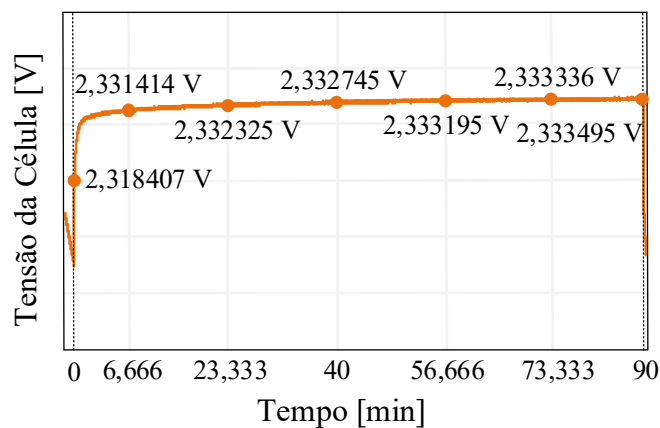
Fonte: Elaborada pela autora.

Agora, passando para a determinação dos parâmetros $V_{oc}(SoC)$, R_s , R_1 , C_1 , R_2 e C_2 do circuito elétrico equivalente. Primeiramente, iniciou-se uma investigação de qual o tempo de repouso necessário para a célula LTO-66160H-2.3V40Ah atingir estabilidade na tensão de circuito. Comumente é aplicado um período de no mínimo 2 h.

O repouso para um pulso de descarga de ~40 A é exibido com pontos detalhados de tensão na Figura 4.21.

Observando a Figura 4.21, percebe-se que após 10 minutos da retirada do pulso de descarga, a célula de LTO alcança uma tensão próxima ao regime permanente, porém, avaliando a diferença de tensão entre os períodos de 40 e 90 minutos, observa-se uma diferença de tensão de 0,72 mV. Assim, com o objetivo de obter ensaios mais exatos, foi utilizado 90 minutos de descanso entre pulsos de descarga como padrão para o ensaio desta célula.

Figura 4.21 – Comportamento dinâmico no período de repouso da célula LTO-66160H-2.3V40Ah.

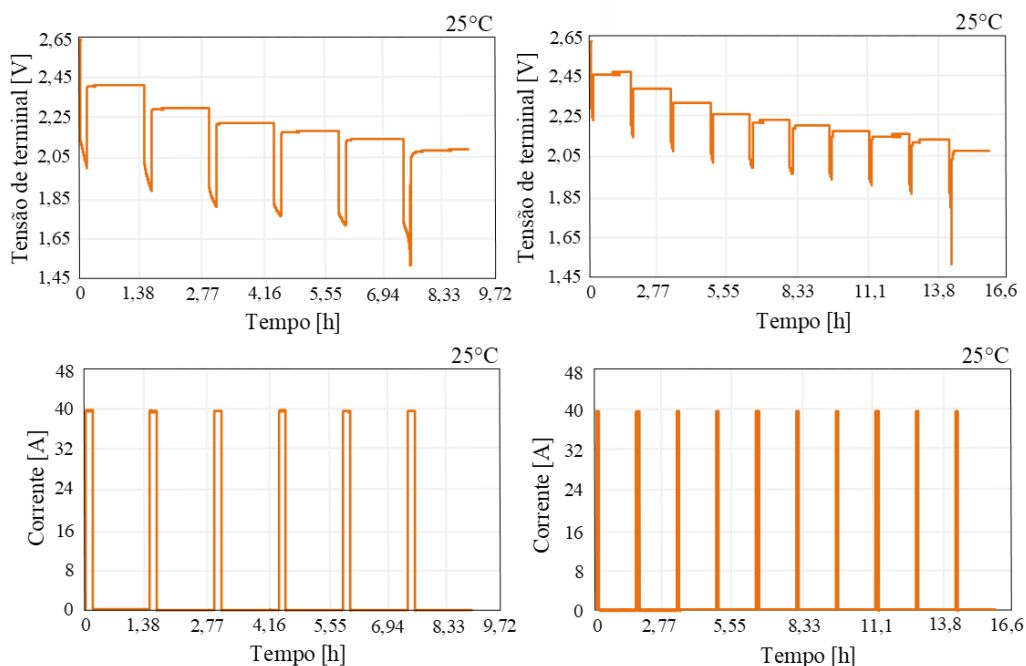


Fonte: Elaborada pela autora.

Utilizando um período de repouso de 90 minutos, na Figura 4.22 são exibidos dois testes de descarga. O primeiro com um período de descarga de 10 minutos, resultando em 6 pulsos completos de descarga e o segundo ensaio com um período de 6 minutos de descarga, totalizando 10 pulsos. Ambos ensaios foram realizados utilizando ~40 A como corrente de descarga. Testes como os apresentados naquela figura foram aplicados buscando descobrir a quantidade de pulsos que gerariam pontos suficientes para definir uma dinâmica da tensão de circuito aberto adequada.

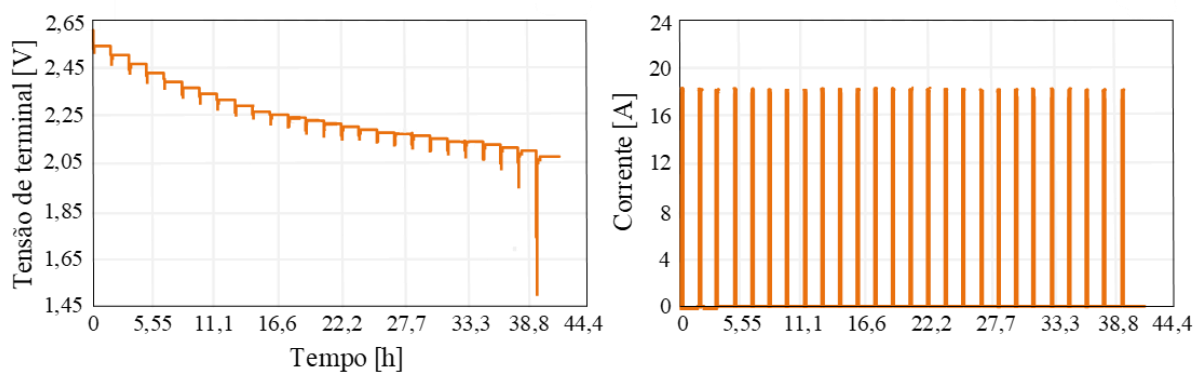
Após a realização dos testes, um bom desempenho para essa tecnologia de célula foi obtido reduzindo a corrente e o tempo de descarga. Os comportamentos encontrados na Figura 4.23, Figura 4.24, Figura 4.25, Figura 4.26 e Figura 4.27 foram obtidos com a redução da corrente para valores próximos de 18 A, com um período de descarga de 5 minutos.

Figura 4.22 – Descarga pulsada com 6 e 10 intervalos.



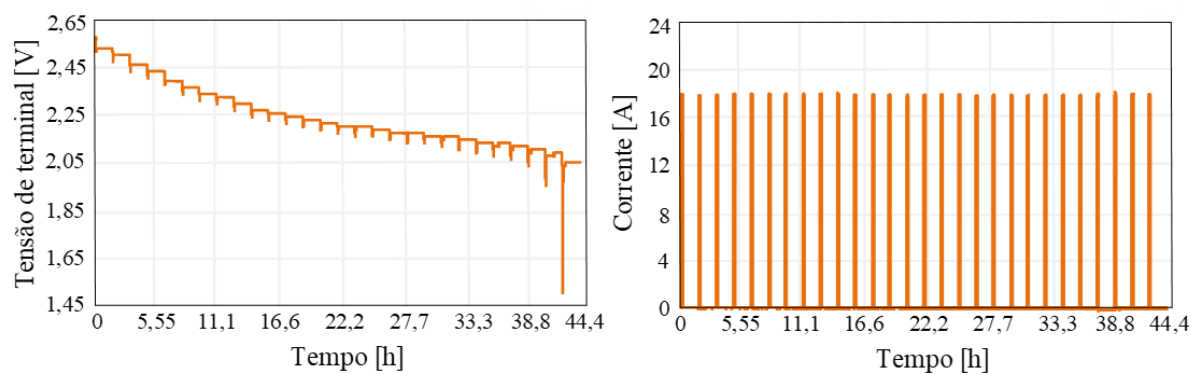
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.23 – Ensaio com 5 minutos de descarga, corrente de ~18 A e temperatura de 5°C.



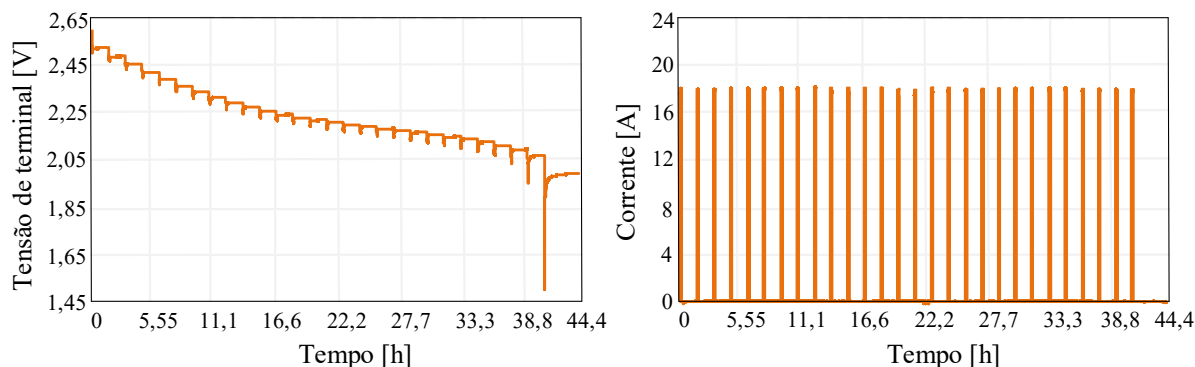
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.24 – Ensaio com 5 minutos de descarga, corrente de ~18 A e temperatura de 15°C.



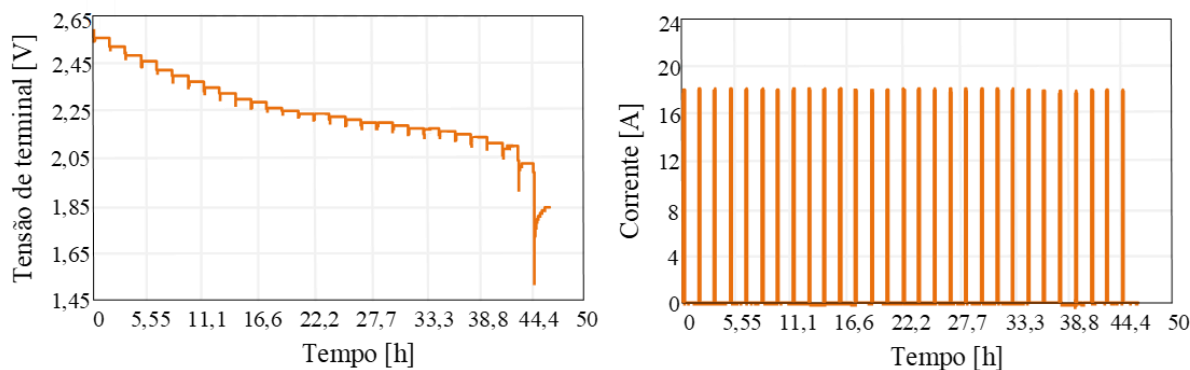
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.25 – Ensaio com 5 minutos de descarga, corrente de ~18 A e temperatura de 25°C.



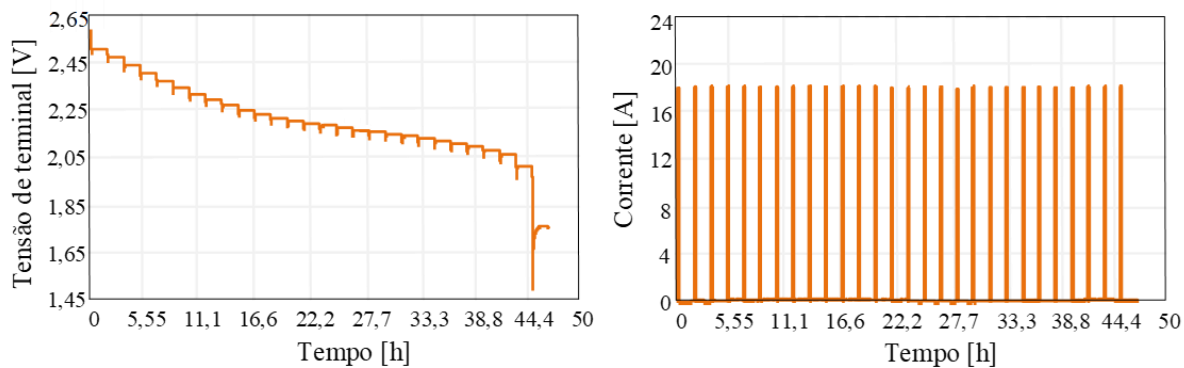
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.26 – Ensaio com 5 minutos de descarga, corrente de ~18 A e temperatura de 35°C.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.27 – Ensaio com 5 minutos de descarga, corrente de ~18 A e temperatura de 45°C.



Fonte: Elaborada pela autora.

Tempos e correntes menores tendem a exibir um comportamento ainda mais exato, o contra ponto é o aumento significativo nos períodos dos ensaios, porém há uma melhora significativa na obtenção da dinâmica característica da célula.

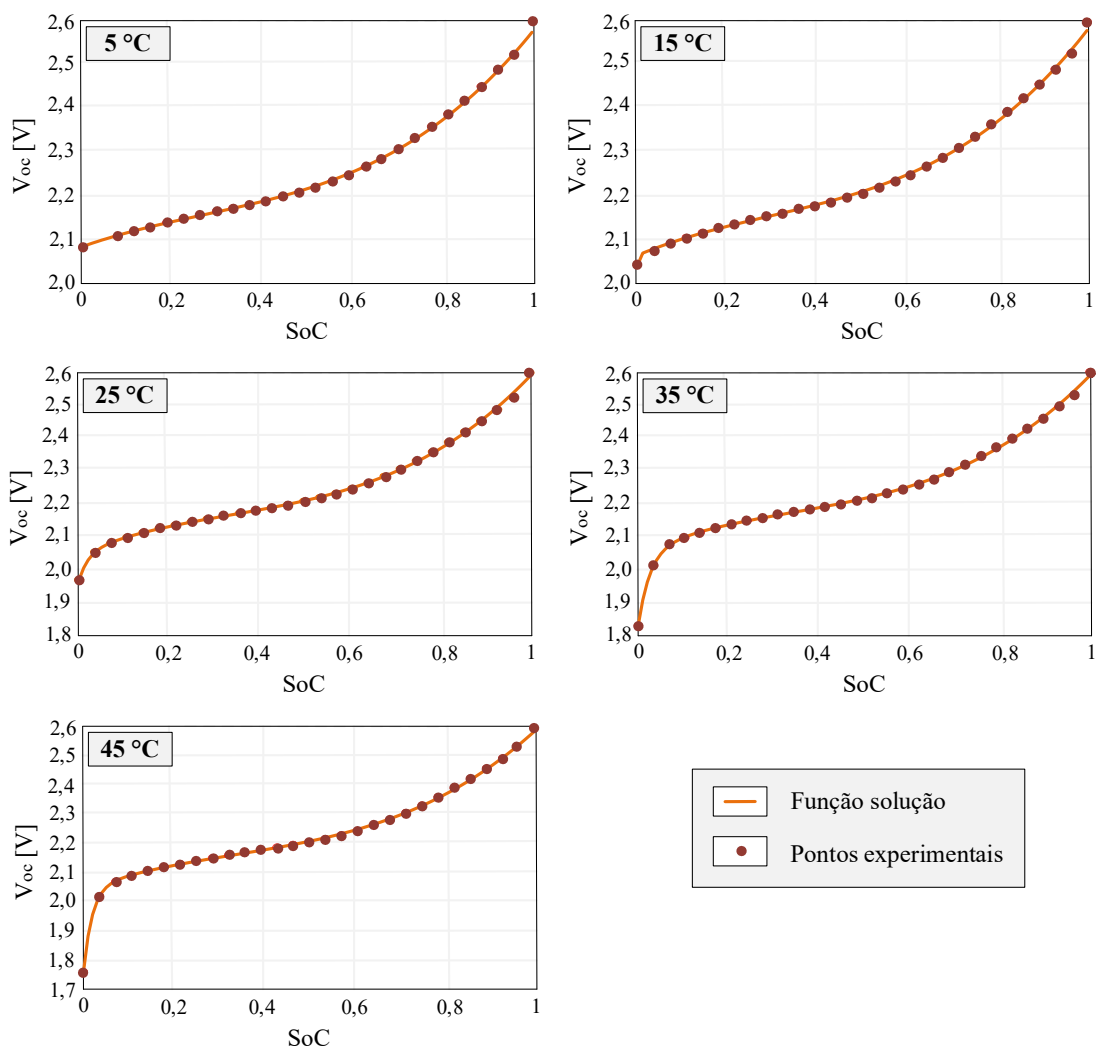
Com os valores da tensão de circuito aberto, coletados após 90 minutos de descanso entre cada pulso de corrente, foi obtida uma função que define a dinâmica da tensão de circuito

aberto. Usando o método numérico de Levenberg-Marquardt, que combina dois algoritmos numéricos de minimização: o método do gradiente descendente e o método de Gauss-Newton, determinou-se os coeficientes da equação (4.1). Os coeficientes desta expressão são apresentados na Tabela 4.2 para cada uma das 5 temperaturas consideradas. Este método numérico foi executado no *software* MATLAB®.

$$V_{oc}(t) = -a_0 e^{-a_1 t} + a_2 + a_3(t) - a_4(t)^2 + a_5(t)^3 \quad (4.1)$$

As cinco equações de V_{oc} obtidas numericamente, agora em função do estado de carga e seus pontos experimentais, podem ser visualizadas na Figura 4.28. Todos os pontos experimentais podem ser consultados no apêndice B.

Figura 4.28 – Pontos experimentais e equações V_{oc} obtidas numericamente.



Fonte: Elaborada pela autora.

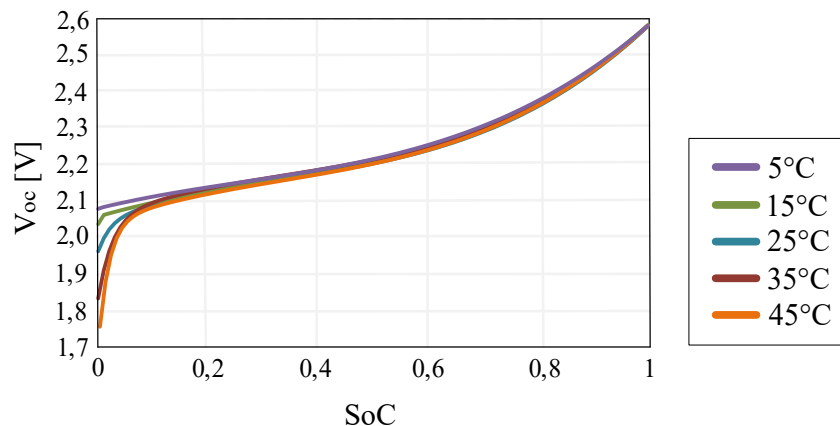
Tabela 4.2 – Coeficientes das equações V_{oc} para diferentes temperaturas.

Temperatura	Coeficiente					
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
5 °C	0,001464472	879,10283	2,0810644	0,3653617	0,521277	0,6543056
15 °C	0,020255282	842,27076	2,074155	0,4198593	0,621387	0,7066048
25 °C	0,080821119	46,600059	2,052984	0,548471	0,909835	0,895769
35 °C	0,227114809	38,740168	2,0456933	0,5647593	0,9231633	0,9006542
45 °C	0,281396039	52,807045	2,0459577	0,5375892	0,8528963	0,8519896

Fonte: Elaborada pela autora.

Já na Figura 4.29, são apresentados os comportamentos de todas as funções obtidas a partir dos ensaios. Com os períodos de descarga de ~18 A - 5 minutos, foi possível mapear de forma satisfatória a dinâmica da tensão V_{oc} . Para os valores nas regiões mais próximos do SoC unitário e até mesmo no final da descarga, uma melhor aproximação à dinâmica da célula poderia ser obtida se os tempos de descarga ou corrente fossem reduzidos ainda mais.

Figura 4.29 – Comportamento dinâmico das equações numéricas de V_{oc} para temperaturas 5°C, 15°C, 25°C, 35°C e 45°C.



Fonte: Elaborada pela autora.

Definidas as equações de $V_{oc}(SoC)$, foi realizada a determinação dos parâmetros R_s , R_1 , C_1 , R_2 e C_2 . O parâmetro R_s foi obtido diretamente pela lei de Ohm, analisando a queda de tensão que ocorre entre o repouso e a descarga. Os demais parâmetros foram obtidos com os pontos experimentais após a retirada do pulso de corrente, através do método numérico de Levenberg-Marquardt no *software* MATLAB®.

Foram selecionados apenas 12 períodos de repouso dos mais de 28 pulsos realizados na temperatura de 25°C. Esta limitação foi aplicada, visto a limitação de velocidade de processamento e armazenamento de dados do microcontrolador utilizado.

Os parâmetros definidos envolvendo a temperatura de 25 °C, são exibidos na Tabela 4.3. Já na Figura 4.30 é possível observar o desempenho da aproximação numérica com os pontos mapeado da acomodação da tensão de circuito aberto para o pulso 1 e pulso 3 selecionado entre os 12 pulsos.

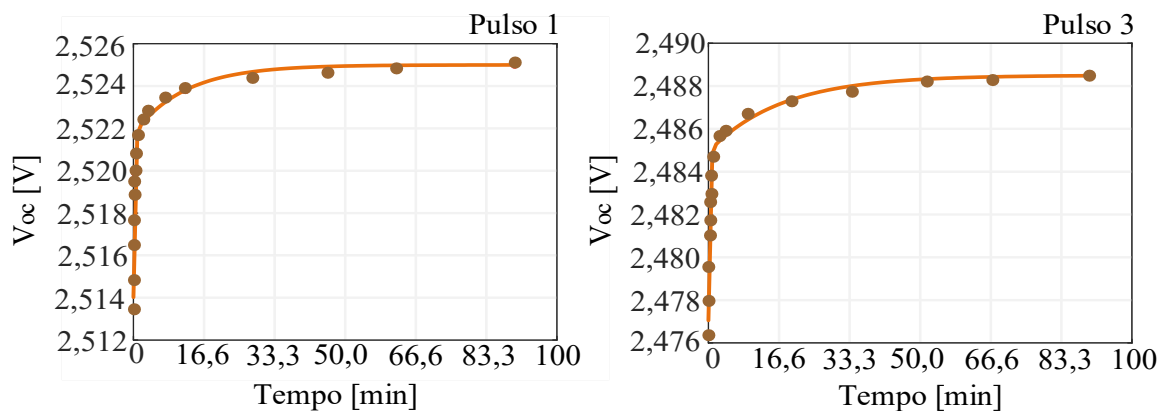
As tabelas obtidas para as temperaturas de 5°C, 15°C, 35°C e 45°C, juntamente com as tabelas dos pontos experimentais retirados dos períodos de repouso selecionados, estão dispostas no apêndice B na Tabela 5.1, Tabela 5.2, Tabela 5.3, Tabela 5.4, Tabela 5.5, Tabela 5.6, Tabela 5.7, Tabela 5.8 e Tabela 5.9.

Tabela 4.3 – Tabela de parâmetros para temperatura de 25 °C.

Parâmetros 25 °C							
Pulso	SoC	R_s	R_1	R_2	C_1	C_2	C_n
1	0,964284	0,0006146	4,3124e-04	1,8213e-04	3,7246e+04	4,0105e+06	143573,042
3	0,892856	0,0006855	4,4005e-04	1,9927e-04	3,6996e+04	5,1769e+06	143573,042
6	0,785713	0,0006523	5,6493e-04	2,0817e-04	2,8397e+04	4,9218e+06	143573,042
9	0,785700	0,0006545	6,3899e-04	2,1389e-04	3,1142e+04	6,7290e+06	143573,042
12	0,571428	0,0006687	6,9703e-04	2,1543e-04	3,2159e+04	4,5246e+06	143573,042
16	0,428571	0,0006942	7,8576e-04	2,1750e-04	3,1975e+04	4,1144e+06	143573,042
19	0,321428	0,0007090	8,4316e-04	2,7663e-04	3,1248e+04	3,1445e+06	143573,042
22	0,214285	0,0007137	9,1565e-04	3,6186e-04	2,8675e+04	1,9644e+06	143573,042
24	0,142857	0,0007267	0,00100000	4,8308e-04	2,6105e+04	1,4147e+06	143573,042
26	0,071428	0,0006967	0,00140000	8,5571e-04	1,4465e+04	5,4498e+05	143573,042
27	0,035714	0,0007658	0,00340000	0,00200000	3,9307e+03	1,9610e+05	143573,042
28	0,000000	0,0007204	0,01700000	0,00920000	867,952400	2,8380e+04	143573,042

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.30 – Pontos associados aos pulsos de repouso 1 e 3 com aproximação numérica.



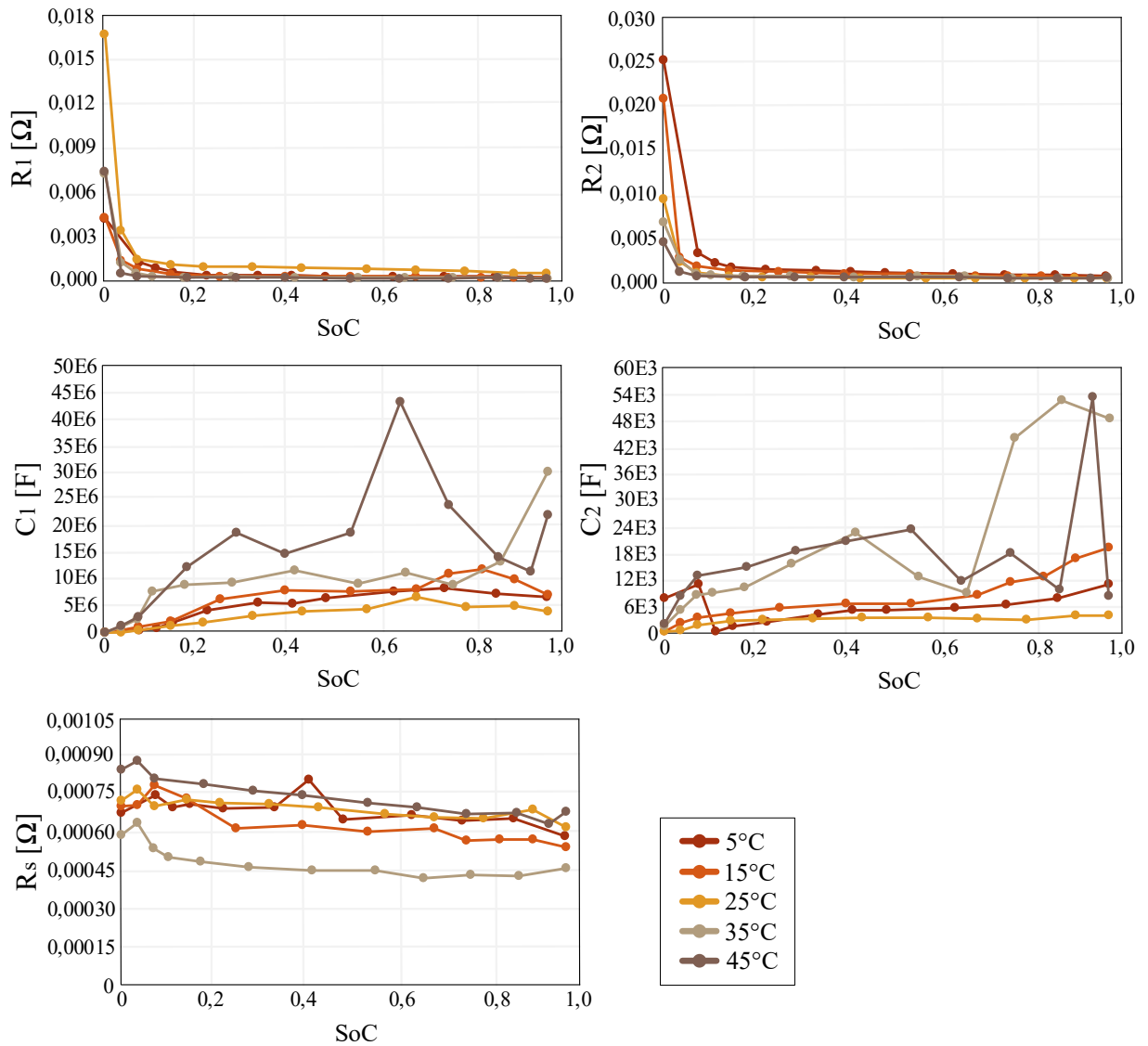
Fonte: Elaborada pela autora.

