

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
COMPUTAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MODELO EM CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE PARA UMA
BATERIA *SINGLE CELL* DE SÓDIO-CLORETO DE NÍQUEL**

ALEXANDRE MARCONDES

FOZ DO IGUAÇU

2019

Alexandre Marcondes

**Modelo em Circuito Elétrico Equivalente para uma Bateria
Single Cell de Sódio-Cloreto de Níquel**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e Computação. Área de concentração: Sistemas Dinâmicos e Energéticos.

Orientador: Ricardo Luiz Barros de Freitas

Coorientador: José Ricardo Cezar Salgado

FOZ DO IGUAÇU

2019

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Marcondes, Alexandre
MODELO EM CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE PARA UMA BATERIA
SINGLE CELL DE SÓDIO-CLORETO DE NÍQUEL / Alexandre
Marcondes; orientador(a), Ricardo Luiz Barros de Freitas;
coorientador(a), José Ricardo Cezar Salgado, 2019.
98 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste
do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e
Computação, 2019.

1. Bateria de sódio-cloreto de níquel. 2. Bateria ZEBRA.
3. Modelagem de baterias. 4. Armazenamento de energia. I.
Freitas, Ricardo Luiz Barros de. II. Salgado, José Ricardo
Cezar. III. Título.


Modelo em Circuito Elétrico Equivalente para uma Bateria *Single Cell* de Sódio-Cloreto de Níquel


Alexandre Marcondes

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação e aprovada pela Banca Examinadora:

Data da defesa pública: 05/06/2019.


Prof. Dr. **Ricardo Luiz Barros de Freitas** – (Orientador)
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE


Prof. Dr. **Carlos Roberto Mendonça da Rocha**
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE


Dr. **Helton Fernando Scherer**
Fundação Parque Tecnológico Itaipu – FPTI

Resumo

Com o crescimento acentuado do consumo energético mundial, aumento da participação das fontes renováveis na matriz energética e a ascensão dos veículos elétricos e híbridos, maior atenção a pesquisa e desenvolvimento na área de armazenamento de energia se faz necessária. O armazenamento de energia vem como um aliado na solução dos problemas de intermitência das fontes renováveis e é essencial no funcionamento de veículos elétricos. A bateria de sódio-cloreto de níquel se mostra como boa alternativa no armazenamento de energia, com grande vida útil e densidade energética teórica elevada. A modelagem de baterias é uma ferramenta sempre presente no desenvolvimento da tecnologia: pode ser utilizada na simulação do comportamento da bateria – na simulação de circuitos elétricos – e é empregada nos sistemas de controle, no qual é utilizado na previsão de estados da bateria. Este trabalho utilizou testes empíricos para a obtenção de um modelo em circuito equivalente para prever o comportamento corrente-tensão de uma bateria de sódio-cloreto de níquel de célula única. Através das medidas de tensão da descarga por pulsos os parâmetros do modelo foram estimados através do método dos mínimos quadrados não-linear para diferentes níveis de estado de carga da bateria. Nos resultados o modelo de Thevenin de terceira ordem foi o que apresentou maior acurácia, já o modelo de primeira ordem foi o que obteve os piores resultados. Os resultados de simulação apontam que quanto maior a ordem do modelo, mais preciso o modelo será, porém será maior também o custo computacional para a obtenção dos parâmetros e a simulação.

Palavras-chave: bateria de sódio-cloreto de níquel, bateria ZEBRA, modelagem de baterias, armazenamento de energia.

Abstract

With an ever-increasing demand for energy among the world, growing contribution of renewable energy sources in the energy matrix, and the constant rise of hybrid and electric vehicles production levels, research and development of energy storage area seeks more attention. Energy storage come as an allied in the issue of intermittent generation of renewable energy sources and is essential for electric powered vehicles. The sodium-nickel chloride battery sits as a good alternative for energy storage, with long lifetime and big theoretical energy density. Battery modelling is a constant in the technology development: used to simulate battery behavior – electrical circuit simulations – as well as in battery management systems to predict states of the battery. This work uses empirical tests in order to obtain an equivalent electrical circuit model to predict the current-voltage behavior of a single cell sodium-nickel chloride battery. With the “pulse discharge voltage” measurements, the model parameters were estimated using the non-linear least squares method for different levels of state of charge. At the results the third order Thevenin model achieved the best accuracy, meanwhile the first order model achieved the worst results. The simulation results show that as the model order increase, more accurate the model will be, but the computational cost for the parameter extraction and the simulation will increase as well.