Os parâmetros R_s , R_1 , C_1 , R_2 e C_2 , que compõem as 5 tabelas levantadas estão representados de forma gráfica, na Figura 4.31. Em análise, nota-se o aumento das resistências

R_1 e R_2 conforme a descarga é efetuada. As capacitâncias obtidas tem duas magnitudes distintas, que juntas são capazes de associar uma dinâmica lenta (C_1) e uma dinâmica rápida (C_2).

Quanto à exatidão dos resultados obtidos para a resistência série, foram um tanto inconclusivas. O tempo entre as aquisições de leitura precisariam ser menores, já que o fabricante indica uma resistência série menor que $0,5 \text{ m}\Omega$, por padrão. Como a capacidade indica uma célula em ótimo estado, essas medidas de resistências mais altas são provavelmente obtidas pela deficiência de leituras em taxas menores de amostras.

Figura 4.31 – Parâmetros R_s , R_1 , C_1 , R_2 e C_2 para as temperaturas de 5°C , 15°C , 25°C , 35°C e 45°C .



Fonte: Elaborada pela autora.

Uma vez que o sistema de interesse está modelado por meio do circuito elétrico equivalente, a estimativa do estado de carga pode ser efetuada.

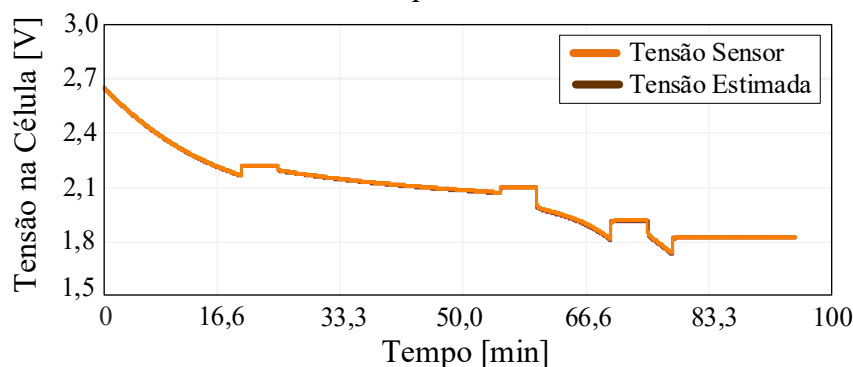
4.3 ESTIMATIVA DO SOC

A primeira etapa para obter o SoC utilizando o filtro de Kalman estendido, é desenvolver um algoritmo que contemple suas equações e estime por meio das aquisições de tensão, corrente e temperatura, o SoC do sistema. Este é modelado por meio dos parâmetros, R_s , R_1 , C_1 , R_2 , C_2 , C_n , equações $V_{oc}(SoC)$ e as matrizes Q_k , R_k e P_k .

4.3.1 Resultados de simulação para estimativa do SoC

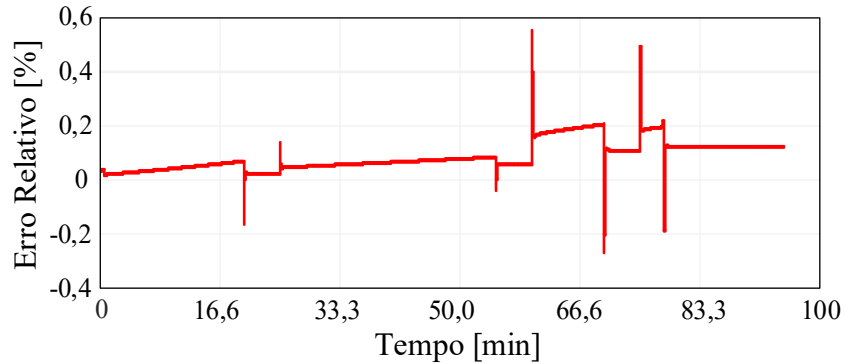
Os resultados de simulação obtidos para a estimação do SoC são exibidos na Figura 4.32, Figura 4.34, Figura 4.34 e Figura 4.35, a partir da metodologia apresentada no capítulo anterior utilizando o *software* PSIM®. Salientando que nessa simulação apenas um valor para R_s , R_1 , C_1 , R_2 e C_2 foi usado, e não uma tabela. Todos os valores experimentais dos parâmetros adicionados na simulação são referentes a temperatura de 25°C. Além disso, o valor de referência associado aos resultados de simulação e práticos, são definidos com base na equação padrão de contagem de Coulomb, colocada no ponto de operação. O perfil de corrente foi apresentado na Figura 3.9, no capítulo anterior.

Figura 4.32 – Comparação entre a tensão nos terminais da célula obtida no sensor do circuito e a estimada pelo método EKF.



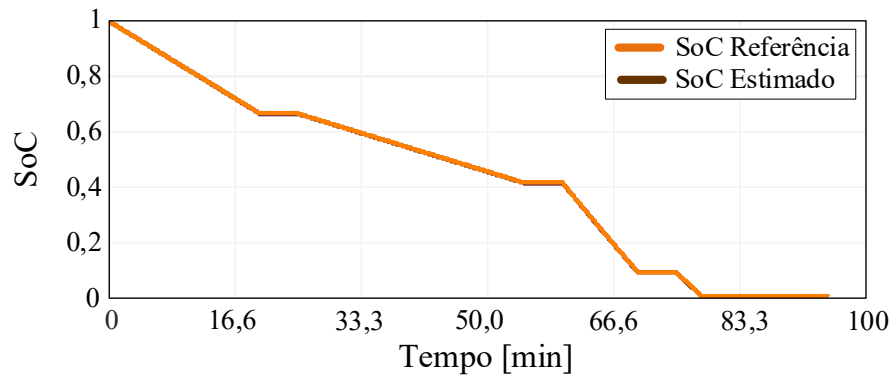
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.33 – Erro relativo entre tensão circuito equivalente e tensão estimada via simulação.



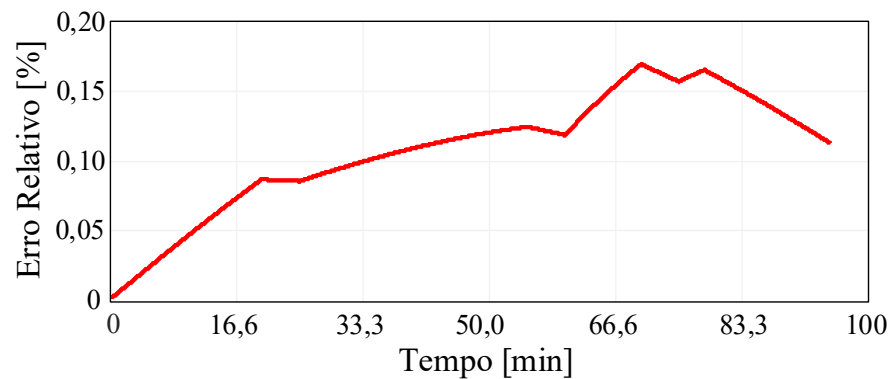
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.34 – SoC de referência e estimado pelo método EKF.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.35 – Erro relativo entre referência e estimado pelo método EKF.



Fonte: Elaborada pela autora.

Analisando as últimas quatro figuras, observa-se o EKF estimando corretamente a tensão de terminal da célula a partir da tensão medida por sensor no circuito elétrico equivalente simulado, com um erro relativo de tensão inferior a 0,6%. Enquanto que o SoC estimado alcançar um valor de erro inferior a 0,2% em relação ao referencial.

Os resultados simulados, além de introduzir a construção do algoritmo em linguagem C das equações que envolvem o EKF, também auxiliaram na definição de estimativa iniciais para as matrizes, Q_k , R_k e P_k . Os valores atribuídos nas equações (4.2), (4.3) e (4.4) são resultados refinados por simulação e experimentação em bancada.

$$R_k = [0,0005] \quad (4.2)$$

$$Q_k = \begin{bmatrix} 0,00001 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0001 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$P_k = \begin{bmatrix} 0,0001 & 0 & 0 \\ 0 & 0,001 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0001 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Possivelmente outros valores combinados desempenhem de forma semelhante ou melhor aos apresentados aqui, mas dentro dos objetivos de erro associados à estimativa, tais valores atenderam o critério de parada (erro relativo abaixo de 2%).

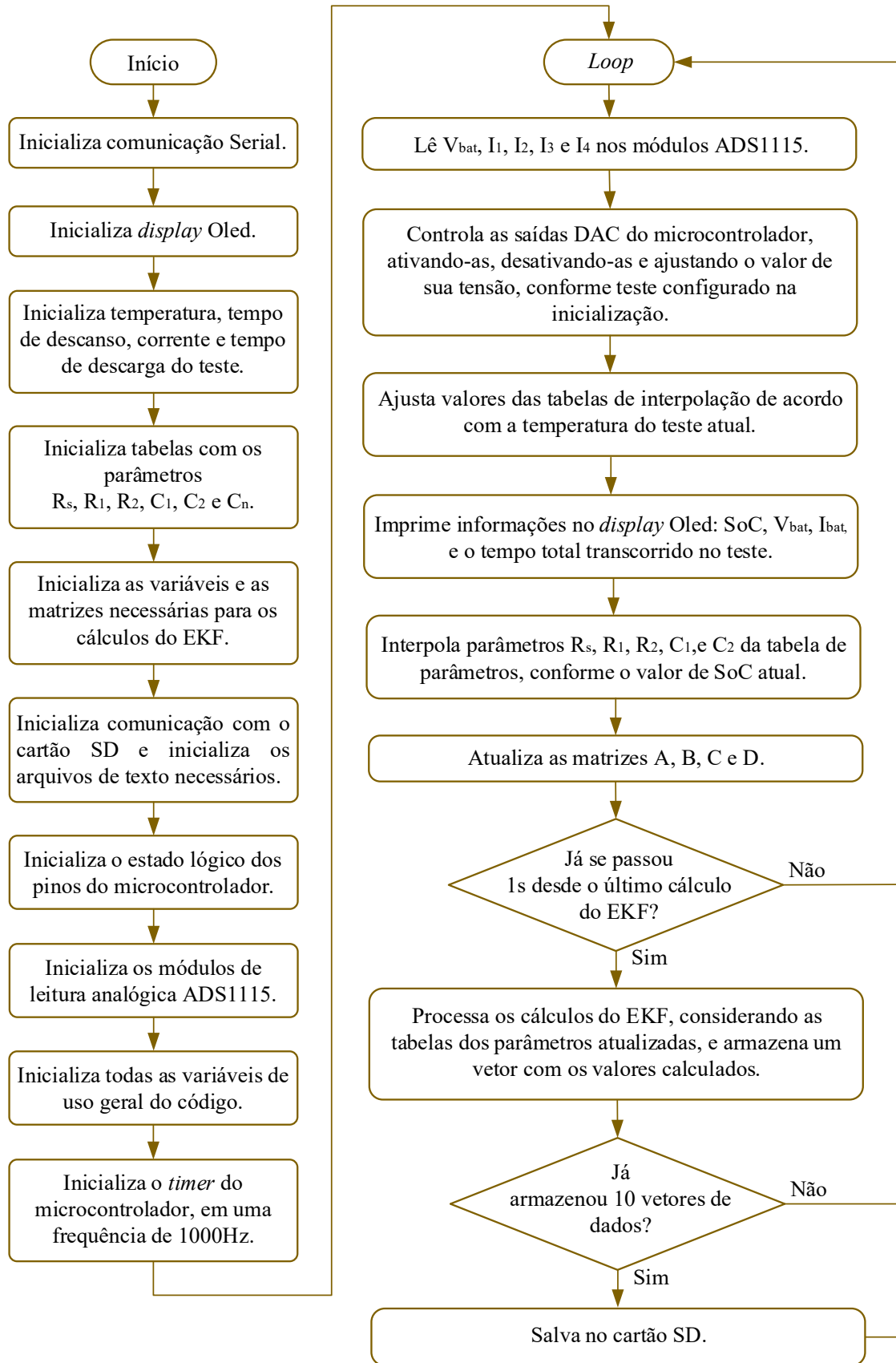
O algoritmo implementado no módulo ESP32 contempla mais funções do que o algoritmo básico desenvolvido para simulação. O acréscimo de funções foi utilizado para melhorar o desempenho do EKF e por limitações de tempo, optou-se por priorizar as melhorias na estimativa experimental. Nele, os parâmetros do circuito elétrico equivalente assumem valores tabelados definidos para cinco temperaturas. Buscando melhorar o desempenho, foi empregado interpolação linear, entre os valores dos parâmetros tabelados. Cabe ressaltar que a interpolação linear não se estende entre tabelas de temperatura, elas assumiram as faixas de atuação estipuladas conforme Tabela 4.4. O diagrama do código desenvolvido para os testes de estimativa do SoC é exibido na Figura 4.36 e o código na íntegra está disposto no apêndice D.

Tabela 4.4 – Faixas de atuação das tabelas de dados por temperatura.

Tabela	Faixa de Temperatura
5°C	De $\geq 0^\circ\text{C}$ a \leq a 10°C
15°C	De $> 10^\circ\text{C}$ a \leq a 20°C
25°C	De $> 20^\circ\text{C}$ a \leq a 30°C
35°C	De $> 30^\circ\text{C}$ a \leq a 40°C
45°C	De $> 40^\circ\text{C}$ a \leq a 50°C

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.36 – Diagrama do código implementado no módulo ESP32 para estimativa do SoC.

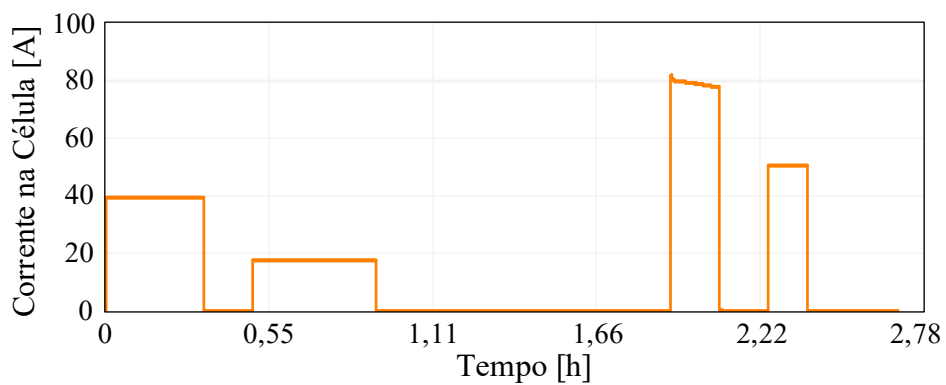


Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.2 Resultados experimentais para estimativa do SoC

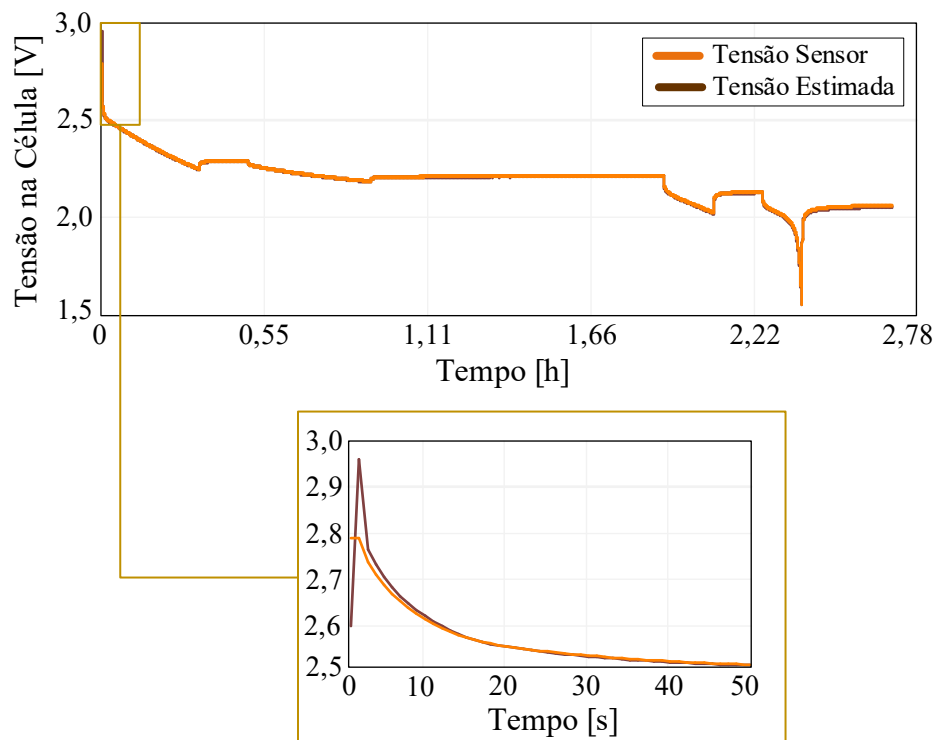
Avaliando na sequência os resultados obtidos nos testes práticos. O primeiro teste consiste no perfil de descarga reproduzido na Figura 4.37, em que a temperatura ao longo de todo o teste foi de 25°C. Os valores de tensão lidos pelo sensor na célula e a estimativa de tensão feita pelo EKF são apresentados na Figura 4.38, onde a tensão inicial informada ao algoritmo foi de 2,6 V.

Figura 4.37 – Perfil de descarga da corrente na célula.



Fonte: Elaborada pela autora.

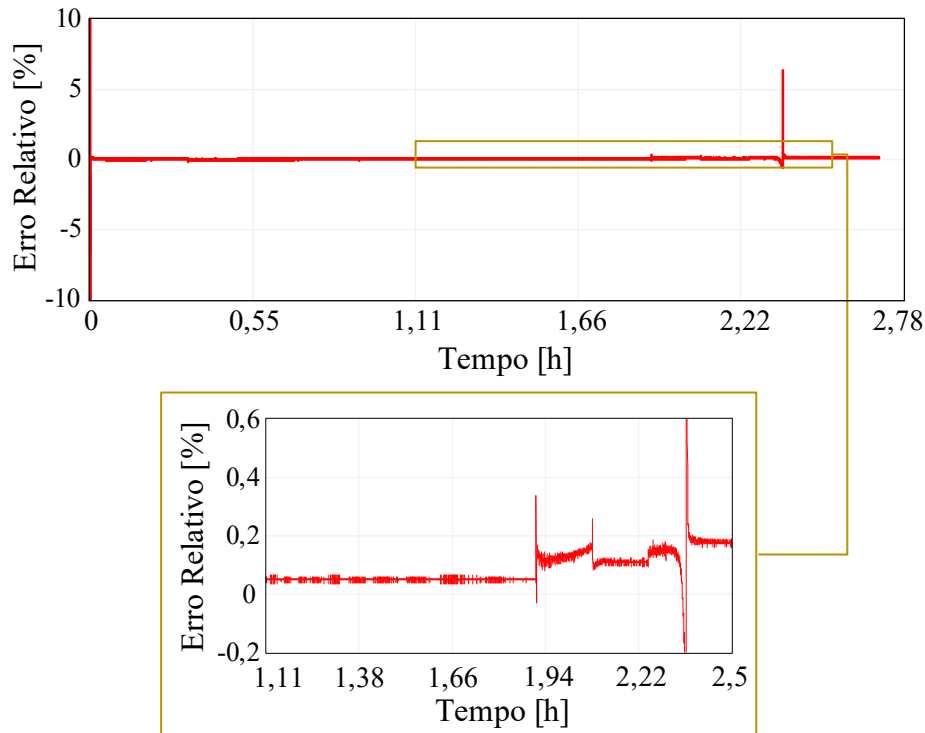
Figura 4.38 – Comparação entre a tensão nos terminais da célula obtida no sensor e a estimada pelo método EKF.



Fonte: Elaborada pela autora.

O erro relativo percentual entre a tensão medida no sensor e a sua estimativa pelo EKF na célula é avaliado na Figura 4.39, permanecendo inferior a 0,6%. O valor do erro apresenta um pico logo no inicial de maior magnitude, correspondente ao período na busca pelo rastreo da tensão, e depois cai a valores muito pequenos com o passar das iterações.

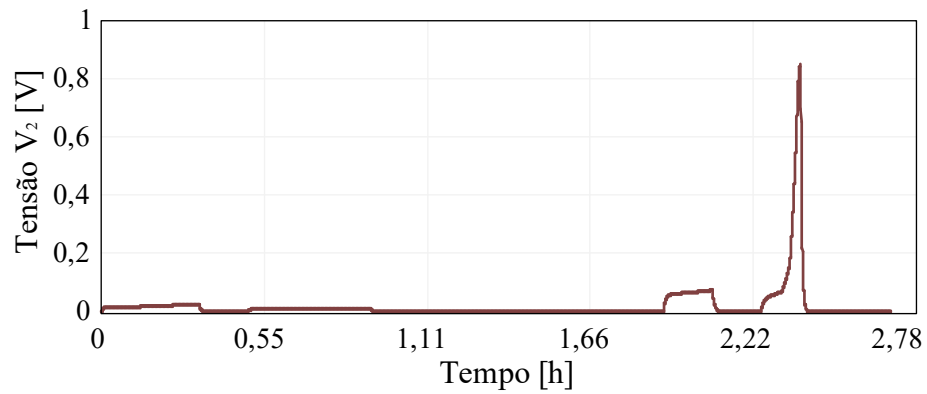
Figura 4.39 – Erro relativo entre tensão nos terminais da célula e a estimada pelo método EKF.



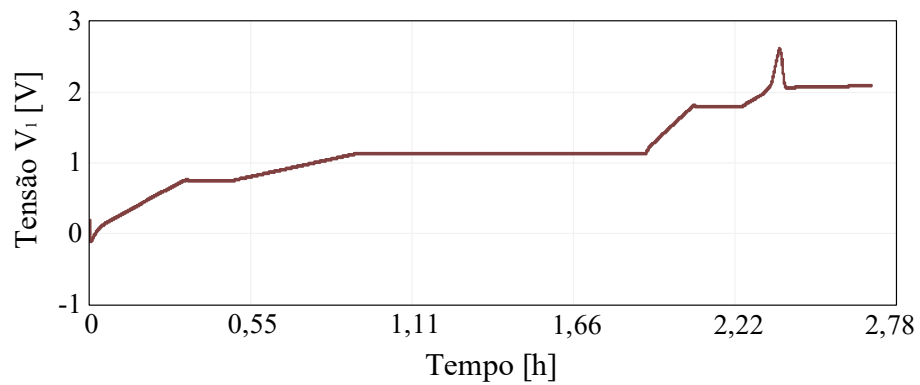
Fonte: Elaborada pela autora.

Agora avaliando os três estados estimados pelo EKF: SoC, V_1 e V_2 . Começando pela tensão V_2 , percebe-se que na Figura 4.40 a tensão assume rapidamente novos patamares conforme o perfil de corrente se altera, descrevendo a dinâmica rápida modelada por R_2 e C_2 . Já na Figura 4.41, a tensão a V_1 assume uma dinâmica semelhante a própria leitura de tensão nos terminais da célula, de comportamento lento, agora modeladas por R_1 e C_1 .

Avaliando o estado de carga estimado mostrado na Figura 4.42, o referencial foi determinado pelo cálculo da contagem de Coulomb. Constata-se que as inclinações do estado de carga estimado acompanham o perfil de corrente e uma vez que a tensão nos terminais da célula atinge 1,5 V, o SoC estimado assume um valor nulo, condizente com a realidade de carga na célula.

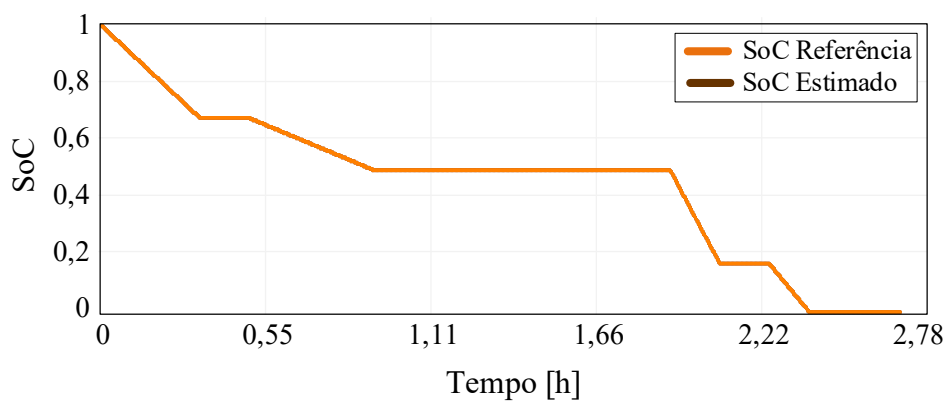
Figura 4.40 – Tensão estimada para V_2 .

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.41 – Tensão estimada para V_1 .

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.42 – SoC de referência e estimado pelo método EKF.



Fonte: Elaborada pela autora.

Com o transcorrer do teste, alguns valores foram capturados do *display* Oled, conforme exibido na Figura 4.43, onde o tempo “*t*” é registrado em segundos. No *display* Oled é possível acompanhar a estimativa em tempo real do SoC obtido pela implementação do EKF no módulo ESP32.

Figura 4.43 – Pontos capturados no *display* Oled na estimativa em tempo real do SoC pelo EKF.