Keywords: sodium-nickel chloride battery, ZEBRA battery, battery modelling, energy storage.

Agradecimentos

Agradeço aos meus irmãos, Adriano e Eduardo, e minhas cunhadas, Dani e Vanessa, por todo o apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também a minha mãe, por sempre me ajudar a manter a calma, mesmo em meio a inúmeras dificuldades.

A minha namorada Caroline e sua família, por tantos momentos bons nestes últimos anos, os quais certamente foram essenciais para a caminhada durante este mestrado.

Ao meu orientador Ricardo por todos os conselhos, essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador José Ricardo, por ter me indicado esta oportunidade e auxiliado no desenvolvimento do trabalho.

A todo o pessoal do Laboratório de Baterias do PTI, por essa grande oportunidade e pelas boas conversas e risadas em meio ao trabalho.

Em especial agradeço a todo o “pessoal da elétrica” do Laboratório de Baterias. Entre eles estão o Helton, Fernando, Diego e Valentim.

A todos meus amigos, que seguem me dando forças para seguir nas batalhas desta vida. Em especial agradeço a meus amigos Andrey, Angel, Fernando, Tales e Ulysses.

Agradeço também a todos os docentes, colegas e técnicos administrativos do PGEEC. Um especial agradecimento a Fabiana, sempre tão solícita ao ajudar os discentes do programa.

Sumário

Lista de Figuras	11
Lista de Tabelas	13
Lista de Símbolos	15
Lista de siglas e abreviaturas.....	17
1 Introdução	19
1.1 Objetivos	21
1.2 Justificativa	21
1.3 Organização do trabalho	22
2 Revisão bibliográfica.....	23
2.1 Modelagem de baterias através de circuito elétrico equivalente.....	23
2.2 Modelos em circuito equivalente para baterias de Na-NiCl ₂	27
2.3 Considerações finais do capítulo.....	27
3 Armazenamento de Energia por baterias	29
3.1 Aspectos gerais	29
3.2 Propriedades e terminologia.....	32
3.2.1 Energia disponível, capacidade e taxa de descarga.....	32
3.2.2 Estado de carga e profundidade de descarga.....	33
3.2.3 Níveis de tensão.....	34
3.2.4 Energia específica, densidade de energia e potência específica.....	35
3.2.5 Temperatura de operação e auto descarga.....	35
3.2.6 Tempo de resposta e tempo de recarga	36
3.2.7 Principais tecnologias.....	36
3.3 Considerações finais do capítulo.....	37
4 Baterias de sódio-cloreto de níquel	39
4.1 Características gerais.....	39
4.2 Aspectos construtivos	41
4.3 Considerações finais do capítulo.....	44
5 Modelagem elétrica de uma bateria.....	45
5.1 Modelos em circuito elétrico equivalente	45
5.2 Testes experimentais para a modelagem.....	47

5.3	Métodos de extração de parâmetros	50
5.4	Considerações finais do capítulo	51
6	Materiais e métodos	53
6.1	Etapa experimental	53
6.2	Modelo e extração de parâmetros	58
6.2	Modelo e simulação.....	63
6.3	Considerações finais do capítulo	64
7	Resultados e discussão	67
7.1	Resultados dos procedimentos experimentais	67
7.2	Extração dos parâmetros do modelo.....	69
7.2.1	Resultados para a tensão V_{OC} e R_s	69
7.2.2	Modelo de Thevenin de primeira ordem.....	70
7.2.3	Modelo de Thevenin de segunda ordem	73
7.2.4	Modelo de Thevenin de terceira ordem	77
7.3	Simulação da descarga por pulsos	81
7.3.1	Análise e discussão do erro.....	84
7.4	Considerações finais do capítulo	86
8	Conclusões	87
	Referências bibliográficas	89
	Apêndice A	93
	Apêndice B	95
	Apêndice C	97

Lista de Figuras

Figura 2.2:	Estrutura do modelo proposto por Chen & Rincón-Mora (2006).	25
Figura 3.1:	Ilustração de uma bateria em processo de descarga.	30
Figura 3.2:	Ilustração de uma bateria em processo de descarga.	30
Figura 3.3:	Relação de tensão, carga e intensidade de corrente em uma bateria.	33
Figura 4.1:	Principais componentes de uma célula da bateria de Na-NiCl ₂ .	40
Figura 4.2:	Componentes de uma célula da bateria de Na-NiCl ₂ .	42
Figura 4.3:	Tensão de circuito aberto (OCV) de uma célula da bateria de Na-NiCl ₂ em uma descarga contínua.	43
Figura 5.1:	Etapas para a elaboração de um modelo em circuito elétrico equivalente.	46
Figura 5.2:	Modelo R _{int} .	46
Figura 5.3:	Modelo de Thevenin com n ramos RC.	47
Figura 5.4:	Descargas contínua e intermitente.	48
Figura 6.1:	Etapas do trabalho.	53
Figura 6.2:	Etapas do teste experimental.	53
Figura 6.3:	Bancada experimental: (a) bancada completa, (b) caixa com a célula em detalhe.	54
Figura 6.4:	Fluxograma ilustrativo do procedimento experimental.	56
Figura 6.5:	Perfil de corrente para a descarga por pulsos.	57
Figura 6.6:	Ilustração do processo de obtenção de dados através da bancada experimental.	57
Figura 6.7:	Circuito montado para a medição da tensão.	58
Figura 6.8:	Modelo de Thevenin de (a) primeira ordem, (b) segunda ordem e (c) terceira ordem.	59
Figura 6.9:	Pulso de descarga em uma célula de Na-NiCl ₂ .	60
Figura 6.10:	Fluxograma do processo de simulação da descarga da bateria.	64
Figura 7.1:	Descargas contínuas do teste de capacidade estática.	67
Figura 7.2:	Teste de descarga por pulsos com tempo de repouso de 25 minutos: perfil de (a) tensão nos terminais da célula e de (b) corrente de descarga.	68
Figura 7.3:	Teste de descarga por pulsos com tempo de repouso de duas horas: perfil de (a) tensão nos terminais da célula e de (b) corrente.	69
Figura 7.4:	Parâmetros comuns a todos os modelos: (a) V _{OC} e (b) R _s .	70
Figura 7.5:	Ajustes de curva para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de primeira ordem: SOC de 90 a 60%.	70