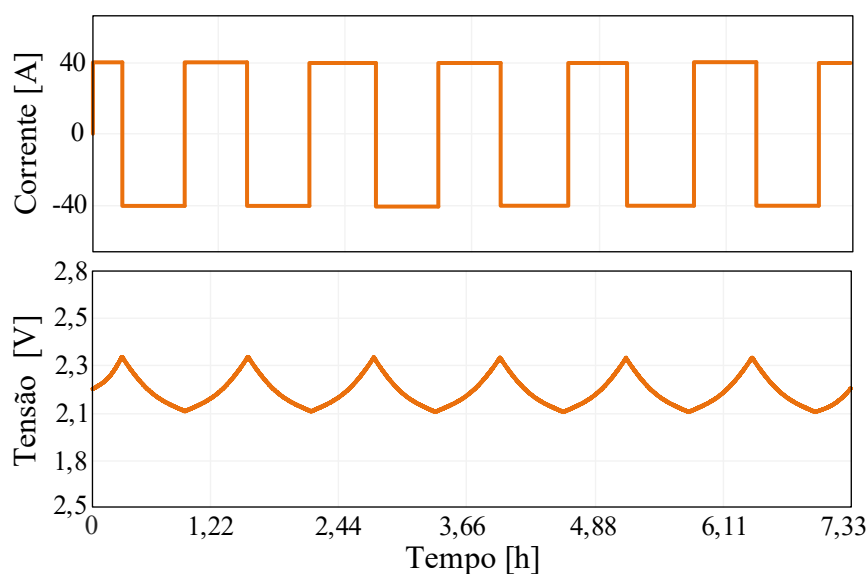


Fonte: Elaborada pela autora.

Considerando agora a leitura dos sensores do perfil de carga e descarga da corrente e da tensão apresentados na Figura 4.44, na temperatura de 30°C. A célula é carregada com um valor de corrente de 40 A e descarrega a -40 A, sendo o teste iniciado na etapa de carga. A tensão varia entre os valores de 2,419 V a 2,107 V, com essa variação de tensão o SoC varia entre 90% e 30%, tendo a célula um valor inicial de tensão de 2,2 V, o SoC inicial a ser estimado corresponde a 60%.

Nesta configuração a duração da etapa de carga apresenta 36,66 minutos, bem como a de descarga, exceto a primeira carga que leva em torno de 18,33 minutos.

Figura 4.44 – Perfil de carga/descarga atual da célula e voltagem da célula a uma temperatura de 30°C.

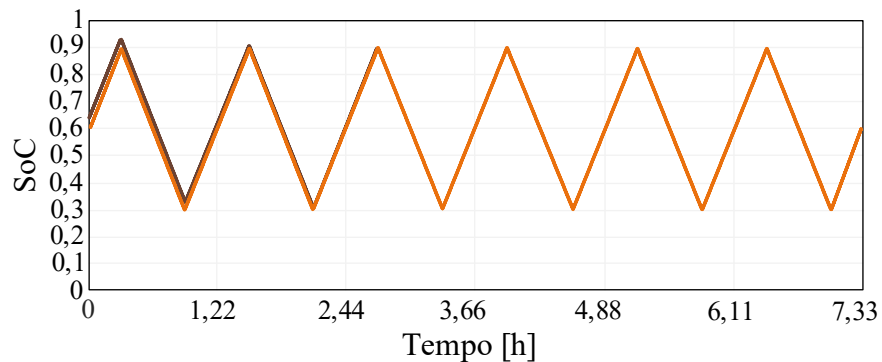


Fonte: Elaborada pela autora.

Para o perfil de corrente apresentado na Figura 4.44 lido pela placa de testes, com valor inicial de 65% do SoC informado ao algoritmo do EKF, é obtido o comportamento mostrado na Figura 4.45. Nessa configuração foram necessários em torno de 3 ciclos completos de carga para o algoritmo estimar o estado de carga com um erro relativo abaixo de 2%.

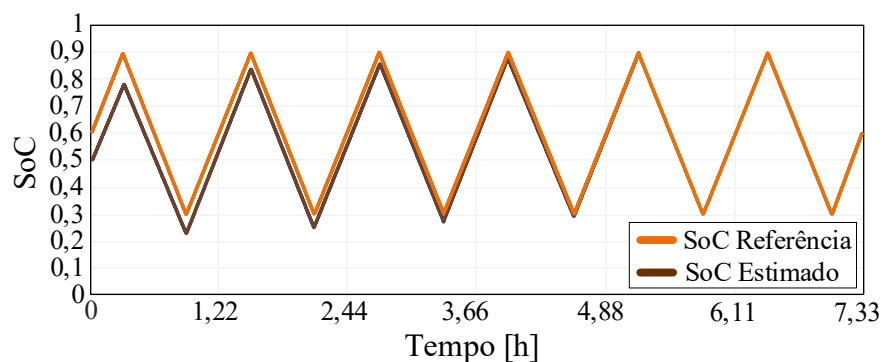
Um segundo caso de estimativa do SoC é apresentado na Figura 4.46, para um valor inicial informado ao algoritmo de 50% do SoC e o mesmo perfil de corrente da Figura 4.44. Para este caso foram necessários em torno de 5 ciclos de carga para o algoritmo estimar o estado de carga com um erro relativo abaixo de 2%.

Figura 4.45 – Referência SoC (equação de Coulomb) e SoC estimado pelo método EKF (algoritmo com um SoC inicial de 65%).



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 4.46 – Referência SoC (equação de Coulomb) e SoC estimado pelo método EKF (algoritmo com um SoC inicial de 50%).



Fonte: Elaborada pela autora.

Analisando comparativamente a Figura 4.45 com a Figura 4.46 é perceptível o impacto dos valores iniciais no tempo de convergência da estimativa do SoC pelo EKF. Uma modelagem adequada da célula, juntamente com valores iniciais e das matrizes R_k , Q_k e P_k são fundamentais para um bom desempenho das estimativas do filtro.

5 CONCLUSÃO

Nesta dissertação foi apresentada uma metodologia de estimativa do estado de carga de células de baterias de íon de lítio em tempo real. O método utiliza como ferramentas um modelo de circuito equivalente de Thévenin, com dois pares RC e o filtro de Kalman estendido, para efetuar a estimativa em tempo real.

Os resultados obtidos validam o rastreamento do SoC na placa de testes com corrente de até 80 A, entretanto, a qualidade de alguns ensaios poderiam ser melhores com algumas alterações no projeto da carga eletrônica ativa, principalmente, utilizando resistores de potências de detecção de corrente com uma precisão maior. Um processo de fabricação da placa de circuito impresso de maior qualidade, também contribuiria com um sistema mais estável.

Com a limitação da placa para aplicação em baixas corrente, as equações de $V_{oc}(SoC)$ obtidas com os pulsos de descarga não puderam ser comparadas com a análise contínua de descarga em C/30. A finalidade da taxa de descarga pequena é minimizar as perdas por efeito joule nas resistências intrínsecas da célula, além de diminuir as quedas de tensões e dinâmica sobre os elementos passivos do modelo da célula. Com o ensaio em corrente contínua haveria uma exatidão maior para as equações $V_{oc}(SoC)$.

Quanto ao algoritmo do EKF, se mostrou um método eficiente para estimar o estado de carga, e por ser um algoritmo iterativo, a capacidade de correção foi gradual. Então, mesmo que os valores iniciais estivessem incorretos à medida que as iterações avançam e mais medições foram incorporadas, o EKF tendeu a ajustar a estimativa do SoC e convergir para um valor correto após alguns ciclos de carga/descarga. Por isso, a necessidade de que os sensores tenham uma boa precisão, bem como o modelo matemático associado. Ambos os fatores contribuem para que essa convergência seja mais assertiva e ágil.

Apesar dos objetivos terem sido alcançados dentro de uma margem de satisfação, percebe-se ainda que com equipamentos comerciais mais precisos e robustos, como exemplo um ciclador de baterias comercial, seriam obtidos resultados mais confiáveis para a parametrização da célula.

Sugestões para trabalhos futuros envolvem:

- Avaliação da margem de confiabilidade dos dados obtidos nesse trabalho, comparando-os aos obtidos com um ciclador de baterias comercial;
- Desenvolvimento de um conversor aliado a carga eletrônica, integrando assim em um único dispositivo a carga e a descarga da célula automatizado;

- Possibilidade de expandir a estimativa do SoC em tempo real para a forma remota, utilizando a transmissão dos dados para dispositivos de gerenciamento;
- Ampliação da interpolação também entre tabelas de temperatura com o desenvolvimento da estimação do estado de saúde da célula.

REFERÊNCIAS

- ABNT. *NBR 16975: Células e baterias secundárias de lítio para aplicações estacionárias - Especificação elétrica e métodos de ensaio*. 2021.
- ABU-SHARKH, S.; DOERFFEL, D. *Rapid test and non-linear model characterization of solid-state lithium-ion batteries*. *Journal Power Sources*, v. 130, p. 266–274, 2004.
- AUNG, H.; SOON, J. J.; GOH, S. T.; LEW, J. M.; LOW K-S. *Battery Management System with State-of-Charge and Opportunistic State-of-Health for a Miniaturized Satellite*. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* v. 56, n. 4, 2020.
- AYMAN, S. E. *Battery management systems for electric vehicle*. *International Conference on Communication, Computer and Power (ICCCP07)*, 2007.
- BATTERY UNIVERSITY. *BU-205: Types of Lithium-ion*. Disponível em <<https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>>, 2021a.
- _____. *BU-216: Summary Table of Lithium-based Batteries*. Disponível em <<https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries>>, 2021b.
- BIOLOGIC. *Battery cycler: modularity, performance, power and flexibility*. 2020.
- CANTANE, D. A.; ANDO JUNIOR, O. H.; HAMERSCHMIDT, M. B. *Tecnologias de Armazenamento de Energia Aplicadas ao Setor Elétrico Brasileiro*. Editora Scienza, 2020 – São Carlos - SP, Brasil.
- CHEN, L.; ZHANG, Q.; FAN Y.; WAN, G.; YIN, G. *A strategy of estimating stage-of-charge of LiFePO4 battery based on Multirate Extended Kalman Filter*. *IEEE 9th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2014.
- CHEN, M.; RINCÓN-MORA, G. A. *Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance*. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 21, n. 2, p. 504–511, 2006.
- CODECA, F.; SAVARESI, S. M.; MANZONI, V. *The mix estimation algorithm for battery state-of charge estimator: Analysis of the sensitivity to measurement errors*. *Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control e 28th Chinese Control Conference*, p. 8083–8088, 2009.
- DO, D. V.; FORGEZ, C.; BENKARA, K. E. K.; FRIEDRICH, G. *Impedance Observer for a Li-Ion Battery Using Kalman Filter*. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 58, n. 8, 2009.
- DRESCH, R. F. V. *Métodos de análise do estado de carga restante de baterias de celular*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS trabalho de conclusão de curso), 2010.

DUAN, J.; TANG, X.; DAI, H.; YANG, Y.; WU, W.; WEI, X.; HUANG, Y. Building Safe Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles: A Review. *Electrochemical Energy Reviews*, 2020.

DURAN, E.; PILIOUGINE, M.; SIDRACH-DE-CARDONA, M.; GALAN, J.; ANDUJAR, J. M. *Different methods to obtain the I–V curve of PV modules: A review*. 2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2008.

EEMB. *LIR18650 Datasheet Li-ion Battery*. 2010. Disponível em <<https://www.ineltro.ch/media/downloads/SAItem/45/45958/36e3e7f3-2049-4adb-a2a7-79c654d92915.pdf>>. Acesso em 01/08/2021.

ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32 Series Datasheet*. 2022.

EUCAR. *Specification of Test Procedures for High Voltage Hybrid Electric Vehicle Traction Batteries*. Traction Battery Working Group, 2005.

FANG, L.; LI, J.; PENG, B. *Online Estimation and Error Analysis of both SOC and SOH of Lithium-ion Battery based on DEKF Method*. The 10th International Conference on Applied Energy, 2019.

GREE. *Gree Altairnano New Energy inc. page web*. Acesso em 06/01/2023, disponível em <<https://www.greelto.com/en/sohw-13378.html>> 2016.

HANNAN, M. A.; LIPU, M. S. H.; HUSSAIN, A.; SAAD, M. H.; AYOB, A. *Neural network approach for estimating state of charge of lithium-ion battery using backtracking search algorithm*. IEEE Access, v. 6, p. 10069-10079, 2018.

HART, D. W. *Eletrônica de potência análise e projeto de circuitos*. 1ª ed. McGrawHill, Bookman, 2012.

HE, H.; XIONG, R.; FAN, J. *Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach*. Energies, v. 4, n. 4, p. 582-598, 2011.

HE, H.; XIONG, R.; ZHANG, X.; SUN, F.; FAN, J. *State-of-Charge Estimation of the Lithium-Ion Battery Using an Adaptive Extended Kalman Filter Based on an Improved Thevenin Model*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, v. 60, n. 4, 2011.,

HU, G.; WIE, Y.; LEI, H.; MA, X. Constant current control of DC electronic load based on boost topology. *Elektronika ir Elektrotechnika*. Kaunas University of Technology, Faculty of Telecommunications and Electronics, v. 20, n. 2, p. 36 – 40, 2014.

HURIA, T.; CERAOLO, M.; GAZZARRI, J.; JACKY, R. *High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells*. IEEE International Electric Vehicle Conference, 2012.

JACKEY, R.; PLETT, G.; KLEIN, M. *Parameterization of a Battery Simulation Model Using Numerical Optimization Methods*. SAE Technical Paper, 2009.

JACKEY, R.; SAGINAW, M.; SANGHVI, P.; GAZZARRI, J.; HURIA, T.; CERAOLO, M. *Battery Model Parameter Estimation Using a Layered Technique: An Example Using a Lithium Iron Phosphate Cell*. The MathWorks, Inc, 2013.

JOKIĆ, I.; ZEČEVIĆ, Ž.; KRSTAJIĆ, B. *State-of-Charge Estimation of Lithium-ion Batteries using Extended Kalman filter and Unscented Kalman filter*. 23rd International Scientific-Professional Conference on Information Technology, 2018.

KALMAN, R. E. *A new approach to linear filtering and prediction problems*. Journal of basic engineering. 1960.

LARMINIE, J.; LOWRY, J. *Electric Vehicle Technology Explained*. 2 ed. Wiley, 2012.

LARSON, D. *How to Design an Optimal Electronic Load for High-Current, Low Voltage Power Supplies (Part 1, 2, 3)*. Electronic Design, 2020.

LEE, J.; KIM, Y.; CHA, H. *A New Battery Parameter Identification Considering Current, SOC and Peukert's Effect for Hybrid Electric Vehicles*. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2011.

LEMON, S.; MILLER, A. *Electric Vehicles in New Zealand: Technologically Challenged?* EEA Conference & Exhibition, 2013.

LI, Q.; LI, R.; JI, K.; DAI, W. *Kalman Filter and Its Application*. 8th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems, 2015.

LI, R.; WU, J.; WANG, H.; LI, G. *Prediction of state of charge of lithium-ion rechargeable battery with electrochemical impedance spectroscopy theory*. 5th IEEE Conference Industrial Electronics and Applications, ICIEA, p. 684–688, 2010.

MARTINS, D. C. *Eletrônica de Potência Transistores de Potência*. Ed. do autor. Florianópolis, 2018.

MARTINS, D. C.; BARBI, I. *Conversores CC-CC Básicos Não Isolados*. 4^a ed. Florianópolis, 2011.

MENG, J.; RICCO, M.; LUO, G.; SWIERCZYNSKI, M.; STROE, D-I.; STROE, A-I.; TEODORESCU, R. *An Overview of Online Implementable SOC Estimation Methods for Lithium-ion Batteries*. 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), 2017.

MURER, N.; DIARD, J-P. *Introduction to EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy) with EC-Lab®/EC-Lab® Express*. 2019.

NG, K. S.; MOO, C.-S.; CHEN, Y.-P.; HSIEH, Y.-C. *Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries*. Applied Energy, v. 86, n. 9, p. 1506–1511, 2009.

PATTIPATI, C. S. System identification and estimation framework for pivotal automotive battery management system characteristics. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews*, v. 41, n. 6, p. 869–884, 2011.

PILLER, S.; PERRIN, M.; JOSSEN, A. Methods for state-of-charge determination and their applications. *Journal of Power Sources*, v. 96, n. 1, p. 113 – 120, 2001.

PLETT, G. L. *Battery Management Systems: Battery Modeling Volume I*. Artech House, p. 0-323, 2015.

RAHIMI-EICHI, H.; CHOW, M.-Y. *Modeling and analysis of battery hysteresis effects*. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), p. 4479–4486, 2012.

RAHIMI-EICHI, H.; OJHA, U.; BARONTI, F.; CHOW, M. *Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles*. IEEE industrial electronics magazine, p. 4-16, 2013.

RAMADESIGAN, V.; NORTHROP, P. W. C.; DE, S.; SANTHANAGOPALAN, S.; BRAATZ, R. D.; SUBRAMANIAN, V. R. *Modeling and simulation of Lithium-ion batteries from a systems engineering perspective*. *Journal of the Electrochemical Society*, v. 159, n. 3, p. R31–R45, 2012.

ROSÉN, L.; SAMIMI, S. *Small electronic load. Design and analysis of a small electronic load for testing on-board DC/DC converters*. Chalmers University of Technology, 2012.

TANG, X.; MAO, X.; LIN, J.; KOCH, B. *Li-ion Battery Parameter Estimation for State of Charge*. American Control Conference, 2011.

TELEDYNE FLIR. *FLIR A655sc*. Disponível em < <https://www.flir.com/products/a655sc/> >. Acesso em: 16/02/2023.

THANAGASUNDRAM, S.; ARUNACHALA, R.; MAKINEJAD, K.; TEUTSCH, T.; JOSSEN, A. *A Cell Level Model for Battery Simulation*. European Electric Vehicle Congress, 2012.

THUNDER-SKY. *Instruction Manual for LFP/LCP/LMP Lithium Power Battery*. 2007.

VICENTE, A. B. *Bateria de íon de lítio: Uma breve revisão*. CBMM - Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, 2018.

VIGERSTOL, O. K. *A Review of the Suitability of Lithium Battery Technology in ICT Energy Infrastructure*. 2017 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2017.

WANG, Y.; LI, L.; DING, Q.; LIU, J.; CHEN, P. *Lithium-ion battery SOC estimation based on an improved adaptive extended Kalman filter*. IEEE 16th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2021.

WEISS UMWELTTECHNIK GMBH. *Climate-Test-Chambers-WK3-WKS3-1*. Manual disponível em < <https://weiss-na.com/wp-content/uploads/Climate-Test-Chambers-WK3-WKS3-1.pdf>>. Acesso 16/02/2023.

WINDARKO, N. A.; CHOI, J.; CHUNG, G-B. *Improvement of electrical modeling of NiMH battery for application of Microgrid System*. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), p. 4243–4248, 2010.

XIONG, R.; CAO, J.; YU, Q.; HE, H.; SUN, F. *Critical Review on the Battery State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicles*. Special Section on Battery Energy Storage and Management Systems. v. 6, p. 1832-1843, 2018.

YINLONG. *Specification of Cylindrical 40Ah-Lithium Titanate Power Cell*. <<http://www.zhyle.com/>>. 2016.

ZHANG, F.; LIU, G.; FANG, L. *A Battery State of Charge Estimation Method using Sliding Mode Observer*. 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008.

ZHANG, H.; CHOW, M-Y. *On-line PHEV Battery Hysteresis Effect Dynamics Modeling*. IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, p. 1844-1849, 2010.

ZHANG, L.; PENG, H.; NING, Z.; MU, Z.; SUN, C. *Comparative Research on RC Equivalent Circuit Models for Lithium-Ion Batteries of Electric Vehicles*. Applied Sciences, p. 5, 2017.

ZORZETTO, R. *Criadores de um mundo recarregável*. Revista pesquisa FAPESP, 2018.

APÊNDICE A – DEDUÇÕES MATEMÁTICAS E ANÁLISE DE CIRCUITOS

Nesse apêndice são apresentadas as deduções para a discretização das equações do modelo de circuito equivalente e para a obtenção das covariâncias Q_K e R_K pela definição, além da análise do circuito da carga eletrônica ativa.

A.1 DISCRETIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES DO MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE

Partindo da conversão de uma equação diferencial ordinária genérica do tempo contínuo para o tempo discreto. Definida por

$$\dot{x}(t) = ax(t) + bu(t). \quad (\text{A.1})$$

Buscando avaliar $x(t)$ em tempos discretos $t = k\Delta t$, onde $x[k] = x(k\Delta t)$. Assumindo que a entrada $u(t)$ é constante durante o intervalo de amostragem, a solução geral da Eq. (A.1) resulta em

$$x(t) = e^{at}x(0) + \int_0^t e^{a(t-\tau)} bu(\tau) d\tau. \quad (\text{A.2})$$

Isso indica que a resposta no tempo da equação diferencial ordinária é composta por uma parte que depende da condição inicial $x(0)$ e outra parte que depende do sinal de entrada $u(t)$. Se a equação diferencial ordinária for estável, então $a < 0$ e a contribuição da condição inicial decai. A contribuição devido ao sinal de entrada é dominante em estado estacionário, e a integral que calcula essa contribuição é conhecida como integral de convolução.

A dedução da equação (A.2) é apresentada a seguir. Primeiro, reorganizamos a Eq. (A.1) como

$$\dot{x}(t) - ax(t) = bu(t). \quad (\text{A.3})$$

Multiplicando ambos os lados dessa equação por e^{-at} , tem-se

$$e^{-at}(\dot{x}(t) - ax(t)) = e^{-at}bu(t). \quad (\text{A.4})$$

Observa-se que o lado esquerdo dessa equação também pode ser descrito como,

$$\frac{d}{dt}[e^{-at}x(t)], \quad (\text{A.5})$$

então podemos escrever

$$\frac{d}{dt}[e^{-at}x(t)] = e^{-at}bu(t). \quad (\text{A.6})$$

Agora, integrando ambos os lados dessa equação, do tempo 0 a t , tendo o cuidado de substituir t dentro da integral por uma variável de integração τ , chega-se em

$$\int_0^t \frac{d}{d\tau}[e^{-a\tau}x(\tau)] d\tau = \int_0^t e^{a\tau} bu(\tau) d\tau. \quad (\text{A.7})$$

$$\int_0^t d[e^{-a\tau}x(\tau)] = \int_0^t e^{a\tau} bu(\tau) d\tau. \quad (\text{A.8})$$

Note que o lado esquerdo dessa equação se torna

$$e^{-a\tau}x(\tau)|_0^t = e^{-at}x(t) - x(0), \quad (\text{A.9})$$

então

$$e^{-at}x(t) - x(0) = \int_0^t e^{a\tau} bu(\tau) d\tau. \quad (\text{A.10})$$

Movendo $x(0)$ para o lado direito e multiplicando ambos os lados por e^{at} é obtido a expressão (A.2).

Uma relação no tempo discreto pode ser encontrada utilizando a equação (A.2). Substituindo

$$\begin{aligned} x[k+1] &= x((k+1)\Delta t) \\ &= e^{a(k+1)\Delta t}x(0) + \int_0^{(k+1)\Delta t} e^{a((k+1)\Delta t-\tau)} bu(\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

Dividindo a integral em duas partes,

$$\begin{aligned}
x[k + 1] &= e^{a(k+1)\Delta t} x(0) + \int_0^{k\Delta t} e^{a((k+1)\Delta t - \tau)} bu(\tau) d\tau \\
&\quad + \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{a((k+1)\Delta t - \tau)} bu(\tau) d\tau.
\end{aligned} \tag{A.12}$$

Fatorando $e^{a\Delta t}$ nos dois primeiros termos

$$\begin{aligned}
x[k + 1] &= e^{a\Delta t} e^{ak\Delta t} x(0) + e^{a\Delta t} \int_0^{k\Delta t} e^{a(k\Delta t - \tau)} bu(\tau) d\tau \\
&\quad + \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{a((k+1)\Delta t - \tau)} bu(\tau) d\tau.
\end{aligned} \tag{A.13}$$

Manipulando (A.13) se chega a

$$\begin{aligned}
x[k + 1] &= e^{a\Delta t} \left(e^{ak\Delta t} x(0) + \int_0^{k\Delta t} e^{a(k\Delta t - \tau)} bu(\tau) d\tau \right) \\
&\quad + \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{a((k+1)\Delta t - \tau)} bu(\tau) d\tau \\
&= e^{a\Delta t} x(k\Delta t) + \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{a((k+1)\Delta t - \tau)} bu(\tau) d\tau.
\end{aligned} \tag{A.14}$$

Por fim, escrevendo o resultado usando notação no tempo discreto

$$x[k + 1] = e^{a\Delta t} x[k] + e^{a(k+1)\Delta t} \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{-a\tau} bu(\tau) d\tau. \tag{A.15}$$

Na integral que resta, se assumido que $u(t)$ é constante de $k\Delta t$ a $(k + 1)\Delta t$ e igual a $u(k\Delta t)$

$$\begin{aligned}
x[k+1] &= e^{a\Delta t}x[k] + e^{a(k+1)\Delta t} \left(\int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{-a\tau} d\tau \right) bu[k] \\
&= e^{a\Delta t}x[k] + e^{a(k+1)\Delta t} \left(-\frac{1}{a} e^{-a\tau} \Big|_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} \right) bu[k] \\
&= e^{a\Delta t}x[k] + \frac{1}{a} e^{a(k+1)\Delta t} (e^{-ak\Delta t} - e^{-a(k+1)\Delta t}) bu[k] \\
&= e^{a\Delta t}x[k] + \frac{1}{a} (e^{a\Delta t} - 1) bu[k].
\end{aligned} \tag{A.16}$$

Essa é a equação de diferença ordinária genérica no tempo discreto, que é equivalente à equação diferencial ordinária no tempo contínuo (A.1). Para usar esse resultado no modelo elétrico de circuito equivalente da célula, associa-se as correspondências entre as constantes em (A.17) e (A.18).