Figura 7.6:	Ajustes de curva para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de primeira ordem: SOC de 50 a 20%.	71
Figura 7.7:	Ajustes de curva para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de primeira ordem: SOC de 10 e 0%.	71
Figura 7.10:	Ajustes de curva para as curvas de descarga do modelo de Thevenin de primeira ordem: SOC de 20 e 10%.	73
Figura 7.11:	Ajustes de curva para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de segunda ordem: SOC de 90 a 60%.	74
Figura 7.12:	Ajustes de curva para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de segunda ordem: SOC de 50 a 20%.	74
Figura 7.13:	Ajustes de curva para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de segunda ordem: SOC de 10 e 0%.	75
Figura 7.14:	Ajustes de curva para as curvas de descarga do modelo de Thevenin de segunda ordem: SOC de 100 a 70%.	76
Figura 7.15:	Ajustes de curva para a curva de descarga do modelo de Thevenin de segunda ordem: SOC de 60 a 30%.	76
Figura 7.16:	Ajustes de curva para a curva de descarga do modelo de Thevenin de segunda ordem: SOC de 20 e 10%.	77
Figura 7.17:	Ajustes de curva para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de terceira ordem: SOC de 90 a 60%.	78
Figura 7.18:	Ajustes de curva para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de terceira ordem: SOC de 50 a 20%.	78
Figura 7.19:	Ajustes de curva para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de terceira ordem: SOC de 10 e 0%.	79
Figura 7.20:	Ajustes de curva para a curva de descarga do modelo de Thevenin de terceira ordem: SOC de 100 a 70%.	80
Figura 7.21:	Ajustes de curva para a curva de descarga do modelo de Thevenin de terceira ordem: SOC de 60 a 30%.	80
Figura 7.22:	Ajustes de curva para a curva de descarga do modelo de Thevenin de terceira ordem: SOC de 20 e 10%.	81
Figura 7.23:	Comparação entre os dados de tensão experimentais e do modelo de primeira ordem: (a) variação da tensão e (b) variação do erro.	82
Figura 7.24:	Comparação entre os dados de tensão experimentais e do modelo de segunda ordem: (a) variação da tensão e (b) variação do erro.	83
Figura 7.25:	Comparação entre os dados de tensão experimentais e do modelo de terceira ordem: (a) variação da tensão e (b) variação do erro.	84

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Potencial padrão de redução de alguns eletrodos a 25°C.	31
Tabela 3.2: Comparação entre características de diferentes tipos de baterias.	37
Tabela 4.1: Características da célula de uma bateria de Na-NiCl ₂ comercial.	43
Tabela 6.1: Principais características da célula e do procedimento experimental.	54
Tabela 6.2: Resumo das equações para as curvas de descarga dos modelos e parâmetros a serem obtidos.	61
Tabela 6.3: Resumo das equações para as curvas de repouso dos modelos e parâmetros a serem obtidos.	62
Tabela 7.1: Parâmetros obtidos para as curvas de repouso (V_1 e τ_1) e de descarga (R_1 e C_1). ...	73
Tabela 7.2: Parâmetros estimados para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de segunda ordem.	75
Tabela 7.3: Parâmetros estimados para as curvas de descarga do modelo de Thevenin de segunda ordem.	77
Tabela 7.4: Parâmetros estimados para as curvas de repouso de do modelo de Thevenin de terceira ordem.	79
Tabela 7.5: Parâmetros estimados para as curvas de descarga de do modelo de Thevenin de terceira ordem.	81
Tabela 7.6: Síntese dos erros para os modelos RC.	85
Tabela 7.7: Síntese dos erros considerando a descarga até 10% do SOC.	85

Lista de Símbolos

C	Capacidade da bateria
$C_{d,i}$	Capacitância para a descarga da bateria no i -ésimo circuito RC do modelo
C_n	Capacidade nominal da bateria
C_{pulso}	Capacidade a ser extraída por um pulso no teste de descarga por pulsos
$C_{r,i}$	Capacitância para o repouso da bateria no i -ésimo circuito RC do modelo
I	Corrente
I_L	Corrente na carga
$R_{d,i}$	Resistência para a descarga da bateria no i -ésimo circuito RC do modelo
R_r	Resistência para o repouso da bateria no i -ésimo circuito RC do modelo
V_{oc}	Tensão de circuito aberto, do inglês <i>open circuit voltage</i>
V_T	Tensão nos terminais da bateria
$V_{T,m}$	Tensão nos terminais da bateria estimada pelo modelo
τ	Constante de tempo do circuito RC
e_k	Erro calculado entre o k -ésimo ponto experimental e o modelo
\bar{e}	Erro médio entre todos os pontos estimados pelo modelo
$e_k(\%)$	Erro percentual calculado entre o k -ésimo ponto experimental e o modelo
$\bar{e}(\%)$	Erro percentual médio entre todos os pontos estimados pelo modelo

Lista de siglas e abreviaturas

ADC	Conversor analógico-digital, do inglês <i>Analog to digital converter</i>
BMS	Sistema de Gerenciamento de Bateria, do inglês <i>Battery Management System</i>
CSV	Valor separado por vírgula, do inglês <i>Comma Separated Value</i>
DOD	Profundidade de descarga, do inglês <i>Depth of Discharge</i>
HPPC	Caracterização por Pulsos Híbridos de Potência, do inglês <i>Hybrid Power Pulse Characterization</i>
LMFIT	<i>Non-linear least squares minimization and curve fit for Python</i>
SOC	Estado de carga, do inglês <i>State of Charge</i>
SOH	Estado de saúde, do inglês <i>State of Health</i>
ZEBRA	<i>Zero Emission Battery Research Activity</i>

Capítulo 1

Introdução

Com o crescimento constante na demanda energética mundial, a pesquisa e desenvolvimento no setor energético é sempre de grande interesse. Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) (EPE, 2016), a geração elétrica no Brasil apresentou em 2015 uma potência instalada, incluindo as variadas fontes de energia, de 140.858 MW. É um grande aumento se comparado por exemplo ao ano de 2005, onde a potência instalada era de cerca de 92.865 MW. Desta potência instalada, um total de 91.650 MW é representado pelos empreendimentos hidrelétricos, representando cerca de 65% do total.

O sistema elétrico brasileiro apresenta uma predominância dos empreendimentos hidrelétricos de geração de energia, devido principalmente às grandes usinas hidrelétricas, tais como a usina hidrelétrica de Itaipu, localizada no estado do Paraná, ou as usinas de Jirau e Santo Antônio, localizadas no estado de Rondônia. Porém, observa-se uma tendência no crescimento das fontes não convencionais, tais como a energia solar fotovoltaica e a energia eólica. Atualmente a energia eólica representa mais de 8% da capacidade instalada no Brasil (ANEEL, n.d.).

O armazenamento de energia elétrica tem papel fundamental no sistema elétrico e passa a ter função ainda mais importante com o crescimento das fontes renováveis não convencionais. Fontes como a solar e a eólica são naturalmente intermitentes, assim exigem alguma forma de *backup* para que se tenha energia elétrica nas fases de baixa produção. Ould et. al (2016) aponta que o armazenamento de energia se tornou fator essencial para o desenvolvimento sustentável, pois pode eliminar as variações de potência, aumentar a flexibilidade do sistema elétrico e permite o armazenamento e despacho da energia elétrica gerada por fontes renováveis intermitentes.

Palizban & Kauhaniemi (2016) apontam também que, através das pesquisas a respeito dos desafios e barreiras dos sistemas de potência verifica-se que os sistemas de armazenamento de energia devem atingir esses três principais desafios:

- Aumento da confiabilidade das fontes renováveis;
- Aumento da resiliência dos sistemas elétricos;
- tornar reais os benefícios dos *smart grids* e otimizar a geração para suprir a demanda

Na geração de energia através de fontes renováveis, o armazenamento eletroquímico de energia através de baterias se mostra como uma alternativa nos problemas de intermitência na geração. Além de auxiliar no armazenamento nos períodos de geração em excesso e despacho nos momentos de escassez, a combinação entre o armazenamento de energia e fontes renováveis pode ajudar na estabilização da potência de saída, além de aumentar a confiança e flexibilidade do sistema (Ould et al., 2016).

Entre as tecnologias de armazenamento eletroquímico encontra-se a bateria de sódio-cloreto de níquel (Na-NiCl₂), ou bateria ZEBRA (*Zero Emission Battery Research Activity*). As baterias de Na-NiCl₂ caracterizam-se pela utilização de eletrodos de sódio (Na) no ânodo, cloreto de níquel (NiCl₂) no cátodo e um eletrólito cerâmico sólido denominado beta-alumina (β'' -Al₂O₃), além de um eletrólito secundário denominado tetracloroaluminato de sódio (NaAlCl₄) (Roberto Benato et al., 2014; Dustmann, 2004).