$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{V_1}{C_1 R_1} + \frac{I_{cell}}{C_1} \tag{A.17}$$

$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{V_2}{C_2 R_2} + \frac{I_{cell}}{C_2} \tag{A.18}$$

Onde

$$a_1 = -\frac{1}{C_1 R_1} \text{ e } b_1 = \frac{1}{C_1}, \tag{A.19}$$

$$a_2 = -\frac{1}{C_2 R_2} \text{ e } b_2 = \frac{1}{C_2}, \tag{A.20}$$

as correspondências entre os sinais

$$x_1[k] = V_1[k] \text{ e } u[k] = I_{cell}[k], \tag{A.21}$$

$$x_2[k] = V_2[k] \text{ e } u[k] = I_{cell}[k]. \tag{A.22}$$

Substituindo (A.19), (A.20), (A.21) e (A.22) no resultado genérico (A.16), é obtido as equações no tempo discreto (A.23) e (A.24).

$$\begin{aligned}
V_1[k+1] &= e^{\left(-\frac{\Delta t}{C_1 R_1}\right)} V_1[k] + (-C_1 R_1) \left(e^{\left(-\frac{\Delta t}{C_1 R_1}\right)} - 1 \right) \left(\frac{1}{C_1} \right) I_{cell}[k] \\
&= e^{\left(-\frac{\Delta t}{C_1 R_1}\right)} V_1[k] + R_1 \left(1 - e^{\left(-\frac{\Delta t}{C_1 R_1}\right)} \right) I_{cell}[k]
\end{aligned} \tag{A.23}$$

$$\begin{aligned}
V_2[k+1] &= e^{\left(-\frac{\Delta t}{C_2 R_2}\right)} V_2[k] + (-C_2 R_2) \left(e^{\left(-\frac{\Delta t}{C_2 R_2}\right)} - 1 \right) \left(\frac{1}{C_2} \right) I_{cell}[k] \\
&= e^{\left(-\frac{\Delta t}{C_2 R_2}\right)} V_2[k] + R_2 \left(1 - e^{\left(-\frac{\Delta t}{C_2 R_2}\right)} \right) I_{cell}[k]
\end{aligned} \tag{A.24}$$

Sendo o modelo no tempo contínuo, que descreve o modelo elétrico de circuito equivalente, descrito por

$$\frac{dSoC(t)}{dt} = -\frac{I_{cell}(t)}{C_n} \tag{A.25}$$

$$\frac{dV_1(t)}{dt} = -\frac{V_1(t)}{C_1 R_1} + \frac{I_{cell}(t)}{C_1} \tag{A.26}$$

$$\frac{dV_2(t)}{dt} = -\frac{V_2(t)}{C_2 R_2} + \frac{I_{cell}(t)}{C_2} \tag{A.27}$$

$$V_{cell}(t) = V_{oc}(SoC(t)) - R_s \cdot I_{cell}(k) - V_1(t) - V_2(t) \tag{A.28}$$

O modelo no tempo discreto, que descreve o circuito é composto pelas quatro equações acopladas que seguem:

$$SoC[k+1] = SoC[k] + \frac{-\Delta t}{C_n} I_{cell}[k], \tag{A.29}$$

$$V_1[k+1] = e^{\left(-\frac{\Delta t}{C_1 R_1}\right)} V_1[k] + R_1 \left(1 - e^{\left(-\frac{\Delta t}{C_1 R_1}\right)} \right) I_{cell}[k], \tag{A.30}$$

$$V_2[k+1] = e^{\left(-\frac{\Delta t}{C_2 R_2}\right)} V_2[k] + R_2 \left(1 - e^{\left(-\frac{\Delta t}{C_2 R_2}\right)} \right) I_{cell}[k], \tag{A.31}$$

$$V_{cell}[k] = V_{oc}(SoC[k]) - V_1[k] + V_2[k] - R_s I_{cell}[k]. \tag{A.32}$$

A.2 OBTENÇÃO DAS COVARIÂNCIAS Q_k E R_k PELA DEFINIÇÃO

Por definição a matriz de covariância é descrita por (A.33), onde se tem a média da multiplicação do vetor de ruído do sistema (ω_k).

$$Q_k = E\{\omega_k \omega_k^T\} \quad (\text{A.33})$$

Sendo ω_k uma relação entre o desvio padrão (σ) e uma variável aleatória gaussiana (ξ_k) de média nula e desvio padrão 1, $\xi \sim N(0,1)$, relação (A.34).

$$\omega_k = \begin{bmatrix} \sigma_{x1} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{x2} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{x3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_k^{\{x1\}} \\ \xi_k^{\{x2\}} \\ \xi_k^{\{x3\}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.34})$$

Multiplicando as matrizes da igualdade (A.34), chega-se:

$$\begin{bmatrix} \omega_k^{\{x1\}} \\ \omega_k^{\{x2\}} \\ \omega_k^{\{x3\}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{x1} \xi_k^{\{x1\}} \\ \sigma_{x2} \xi_k^{\{x2\}} \\ \sigma_{x3} \xi_k^{\{x3\}} \end{bmatrix}, \quad \xi \sim N(0,1). \quad (\text{A.35})$$

Substituindo a igualdade (A.35) na definição covariância (A.33), fica sendo válido as operações em (A.36), (A.37) e (A.38).

$$\begin{aligned} Q_k = E\{\omega_k \omega_k^T\} &= E \left\{ \begin{bmatrix} \sigma_{x1} \xi_k^{\{x1\}} \\ \sigma_{x2} \xi_k^{\{x2\}} \\ \sigma_{x3} \xi_k^{\{x3\}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{x1} \xi_k^{\{x1\}} \\ \sigma_{x2} \xi_k^{\{x2\}} \\ \sigma_{x3} \xi_k^{\{x3\}} \end{bmatrix}^T \right\} \\ &= \left\{ \begin{bmatrix} \sigma_{x1} \xi_k^{\{x1\}} \\ \sigma_{x2} \xi_k^{\{x2\}} \\ \sigma_{x3} \xi_k^{\{x3\}} \end{bmatrix} \left[(\sigma_{x1} \xi_k^{\{x1\}})^T \quad (\sigma_{x2} \xi_k^{\{x2\}})^T \quad (\sigma_{x3} \xi_k^{\{x3\}})^T \right] \right\} \end{aligned} \quad (\text{A.36})$$

$$\begin{aligned} Q_k &= E\{\omega_k \omega_k^T\} \\ &= E \left\{ \begin{bmatrix} \sigma_{x1} \xi_k^{\{x1\}} (\sigma_{x1} \xi_k^{\{x1\}})^T & \sigma_{x1} \xi_k^{\{x1\}} (\sigma_{x2} \xi_k^{\{x2\}})^T & \sigma_{x1} \xi_k^{\{x1\}} (\sigma_{x3} \xi_k^{\{x3\}})^T \\ \sigma_{x2} \xi_k^{\{x2\}} (\sigma_{x1} \xi_k^{\{x1\}})^T & \sigma_{x2} \xi_k^{\{x2\}} (\sigma_{x2} \xi_k^{\{x2\}})^T & \sigma_{x2} \xi_k^{\{x2\}} (\sigma_{x3} \xi_k^{\{x3\}})^T \\ \sigma_{x3} \xi_k^{\{x3\}} (\sigma_{x1} \xi_k^{\{x1\}})^T & \sigma_{x3} \xi_k^{\{x3\}} (\sigma_{x2} \xi_k^{\{x2\}})^T & \sigma_{x3} \xi_k^{\{x3\}} (\sigma_{x3} \xi_k^{\{x3\}})^T \end{bmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (\text{A.37})$$

$$\begin{aligned}
Q_k &= E\{\omega_k \omega_k^T\} \\
&= E \left\{ \begin{bmatrix} \sigma_{x1}^2 \xi_k^{\{x1\}} \left(\xi_k^{\{x1\}} \right)^T & \sigma_{x1} \sigma_{x2} \xi_k^{\{x1\}} \left(\xi_k^{\{x2\}} \right)^T & \sigma_{x1} \sigma_{x3} \xi_k^{\{x1\}} \left(\xi_k^{\{x3\}} \right)^T \\ \sigma_{x2} \sigma_{x1} \xi_k^{\{x2\}} \left(\xi_k^{\{x1\}} \right)^T & \sigma_{x2}^2 \xi_k^{\{x2\}} \left(\xi_k^{\{x2\}} \right)^T & \sigma_{x2} \sigma_{x3} \xi_k^{\{x2\}} \left(\xi_k^{\{x3\}} \right)^T \\ \sigma_{x3} \sigma_{x1} \xi_k^{\{x3\}} \left(\xi_k^{\{x1\}} \right)^T & \sigma_{x3} \sigma_{x2} \xi_k^{\{x3\}} \left(\xi_k^{\{x2\}} \right)^T & \sigma_{x3}^2 \xi_k^{\{x3\}} \left(\xi_k^{\{x3\}} \right)^T \end{bmatrix} \right\} \quad (A.38)
\end{aligned}$$

Multiplicando o operador média (E) por cada termo, obtém-se:

$$\begin{aligned}
Q_k &= E\{\omega_k \omega_k^T\} \\
&= \begin{bmatrix} \sigma_{x1}^2 E \left\{ \xi_k^{\{x1\}} \left(\xi_k^{\{x1\}} \right)^T \right\} & \sigma_{x1} \sigma_{x2} E \left\{ \xi_k^{\{x1\}} \left(\xi_k^{\{x2\}} \right)^T \right\} & \sigma_{x1} \sigma_{x3} E \left\{ \xi_k^{\{x1\}} \left(\xi_k^{\{x3\}} \right)^T \right\} \\ \sigma_{x2} \sigma_{x1} E \left\{ \xi_k^{\{x2\}} \left(\xi_k^{\{x1\}} \right)^T \right\} & \sigma_{x2}^2 E \left\{ \xi_k^{\{x2\}} \left(\xi_k^{\{x2\}} \right)^T \right\} & \sigma_{x2} \sigma_{x3} E \left\{ \xi_k^{\{x2\}} \left(\xi_k^{\{x3\}} \right)^T \right\} \\ \sigma_{x3} \sigma_{x1} E \left\{ \xi_k^{\{x3\}} \left(\xi_k^{\{x1\}} \right)^T \right\} & \sigma_{x3} \sigma_{x2} E \left\{ \xi_k^{\{x3\}} \left(\xi_k^{\{x2\}} \right)^T \right\} & \sigma_{x3}^2 E \left\{ \xi_k^{\{x3\}} \left(\xi_k^{\{x3\}} \right)^T \right\} \end{bmatrix}. \quad (A.39)
\end{aligned}$$

Como as variáveis são totalmente correlacionadas consigo mesmas, (A.40) e descorrelacionadas entre si, (A.41), então os termos relacionados a ξ_k assumem valores de 1 e 0, respectivamente.

$$E \left\{ \xi_k^{\{x1\}} \left(\xi_k^{\{x1\}} \right)^T \right\} = E \left\{ \xi_k^{\{x2\}} \left(\xi_k^{\{x2\}} \right)^T \right\} = E \left\{ \xi_k^{\{x3\}} \left(\xi_k^{\{x3\}} \right)^T \right\} = 1 \quad (A.40)$$

$$\begin{aligned}
E \left\{ \xi_k^{\{x1\}} \left(\xi_k^{\{x2\}} \right)^T \right\} &= E \left\{ \xi_k^{\{x1\}} \left(\xi_k^{\{x3\}} \right)^T \right\} = E \left\{ \xi_k^{\{x2\}} \left(\xi_k^{\{x1\}} \right)^T \right\} = E \left\{ \xi_k^{\{x2\}} \left(\xi_k^{\{x3\}} \right)^T \right\} \\
&= \sigma_{x3} \sigma_{x1} E \left\{ \xi_k^{\{x3\}} \left(\xi_k^{\{x1\}} \right)^T \right\} = E \left\{ \xi_k^{\{x3\}} \left(\xi_k^{\{x2\}} \right)^T \right\} = 0 \quad (A.41)
\end{aligned}$$

Logo a matriz de covariância sistema é descrita por:

$$Q_k = E\{\omega_k \omega_k^T\} = \begin{bmatrix} \sigma_{x1}^2 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{x2}^2 1 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{x3}^2 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{x1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{x2}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{x3}^2 \end{bmatrix}. \quad (A.42)$$

O mesmo é aplicável para a definição (A.43).

$$R_k = E\{\vartheta_k \vartheta_k^T\} \quad (A.43)$$

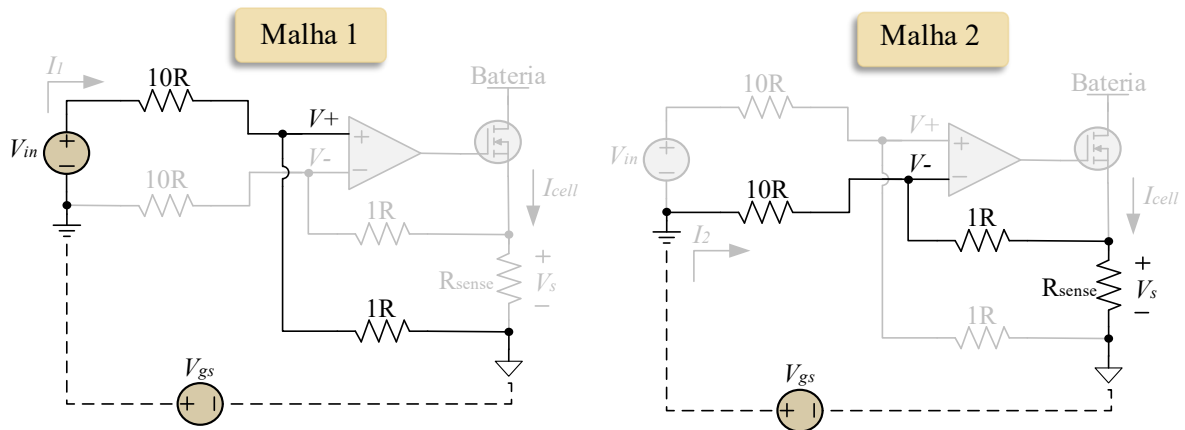
Então a matriz de covariância sistema de observação pode ser descrita pela relação (A.44).

$$R_k = E\{\vartheta_k \vartheta_k^T\} = \begin{bmatrix} \sigma_{x1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{x2}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{x3}^2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.44})$$

A.3 ANÁLISE DO CIRCUITO DA CARGA ELETRÔNICA ATIVA

Considerando o circuito de controle e potência apresentado na Figura 2.28, são obtidas pela lei de Kirchhoff das correntes, as duas malhas apresentadas na Figura A.1.

Figura A.1 – Análise de malhas de corrente do circuito de controle e potência.



Fonte: Elaborada pela autora.

Com a presença de dois referenciais no circuito, um para o sinal de controle e outro para o referencial de potência, surge uma tensão diferencial entre ambos, denominada V_{gs} . Pela análise do circuito da malha 1, a corrente circulante na malha definida como I_1 é descrita pela relação (A.45).

$$I_1 = \frac{V_{gs} + V_{in}}{11R} \quad (\text{A.45})$$

Onde V_{in} é a tensão de entrada do controle e R é uma resistência. A tensão V^+ na entrada não inversora do amplificador pode ser descrita com base no referencial de potência, por

$$V^+ = R \cdot I_1, \quad (\text{A.46})$$

então se for substituída a relação (A.45) na equação (A.46), é obtido:

$$V^+ = \frac{R \cdot (V_{gs} + V_{in})}{11R}. \quad (\text{A.47})$$

Simplificando as resistências chega-se à

$$V^+ = \frac{(V_{gs} + V_{in})}{11}. \quad (\text{A.48})$$

Para a análise do circuito da malha 2, a corrente I_2 circulante assume a igualdade (A.49).

$$I_2 = \frac{V_{gs} - V_s}{11R} \quad (\text{A.49})$$

Onde V_s é a tensão sobre resistor de detecção R_{sense} . A tensão na entrada inversora do amplificador, V^- , pode ser descrita com base no referencial de potência por

$$V^- = R \cdot I_2 + V_s, \quad (\text{A.50})$$

então se for substituída a relação (A.49) na equação (A.50), obtém-se:

$$V^- = \frac{R(V_{gs} - V_s) + V_s}{11R}. \quad (\text{A.51})$$

Simplificando as resistências é chegado em

$$V^- = \frac{(V_{gs} - V_s) + V_s}{11} \quad (\text{A.52})$$

Pelas características fundamentais de operação do amplificador operacional, a tensão na entrada inversora é igual a tensão na entrada não inversora, conforme equação (A.53). Logo, substituindo as igualdades (A.48) e (A.52) na definição, é obtida a relação (A.54).

$$V^+ = V^- \quad (\text{A.53})$$

$$\frac{(V_{gs} + V_{in})}{11} = \frac{(V_{gs} - V_s)}{11} + V_s \quad (\text{A.54})$$

Ambos os lados da igualdade são multiplicados por 11, equação (A.55), com objetivo de simplificar a expressão, logo,

$$(11) \left[\frac{(V_{gs} + V_{in})}{11} \right] = \left[\frac{(V_{gs} - V_s)}{11} + V_s \right] (11) \quad (\text{A.55})$$

é igual a:

$$V_{gs} + V_{in} = V_{gs} - V_s + 11V_s . \quad (\text{A.56})$$

Subtraindo os termos

$$V_{in} = 10V_s . \quad (\text{A.57})$$

A relação (A.57) indica a proporção entre o sinal aplicado na entrada do controle e a tensão refletida para o resistor de detecção. A corrente I_{cell} provinda da bateria é definida diretamente por lei de Ohm, conforme igualdade (A.58). Da determinação de I_{cell} é possível constatar que a tensão sobre o resistor de detecção será 10 vezes menor que a tensão de entrada do controle e que a corrente nesse ramo depende diretamente de V_{in} , uma vez que R_{sense} é fixo.

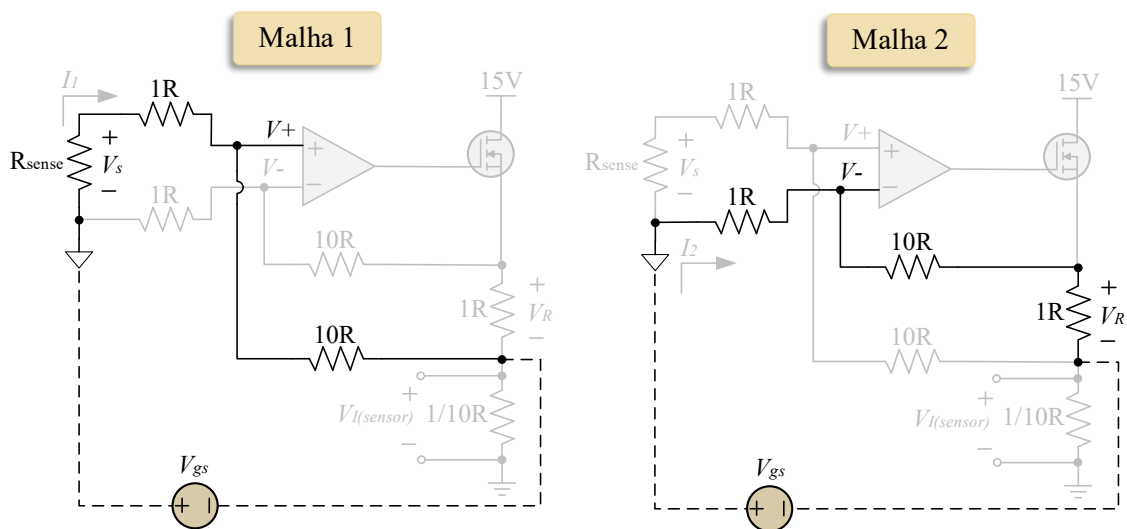
$$I_{cell} = \frac{V_s}{R_{sense}} = \frac{V_{in}}{10R_{sense}} \quad (\text{A.58})$$

Uma análise semelhante se aplica ao circuito de aquisição de corrente. Sendo obtida a relação (A.59), que indica que a proporção entre o sinal aplicado sobre o resistor de detecção (V_s) e a tensão sobre o segundo resistor do divisor resistivo ($V_{R_{current}}$) será igual.

$$V_s = V_{R_{current}} . \quad (\text{A.59})$$

Agora fazendo a análise das duas malhas também por Kirchhoff, para o circuito de aquisição do sinal de corrente, conforme Figura A.2.

Figura A.2 – Análise de malhas de corrente do circuito de aquisição do sinal de corrente.



Fonte: Adaptado de Larson (2020).

Pela análise do circuito da malha 1, a corrente circulante na malha definida como I_1 é descrita pela relação (A.60).

$$I_1 = \frac{V_{gs} + V_s}{11R} \quad (\text{A.60})$$

A tensão V^+ na entrada não inversora do amplificador é descrita por

$$V^+ = 10R \cdot I_1 - V_{gs}, \quad (\text{A.61})$$

substituído a relação (A.60) na equação (A.61), é obtida:

$$V^+ = 10R \cdot \left(\frac{V_{gs} + V_s}{11R} \right) - V_{gs}. \quad (\text{A.62})$$

Simplificando as resistências e expandindo os termos chega-se em

$$V^+ = \frac{10}{11} V_{gs} + \frac{10}{11} V_s - V_{gs}. \quad (\text{A.63})$$

Para a análise do circuito da malha 2, a corrente I_2 circulante assume a igualdade (A.64).

$$I_2 = \frac{V_{gs} - V_R}{11R} \quad (\text{A.64})$$

Aonde V_R é a tensão sobre o primeiro resistor do divisor resistivo. A tensão na entrada inversora do amplificador, V^- , é descrita por

$$V^- = 10R \cdot I_2 + V_R - V_{gs}, \quad (\text{A.65})$$

substituído a relação (A.64) na equação (A.65), é obtida:

$$V^- = 10R \cdot \left(\frac{V_{gs} - V_R}{11R} \right) + V_R - V_{gs}. \quad (\text{A.66})$$

Simplificando as resistências e expandindo os termos chega-se em

$$V^- = \frac{10}{11} V_{gs} - \frac{10}{11} V_R + V_R - V_{gs} = \frac{1}{11} V_R - \frac{1}{11} V_{gs}. \quad (\text{A.67})$$

Novamente aplicando as características de operação do amplificador operacional da equação (A.53), das igualdades (A.63) e (A.67) obtém-se a relação (A.68).

$$\frac{10}{11} V_{gs} + \frac{10}{11} V_s - V_{gs} = \frac{1}{11} V_R - \frac{1}{11} V_{gs} \quad (\text{A.68})$$

Simplificando os termos da equação (A.68), é chegado em

$$\frac{10}{11}V_s = \frac{1}{11}V_R \quad (\text{A.69})$$

ou

$$10V_s = V_R. \quad (\text{A.70})$$

A relação (A.70) indica a proporção entre o sinal aplicado sobre o resistor de detecção e a tensão sobre o primeiro resistor do divisor resistivo, o que significa que a tensão a ser lida pelo microcontrolador será 10 vezes menor que isso; sinal de tensão lido no ponto $V_{I(sensor)}$.

APÊNDICE B – DADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Tabela 5.1 – Tabela de parâmetros para temperatura de 5 °C.

Parâmetros: 5 °C						
Pulso	SOC	Rs	R1	R2	C1	C2
1	0.962962313	0.00058027	1.7434e-04	4.2912e-04	6.6841e+06	1.0754e+05
4	0.851853151	0.00065148	2.0530e-04	5.3599e-04	7.4131e+06	7.7147e+04
7	0.740741391	0.00064072	2.0052e-04	5.0820e-04	8.4246e+06	6.2132e+04
10	0.629630279	0.00066304	1.9695e-04	6.3041e-04	7.7968e+06	5.5170e+04
14	0.481550357	0.00064613	2.4449e-04	7.9889e-04	6.4483e+06	5.0660e+04
16	0.407440546	0.00080408	2.6752e-04	8.8397e-04	5.4753e+06	4.8479e+04
18	0.333406758	0.00069421	2.7677e-04	0.0010	5.7136e+06	3.8764e+04
21	0.222252762	0.00068886	3.0996e-04	0.0012	4.2245e+06	2.2398e+04
23	0.14820078	0.00070688	5.0213e-04	0.0014	1.9437e+06	1.2243e+04
24	0.111334633	0.00069632	7.9421e-04	0.0019	1.0124e+06	624.7485
25	0.074185835	0.00074301	0.0012	0.0030	5.4508e+05	1.0754e+05
26	0	0.00067437	0.0042	0.0248	5.9578e+04	7.7147e+04

Tabela 5.2 – Pontos retirados das acomodações de V_{oc} em 5 °C.

Pulso 2		Pulso 5		Pulso 8		Pulso 11	
Tempo [s]	Voc [V]	Tempo [s]	Voc [V]	Tempo [s]	Voc [V]	Tempo [s]	Voc [V]
0	2.5121	0	2.4013	0	2.3123	0	2.2433
1.1	2.5145	1.2	2.4046	1.4	2.3161	1.5	2.2467
4.7	2.5165	5	2.4069	5.2	2.3184	5.2	2.2489
9.7	2.5183	10.1	2.4086	10.2	2.3202	10.3	2.2511
14.8	2.5195	15.1	2.41	15.2	2.3215	15.2	2.2527
19.7	2.5206	20	2.4111	20.3	2.3228	20.3	2.254
24.7	2.5215	25	2.412	25.5	2.3237	25.3	2.2552
34.7	2.5226	35.1	2.4133	35.3	2.3253	35.3	2.2567
65.1	2.5246	70.5	2.4158	87	2.3284	53.9	2.2587
168.2	2.5264	206.6	2.4178	192.2	2.33	76.5	2.2601
479.3	2.5275	614.6	2.4189	547.2	2.3311	126.8	2.2614
742	2.5279	1645	2.4199	1509.2	2.3322	232	2.2625
1725.7	2.5288	2603.9	2.4205	2535.4	2.3327	413.3	2.2632
2720.3	2.5291	3635.3	2.4209	3509.4	2.3331	1412.8	2.2643
3772.9	2.5293	4628.3	2.4209	4541.7	2.3333	2401.2	2.265
4633.3	2.5295	5400	2.4212	5400	2.3336	3429.8	2.2652
5400	2.5295					4431.8	2.2654
						5400	2.2657
Pulso 15		Pulso 17		Pulso 19		Pulso 22	
0	2.1805	0	2.1607	0	2.1388	0	2.105
1.4	2.1846	1.1	2.1629	1.3	2.1437	1.1	2.1131
5.6	2.1875	4.1	2.1651	3.9	2.1461	3.6	2.1157

11.4	2.1904	7.4	2.1671	9.2	2.1488	7.4	2.1182
16.4	2.1919	11.9	2.1691	15.3	2.1515	15.4	2.1222
21.4	2.1933	16.9	2.1709	20.3	2.1531	28.1	2.1265
26.4	2.1944	21.9	2.1723	25.3	2.1546	37.5	2.1287
36.4	2.1964	31.9	2.1747	30.3	2.1557	47.4	2.1307
62.9	2.1995	54.8	2.1781	40.2	2.1577	79.7	2.1347
107.7	2.2018	82.2	2.1803	59	2.1604	106.1	2.1365
231.2	2.2035	125.2	2.1819	87.1	2.1627	222.6	2.1397
602	2.2049	210.2	2.1832	138.7	2.1647	497.8	2.1417
1631.2	2.206	770.1	2.1852	295	2.1665	726.4	2.1423
2634.1	2.2067	1239.6	2.1857	875.2	2.1682	1399.4	2.1432
3631.1	2.2071	2250.5	2.1866	1821.6	2.1691	1744.6	2.1437
4660.9	2.2073	3252.9	2.187	2839.4	2.1698	2739.2	2.1443
5400	2.2076	4233.9	2.1872	3838.9	2.17	3720.1	2.1448
		4947.9	2.1875	4435.7	2.1703	4591.1	2.145
		5400	2.1877	5400	2.1707	5400	2.1452
Pulso 24		Pulso 25		Pulso 26		Pulso 27	
0	2.0791	0	2.0512	0	1.9661	0	1.5128
0.7	2.0847	0.9	2.0617	0.9	2.0007	0.4	1.5463
2.3	2.0874	2.2	2.0657	2.2	2.0174	1.5	1.5894
5	2.0903	4.5	2.0695	3.7	2.0259	2.4	1.6133
8	2.0925	6.4	2.0715	5.3	2.032	4	1.6586
11.5	2.0945	9.2	2.0742	9.9	2.0413	8.4	1.7505
16.4	2.0972	13.6	2.0775	15.5	2.0485	11.7	1.8016
21.4	2.0997	18.6	2.0804	23.7	2.0552	15.5	1.8456
26.4	2.1014	23.6	2.0831	31.2	2.0601	18.9	1.8792
39.1	2.1052	28.7	2.0851	38	2.0635	24.1	1.9165
51.7	2.1079	33.7	2.0869	53.5	2.0693	36.6	1.9687
70.7	2.1108	37.9	2.0883	59.6	2.0711	50.9	1.9969
90.3	2.1128	47.4	2.0909	84.1	2.0764	53.5	2.0002
110	2.1144	60.5	2.0939	146.5	2.0838	83.5	2.0241
155.9	2.1166	81.2	2.097	186.8	2.0865	132.9	2.0402
208.1	2.1182	131.5	2.1014	257.6	2.0894	193.5	2.0494
325.4	2.12	166.3	2.1032	385.8	2.0923	262.4	2.0554
783.7	2.1227	218.5	2.105	517.2	2.0941	349.4	2.0599
1307.2	2.1238	570.8	2.1097	940.6	2.0972	539	2.0655
2347.9	2.1249	1204.9	2.1122	1456.3	2.0992	702.9	2.0682
3312.6	2.1255	1689.7	2.1131	1977.2	2.1003	1043.9	2.0713
4314.7	2.1258	2625.3	2.114	2935.4	2.1014	1238.8	2.0726
5400	2.1262	3610.9	2.1146	3948.3	2.1023	1636.5	2.0742
		4535.9	2.1151	4962	2.1028	2158.3	2.0755
		5400	2.1155	5400	2.1031	2685.3	2.0766
						3669.6	2.078

						4697.9	2.0789
						5400	2.0796

Tabela 5.3 – Tabela de parâmetros para temperatura de 15 °C.