A tecnologia das baterias de Na-NiCl₂ mostra-se viável para aplicações que exijam descargas em intervalos de tempo curtos e longos (Roberto Benato et al., 2015). Portanto, são utilizadas onde há uma demanda maior de energia em intervalos curtos de tempo, como em veículos elétricos e híbridos, ou quando se necessita de energia elétrica em grandes quantidades a menor taxa de tempo, como em aplicações residenciais.

A modelagem de baterias se mostra como uma ferramenta para o desenvolvimento da tecnologia das baterias de Na-NiCl₂. Musio & Damiano (2015) mencionam que modelos de baterias eficazes podem auxiliar tanto no desenvolvimento da tecnologia quanto na operação em tempo real, estimando o mais precisamente possível a resposta da bateria para diferentes níveis de carga.

Entre os principais tipos de modelos para baterias pode se destacar os modelos em circuito elétrico equivalente e os eletroquímicos. Os modelos eletroquímicos são os mais precisos e podem explicar o comportamento em escala microscópica baseado nas reações eletroquímicas que ocorrem internamente na bateria (Fotouhi et al., 2018). Apesar da grande precisão, por conter um grande número de equações diferenciais parciais e grande número de parâmetros, os modelos eletroquímicos exigem grande custo computacional (X. Hu, Li, & Peng, 2012).

Por outro lado, os modelos em circuito equivalente representam o comportamento da bateria através de fontes de tensão, resistores e capacitores e, para aplicações na área elétrica, são de mais fácil implementação, manipulação e compreensão (Chen & Rincón-Mora, 2006). Cada componente dos modelos em circuito equivalente tem um significado físico claro, expressões matemáticas simples e são mais simples de lidar (Zhang et al., 2017).

Os modelos em circuito equivalente podem ser utilizados *offline*, quando se busca simular o comportamento da bateria em diferentes aplicações, ou *online*, onde utiliza-se o modelo embarcado no sistema de gerenciamento da bateria (BMS, do inglês *Battery Management System*) para estimar seus parâmetros em tempo real. Zhang et al. (2017) aponta que métodos de estimativa de estados da bateria baseados em modelos em circuito equivalente, como o estado de carga (SOC) e o estado de vida (SOH), tem sido utilizados amplamente.

Dada a importância da modelagem das baterias para a avaliação de seu comportamento em diferentes aplicações, este trabalho tem como tema os modelos em circuito elétrico equivalente para a avaliação do desempenho da bateria de Na-NiCl₂.

1.1 Objetivos

Considerando a necessidade da obtenção de um modelo eficaz, o objetivo principal neste trabalho é obter um modelo em circuito elétrico equivalente para estimar o comportamento corrente-tensão de uma bateria de Na-NiCl₂ para diferentes níveis de estado de carga. Para atingir tal objetivo, os seguintes objetivos específicos são definidos:

- i. Estudar a tecnologia das baterias de sódio-cloreto de níquel e suas aplicações;
- ii. Conhecer os modelos elétricos de baterias e métodos de extração de parâmetros;
- iii. Selecionar o modelo e método de extração de parâmetros;
- iv. Realizar os testes experimentais para o levantamento de dados para o modelo;
- v. Implementar o modelo em circuito elétrico equivalente e aplicar o método de extração dos parâmetros através dos dados experimentais;
- vi. Validar o modelo.

1.2 Justificativa

A importância deste trabalho se apresenta em dois principais aspectos: a análise do comportamento corrente-tensão de uma célula da bateria de Na-NiCl₂ e o desenvolvimento de um modelo capaz de prever com precisão este comportamento. O modelo pode ser utilizado principalmente em duas situações: a simulação do comportamento da bateria em circuitos elétricos e eletrônicos e em sistemas de gerenciamento de baterias, os quais utilizam modelos para realizar a predição de estados.

Devido aos diferentes ciclos de carga e descarga que devem ser realizados para a obtenção de um modelo, justifica-se o desenvolvimento do modelo para somente uma célula pela maior facilidade e economia de material. Assim, pretende-se aplicar o modelo de uma célula para baterias com diferentes números de células conectadas em série e paralelo. Esta funcionalidade elimina a necessidade do desenvolvimento de um modelo para cada caso particular, permitindo uma adaptação fácil do modelo para diferentes casos.

O desenvolvimento do modelo em circuito equivalente, em detrimento de outras formas de modelagem, se dá devido às vantagens deste tipo de modelo para trabalhos na área de engenharia elétrica. Os modelos em circuito equivalente representam o comportamento da bateria através de um circuito elétrico, são mais intuitivos, úteis e de mais fácil implementação

(Chen & Rincón-Mora, 2006), principalmente quando se deseja incorporar em simuladores de circuitos tais como o PSPICE (Cadence, n.d.).

Portanto, este trabalho justifica-se principalmente nas seguintes razões: caracterização do comportamento de uma célula da bateria de Na-NiCl₂ em diferentes condições, demanda de um modelo para diferentes aplicações, escassez de trabalhos para esta tecnologia de bateria e a acurácia atrelada com a praticidade de modelos em circuito elétrico equivalente.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em sete capítulos, além do resumo e dos apêndices. O capítulo 1 é a introdução do trabalho, contendo a contextualização, o objetivo e a justificativa.

O Capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica temporal sobre trabalhos na temática da modelagem de baterias através de circuitos elétricos equivalentes, destacando trabalhos já realizados que serviram como base teórica para a elaboração desta dissertação.

No Capítulo 3 estão descritos conceitos essenciais no estudo do armazenamento de energia através de baterias. Além disso, neste capítulo há também uma síntese sobre as principais tecnologias de baterias existentes e um quadro comparativo entre estas.

No Capítulo 4 a tecnologia das baterias de Na-NiCl₂ é abordada, trazendo suas particularidades em relação a outras tecnologias, seu funcionamento e os aspectos construtivos.

No Capítulo 5 são apresentados conceitos sobre a modelagem de uma bateria através de um modelo em circuito elétrico equivalente. São abordados os procedimentos experimentais necessários, a construção do modelo de Thevenin e as formas de obtenção de parâmetros para o modelo.

No capítulo 6 são apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Aqui é descrita detalhadamente a etapa experimental, para a obtenção dos dados da bateria, e a etapa computacional, incluindo a parte do tratamento dos dados, método de extração dos parâmetros do modelo e a simulação.

No Capítulo 7 são apresentados detalhadamente os resultados obtidos. Estão incluídos os resultados experimentais, parâmetros para os três modelos de Thevenin e resultados da simulação com o modelo implementado.

Por fim, no Capítulo 8 encontra-se a conclusão do trabalho, com considerações finais além de sugestões para possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Neste capítulo são abordados trabalhos acerca do tema de modelagem de baterias. Devido a relevância para este trabalho, o levantamento foi feito somente para a modelagem em circuito elétrico equivalente.

O processo de obtenção de modelos em circuito elétrico equivalente pode ser dividido em duas partes principais: concepção do modelo adequado (formulação do problema) e a extração dos parâmetros para o modelo. Na etapa de concepção, modelos bastante similares são utilizados para diferentes tecnologias de bateria. Porém, na etapa de extração dos parâmetros, os resultados divergem para diferentes tipos de baterias, devido as características de composição dos materiais que as compõem.

2.1 Modelagem de baterias através de circuito elétrico equivalente

Durante o desenvolvimento desta revisão de referências bibliográficas, verificaram-se dois principais motivos para o crescimento do interesse em sistemas de armazenamento por baterias: (i) o crescimento das fontes renováveis de geração de energia e (ii) a evolução dos veículos elétricos. Ambos os setores trazem a necessidade de sistemas de armazenamento confiáveis. Assim, em conjunto surgiram as pesquisas sobre a modelagem de baterias. Devido a necessidade de incluir modelos de baterias confiáveis na fase de projeto de sistemas de energia, ou também utilizar estes modelos em sistemas de controle de baterias baseados em modelo, verificou-se esse crescimento no número de trabalhos sobre o tema.