Parâmetros: 15 °C						
Pulso	SOC	Rs	R1	R2	C1	C2
1	0.96428558	0.0005373	1.4071e-04	2.5830e-04	7.1303e+06	1.9224e+05
3	0.892857367	0.0005692	1.6396e-04	3.1693e-04	1.0046e+07	1.6735e+05
5	0.821430406	0.0005679	1.6074e-04	4.0242e-04	1.1967e+07	1.2657e+05
7	0.75000282	0.0005651	1.6593e-04	4.3822e-04	1.1068e+07	1.1372e+05
9	0.678575233	0.00061193	1.7759e-04	4.8726e-04	8.0825e+06	8.3941e+04
13	0.535719432	0.00060037	1.9231e-04	6.2792e-04	7.7814e+06	6.4739e+04
17	0.392864885	0.00062711	1.9878e-04	7.3685e-04	7.9288e+06	6.5141e+04
21	0.250008459	0.00061138	2.4371e-04	8.8971e-04	6.2502e+06	5.4821e+04
24	0.142867705	0.00072719	3.8708e-04	0.0011	2.2357e+06	4.2147e+04
26	0.071479591	0.00078172	7.4572e-04	0.0015	1.1039e+06	3.2921e+04
27	0.035781462	0.00070215	0.0013	0.0025	5.4008e+05	1.9535e+04
28	0	0.00069795	0.0043	0.0205	6.3711e+04	897.9474

Tabela 5.4 – Pontos retirados das acomodações de V_{oc} em 15 °C.

Pulso 2		Pulso 4		Pulso 6		Pulso 8	
Tempo [s]	Voc [V]	Tempo [s]	Voc [V]	Tempo [s]	Voc [V]	Tempo [s]	Voc [V]
0	2.5159	0	2.4437	0	2.38	0	2.3235
1.1	2.5174	1.2	2.4455	1.1	2.3818	1.1	2.3253
4.7	2.519	4.8	2.4473	4.7	2.3838	4.7	2.3273
9.7	2.5206	9.9	2.4489	9.8	2.3856	9.7	2.3293
14.8	2.5215	14.7	2.4502	14.9	2.3867	14.8	2.3307
19.9	2.5224	19.7	2.4511	19.7	2.3879	19.7	2.3316
24.7	2.5228	24.8	2.4518	24.7	2.3885	24.7	2.3325
35.4	2.5237	35.1	2.4529	34.7	2.3896	34.7	2.3336
73	2.525	101.3	2.4551	112.1	2.3923	117.3	2.3367
262.6	2.5264	478.2	2.4565	441.8	2.3937	448.8	2.338
553.4	2.527	1324.2	2.4574	925	2.3941	1075.8	2.3387
1013.3	2.5275	2306.2	2.458	1912.9	2.3948	1754	2.3392
1722.7	2.5279	3300.7	2.4582	2909.7	2.3952	2555.8	2.3394
2747.8	2.5282	4328	2.4585	3950.3	2.3955	3513.2	2.3398
3713	2.5284	5400	2.4587	4803.5	2.3957	4451	2.3401
5400	2.5284	-	-	5400	2.3959	5400	2.3403
Pulso 10		Pulso 14		Pulso 18		Pulso 22	
0	2.2762	0	2.2069	0	2.1638	0	2.1262
1	2.2773	1.1	2.2085	1.1	2.1656	1.2	2.1296
4.7	2.2795	4.7	2.2109	4.7	2.168	4.7	2.1321

9.6	2.2813	9.7	2.2129	9.7	2.1703	9.7	2.1345
14.6	2.2829	14.7	2.2145	14.7	2.1718	14.7	2.1363
19.6	2.284	19.7	2.2156	19.8	2.1734	19.7	2.1381
24.6	2.2849	24.8	2.2167	24.7	2.1745	24.7	2.1392
34.8	2.2862	34.9	2.2183	34.7	2.1765	34.7	2.1414
88.2	2.2889	60.2	2.2205	69.2	2.1796	48.8	2.1434
172.5	2.2898	137.9	2.2225	129.2	2.1817	74.6	2.1457
463.2	2.2907	306.1	2.2237	504.8	2.1837	107.5	2.1472
1108.8	2.2916	1336.7	2.225	1519.2	2.1848	250.9	2.1495
2150.7	2.292	2328.7	2.2254	2512.2	2.1852	717.7	2.1508
3102.9	2.2925	3310	2.2259	3551.8	2.1857	1705.2	2.1519
4131.8	2.2927	4321.8	2.2261	4513.5	2.1859	2701.2	2.1524
5400	2.2929	5400	2.2263	5400	2.1861	3730.9	2.1528
-	-	-	-	-	-	4734	2.1531
-	-	-	-	-	-	5400	2.1533
Pulso 25		Pulso 27		Pulso 28		Pulso 29	
0	2.0927	0	2.0458	0	1.9649	0	1.5208
1	2.095	1.1	2.0525	1.3	1.9906	1	1.565
4.7	2.0983	4.6	2.0583	6.5	2.0139	4.4	1.6593
9.7	2.1012	9.8	2.063	11.3	2.0228	8.7	1.7391
14.7	2.1032	14.6	2.0664	16.3	2.0288	11.6	1.7797
19.7	2.1052	19.6	2.0691	21.3	2.0333	16.6	1.8338
24.7	2.1068	24.6	2.0713	26.3	2.0369	21.6	1.8727
34.8	2.109	34.6	2.0746	31.3	2.0398	26.6	1.9006
52.8	2.1122	44.8	2.0773	41.5	2.0445	36.8	1.9366
84.3	2.1151	55.5	2.0793	47.7	2.0469	41.8	1.9482
138	2.1175	68.5	2.0813	55.3	2.0494	46.7	1.9573
222.2	2.1193	87.2	2.0836	67.5	2.0523	56.7	1.971
526.6	2.1218	113.9	2.0858	82.4	2.0554	61.6	1.9759
872.4	2.1227	153.6	2.0878	99.8	2.0581	66.6	1.9801
1640.3	2.1233	247.1	2.0907	127	2.0612	76.8	1.9875
2600.1	2.124	396.8	2.0934	152.7	2.0635	90.6	1.9951
3630.1	2.1245	756.7	2.0961	184.8	2.0655	135.9	2.0094
4633.4	2.1247	1248.4	2.0976	229.4	2.0677	174.2	2.0163
5400	2.1249	2251.8	2.099	294.3	2.0702	241.7	2.0239
		3245.4	2.0997	398.6	2.0726	339.3	2.0302
		4230.7	2.1001	543.6	2.0749	385.4	2.0324
		5038.7	2.1006	791.1	2.0773	521.2	2.0367
		5400	2.1008	1268	2.0798	874	2.0422
				1541.7	2.0807	1324.8	2.0458
				2541.5	2.0825	1833.9	2.0481
				3516.3	2.0834	2858.7	2.0507
				4528.6	2.0838	3832.6	2.0521

				5400	2.0842	4871.9	2.0532
						5374.1	2.0536
						5400	2.0539

Tabela 5.5 – Pontos retirados das acomodações de V_{oc} em 25 °C.

Pulso 1		Pulso 3		Pulso 6		Pulso 9	
<i>Tempo [s]</i>	<i>Voc [V]</i>	<i>Tempo [s]</i>	<i>Voc [V]</i>	<i>Tempo [s]</i>	<i>Voc [V]</i>	<i>Tempo [s]</i>	<i>Voc [V]</i>
0	2.5134	0	2.4415	0	2.3459	0	2.2703
1	2.5148	1	2.4426	1	2.3474	1	2.2719
4.8	2.5165	4.6	2.4444	4.6	2.3497	4.6	2.2739
9.7	2.5177	9.7	2.4459	9.6	2.3514	9.6	2.2757
14.8	2.5188	14.6	2.4468	14.6	2.3526	14.7	2.2771
19.8	2.5195	19.6	2.4477	19.7	2.3537	19.8	2.2782
24.9	2.5199	24.7	2.4482	24.6	2.3544	24.6	2.2791
34.7	2.5208	34.6	2.4491	34.7	2.3552	34.6	2.2802
60.7	2.5217	70.1	2.4502	76.4	2.3568	77.9	2.2822
123.7	2.5224	318.8	2.4515	267.4	2.3579	225.1	2.2833
216.3	2.5228	660.3	2.4522	579.1	2.3586	548	2.284
461	2.5234	1014.1	2.4524	938.7	2.3588	1103.7	2.2846
734.2	2.5238	1324	2.4527	1236.7	2.3593	2106.1	2.2851
1711.5	2.5244	2312.8	2.4532	2208.1	2.3597	3110.8	2.2858
2735.9	2.5247	3313.1	2.4535	3210.4	2.3599	4146.9	2.286
3716.3	2.5248	4339.9	2.4538	4206	2.3602	5400	2.2863
5400	2.525	5400	2.454	5400	2.3604	-	-
Pulso 12		Pulso 16		Pulso 19		Pulso 22	
0	2.2176	0	2.1723	0	2.1446	0	2.1142
0.9	2.219	1	2.1736	1.1	2.1464	1.1	2.1164
4.7	2.221	4.7	2.1761	4.8	2.1486	4.7	2.1189
9.8	2.223	9.8	2.1781	9.8	2.1508	9.7	2.1211
14.7	2.2245	14.7	2.1794	14.9	2.1524	14.8	2.1229
19.8	2.2257	19.8	2.1808	19.8	2.1537	19.7	2.1245
24.7	2.2266	24.8	2.1819	24.8	2.1548	24.7	2.1254
34.7	2.2279	34.7	2.1834	34.8	2.1566	34.8	2.1274
54.8	2.2295	63.4	2.1857	53.7	2.1584	58.4	2.1298
139.4	2.2313	169.7	2.1879	89.2	2.1602	103.8	2.1321
301.7	2.2321	275	2.1886	203.3	2.1622	208.8	2.1341
650.9	2.2328	638.1	2.1892	450.4	2.1631	364.7	2.135
1004	2.2333	1207.5	2.1899	749.9	2.1638	663	2.1359
2009	2.2337	2233.9	2.1904	1163.8	2.164	1052.3	2.1365
3025.8	2.2342	3287.2	2.1906	2153.7	2.1647	2028.4	2.1372
4063.1	2.2344	4229.8	2.1908	3109	2.1649	3011.2	2.1376
4894.8	2.2346	5400	2.191	4141.8	2.1653	4017.3	2.1379
5400	2.2346	-	-	5400	2.1656	4806.2	2.1381

-	-	-	-	-	-	5400	2.1383
Pulso 24		Pulso 26		Pulso 27		Pulso 28	
0	2.088	0	2.0405	0	1.9518	0	1.4844
0.9	2.0896	1.1	2.0449	1	1.9716	0.7	1.5174
4.5	2.0925	4.6	2.0496	4.6	1.9868	2.3	1.5603
9.5	2.0952	9.6	2.0539	9.6	1.9964	4.7	1.6001
14.5	2.0972	14.6	2.0568	14.6	2.0025	6.9	1.6314
19.5	2.099	19.7	2.059	19.6	2.0069	9.6	1.6607
24.5	2.1003	24.7	2.0608	24.6	2.0105	12.2	1.6837
34.5	2.1021	34.7	2.0635	34.7	2.0159	15.6	1.7082
55.7	2.1048	50.7	2.0666	86.2	2.0288	21.5	1.7411
79.4	2.1064	66.2	2.0684	108.6	2.0315	32.4	1.7811
130.1	2.1084	92.2	2.0706	139.2	2.0344	40.8	1.8027
208.9	2.1099	134.9	2.0729	177.3	2.0369	62.3	1.8378
332.6	2.1113	200.8	2.0749	211.6	2.0387	73.9	1.8503
567.2	2.1124	498	2.0784	255.1	2.0405	105.3	1.8733
1107.1	2.1135	701.8	2.0796	331.6	2.0427	176.3	1.9004
1601.8	2.114	1209	2.0807	425.3	2.0447	319.8	1.9234
2616.5	2.1146	2233.1	2.0819	535	2.0465	652.7	1.9426
3634	2.1151	3239.8	2.0825	862	2.0494	972.4	1.9504
4637.7	2.1155	4250.9	2.0829	1057.2	2.0505	1409.8	1.9565
5400	2.1157	4812.2	2.0831	1527.2	2.0523	1959.5	1.9607
		5400	2.0834	2507.2	2.0543	2516.6	1.9638
				3512.7	2.0554	2914.1	1.9656
				4539.2	2.0561	3542.2	1.9676
				5400	2.0568	3887.7	1.9687
						4395.9	1.9699
						4940.9	1.9712
						5275.7	1.9716
						5400	1.9721

Tabela 5.6 – Tabela de parâmetros para temperatura de 35 °C.

Parâmetros: 35 °C						
Pulso	SOC	Rs	R1	R2	C1	C2
1	0.965516636	0.00045845	6.1693e-05	1.5777e-04	3.0167e+07	4.8681e+05
4	0.862068361	0.00042815	1.1835e-04	1.4917e-04	1.3310e+07	5.2826e+05
7	0.758620085	0.00042942	1.3278e-04	1.5637e-04	9.0406e+06	4.4101e+05
10	0.655186328	0.00041708	1.3121e-04	3.7806e-04	1.1262e+07	8.8706e+04
13	0.551797338	0.00044694	1.2020e-04	3.8028e-04	9.2648e+06	1.2617e+05
17	0.413975802	0.00045012	1.4215e-04	3.3183e-04	1.1696e+07	2.2510e+05
21	0.276185118	0.00046060	1.7882e-04	4.3858e-04	9.3635e+06	1.5424e+05
24	0.172826376	0.00048419	1.6755e-04	4.8879e-04	8.9257e+06	1.0034e+05
26	0.103511192	0.00050123	2.0421e-04	5.7657e-04	7.7646e+06	8.9614e+04

27	0.069028433	0.00053388	4.3579e-04	7.2656e-04	2.6191e+06	8.3962e+04
28	0.034545675	0.00063407	0.0012	0.0023	1.1588e+06	4.8709e+04
29	0	0.00058679	0.0073	0.0065	1.8971e+05	1.1722e+04

Tabela 5.7 – Pontos retirados das acomodações de V_{oc} em 35 °C.

Pulso 2		Pulso 5		Pulso 8		Pulso 11	
<i>Tempo [s]</i>	<i>Voc [V]</i>	<i>Tempo [s]</i>	<i>Voc [V]</i>	<i>Tempo [s]</i>	<i>Voc [V]</i>	<i>Tempo [s]</i>	<i>Voc [V]</i>
0	2.5186	0	2.4147	0	2.3271	0	2.2581
1.2	2.5199	1	2.416	1.2	2.3284	0.6	2.259
4.8	2.5215	4.5	2.4178	4.8	2.3302	5.3	2.2614
9.8	2.5224	9.6	2.4191	9.9	2.332	10.2	2.2632
14.8	2.5233	14.5	2.42	14.7	2.3331	15.3	2.2643
19.9	2.5237	19.5	2.4209	19.8	2.334	20.2	2.2652
24.8	2.5241	24.5	2.4212	24.8	2.3345	25.2	2.2659
34.8	2.5248	34.7	2.4218	34.7	2.3354	35.2	2.267
66.8	2.5255	101.5	2.4229	139.3	2.3369	83.9	2.2686
279.7	2.5266	342.3	2.4238	309.1	2.3376	194.8	2.2695
723.5	2.527	639.3	2.4243	527.9	2.3378	400.4	2.2697
1703.4	2.5273	1602	2.4247	1523.1	2.3387	1403.3	2.2706
2722	2.5274	2640.5	2.4252	2525.3	2.3392	2408.5	2.271
3727.7	2.5275	3656.6	2.4254	3508.9	2.3392	3438.5	2.2712
5400	2.5277	4503.8	2.4256	4506.4	2.3394	4444.2	2.2715
		5400	2.4256	5400	2.3394	5400	2.2715
Pulso 14		Pulso 18		Pulso 22		Pulso 25	
0	2.2111	0	2.1691	0	2.1336	0	2.1006
1.6	2.2125	1.2	2.1705	1.3	2.1352	1	2.1028
4.8	2.214	3.1	2.1716	4	2.1367	4.8	2.105
8.2	2.2154	5.3	2.1727	7.8	2.1383	7.8	2.1064
12.7	2.2165	7.2	2.1734	12.9	2.1401	12.8	2.1082
18	2.2176	12	2.175	18.1	2.1412	17.8	2.1095
22.9	2.2185	16.6	2.1761	22.8	2.1421	22.7	2.1106
27.4	2.2192	21.6	2.177	27.8	2.143	27.7	2.1113
32.3	2.2196	39.4	2.1792	33.2	2.1437	33	2.1119
43	2.2205	57.5	2.1803	100.7	2.1468	53.9	2.1137
112.7	2.2225	94.2	2.1817	211	2.1481	86.8	2.1149
351.9	2.2237	204.4	2.1828	408.3	2.149	151.7	2.116
1325.7	2.2245	335.5	2.1834	785.2	2.1497	288.8	2.1169
2344.8	2.225	531.1	2.1839	1753.4	2.1504	646.3	2.1175
3314.3	2.225	1529.2	2.1846	2781.5	2.1508	1668	2.1182
4353.1	2.2252	2549.8	2.185	3784.7	2.151	2717.1	2.1187
5400	2.2252	3602.9	2.1852	4689.9	2.1513	3690.7	2.1191
		4599.9	2.1855	5400	2.1515	4758.3	2.1193
		5400	2.1856			5400	2.1193

Pulso 27		Pulso 28		Pulso 29		Pulso 30	
0	2.065	0	2.0338	0	1.904	0	1.5101
1.2	2.0684	1.5	2.0393	1.3	1.9145	3.6	1.5532
3.1	2.0702	3.8	2.0422	4.3	1.9229	9.9	1.5789
5.1	2.0715	5.3	2.0434	7.1	1.9281	11.7	1.5836
10.2	2.0742	8.4	2.0456	11	1.9334	21	1.6046
15.2	2.0758	11.2	2.0472	16.4	1.9393	50	1.6388
20.3	2.0773	15.2	2.0489	23.9	1.9448	107.7	1.6687
25.2	2.0782	20.3	2.0507	36.5	1.9515	128.7	1.6754
30.2	2.0791	25.2	2.0519	40	1.9531	181	1.6884
52	2.0813	30.2	2.053	56.3	1.9587	284.7	1.7056
77.4	2.0827	58.3	2.0563	79.7	1.9643	426.3	1.7219
212.2	2.0849	79.3	2.0577	92.6	1.9665	505.3	1.7288
625.2	2.0863	118	2.0592	127.9	1.9714	641	1.7386
1232.4	2.0869	194.5	2.061	169.8	1.9754	854.7	1.7509
2227.2	2.0875	290.9	2.0621	239.1	1.9801	977.9	1.7565
3260.2	2.0878	497.3	2.0637	323.5	1.9837	1114.5	1.7621
4249.2	2.0883	892.8	2.0653	418.7	1.9864	1301.7	1.7688
5400	2.0885	1512.8	2.0661	536	1.9891	1506	1.775
		2532.7	2.0673	640.1	1.9904	1763.1	1.7815
		3547.5	2.0677	840.9	1.9926	1951.2	1.7855
		4497.4	2.0682	1092.6	1.9947	2074.5	1.788
		5400	2.0684	1306.3	1.9958	2282.3	1.7918
				1549.9	1.9969	2419.3	1.794
				1940.4	1.998	2717.1	1.7983
				2446.3	1.9993	2892	1.8005
				2827.5	2	3151.1	1.8034
				3398.2	2.0011	3332.8	1.8052
				3846	2.0016	3644.1	1.8079
				4682.9	2.0027	3865.7	1.8097
				5216.1	2.0031	4118	1.8115
				5400	2.0034	4480.8	1.8137
						4870.6	1.8157
						5234.3	1.8173
						5400	1.8187

Tabela 5.8 – Tabela de parâmetros para temperatura de 45 °C.

Parâmetros: 45 °C						
Pulso	SOC	Rs	R1	R2	C1	C2
1	0.964285132	0.00067667	8.2739e-05	2.7685e-04	2.2107e+07	8.2298e+04
2	0.928569638	0.00063067	5.7869e-05	1.3099e-04	1.1532e+07	5.3462e+05
4	0.857141783	0.00067088	1.1206e-04	2.4710e-04	1.4183e+07	9.7474e+04
7	0.74999906	0.00066700	5.9054e-05	2.2623e-04	2.3843e+07	1.7979e+05

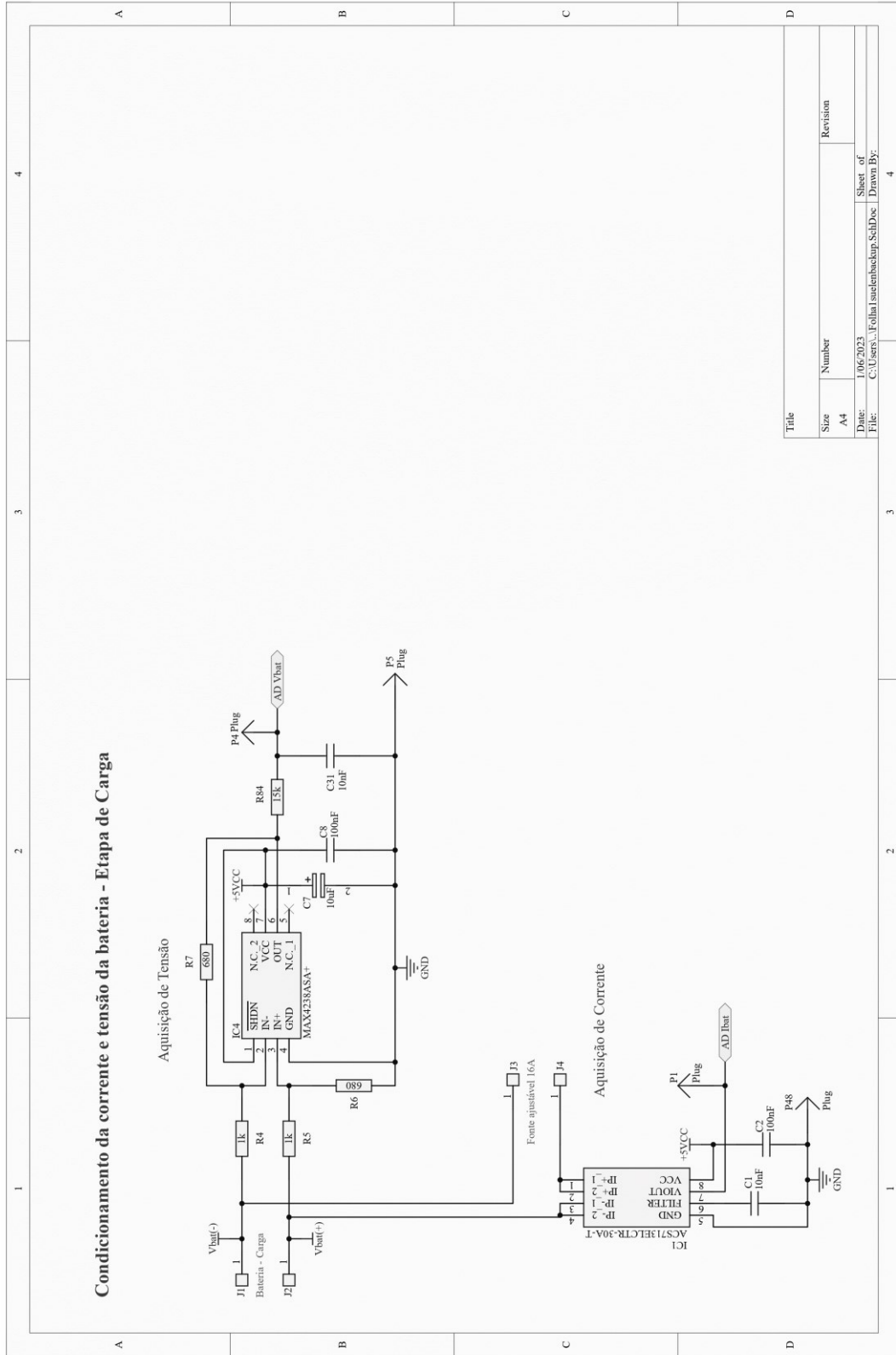
10	0.642856964	0.00069362	4.6127e-05	3.3309e-04	4.3113e+07	1.1571e+05
13	0.535714241	0.00070987	6.1712e-05	2.5735e-04	1.8716e+07	2.3389e+05
17	0.392856024	0.00074223	1.0932e-04	3.3747e-04	1.4856e+07	2.0556e+05
20	0.285714554	0.00075806	1.0835e-04	2.9862e-04	1.8683e+07	1.8514e+05
23	0.178571205	0.00078577	1.5177e-04	2.8133e-04	1.2284e+07	1.4659e+05
26	0.071428482	0.00080798	1.9169e-04	4.0402e-04	3.0148e+06	1.2883e+05
27	0.035714868	0.00087498	4.2099e-04	9.4521e-04	1.4374e+06	8.1061e+04
28	0	0.00084202	0.0075	0.0043	8.2139e+04	1.6659e+04

Tabela 5.9 – Pontos retirados das acomodações de V_{oc} em 45 °C.

Pulso 1		Pulso 2		Pulso 4		Pulso 7	
<i>Tempo [s]</i>	<i>Voc [V]</i>	<i>Tempo [s]</i>	<i>Voc [V]</i>	<i>Tempo [s]</i>	<i>Voc [V]</i>	<i>Tempo [s]</i>	<i>Voc [V]</i>
0	2.5199	0	2.4828	0	2.414	0	2.3217
0.9	2.5208	1.1	2.4842	1	2.4151	1.2	2.3233
4.5	2.5226	4.8	2.4855	4.6	2.4169	4.9	2.3251
9.6	2.5235	9.7	2.4864	9.7	2.4185	9.9	2.3266
14.5	2.5244	14.7	2.4871	14.6	2.4191	20.4	2.3284
19.5	2.5248	19.8	2.4875	39.9	2.4207	70.5	2.3302
24.6	2.5253	24.9	2.4877	455.7	2.422	239.1	2.3309
43.5	2.5262	155.7	2.4891	1618	2.4228	531.5	2.3313
154.8	2.527	510.4	2.4897	2613.3	2.423	1542.2	2.3315
745.8	2.5271	1058.7	2.49	3617.7	2.4233	2508.8	2.3317
1749.7	2.5275	2315.8	2.4902	4678.3	2.4235	3534.3	2.3318
2723.9	2.5277	3415.1	2.4902	5400	2.4235	4556.6	2.3319
3701	2.528	4200.2	2.4902			5400	2.3319
4715.8	2.5284	5400	2.4902				
5400	2.5284						
Pulso 10		Pulso 13		Pulso 17		Pulso 20	
0	2.2516	0	2.2047	0	2.1651	0	2.1383
1.1	2.2529	1.1	2.206	1	2.1665	1.2	2.1399
4.8	2.2547	4.7	2.2078	4.9	2.1685	4.8	2.1419
10.1	2.2565	9.9	2.2094	10.2	2.1703	10.5	2.1437
23	2.2587	52	2.214	30.8	2.1734	28.6	2.1466
68.6	2.261	87.3	2.2149	117.9	2.1763	100.9	2.149
435.9	2.2621	298.8	2.2161	322.8	2.1774	255.2	2.1499
1417.5	2.2625	1307.7	2.2167	516.8	2.1779	474.9	2.1502
2424.7	2.2625	2326.8	2.2168	1540.6	2.1785	1421.8	2.1508
3482.3	2.2626	3351.9	2.2169	2541.5	2.1787	2426.1	2.151
4430.4	2.2627	4330.1	2.217	3533.3	2.179	3404.6	2.1513
5400	2.2628	5400	2.217	4555.2	2.179	4403.8	2.1515
				5400	2.1792	5400	2.1517
Pulso 23		Pulso 26		Pulso 27		Pulso 28	
0	2.1064	0	2.0527	0	1.9868	0	1.5128

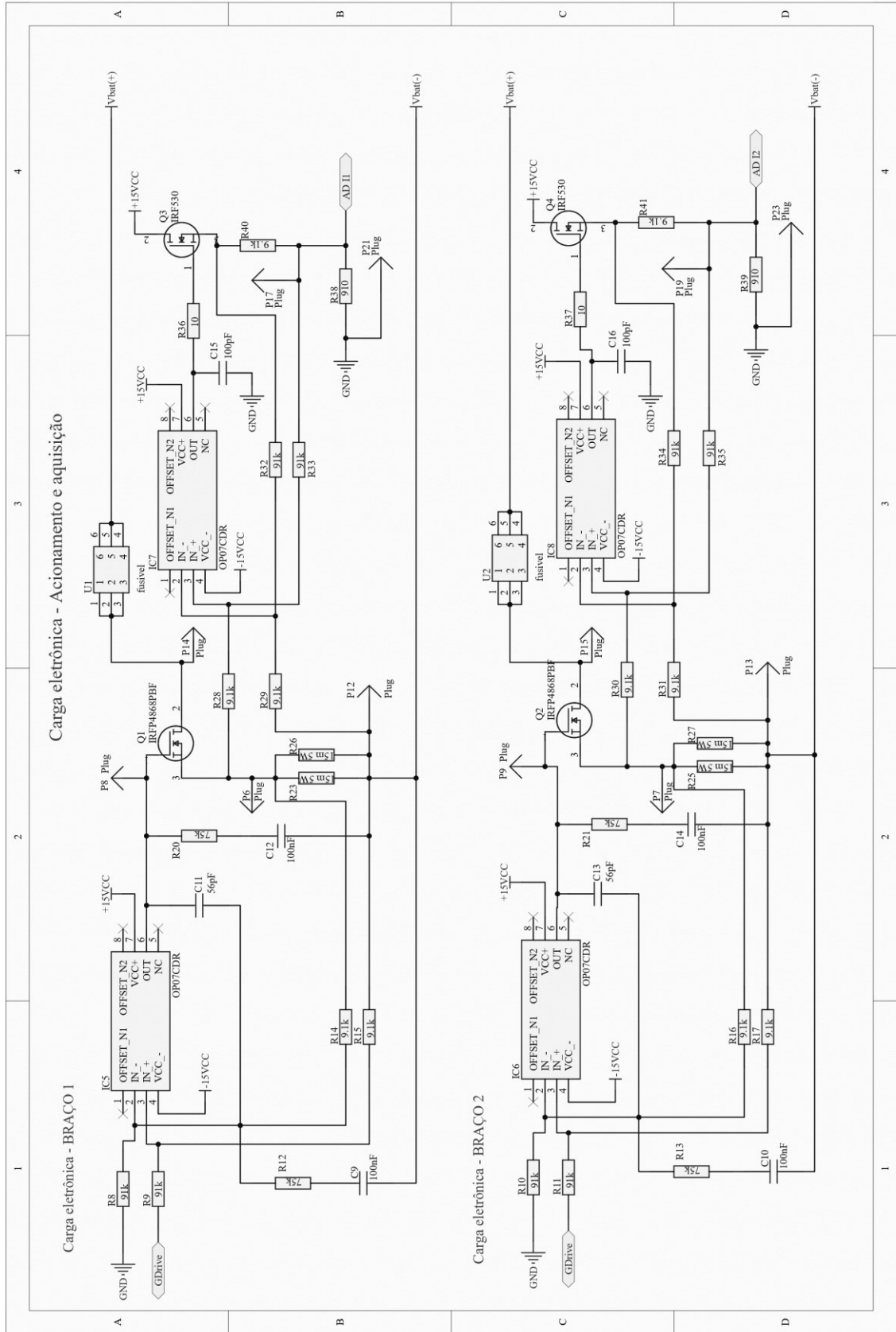
APÊNDICE C – ESQUEMÁTICO ELÉTRICO CARGA ELETRÔNICA

Figura C.1 – Esquemático.



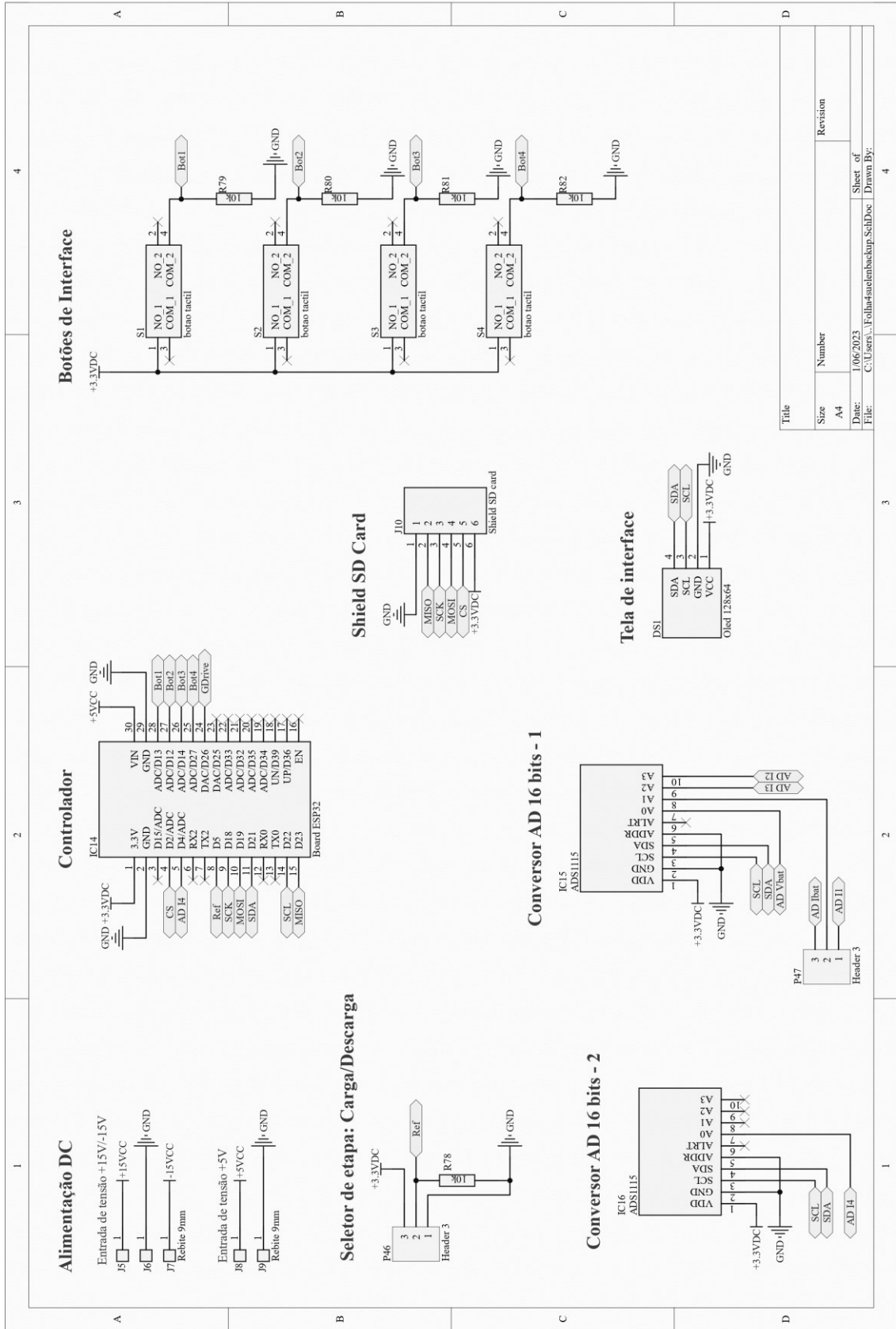
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura C.2 – Esquemático.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura C.4 – Esquemático.



Fonte: Elaborada pela autora.

APÊNDICE D – CÓDIGOS IMPLEMENTADOS

D.1 – CÓDIGO ENSAIOS

```

/* Gravar o ESP:
!Placa: EspDevModule
!Upload Speed: 115200
!CPU-FREQUENCY: 80MHz
!Flash-FREQUENCY: 80MHz
!Partition-Scheme: Huge APP
- (GRAVAR O ESP COM CPU-FREQUENCY = 80MHz e Flash-FREQUENCY = 80MHz... Baud da serial = 115200)
*/

#include <GyverOLED.h>          //biblioteca display
GyverOLED<SSH1106_128x64> oled;
#include <FS.h>                  //Funcionamento SD
#include <SD.h>                  //Funcionamento SD
#include <SPI.h>                 //Funcionamento SD
#include <ADS1115_WE.h>
#include <Wire.h>
#include "EEPROM.h"             //EEPROM Begin (256 endereços)

//Definição de pinos
#define PIN_REF 5               //pino de conexão referência
#define PIN_ADC 4               //pino de conexão ADC corrente I4
#define PIN_BUTTON1 13         //pino de conexão botão 1
#define PIN_BUTTON2 12         //pino de conexão botão 2
#define PIN_BUTTON3 14         //pino de conexão botão 3
#define PIN_BUTTON4 27         //pino de conexão botão 4
#define PIN_START 15           //pino de start descarga
#define PIN_DAC1 25            //Definição do pino DAC_0 (GPIO 25)
#define PIN_DAC2 26            //Definição do pino DAC_2 (GPIO 26)

bool auxPin1 = false;         //variável auxiliar botão 1
bool auxPin2 = false;         //variável auxiliar botão 2
bool auxPin3 = false;         //variável auxiliar botão 3
bool auxPin4 = false;         //variável auxiliar botão 4
bool auxPin5 = false;         //variável auxiliar start descarga
bool configurar = false;     //configuração de tela
int checkSD = 0;
int couteroled = 0;

float confCorrente = 0;
float confTimeOn = 0;
float confTimeoff = 0;

```

```

float Vbat = 0;
float Ibat = 0;
float I1 = 0;
float I2 = 0;
float I3 = 0;
float I4 = 0;

struct VetorDeDados {
    double tempo = 0;
    float Vbat = 0;
    float Ibat = 0;
    float I1 = 0;
    float I2 = 0;
    float I3 = 0;
    float I4 = 0;
};

VetorDeDados dadosCartaoSD[10];
int indiceDadosSD = 0;
bool armazenouDadosNesteFrame = false;

//DAC -----
float corrente = 0;    //Valor de corrente setado dividido para cada um dos braços
int timeOn = 0;       //transformação de minutos pra segundos na variável timeOn
int timeOff = 0;      //transformação de minutos pra segundos na variável timeOff
double couter = 0;    //variável contador
int totaltime = 0;    //variável tempo total
int resolucao = 0;

bool printouTelaNesteFrame = false;
int incrementoPrintTela = 0;
bool desativarADC_Em_1_47V = false;

//ADS1115 shield 1
#define I2C_ADDRESS1 0x48
ADS1115_WE adc1 = ADS1115_WE(I2C_ADDRESS1); //declaração do shield 1
float readChannelADC1(ADS1115_MUX channel) {
    float voltage = 0.0;
    adc1.setCompareChannels(channel);
    voltage = adc1.getResult_V(); // alternative: getResult_mV for Millivolt
    return voltage;
}

//ADS1115 shield 2
#define I2C_ADDRESS2 0x49
ADS1115_WE adc2 = ADS1115_WE(I2C_ADDRESS2); //declaração do shield 2

```

```

float readChannelADC2(ADS1115_MUX channel) {
    float voltage = 0.0;
    adc2.setCompareChannels(channel);
    voltage = adc2.getResult_V(); // alternative: getResult_mV for Millivolt
    return voltage;
}

#define SD_CS 2 //pino de conexão com CS
File fileGeral;
void writeFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message) { //cria pasta e escreve as variáveis
    File file = fs.open(path, FILE_WRITE);
    file.print(message);
    delay(10);
    file.close();
}
void appendFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message) { // Abre arquivo e escreve em um arquivo que já existe
    File file = fs.open(path, FILE_APPEND);
    file.print(message);
    delay(10);
    file.close();
}

//INTERRUPÇÃO DO TIMER =====
hw_timer_t * timer = NULL;
portMUX_TYPE timerMux = portMUX_INITIALIZER_UNLOCKED;
double segundosWatchDog = 0;
double tempoTotalDecorrido = 0;
void IRAM_ATTR onTimer() { //esta interrupção está acontecendo de 0.1 em 0.1 segundos
    portENTER_CRITICAL_ISR(&timerMux);

    //contador de um ciclo de descarga -----
    couter = (couter + 0.1);
    if(couter > totaltime){
        couter = 0;
    }

    //contador do tempo total
    tempoTotalDecorrido = (tempoTotalDecorrido + 0.1);
    if(tempoTotalDecorrido >= 259200){
        tempoTotalDecorrido = 0;
    }

    //configuração WatchDog time -----
    segundosWatchDog = (segundosWatchDog + 0.1);

```

```

if(segundosWatchDog >= 40){
    ets_printf("(watchdog) reiniciar\n"); //imprime no log
    ESP.restart();
}

//Indica que não printou a tela ainda nesse ciclo de 0.1s
printouTelaNesteFrame = false;
incrementoPrintTela++;
if(incrementoPrintTela > 100){ //desnecessário... apenas para prevenção mesmo
    incrementoPrintTela = 0;
}

//logica dos dados do cartão SD
armazenouDadosNesteFrame = false;

portEXIT_CRITICAL_ISR(&timerMux);
}

void setup() {
    Serial.begin(115200); //valor minimo para funcionar o wifi
    oled.init(); //inicializa o display

    //inicialização Card SD =====
    InicializaSDCardEArquivosTXT (); //inicializando SD

    //inicialização dos pinos pushbuttons como input:
    pinMode(PIN_REF, INPUT);
    pinMode(PIN_BUTTON1, INPUT);
    pinMode(PIN_BUTTON2, INPUT);
    pinMode(PIN_BUTTON3, INPUT);
    pinMode(PIN_BUTTON4, INPUT);
    pinMode(PIN_START, INPUT);

    //inicialização ADCs externos =====
    Wire.begin();

    //ADC1
    if(!adc1.init()){
        Serial.println("ADS1115-shield 1 não está conectado!"); //avisa se o serial não está conectado
    }
    adc1.setVoltageRange_mV(ADS1115_RANGE_4096); //opção de range maior com 6144mV - ADS1115_RANGE_6144
    adc1.setCompareChannels(ADS1115_COMP_0_GND); //seta entrada a ser comparada, aqui com o GND
    adc1.setMeasureMode(ADS1115_CONTINUOUS); //seta modo de leitura continua
    //ADC2

```

```

if(!adc2.init()){
  Serial.println("ADS1115-shield 2 não está conectado!"); //avisa se o serial não está conectado
}
adc2.setVoltageRange_mV(ADS1115_RANGE_4096); //opção de range maior com 6144mV - ADS1115_RANGE_6144
adc2.setCompareChannels(ADS1115_COMP_0_GND); //seta entrada a ser comparada, aqui com o GND
adc2.setMeasureMode(ADS1115_CONTINUOUS); //seta modo de leitura continua
//=====

//inicialização EEPROM =====
if (!EEPROM.begin(256)) { //256 é o número de caracter que consegue salvar
  delay(100);
  Serial.println("Falha ao iniciar EEPROM");
  delay(1000);
  ESP.restart();
}
ResgatarValoresEEPROM();

//Inicializa a interrupção do TIMER =====
timer = timerBegin(0, 80, true); //timerBegin([timer que pode ser de 0 a 3], [CPU-Frequency(MHz)], [fazer o contador
contar]);
timerAttachInterrupt(timer, &onTimer, true);
timerAlarmWrite(timer, 100000, true); //incrementos = 0.1 segundo... chama a interrupção do timer a cada 100ms.
timerAlarmEnable(timer);

//Inicialização das variáveis geral =====
configurar = false;
printouTelaNesteFrame = false;
incrementoPrintTela = 0;
//
for(int x = 0; x < 10; x++){
  dadosCartaoSD[x].tempo = 0;
  dadosCartaoSD[x].Vbat = 0;
  dadosCartaoSD[x].Ibat = 0;
  dadosCartaoSD[x].I1 = 0;
  dadosCartaoSD[x].I2 = 0;
  dadosCartaoSD[x].I3 = 0;
  dadosCartaoSD[x].I4 = 0;
}
indiceDadosSD = 0;
armazenouDadosNesteFrame = false;
tempoTotalDecorrido = 0;
}

void InicializaSDCardEArquivosTXT(){

```

```

if (!SD.begin(SD_CS)){
  delay(500);
  Serial.println("Falha ao inicializar o SD");
  checkSD = 0;
  delay(100);
}
else{
  Serial.println("SD Inicializado");
  checkSD = 1;
  //
  uint8_t cardType = SD.cardType();
  delay(100);

  // Arquivo de texto geral - criação
  fileGeral = SD.open("/dadosCargaDescarga.txt");
  if(!fileGeral) {
    writeFile(SD, "/dadosCargaDescarga.txt", "");
  }
  if(fileGeral){
    fileGeral.close();
  }
  delay(100);
}
}

void loop() {
  segundosWatchDog = 0; //zera o contador do watchdog toda vez que entra no loop (contagem de 40s caso travar em um
loop)
  buttons();
  leituraADS1115Shield1();
  leituraADS1115Shield2();

  Ibat = I1 + I2 + I3 + I4;
  corrente = confCorrente; //Valor de corrente setado dividido para cada um dos braços
  timeOn = (confTimeOn*60); //transformação de minutos pra segundos na variável timeOn
  timeOff = (confTimeoff*60); //transformação de minutos pra segundos na variável timeOff
  totaltime = timeOn + timeOff;

  couteroled = couter;

  ControleDAC();
  PrintarInformacoesNaTelaDe1Em1Segundo();
  SalvarDadosNoSD();
}

```

```

}
//FIM LOOP =====

void ControleDAC(){
  if (digitalRead(PIN_REF) == HIGH){
    if(desativarADC_Em_1_47V == false){
      //Time ON
      if(couter <= timeOn){
        if(Vbat >= 1.5 && Vbat < 3.0){ //LIMITE operação Vbat <<<<<<<-----
          resolucao = 80.95 * (0.00007*corrente*corrente*corrente - 0.0031*corrente*corrente + 0.1272*corrente +
0.3184);
        }
        else{
          resolucao = 0;
        }
        if(Vbat < 1.5){
          desativarADC_Em_1_47V = true; //desativa o ADC até que o ESP seja resetado, ou o ciclo seja reiniciado.
          resolucao = 0;
        }
      }
    }
    else{
      resolucao = 0;
    }
  }
  else{
    resolucao = 0;
  }
}

//Reinicia contador e variável do ensaio
if(couter > totaltime){
  couter = 0;
  resolucao = 0;
  desativarADC_Em_1_47V = false;
}

if (digitalRead(PIN_REF) == LOW){
  resolucao = 0;
}

//DAC 2 desativado... os 4 braços estão trabalhando com a resolução fornecida pelo DAC1
dacWrite(PIN_DAC1, resolucao); //resolução 0 - 255 | 0 - 3.15V pin 25
dacWrite(PIN_DAC2, 0); //resolução 0 - 255 | 0 - 3.14V pin 26 ex: dacWrite(PIN_DAC2, 154)
}

```



```

void PrintarInformacoesNaTelaDe1Em1Segundo(){
    if(!printouTelaNesteFrame){
        printouTelaNesteFrame = true;
        //
        if(incrementoPrintTela >= 10){ //faz com que só printe informações na tela de 10 em 10 incrementos do timer, de 1 em 1
seg.
            incrementoPrintTela = 0;
            if (configurar == false) {
                oled.clear();          //limpa display
                oled.setScale(2);      //determina escala do display
                oled.setCursorXY(0, 0); //seta cursor
                oled.println("INEP");  //printa variável data0
                oled.setScale(1);      //determina escala do display, somente numeros inteiros
                oled.setCursorXY(105, 0); //seta cursor
                oled.print("SD:");
                oled.println(checkSD);
                oled.setCursorXY(60, 0);
                oled.print("t:");
                oled.println(couteroled);
                oled.setCursorXY(0, 30);
                oled.print("Vbat:");
                oled.println(Vbat);
                oled.setCursorXY(0, 40);
                oled.print("Ibat:");
                oled.println(Ibat);
                oled.setCursorXY(70, 15);
                oled.print("I-1:");
                oled.println(I1);
                oled.setCursorXY(70, 25);
                oled.print("I-2:");
                oled.println(I3);
                oled.setCursorXY(70, 40);
                oled.print("I-3:");
                oled.println(I2);
                oled.setCursorXY(70, 50);
                oled.print("I-4:");
                oled.println(I4);
                oled.update();
            }
            else {
                oled.clear();
                oled.setScale(2);
                oled.setCursorXY(80, 0);

```

```

oled.println("INEP");
oled.setScale(1);
oled.setCursorXY(0, 0);
oled.println("SETTINGS");
oled.setCursorXY(0, 13);
oled.println("DISCHARGE");
oled.setCursorXY(0, 30);
oled.print("Current (A): ");
oled.println(confCorrente);
oled.setCursorXY(0, 40);
oled.print("Time on (min): ");
oled.println(confTimeOn);
oled.setCursorXY(0, 50);
oled.print("Time off (min): ");
oled.println(confTimeoff);
oled.update();
}
}
}
}
void SalvarDadosNoSD(){
  if(!armazenouDadosNesteFrame){ //a variavel "armazenouDadosNesteFrame" fica automaticamente falsa de 0.1s em 0.1s
    armazenouDadosNesteFrame = true;
    //
    dadosCartaoSD[indiceDadosSD].tempo = tempoTotalDecorrido;
    dadosCartaoSD[indiceDadosSD].Vbat = Vbat;
    dadosCartaoSD[indiceDadosSD].Ibat = Ibat;
    dadosCartaoSD[indiceDadosSD].I1 = I1;
    dadosCartaoSD[indiceDadosSD].I2 = I2;
    dadosCartaoSD[indiceDadosSD].I3 = I3;
    dadosCartaoSD[indiceDadosSD].I4 = I4;
    indiceDadosSD++;

    // se armazenou 10 dados na memória RAM, ai salva no SD e apaga a RAM.
    if(indiceDadosSD >= 10){
      indiceDadosSD = 0;
      //
      String mensagemSD =
        String(dadosCartaoSD[0].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[0].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[0].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[0].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[0].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[0].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[0].I4, 4) + "\r\n" +
        String(dadosCartaoSD[1].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[1].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[1].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[1].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[1].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[1].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[1].I4, 4) + "\r\n" +

```

```

String(dadosCartaoSD[2].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[2].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[2].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[2].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[2].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[2].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[2].I4, 4) + "\r\n" +
String(dadosCartaoSD[3].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[3].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[3].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[3].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[3].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[3].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[3].I4, 4) + "\r\n" +
String(dadosCartaoSD[4].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[4].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[4].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[4].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[4].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[4].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[4].I4, 4) + "\r\n" +
String(dadosCartaoSD[5].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[5].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[5].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[5].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[5].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[5].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[5].I4, 4) + "\r\n" +
String(dadosCartaoSD[6].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[6].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[6].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[6].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[6].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[6].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[6].I4, 4) + "\r\n" +
String(dadosCartaoSD[7].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[7].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[7].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[7].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[7].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[7].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[7].I4, 4) + "\r\n" +
String(dadosCartaoSD[8].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[8].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[8].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[8].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[8].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[8].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[8].I4, 4) + "\r\n" +
String(dadosCartaoSD[9].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[9].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[9].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[9].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[9].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[9].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[9].I4, 4) + "\r\n";
//
appendFile(SD, "/dadosCargaDescarga.txt", mensagemSD.c_str());

//zera a array de dados temporários
for(int x = 0; x < 10; x++){
    dadosCartaoSD[x].tempo = 0;
    dadosCartaoSD[x].Vbat = 0;
    dadosCartaoSD[x].Ibat = 0;
    dadosCartaoSD[x].I1 = 0;
    dadosCartaoSD[x].I2 = 0;
    dadosCartaoSD[x].I3 = 0;
    dadosCartaoSD[x].I4 = 0;
}
}
}
}
void ResgatarValoresEEPROM(){
/*
MAPA DA EEPROM:
195 = bit de sinal que a EEPROM ja esta OK... letra 'D'

```

```

100 = confCorrente (long) --> corrente
110 = confTimeOn (long) --> time on
120 = confTimeoff (long) --> time off

//exemplo
confCorrente = EEPROM.readLong(100);
if(confCorrente < 0 || confCorrente > 45){
  confCorrente = 10;
  EEPROM.writeLong(100, confCorrente);
  EEPROM.commit(); //comando para gravar
  delay(100);
}

*/

//Se eh a primeira vez que o esp eh iniciado, preenche toda a EEPROM com [\0, \0]
if(EEPROM.read(195) != 'D'){
  EEPROM.write(195, 'D');
  for(int x = 1; x < 190; x+=2){
    EEPROM.write(x, '\0'); //limpa
    EEPROM.write(x+1, '\0');
  }
  EEPROM.commit();
  delay(100);
  //
  confCorrente = 0;
  confTimeOn = 0;
  confTimeoff = 0;
  EEPROM.writeLong(100, confCorrente);
  EEPROM.writeLong(110, confTimeOn);
  EEPROM.writeLong(120, confTimeoff);
  EEPROM.commit();
  delay(100);
}

//confCorrente
confCorrente = EEPROM.readLong(100);
if(confCorrente < 0 || confCorrente > 90){ //AJUSTE DO LIMITE DE CORRENTE DESCARGA --<<<<<<
  confCorrente = 0;
  EEPROM.writeLong(100, confCorrente);
  EEPROM.commit();
  delay(100);
}

```

```

//confTimeOn
confTimeOn = EEPROM.readLong(110);
if(confTimeOn < 0 || confTimeOn > 90){ //AJUSTE DO LIMITE DE TEMPO DESCARGA --<<<<<<<<<
    confTimeOn = 0;
    EEPROM.writeLong(110, confTimeOn);
    EEPROM.commit();
    delay(100);
}

//confTimeoff
confTimeoff = EEPROM.readLong(120);
if(confTimeoff < 0 || confTimeoff > 90){ //AJUSTE DO LIMITE DE TEMPO DESCARGA --<<<<<<<<<
    confTimeoff = 0;
    EEPROM.writeLong(120, confTimeoff);
    EEPROM.commit();
    delay(100);
}
}
void buttons(){

// Botao1 =====
if(digitalRead(PIN_BUTTON1) == HIGH && auxPin1 == false){
    auxPin1 = true;
    delay (15); //unidade milisegundos
}
if(digitalRead(PIN_BUTTON1) == LOW && auxPin1 == true){
    auxPin1 = false;
    delay (15); //unidade milisegundos
    configurar = !configurar;

    if (configurar == false){
        EEPROM.writeLong(120, confTimeoff);
        EEPROM.writeLong(110, confTimeOn);
        EEPROM.writeLong(100, confCorrente);
        delay (10); //10
        EEPROM.commit();
        delay(100); //100
    }
}
//=====

if ( configurar == true){
    // Botao2 =====
    if(digitalRead(PIN_BUTTON2) == HIGH && auxPin2 == false){

```



```

//Sensor de tensão 2 =====
float tensao2 = 0.0;
tensao2 = readChannelADC2(ADS1115_COMP_1_GND);

//Sensor de tensão 3 =====
float tensao3 = 0.0;
tensao3 = readChannelADC2(ADS1115_COMP_2_GND);

//Sensor de tensão 4 =====
float tensao4 = 0.0;
tensao4 = readChannelADC2(ADS1115_COMP_3_GND);
}

```

D.2 – CÓDIGO ESTIMATIVA SOC

```

/* Gravar o ESP:
!Placa: EspDevModule
!Upload Speed: 115200
!CPU-FREQUENCY: 80MHz
!Flash-FREQUENCY: 80MHz
!Partition-Scheme: Huge APP
- (GRAVAR O ESP COM CPU-FREQUENCY = 80MHz e Flash-FREQUENCY = 80MHz... Baud da serial = 115200)
*/

//=====
//IMPORTANTE!!!! --> Modificar funções das linhas 113 (InicializarTempos)
//IMPORTANTE!!!! --> Modificar funções das linhas 510 (InicializarTabelaParametrosSOC)
//IMPORTANTE!!!! --> Modificar linhas 1063 e adiante de acordo com a necessidade
//=====

#include <GyverOLED.h>      //biblioteca display
GyverOLED<SSH1106_128x64> oled;
#include <FS.h>              //Funcionamento SD
#include <SD.h>              //Funcionamento SD
#include <SPI.h>             //Funcionamento SD
#include <ADS1115_WE.h>
#include <Wire.h>

//Definição de pinos
#define PIN_REF 5           //pino de conexão referência
#define PIN_DAC1 25        //Definição do pino DAC_0 (GPIO 25)
#define PIN_DAC2 26        //Definição do pino DAC_2 (GPIO 26)

int checkSD = 0;

```



```

double R = 0.0005;
//
double Q [3][3];
double K [3][1];
double P [3][3];
double x [3][1];
double A [3][3];
double B [3][1];
double C [1][3];
double D [1][1];
double Id [3][3];
//=====
//DAC -----
double couter = 0;    //variável contador
long totaltime = 0;   //variável tempo total
int resolucao = 0;
double incrementoPrintTela = 0;
bool desativarADC_Em_1_47V = false;

//Variaveis do ciclo carga e descarga =====
struct ciclo {
    int tempoOn = 0;
    int tempoOff = 0;
    int corrente = 0;
    int temperatura = 0;
    long segundosOn = 0;
    long segundosOff = 0;
};
ciclo ciclo1;
ciclo ciclo2;
ciclo ciclo3;
ciclo ciclo4;
//
void InicializarTempos () { //Config. perfil de descarga
    ciclo1.tempoOn = 20;//minutos
    ciclo1.tempoOff = 10;//minutos
    ciclo1.corrente = 9; //~40A/4
    ciclo1.temperatura = 25;
    //
    ciclo2.tempoOn = 25;//minutos
    ciclo2.tempoOff = 60;//minutos
    ciclo2.corrente = 4; //~18A/4
    ciclo2.temperatura = 25;
    //

```

```

ciclo3.tempoOn = 10;//minutos
ciclo3.tempoOff = 10;//minutos
ciclo3.corrente = 20; //~80A/4
ciclo3.temperatura = 25;
//
ciclo4.tempoOn = 60;//minutos
ciclo4.tempoOff = 0;//minutos
ciclo4.corrente = 12; //~48A/4
ciclo4.temperatura = 25;
}
//=====

//ADS1115 shield 1
#define I2C_ADDRESS1 0x48
ADS1115_WE adc1 = ADS1115_WE(I2C_ADDRESS1); //declaração do shield 1
float readChannelADC1(ADS1115_MUX channel) {
    float voltage = 0.0;
    adc1.setCompareChannels(channel);
    voltage = adc1.getResult_V(); // alternative: getResult_mV for Millivolt
    return voltage;
}

//ADS1115 shield 2
#define I2C_ADDRESS2 0x49
ADS1115_WE adc2 = ADS1115_WE(I2C_ADDRESS2); //declaração do shield 2
float readChannelADC2(ADS1115_MUX channel) {
    float voltage = 0.0;
    adc2.setCompareChannels(channel);
    voltage = adc2.getResult_V(); // alternative: getResult_mV for Millivolt
    return voltage;
}

#define SD_CS 2 //pino de conexão com CS
File fileGeral;
void writeFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message) { //cria pasta e escreve as variáveis
    File file = fs.open(path, FILE_WRITE);
    file.print(message);
    delay(10);
    file.close();
}
void appendFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message) { // Abre arquivo e escreve em um arquivo que já existe
    File file = fs.open(path, FILE_APPEND);
    file.print(message);
    delay(10);
}

```

```

file.close();
}

//VariaveisTabela =====
double ultimoQnSelecionado = 0;
double temperaturaAtual_Graus = 25;
struct soc_x_parametros {
    double _SOC;
    double _RS;
    double _R1;
    double _R2;
    double _C1;
    double _C2;
    double _Qn;
};
soc_x_parametros tabela_Atual[12];
soc_x_parametros tabela_5_graus[12];
soc_x_parametros tabela_15_graus[12];
soc_x_parametros tabela_25_graus[12];
soc_x_parametros tabela_35_graus[12];
soc_x_parametros tabela_45_graus[12];
//
void InterpolarParametrosTabela(){
    //Interpolar_A_B(x, y); //indiceComValoresMajores, indiceComValoresMenores
    //
    if(x_0 >= tabela_Atual[0]._SOC) {
        Interpolar_A_B(0, 0);
    }
    if(x_0 >= tabela_Atual[1]._SOC && x_0 < tabela_Atual[0]._SOC){
        Interpolar_A_B(0, 1);
    }
    if(x_0 >= tabela_Atual[2]._SOC && x_0 < tabela_Atual[1]._SOC){
        Interpolar_A_B(1, 2);
    }
    if(x_0 >= tabela_Atual[3]._SOC && x_0 < tabela_Atual[2]._SOC){
        Interpolar_A_B(2, 3);
    }
    if(x_0 >= tabela_Atual[4]._SOC && x_0 < tabela_Atual[3]._SOC){
        Interpolar_A_B(3, 4);
    }
    if(x_0 >= tabela_Atual[5]._SOC && x_0 < tabela_Atual[4]._SOC){
        Interpolar_A_B(4, 5);
    }
    if(x_0 >= tabela_Atual[6]._SOC && x_0 < tabela_Atual[5]._SOC){

```

```

    Interpolar_A_B(5, 6);
}
if(x_0 >= tabela_Atual[7]._SOC && x_0 < tabela_Atual[6]._SOC){
    Interpolar_A_B(6, 7);
}
if(x_0 >= tabela_Atual[8]._SOC && x_0 < tabela_Atual[7]._SOC){
    Interpolar_A_B(7, 8);
}
if(x_0 >= tabela_Atual[9]._SOC && x_0 < tabela_Atual[8]._SOC){
    Interpolar_A_B(8, 9);
}
if(x_0 >= tabela_Atual[10]._SOC && x_0 < tabela_Atual[9]._SOC){
    Interpolar_A_B(9, 10);
}
if(x_0 >= tabela_Atual[11]._SOC && x_0 < tabela_Atual[10]._SOC){
    Interpolar_A_B(10, 11);
}
if(x_0 < tabela_Atual[11]._SOC){
    Interpolar_A_B(11, 11);
}
}
void Interpolar_A_B (int indiceValMaior, int indiceValMenor){
    //retorna uma porcentagem de 0 a 1, sendo o menor SOC informado = 0% e o maior SOC informado = 100%
    double numerador = (tabela_Atual[indiceValMaior]._SOC - x_0);
    double denominador = (tabela_Atual[indiceValMaior]._SOC - tabela_Atual[indiceValMenor]._SOC);
    if(denominador <= 0.000001){
        denominador = 0.000001;
    }
    double percent = 1 - (numerador / denominador);

    //
    R0 = (percent * (tabela_Atual[indiceValMaior]._RS - tabela_Atual[indiceValMenor]._RS)) +
tabela_Atual[indiceValMenor]._RS;
    R1 = (percent * (tabela_Atual[indiceValMaior]._R1 - tabela_Atual[indiceValMenor]._R1)) +
tabela_Atual[indiceValMenor]._R1;
    R2 = (percent * (tabela_Atual[indiceValMaior]._R2 - tabela_Atual[indiceValMenor]._R2)) +
tabela_Atual[indiceValMenor]._R2;
    C1 = (percent * (tabela_Atual[indiceValMaior]._C1 - tabela_Atual[indiceValMenor]._C1)) +
tabela_Atual[indiceValMenor]._C1;
    C2 = (percent * (tabela_Atual[indiceValMaior]._C2 - tabela_Atual[indiceValMenor]._C2)) +
tabela_Atual[indiceValMenor]._C2;
}
//=====

```

```

//INTERRUPÇÃO DO TIMER =====
hw_timer_t * timer = NULL;
portMUX_TYPE timerMux = portMUX_INITIALIZER_UNLOCKED;
double segundosWatchDog = 0;
double tempoTotalDecorrido = 0;
double cronometro_1000ms = 0;
void IRAM_ATTR onTimer() { //esta interrupção está acontecendo de 0.001 em 0.001 segundos
    portENTER_CRITICAL_ISR(&timerMux);

    //contador de um ciclo de descarga -----
    couter = (couter + 0.001);
    if(couter > (totaltime + 2)){
        couter = 0;
    }

    //contador do tempo total
    tempoTotalDecorrido = (tempoTotalDecorrido + 0.001);
    if(tempoTotalDecorrido >= 259200){
        tempoTotalDecorrido = 0;
    }

    //configuração WatchDog time -----
    segundosWatchDog = (segundosWatchDog + 0.001);
    if(segundosWatchDog >= 40){
        ets_printf("(watchdog) reiniciar\n"); //imprime no log
        ESP.restart();
    }

    //Indica que não printou a tela ainda nesse ciclo de 0.1s
    incrementoPrintTela = (incrementoPrintTela + 0.001);
    if(incrementoPrintTela > 3){ //desnecessário... apenas para prevenção mesmo
        incrementoPrintTela = 0;
    }

    //logica dos dados do cartão SD
    cronometro_1000ms = (cronometro_1000ms + 0.001);
    if(cronometro_1000ms > 3){ //desnecessário... apenas para prevenção mesmo
        cronometro_1000ms = 0;
    }
    portEXIT_CRITICAL_ISR(&timerMux);
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
}

```

```

delay(100);

// Inicializa o display Oled =====
oled.init();
//=====

//Calculos para descobrir em quais segundos vai estar on, off e quais os tempos e temperaturas
InicializarTempos();
//
ciclo1.segundosOn = (ciclo1.tempoOn*60);
ciclo1.segundosOff = (ciclo1.tempoOn*60) + (ciclo1.tempoOff*60);
ciclo2.segundosOn = (ciclo1.tempoOn*60) + (ciclo1.tempoOff*60) + (ciclo2.tempoOn*60);
ciclo2.segundosOff = (ciclo1.tempoOn*60) + (ciclo1.tempoOff*60) + (ciclo2.tempoOn*60) + (ciclo2.tempoOff*60);
ciclo3.segundosOn = (ciclo1.tempoOn*60) + (ciclo1.tempoOff*60) + (ciclo2.tempoOn*60) + (ciclo2.tempoOff*60) +
(ciclo3.tempoOn*60);
ciclo3.segundosOff = (ciclo1.tempoOn*60) + (ciclo1.tempoOff*60) + (ciclo2.tempoOn*60) + (ciclo2.tempoOff*60) +
(ciclo3.tempoOn*60) + (ciclo3.tempoOff*60);
ciclo4.segundosOn = (ciclo1.tempoOn*60) + (ciclo1.tempoOff*60) + (ciclo2.tempoOn*60) + (ciclo2.tempoOff*60) +
(ciclo3.tempoOn*60) + (ciclo3.tempoOff*60) + (ciclo4.tempoOn*60);
ciclo4.segundosOff = (ciclo1.tempoOn*60) + (ciclo1.tempoOff*60) + (ciclo2.tempoOn*60) + (ciclo2.tempoOff*60) +
(ciclo3.tempoOn*60) + (ciclo3.tempoOff*60) + (ciclo4.tempoOn*60) + (ciclo4.tempoOff*60);
//
totaltime = ciclo4.segundosOff + 100;
//=====

//Tabela dados interpolacao =====
ultimoQnSelecionado = 0;
//
x_0 = 1; //define o SOC inicial, logo, em qual linha da tabela vai buscar os parametros iniciais
temperaturaAtual_Graus = ciclo1.temperatura; //temperatura inicial
//
InicializarTabelaParametrosSOC(); //Inicializa todas as tabelas de todas as temperaturas
AtualizaTabelaDeAcordoComATemperatura(); //Define a tabela atual (que esta sendo usada) de acordo com a temperatura
atual
InterpolarParametrosTabela(); //Atualiza R0,R1,R2,C1,C2
//=====

//Variaveis Kalman =====
InicializarVariaveisDoKalman ();
//=====

//inicialização Card SD =====
InicializaSDCardEArquivosTXT ();
//=====

```



```

//Inicializa a interrupção do TIMER =====
timer = timerBegin(0, 80, true); //timerBegin([timer que pode ser de 0 a 3], [CPU-Frequency(MHz)], [fazer o contador
contar]);
timerAttachInterrupt(timer, &onTimer, true);
timerAlarmWrite(timer, 1000, true); //incrementos = 0.001 segundo... chama a interrupção do timer a cada 1ms.
timerAlarmEnable(timer);
//=====
}

void AtualizaTabelaDeAcordoComATemperatura(){
    bool atualizouTabela = false;
    if(temperaturaAtual_Graus >= 0 && temperaturaAtual_Graus < 10){ //entre 0 e 10 graus
        if(tabela_5_graus[0]._Qn != ultimoQnSelecionado){
            for(int x = 0; x < 12; x++){
                tabela_Atual[x]._SOC = tabela_5_graus[x]._SOC;
                tabela_Atual[x]._RS = tabela_5_graus[x]._RS;
                tabela_Atual[x]._R1 = tabela_5_graus[x]._R1;
                tabela_Atual[x]._R2 = tabela_5_graus[x]._R2;
                tabela_Atual[x]._C1 = tabela_5_graus[x]._C1;
                tabela_Atual[x]._C2 = tabela_5_graus[x]._C2;
                tabela_Atual[x]._Qn = tabela_5_graus[x]._Qn;
            }
            ultimoQnSelecionado = tabela_Atual[0]._Qn;
            atualizouTabela = true;
        }
    }
    //
    if(temperaturaAtual_Graus >= 10 && temperaturaAtual_Graus < 20){ //entre 10 e 20 graus
        if(tabela_15_graus[0]._Qn != ultimoQnSelecionado){
            for(int x = 0; x < 12; x++){
                tabela_Atual[x]._SOC = tabela_15_graus[x]._SOC;
                tabela_Atual[x]._RS = tabela_15_graus[x]._RS;
                tabela_Atual[x]._R1 = tabela_15_graus[x]._R1;
                tabela_Atual[x]._R2 = tabela_15_graus[x]._R2;
                tabela_Atual[x]._C1 = tabela_15_graus[x]._C1;
                tabela_Atual[x]._C2 = tabela_15_graus[x]._C2;
                tabela_Atual[x]._Qn = tabela_15_graus[x]._Qn;
            }
            ultimoQnSelecionado = tabela_Atual[0]._Qn;
            atualizouTabela = true;
        }
    }
    //

```

```

if(temperaturaAtual_Graus >= 20 && temperaturaAtual_Graus < 30){ //entre 20 e 30 graus
    if(tabela_25_graus[0]._Qn != ultimoQnSelecionado){
        for(int x = 0; x < 12; x++){
            tabela_Atual[x]._SOC = tabela_25_graus[x]._SOC;
            tabela_Atual[x]._RS = tabela_25_graus[x]._RS;
            tabela_Atual[x]._R1 = tabela_25_graus[x]._R1;
            tabela_Atual[x]._R2 = tabela_25_graus[x]._R2;
            tabela_Atual[x]._C1 = tabela_25_graus[x]._C1;
            tabela_Atual[x]._C2 = tabela_25_graus[x]._C2;
            tabela_Atual[x]._Qn = tabela_25_graus[x]._Qn;
        }
        ultimoQnSelecionado = tabela_Atual[0]._Qn;
        atualizouTabela = true;
    }
}
//
if(temperaturaAtual_Graus >= 30 && temperaturaAtual_Graus < 40){ //entre 30 e 40 graus
    if(tabela_35_graus[0]._Qn != ultimoQnSelecionado){
        for(int x = 0; x < 12; x++){
            tabela_Atual[x]._SOC = tabela_35_graus[x]._SOC;
            tabela_Atual[x]._RS = tabela_35_graus[x]._RS;
            tabela_Atual[x]._R1 = tabela_35_graus[x]._R1;
            tabela_Atual[x]._R2 = tabela_35_graus[x]._R2;
            tabela_Atual[x]._C1 = tabela_35_graus[x]._C1;
            tabela_Atual[x]._C2 = tabela_35_graus[x]._C2;
            tabela_Atual[x]._Qn = tabela_35_graus[x]._Qn;
        }
        ultimoQnSelecionado = tabela_Atual[0]._Qn;
        atualizouTabela = true;
    }
}
//
if(temperaturaAtual_Graus >= 40 && temperaturaAtual_Graus < 50){ //entre 40 e 50 graus
    if(tabela_45_graus[0]._Qn != ultimoQnSelecionado){
        for(int x = 0; x < 12; x++){
            tabela_Atual[x]._SOC = tabela_45_graus[x]._SOC;
            tabela_Atual[x]._RS = tabela_45_graus[x]._RS;
            tabela_Atual[x]._R1 = tabela_45_graus[x]._R1;
            tabela_Atual[x]._R2 = tabela_45_graus[x]._R2;
            tabela_Atual[x]._C1 = tabela_45_graus[x]._C1;
            tabela_Atual[x]._C2 = tabela_45_graus[x]._C2;
            tabela_Atual[x]._Qn = tabela_45_graus[x]._Qn;
        }
        ultimoQnSelecionado = tabela_Atual[0]._Qn;
    }
}

```

```

        atualizouTabela = true;
    }
}

//
if(atualizouTabela){
    Serial.println("");
    Serial.print("Temperatura (C): "); Serial.println(temperaturaAtual_Graus, 0);
    Serial.println("TABELA ATUALIZADA -----");
    Serial.println(" SOC   RS    R1    R2    C1    C2    Qn");
    for(int x = 0; x < 12; x++){
        Serial.print(tabela_Atual[x]._SOC,6); Serial.print(" | "); Serial.print(tabela_Atual[x]._RS,5); Serial.print(" | ");
        Serial.print(tabela_Atual[x]._R1, 8); Serial.print(" | "); Serial.print(tabela_Atual[x]._R2,8); Serial.print(" | ");
        Serial.print(tabela_Atual[x]._C1, 4); Serial.print(" | "); Serial.print(tabela_Atual[x]._C2,0); Serial.print(" | ");
        Serial.print(tabela_Atual[x]._Qn, 3);Serial.println(" | ");
    }
    Serial.println("-----");
    Serial.println("");
    //
}
}

void InicializarTabelaParametrosSOC(){
    //
    //=====05_graus=====
    //          SOC   RS    R1    R2    C1    C2    Qn
    tabela_5_graus[0] = {0.96296, 0.0005803, 0.0001743, 0.0004291, 6684100, 107540, 125676}; //linha_01
    tabela_5_graus[1] = {0.85185, 0.0006515, 0.0002053, 0.0005360, 7413100, 77147, 125676}; //linha_02
    tabela_5_graus[2] = {0.74074, 0.0006407, 0.0002005, 0.0005082, 8424600, 62132, 125676}; //linha_03
    tabela_5_graus[3] = {0.62963, 0.0006630, 0.0001970, 0.0006304, 7796800, 55170, 125676}; //linha_04
    tabela_5_graus[4] = {0.48155, 0.0006461, 0.0002445, 0.0007989, 6448300, 50660, 125676}; //linha_05
    tabela_5_graus[5] = {0.40744, 0.0008041, 0.0002675, 0.0008840, 5475300, 48479, 125676}; //linha_06
    tabela_5_graus[6] = {0.33341, 0.0006942, 0.0002768, 0.0010000, 5713600, 38764, 125676}; //linha_07
    tabela_5_graus[7] = {0.22225, 0.0006889, 0.0003100, 0.0012000, 4224500, 22398, 125676}; //linha_08
    tabela_5_graus[8] = {0.14820, 0.0007069, 0.0005021, 0.0014000, 1943700, 12243, 125676}; //linha_09
    tabela_5_graus[9] = {0.11133, 0.0006963, 0.0007942, 0.0019000, 1012400, 624.75, 125676}; //linha_10
    tabela_5_graus[10] = {0.07419, 0.0007430, 0.0012000, 0.0030000, 545080, 107540, 125676}; //linha_11
    tabela_5_graus[11] = {0.00000, 0.0006744, 0.0042000, 0.0248000, 59578, 77147, 125676}; //linha_12
    //=====

    //=====15_graus=====
    //          SOC   RS    R1    R2    C1    C2    Qn
    tabela_15_graus[0] = {0.96429, 0.0005373, 0.0001407, 0.0002583, 7130300, 192240, 132314.4}; //linha_01
    tabela_15_graus[1] = {0.89286, 0.0005692, 0.0001640, 0.0003169, 10046000, 167350, 132314.4}; //linha_02

```

```

tabela_15_graus[2] = {0.82143, 0.0005679, 0.0001607, 0.0004024, 11967000, 126570, 132314.4}; //linha_03
tabela_15_graus[3] = {0.75000, 0.0005651, 0.0001659, 0.0004382, 11068000, 113720, 132314.4}; //linha_04
tabela_15_graus[4] = {0.67858, 0.0006119, 0.0001776, 0.0004873, 8082500, 83941, 132314.4}; //linha_05
tabela_15_graus[5] = {0.53572, 0.0006004, 0.0001923, 0.0006279, 7781400, 64739, 132314.4}; //linha_06
tabela_15_graus[6] = {0.39286, 0.0006271, 0.0001988, 0.0007369, 7928800, 65141, 132314.4}; //linha_07
tabela_15_graus[7] = {0.25001, 0.0006114, 0.0002437, 0.0008897, 6250200, 54821, 132314.4}; //linha_08
tabela_15_graus[8] = {0.14287, 0.0007272, 0.0003871, 0.0011000, 2235700, 42147, 132314.4}; //linha_09
tabela_15_graus[9] = {0.07148, 0.0007817, 0.0007457, 0.0015000, 1103900, 32921, 132314.4}; //linha_10
tabela_15_graus[10] = {0.03578, 0.0007021, 0.0013000, 0.0025000, 540080, 19535, 132314.4}; //linha_11
tabela_15_graus[11] = {0.00000, 0.0006979, 0.0043000, 0.0205000, 63711, 897.95, 132314.4}; //linha_12
//=====

```

```
//===== [25_graus] =====
```

```

//          SOC    RS    R1    R2    C1    C2    Qn
tabela_25_graus[0] = {0.964284, 0.0006146, 0.00043124, 0.00018213, 37246.00, 4010500, 143573.042}; //linha_01
tabela_25_graus[1] = {0.892856, 0.0006855, 0.00044005, 0.00019927, 36996.00, 5176900, 143573.042}; //linha_02
tabela_25_graus[2] = {0.785713, 0.0006523, 0.00056493, 0.00020817, 28397.00, 4921800, 143573.042}; //linha_03
tabela_25_graus[3] = {0.678570, 0.0006545, 0.00063899, 0.00021389, 31142.00, 6729000, 143573.042}; //linha_04
tabela_25_graus[4] = {0.571428, 0.0006687, 0.00069703, 0.00021543, 32159.00, 4524600, 143573.042}; //linha_05
tabela_25_graus[5] = {0.428571, 0.0006942, 0.00078576, 0.00021750, 31975.00, 4114400, 143573.042}; //linha_06
tabela_25_graus[6] = {0.321428, 0.0007090, 0.00084316, 0.00027663, 31248.00, 3144500, 143573.042}; //linha_07
tabela_25_graus[7] = {0.214285, 0.0007137, 0.00091565, 0.00036186, 28675.00, 1964400, 143573.042}; //linha_08
tabela_25_graus[8] = {0.142857, 0.0007267, 0.00100000, 0.00048308, 26105.00, 1414700, 143573.042}; //linha_09
tabela_25_graus[9] = {0.071428, 0.0006967, 0.00140000, 0.00085571, 14465.00, 544980, 143573.042}; //linha_10
tabela_25_graus[10] = {0.035714, 0.0007658, 0.00340000, 0.00200000, 3930.700, 196100, 143573.042}; //linha_11
tabela_25_graus[11] = {0.000000, 0.0007204, 0.01700000, 0.00920000, 867.9524, 28380, 143573.042}; //linha_12
//=====

```

```
//===== [35_graus] =====
```

```

//          SOC    RS    R1    R2    C1    C2    Qn
tabela_35_graus[0] = {0.96552, 0.0004584, 0.0000617, 0.0001578, 30167000, 486810, 147862.8}; //linha_01
tabela_35_graus[1] = {0.86207, 0.0004281, 0.0001184, 0.0001492, 13310000, 528260, 147862.8}; //linha_02
tabela_35_graus[2] = {0.75862, 0.0004294, 0.0001328, 0.0001564, 9040600, 441010, 147862.8}; //linha_03
tabela_35_graus[3] = {0.65519, 0.0004171, 0.0001312, 0.0003781, 11262000, 88706, 147862.8}; //linha_04
tabela_35_graus[4] = {0.55180, 0.0004469, 0.0001202, 0.0003803, 9264800, 126170, 147862.8}; //linha_05
tabela_35_graus[5] = {0.41398, 0.0004501, 0.0001422, 0.0003318, 11696000, 225100, 147862.8}; //linha_06
tabela_35_graus[6] = {0.27619, 0.0004606, 0.0001788, 0.0004386, 9363500, 154240, 147862.8}; //linha_07
tabela_35_graus[7] = {0.17283, 0.0004842, 0.0001676, 0.0004888, 8925700, 100340, 147862.8}; //linha_08
tabela_35_graus[8] = {0.10351, 0.0005012, 0.0002042, 0.0005766, 7764600, 89614, 147862.8}; //linha_09
tabela_35_graus[9] = {0.06903, 0.0005339, 0.0004358, 0.0007266, 2619100, 83962, 147862.8}; //linha_10
tabela_35_graus[10] = {0.03455, 0.0006341, 0.0012000, 0.0023000, 1158800, 48709, 147862.8}; //linha_11
tabela_35_graus[11] = {0.00000, 0.0005868, 0.0073000, 0.0065000, 189710, 11722, 147862.8}; //linha_12

```

```
//=====

//=====[45_graus]=====
//          SOC   RS    R1    R2    C1    C2    Qn
tabela_45_graus[0] = {0.96429, 0.0006767,0.0000827, 0.0002769, 22107000, 82298, 150256.8}; //linha_01
tabela_45_graus[1] = {0.92857, 0.0006307,0.0000579, 0.0001310,11532000,534620, 150256.8}; //linha_02
tabela_45_graus[2] = {0.85714, 0.0006709,0.0001121, 0.0002471,14183000,97474, 150256.8}; //linha_03
tabela_45_graus[3] = {0.75000, 0.0006670,0.0000591, 0.0002262,23843000,179790, 150256.8}; //linha_04
tabela_45_graus[4] = {0.64286, 0.0006936,0.0000461, 0.0003331,43113000,115710, 150256.8}; //linha_05
tabela_45_graus[5] = {0.53571, 0.0007098,0.0000617, 0.0002574, 18716000,233890, 150256.8}; //linha_06
tabela_45_graus[6] = {0.39286, 0.0007422,0.0001093, 0.0003375,14856000,205560, 150256.8}; //linha_07
tabela_45_graus[7] = {0.28571, 0.0007581,0.0001084, 0.0002986,18683000,185140, 150256.8}; //linha_08
tabela_45_graus[8] = {0.17857, 0.0007858,0.0001518, 0.0002813,12284000,146590, 150256.8}; //linha_09
tabela_45_graus[9] = {0.07143, 0.0008079,0.0001917, 0.0004040,3014800, 128830, 150256.8}; //linha_10
tabela_45_graus[10] = {0.03571, 0.0008750,0.0004210, 0.0009452,1437400, 81061, 150256.8}; //linha_11
tabela_45_graus[11] = {0.00000, 0.0008420,0.0075000, 0.0043000,82139, 16659, 150256.8}; //linha_12
//=====
}

void InicializarVariaveisDoKalman(){
    //nome[linhas,colunas]

    //matriz Q[3][3]
    Q[0][0] = 0.00001; Q[0][1] = 0; Q[0][2] = 0;
    Q[1][0] = 0; Q[1][1] = 0.0001; Q[1][2] = 0;
    Q[2][0] = 0; Q[2][1] = 0; Q[2][2] = 10;

    //matriz P[3][3]
    P[0][0] = 0.0001; P[0][1] = 0; P[0][2] = 0;
    P[1][0] = 0; P[1][1] = 0.001; P[1][2] = 0;
    P[2][0] = 0; P[2][1] = 0; P[2][2] = 0.0001;

    //matriz A[3][3]
    double v1 = exp(-Ts/(R1*C1));
    double v2 = exp(-Ts/(R2*C2));
    A[0][0] = 1; A[0][1] = 0; A[0][2] = 0;
    A[1][0] = 0; A[1][1] = v1; A[1][2] = 0;
    A[2][0] = 0; A[2][1] = 0; A[2][2] = v2;

    //matriz B[3][1]
    double QnTabela = tabela_Atual[0]._Qn;
    double vb1 = (-Ts/QnTabela);
    double vb2 = R1*(1-exp(-Ts/(R1*C1)));
    double vb3 = R2*(1-exp(-Ts/(R2*C2)));
}
```

```

B[0][0] = vb1; B[1][0] = vb2; B[2][0] = vb3;

//matriz C[1][3]
C[0][0] = Voc_SoC; C[0][1] = -1; C[0][2] = -1;

//matriz D[1][1]
D[0][0] = (-R0);

//matriz Id[3][3]
Id[0][0] = 1; Id[0][1] = 0; Id[0][2] = 0;
Id[1][0] = 0; Id[1][1] = 1; Id[1][2] = 0;
Id[2][0] = 0; Id[2][1] = 0; Id[2][2] = 1;

//matriz K[3][1]
K[0][0] = 0.1; K[1][0] = 0.1; K[2][0] = 0.1;

//matriz X[3][1]
x[0][0] = 1; x[1][0] = 0.0; x[2][0] = 0.0;
}
void InicializaSDCardEArquivosTXT(){
  if (!SD.begin(SD_CS)){
    delay(500);
    Serial.println("Falha ao inicializar o SD");
    checkSD = 0;
    delay(100);
  }
  else{
    Serial.println("SD Inicializado");
    checkSD = 1;
    //
    uint8_t cardType = SD.cardType();
    delay(100);

    // Arquivo de texto geral - criação
    fileGeral = SD.open("/dadosCargaDescarga.txt");
    if(!fileGeral) {
      writeFile(SD, "/dadosCargaDescarga.txt", "");
    }
    if(fileGeral){
      fileGeral.close();
    }
    delay(100);
  }
}
}

```

```

//INICIO LOOP =====
void loop() {
    segundosWatchDog = 0; //zera o contador do watchdog toda vez que entra no loop (contagem de 40s caso travar em um
loop)

    leituraADS1115Shield1(); //Le Vbat, I1, I2 e I3
    leituraADS1115Shield2(); //Le I4
    Ibat = I1 + I2 + I3 + I4;

    ControleDAC(); // controle DAC de acordo com os ciclos
    ControleTemperatura(); // define a temperatura atual de acordo com o tempo dos ciclos
    PrintarInformacoesNaTelaDe1Em1Segundo(); //printa Vbat, correntes, x_0, tempos

    AtualizaTabelaDeAcordoComATemperatura(); //Se mudou a temperatura, atualiza a tabela com os parametros
correspondentes
    InterpolarParamsTabela(); //Atualiza R0, R1, R2, C1 e C2 de acordo com x_0
    AtualizarMatrizes_A_B_C_D(); //Atualiza Matrizes A, B, C, D

    //ordem: (tempo, Vbat, Ibat, I1, I2, I3, I4, VBatEstimado, erro, x_0, x_1, x_2)
    CalcularKalmanESalvarDadosNoSD(); //Calcula kalman a 1Hz e salva a cada 10s as 10 amostras coletadas.
}
//FIM LOOP =====

void ControleTemperatura(){
    if(couter >= 0.0000000000000000 && couter < ciclo1.segundosOff) { // temperatura do ciclo 1
        temperaturaAtual_Graus = ciclo1.temperatura;
    }
    if(couter >= ciclo1.segundosOff && couter < ciclo2.segundosOff) { // temperatura do ciclo 2
        temperaturaAtual_Graus = ciclo2.temperatura;
    }
    if(couter >= ciclo2.segundosOff && couter < ciclo3.segundosOff){ // temperatura do ciclo 3
        temperaturaAtual_Graus = ciclo3.temperatura;
    }
    if(couter >= ciclo3.segundosOff && couter < ciclo4.segundosOff){ // temperatura do ciclo 4
        temperaturaAtual_Graus = ciclo4.temperatura;
    }
    if(couter >= ciclo4.segundosOff){ // temperatura do ciclo 4
        temperaturaAtual_Graus = ciclo4.temperatura;
    }
}

void ControleDAC(){
    if(digitalRead(PIN_REF) == HIGH){
        if(desativarADC_Em_1_47V == false){

```



```

    if(Vbat < 1.55){
        desativarADC_Em_1_47V = true; //desativa o ADC até que o ESP seja resetado, ou o ciclo seja reiniciado.
        resolucao = 0;
    }
}
else{
    resolucao = 0;
}
}
else{
    resolucao = 0;
}
}
//Reinicia contador e variável do ensaio
if(couter > totaltime){
    couter = 0;
    resolucao = 0;
    desativarADC_Em_1_47V = false;
}
}
if (digitalRead(PIN_REF) == LOW){
    resolucao = 0;
}

//DAC 2 desativado... os 4 braços estão trabalhando com a resolução fornecida pelo DAC1
dacWrite(PIN_DAC1, resolucao); //resolução 0 - 255 | 0 - 3.15V pin 25
dacWrite(PIN_DAC2, 0); //resolução 0 - 255 | 0 - 3.14V pin 26 ex: dacWrite(PIN_DAC2, 154)
}

void PrintarInformacoesNaTelaDe1Em1Segundo(){
    if(incrementoPrintTela >= 1){
        incrementoPrintTela = 0;
        //
        couteroled = couter;
        oled.clear(); //limpa display
        oled.setScale(2); //determina escala do display
        oled.setCursorXY(0, 0); //seta cursor
        oled.println("INEP"); //printa variável data0
        oled.setScale(1); //determina escala do display, somente numeros inteiros
        //oled.setCursorXY(105, 0); //seta cursor
        //oled.print("SD:");
        //oled.println(checkSD);
        oled.setCursorXY(60, 0);
        oled.print("t:");
        oled.println(couteroled);
        oled.setCursorXY(0, 30);
    }
}

```



```

//Sensor de tensão 3 =====
float tensao3 = 0.0;
tensao3 = readChannelADC2(ADS1115_COMP_2_GND);

//Sensor de tensão 4 =====
float tensao4 = 0.0;
tensao4 = readChannelADC2(ADS1115_COMP_3_GND);

}
void AtualizarMatrizes_A_B_C_D(){
//matriz A
double v1 = exp(-Ts/(R1*C1));
double v2 = exp(-Ts/(R2*C2));
A[0][0] = 1; A[0][1] = 0; A[0][2] = 0;
A[1][0] = 0; A[1][1] = v1; A[1][2] = 0;
A[2][0] = 0; A[2][1] = 0; A[2][2] = v2;

//matriz B[3][1]
double QnTabela = tabela_Atual[0]._Qn;
double vb1 = (-Ts/QnTabela);
double vb2 = R1*(1-exp(-Ts/(R1*C1)));
double vb3 = R2*(1-exp(-Ts/(R2*C2)));
B[0][0] = vb1; B[1][0] = vb2; B[2][0] = vb3;

//matriz C[1][3]
C[0][0] = Voc_SoC; C[0][1] = -1; C[0][2] = -1;

//matriz D[1][1]
D[0][0] = (-R0);
}
void CalculosKalman(){
//===== 1 =====
// atualização da predição ( x = A*x + B*Ibat; )
// Multiplicar A*x
double resultadoAvezesX[3][1]; //{ A[3][3] * X[3][1] }
for(int linha = 0; linha < 3; linha++){ //linhas matriz 1
for(int coluna = 0; coluna < 1; coluna++){ //colunas matriz 2
double somaprod = 0;
for(int i = 0; i < 3; i++){ //coluna matriz 1
somaprod += A[linha][i] * x[i][coluna];
}
resultadoAvezesX[linha][coluna] = somaprod;
}
}
}
}

```

```

// Multiplicar B*Ibat
double matB[3][1];
double valor1 = B[0][0]*Ibat; //Ibat=40; no loop
double valor2 = B[1][0]*Ibat;
double valor3 = B[2][0]*Ibat;
matB[0][0] = valor1;
matB[1][0] = valor2;
matB[2][0] = valor3;

//NovaMatrizX ---> x = A*x + B*Ibat;
x[0][0] = resultadoAvezesX[0][0] + matB[0][0];
x[1][0] = resultadoAvezesX[1][0] + matB[1][0];
x[2][0] = resultadoAvezesX[2][0] + matB[2][0];

//===== 2 =====
double matrizATransposta[3][3];
matrizATransposta[0][0] = A[0][0];
matrizATransposta[0][1] = A[1][0];
matrizATransposta[0][2] = A[2][0];
matrizATransposta[1][0] = A[0][1];
matrizATransposta[1][1] = A[1][1];
matrizATransposta[1][2] = A[2][1];
matrizATransposta[2][0] = A[0][2];
matrizATransposta[2][1] = A[1][2];
matrizATransposta[2][2] = A[2][2];
double matrAxP[3][3];
for(int linha = 0; linha < 3; linha++){ //linhas matriz 1
    for(int coluna = 0; coluna < 3; coluna++){ //colunas matriz 2
        double somaprod = 0;
        for(int i = 0; i < 3; i++){ //coluna matriz 1
            somaprod += A[linha][i] * P[i][coluna];
        }
        matrAxP[linha][coluna] = somaprod;
    }
}

//A*P*A'
double matrAxPxAt[3][3];
for(int linha = 0; linha < 3; linha++){ //linhas matriz 1
    for(int coluna = 0; coluna < 3; coluna++){ //colunas matriz 2
        double somaprod = 0;
        for(int i = 0; i < 3; i++){ //coluna matriz 1
            somaprod += matrAxP[linha][i] * matrizATransposta[i][coluna];
        }
    }
}

```

```

    }
    matrAxPxAt[linha][coluna] = somaprod;
}
}

//P = A*P*A' + Q; ---- covariância estimada B.*Q.*B'
P[0][0] = matrAxPxAt[0][0] + Q[0][0];
P[0][1] = matrAxPxAt[0][1] + Q[0][1];
P[0][2] = matrAxPxAt[0][2] + Q[0][2];
P[1][0] = matrAxPxAt[1][0] + Q[1][0];
P[1][1] = matrAxPxAt[1][1] + Q[1][1];
P[1][2] = matrAxPxAt[1][2] + Q[1][2];
P[2][0] = matrAxPxAt[2][0] + Q[2][0];
P[2][1] = matrAxPxAt[2][1] + Q[2][1];
P[2][2] = matrAxPxAt[2][2] + Q[2][2];

//===== 3 =====
double matrizCTransposta[3][1]; //matriz C[1][3], CTransposta[3][1]
matrizCTransposta[0][0] = C[0][0];
matrizCTransposta[1][0] = C[0][1];
matrizCTransposta[2][0] = C[0][2];
double matrCxP[1][3] = {0,0,0};
for(int linha = 0; linha < 1; linha++){ //linhas matriz 1
    for(int coluna = 0; coluna < 3; coluna++){ //colunas matriz 2
        double somaprod = 0;
        for(int i = 0; i < 3; i++){ //coluna matriz 1
            somaprod += C[linha][i] * P[i][coluna];
        }
        matrCxP[linha][coluna] = somaprod;
    }
}

//C*P*C'
double matrCxPxCt[1][1]; //matrCxP[1][3], matrizCTransposta[3][1]
for(int linha = 0; linha < 1; linha++){ //linhas matriz 1
    for(int coluna = 0; coluna < 1; coluna++){ //colunas matriz 2
        double somaprod = 0;
        for(int i = 0; i < 3; i++){ //coluna matriz 1
            somaprod += matrCxP[linha][i] * matrizCTransposta[i][coluna];
        }
        matrCxPxCt[linha][coluna] = somaprod;
    }
}
}

```

```

// (C*P*C' + R)
double CxPxCtmaisR = matrCxPxCt[0][0] + R;

// P*C'
double matrPxCt[3][1]; //P[3][3],  matrizCTransposta[3][1]
for(int linha = 0; linha < 3; linha++){ //linhas matriz 1
    for(int coluna = 0; coluna < 1; coluna++){ //colunas matriz 2
        double somaprod = 0;
        for(int i = 0; i < 3; i++){ //coluna matriz 1
            somaprod += P[linha][i] * matrizCTransposta[i][coluna];
        }
        matrPxCt[linha][coluna] = somaprod;
    }
}

//K = P*C'/(C*P*C' + R);
double k1_1 = (matrPxCt[0][0]) / CxPxCtmaisR;
double k2_1 = (matrPxCt[1][0]) / CxPxCtmaisR;
double k3_1 = (matrPxCt[2][0]) / CxPxCtmaisR;
K[0][0] = k1_1;
K[1][0] = k2_1;
K[2][0] = k3_1;

//===== 4 =====
// Multiplicar C*x
double resultadoCvezesX = 0;
for(int linha = 0; linha < 1; linha++){ //linhas matriz 1
    for(int coluna = 0; coluna < 1; coluna++){ //colunas matriz 2
        double somaprod = 0;
        for(int i = 0; i < 3; i++){ //colunas matriz 1
            somaprod += C[linha][i] * x[i][coluna];
        }
        resultadoCvezesX = somaprod;
    }
}

//(Vbat - (C*x + D*Ibat)
VBatEstimado = resultadoCvezesX + D[0][0] * Ibat;
double VBatMenosVBatEst = (Vbat - VBatEstimado);

//K*VBatMenosVBatEst
double KxVmenosVBatEst[3][1];
KxVmenosVBatEst[0][0] = (K[0][0]) * VBatMenosVBatEst;
KxVmenosVBatEst[1][0] = (K[1][0]) * VBatMenosVBatEst;

```

```

KxVmenosVBatEst[2][0] = (K[2][0]) * VBatMenosVBatEst;

//x = x + K*VBatMenosVBatEst
double xMaisK1 = x[0][0] + KxVmenosVBatEst[0][0];
double xMaisK2 = x[1][0] + KxVmenosVBatEst[1][0];
double xMaisK3 = x[2][0] + KxVmenosVBatEst[2][0];
x[0][0] = xMaisK1;
x[1][0] = xMaisK2;
x[2][0] = xMaisK3;

//=====
//equação do VoC em função do SoC
//Coeficientes VOC_SOC
double a1, a2, a3, b1, b2, b3, c1, c2, c3;
a1 = a2 = a3 = b1 = b2 = b3 = c1 = c2 = c3 = 0;
//
if(temperaturaAtual_Graus >= 0 && temperaturaAtual_Graus < 10){
    a1 = 0.001464472;
    b1 = 879.10283;
    c1 = 2.0810644;
    a2 = 0.3653617;
    b2 = 0.521277;
    c2 = 0.6543056;
    a3 = 0;
    b3 = 0;
    c3 = 0;
}
if(temperaturaAtual_Graus >= 10 && temperaturaAtual_Graus < 20){
    a1 = 0.020255282;
    b1 = 842.27076;
    c1 = 2.074155;
    a2 = 0.4198593;
    b2 = 0.621387;
    c2 = 0.7066048;
    a3 = 0;
    b3 = 0;
    c3 = 0;
}
if(temperaturaAtual_Graus >= 20 && temperaturaAtual_Graus < 30){
    a1 = 0.080821119;
    b1 = 46.600059;
    c1 = 2.052984;
    a2 = 0.548471;
    b2 = 0.909835;

```

```

c2 = 0.895769;
a3 = 0;
b3 = 0;
c3 = 0;
}
if(temperaturaAtual_Graus >= 30 && temperaturaAtual_Graus < 40){
a1 = 0.227114809;
b1 = 38.740168;
c1 = 2.0456933;
a2 = 0.5647593;
b2 = 0.9231633;
c2 = 0.9006542;
a3 = 0;
b3 = 0;
c3 = 0;
}
if(temperaturaAtual_Graus >= 40 && temperaturaAtual_Graus < 50){
a1 = 0.281396039;
b1 = 52.807045;
c1 = 2.0459577;
a2 = 0.5375892;
b2 = 0.8528963;
c2 = 0.8519896;
a3 = 0;
b3 = 0;
c3 = 0;
}
//
Voc_SoC = a1*b1*exp(-b1*xMaisK1) + a2 - 2*b2*(xMaisK1) + 3*c2*(xMaisK1*xMaisK1);
//===== 5 =====
//Id[3][3], K[3][1], C[1][3], P[3][3]
//K*C
double resultadoKvezesC[3][3] = {{0,0,0},{0,0,0},{0,0,0}};
for(int linha = 0; linha < 3; linha++){ //linhas matriz 1
for(int coluna = 0; coluna < 3; coluna++){ //colunas matriz 2
double somaprod = 0;
for(int i = 0; i < 1; i++){ //colunas matriz 1
somaprod += K[linha][i] * C[i][coluna];
}
resultadoKvezesC[linha][coluna] = somaprod;
}
}
}

```



```

//(Id - K*C)
double resultadoIdMenosKxC[3][3];
resultadoIdMenosKxC[0][0] = Id[0][0] - resultadoKvezesC[0][0];
resultadoIdMenosKxC[0][1] = Id[0][1] - resultadoKvezesC[0][1];
resultadoIdMenosKxC[0][2] = Id[0][2] - resultadoKvezesC[0][2];
resultadoIdMenosKxC[1][0] = Id[1][0] - resultadoKvezesC[1][0];
resultadoIdMenosKxC[1][1] = Id[1][1] - resultadoKvezesC[1][1];
resultadoIdMenosKxC[1][2] = Id[1][2] - resultadoKvezesC[1][2];
resultadoIdMenosKxC[2][0] = Id[2][0] - resultadoKvezesC[2][0];
resultadoIdMenosKxC[2][1] = Id[2][1] - resultadoKvezesC[2][1];
resultadoIdMenosKxC[2][2] = Id[2][2] - resultadoKvezesC[2][2];

//resultadoIdMenosKxC*P;
double matrizPAtualizada[3][3];
for(int linha = 0; linha < 3; linha++){ //linhas matriz 1
    for(int coluna = 0; coluna < 3; coluna++){ //colunas matriz 2
        double somaprod = 0;
        for(int i = 0; i < 3; i++){ //colunas matriz 1
            somaprod += resultadoIdMenosKxC[linha][i] * P[i][coluna];
        }
        matrizPAtualizada[linha][coluna] = somaprod;
    }
}

//P = (Id - K*C)*P;
P[0][0] = matrizPAtualizada[0][0];
P[0][1] = matrizPAtualizada[0][1];
P[0][2] = matrizPAtualizada[0][2];
P[1][0] = matrizPAtualizada[1][0];
P[1][1] = matrizPAtualizada[1][1];
P[1][2] = matrizPAtualizada[1][2];
P[2][0] = matrizPAtualizada[2][0];
P[2][1] = matrizPAtualizada[2][1];
P[2][2] = matrizPAtualizada[2][2];

erro = VBatMenosVBatEst;

x_0 = x[0][0];
x_1 = x[1][0];
x_2 = x[2][0];
}
void CalcularKalmanESalvarDadosNoSD(){
    if(cronometro_1000ms >= 1){

```

```

cronometro_1000ms = 0;

//
CalculosKalman(); //atualiza o valor das variáveis (VBatEstimado, erro, x_0, x_1, x_2)

//
dadosCartaoSD[indiceDadosSD].tempo = tempoTotalDecorrido;
dadosCartaoSD[indiceDadosSD].Vbat = Vbat;
dadosCartaoSD[indiceDadosSD].Ibat = Ibat;
dadosCartaoSD[indiceDadosSD].I1 = I1;
dadosCartaoSD[indiceDadosSD].I2 = I2;
dadosCartaoSD[indiceDadosSD].I3 = I3;
dadosCartaoSD[indiceDadosSD].I4 = I4;
dadosCartaoSD[indiceDadosSD].VBatEstimado = VBatEstimado;
dadosCartaoSD[indiceDadosSD].erro = erro;
dadosCartaoSD[indiceDadosSD].x_0 = x_0;
dadosCartaoSD[indiceDadosSD].x_1 = x_1;
dadosCartaoSD[indiceDadosSD].x_2 = x_2;
indiceDadosSD++;

// se armazenou 10 dados na memória RAM, aí salva no SD e apaga a RAM.
if(indiceDadosSD >= 10){
    indiceDadosSD = 0;
    //
    String mensagemSD =
        String(dadosCartaoSD[0].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[0].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[0].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[0].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[0].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[0].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[0].I4, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[0].VBatEstimado, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[0].erro,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[0].x_0, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[0].x_1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[0].x_2, 4)
+ " \r\n" +
        String(dadosCartaoSD[1].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[1].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[1].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[1].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[1].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[1].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[1].I4, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[1].VBatEstimado, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[1].erro,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[1].x_0, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[1].x_1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[1].x_2, 4)
+ " \r\n" +
        String(dadosCartaoSD[2].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[2].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[2].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[2].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[2].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[2].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[2].I4, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[2].VBatEstimado, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[2].erro,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[2].x_0, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[2].x_1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[2].x_2, 4)
+ " \r\n" +
        String(dadosCartaoSD[3].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[3].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[3].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[3].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[3].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[3].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[3].I4, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[3].VBatEstimado, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[3].erro,

```

```

4) + " " + String(dadosCartaoSD[3].x_0, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[3].x_1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[3].x_2, 4)
+ " \r\n" +
    String(dadosCartaoSD[4].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[4].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[4].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[4].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[4].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[4].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[4].I4, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[4].VBatEstimado, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[4].erro,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[4].x_0, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[4].x_1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[4].x_2, 4)
+ " \r\n" +
    String(dadosCartaoSD[5].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[5].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[5].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[5].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[5].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[5].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[5].I4, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[5].VBatEstimado, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[5].erro,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[5].x_0, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[5].x_1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[5].x_2, 4)
+ " \r\n" +
    String(dadosCartaoSD[6].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[6].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[6].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[6].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[6].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[6].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[6].I4, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[6].VBatEstimado, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[6].erro,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[6].x_0, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[6].x_1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[6].x_2, 4)
+ " \r\n" +
    String(dadosCartaoSD[7].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[7].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[7].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[7].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[7].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[7].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[7].I4, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[7].VBatEstimado, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[7].erro,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[7].x_0, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[7].x_1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[7].x_2, 4)
+ " \r\n" +
    String(dadosCartaoSD[8].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[8].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[8].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[8].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[8].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[8].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[8].I4, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[8].VBatEstimado, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[8].erro,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[8].x_0, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[8].x_1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[8].x_2, 4)
+ " \r\n" +
    String(dadosCartaoSD[9].tempo, 1) + " " + String(dadosCartaoSD[9].Vbat, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[9].Ibat,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[9].I1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[9].I2, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[9].I3, 4) + " "
+ String(dadosCartaoSD[9].I4, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[9].VBatEstimado, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[9].erro,
4) + " " + String(dadosCartaoSD[9].x_0, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[9].x_1, 4) + " " + String(dadosCartaoSD[9].x_2, 4)
+ " \r\n";
    //
    appendFile(SD, "/dadosCargaDescarga.txt", mensagemSD.c_str());

    //zera a array de dados temporários
    for(int x = 0; x < 10; x++){
        dadosCartaoSD[x].tempo = 0;
        dadosCartaoSD[x].Vbat = 0;
        dadosCartaoSD[x].Ibat = 0;
        dadosCartaoSD[x].I1 = 0;
        dadosCartaoSD[x].I2 = 0;
        dadosCartaoSD[x].I3 = 0;
        dadosCartaoSD[x].I4 = 0;
    }

```

```
dadosCartaoSD[x].VBatEstimado = 0;
dadosCartaoSD[x].erro = 0;
dadosCartaoSD[x].x_0 = 0;
dadosCartaoSD[x].x_1 = 0;
dadosCartaoSD[x].x_2 = 0;
    }
}
}
}
```