Gao, Liu, & Dougal (2002) desenvolveram um modelo para a utilização em prototipagem virtual de sistemas eletrônicos. O modelo foi desenvolvido para uma bateria de íons de lítio e era composto por uma fonte de tensão, a qual representava o potencial de equilíbrio da bateria, dois resistores que representavam a resistência interna da bateria e um capacitor em paralelo com o segundo resistor, os quais caracterizavam a resposta transiente da tensão da bateria. O modelo foi desenvolvido para ser facilmente adaptado a ambientes virtuais de simulação de circuitos elétricos. Os parâmetros foram obtidos através de métodos de ajuste de curva utilizando dados disponíveis publicamente, em folhas de dados da bateria.

Schweighofer, Raab, & Brasseur (2003) utilizaram um circuito elétrico com dois ramos RC em série com um resistor, um capacitor e um resistor a mais. Neste trabalho os autores construíram uma bancada automatizada para testes de diferentes tipos de bateria e para diferentes condições de descarga. Os modelos foram desenvolvidos para baterias de chumbo-ácido e de níquel-hidreto metálico (NiMH) de uma única célula. Os testes para a obtenção dos parâmetros do modelo foram obtidos através de pulsos de carga e descarga executados em somente um nível de SOC (50%). Os parâmetros foram obtidos de forma puramente algébrica, através da análise da curva de resposta da tensão da bateria a aplicação dos pulsos. Mesmo usando métodos simplificados, os autores obtiveram bons resultados e este trabalho serviu como base para trabalhos futuros.

Foram também desenvolvidos métodos para a obtenção de modelos especificamente para baterias de veículos elétricos. INEEL (2003) apresentou um manual de testes para baterias utilizadas em veículos elétricos que definiu uma série de testes de caracterização de baterias para este tipo de aplicação. Entre os testes encontra-se a caracterização de potência através de pulsos híbridos (HPPC, do inglês *Hybrid Pulse Power Characterization*), no qual são feitas descargas através de pulsos de curta duração (cerca de 10 segundos) em diferentes níveis de SOC. Este teste tem como objetivo simular as condições rápidas de dinâmica da bateria utilizada em um veículo elétrico. Através das curvas obtidas através do teste HPPC os parâmetros para o modelo podem ser obtidos.

Liaw et al. (2004) apresentaram um circuito equivalente com um resistor em série com um ramo RC, como ilustrado na Figura 2.1, utilizado para estimar o comportamento da tensão de células de NiMH. O resistor em série representa a resistência ôhmica da bateria e o ramo RC representa as variações não lineares. Para a obtenção dos parâmetros os autores utilizaram dois métodos: espectroscopia de impedância para a obtenção de R_1 , o qual foi considerado constante durante a descarga da bateria, e os valores de R_2 e C foram obtidos através de curvas de descargas a corrente constante, sendo que estes variavam com o SOC. O modelo apresentou grande fidelidade as curvas experimentais, porém foram consideradas somente descargas com correntes constantes.

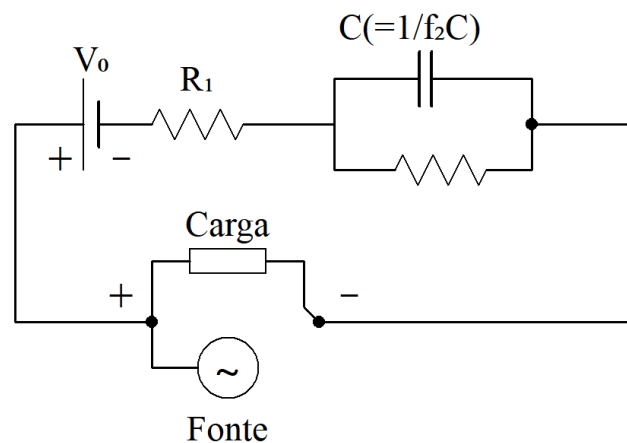


Figura 2.1: modelo utilizado por (Liaw et al., 2004).

Chen & Rincón-Mora (2006) apresentaram um modelo que diverge de todos os modelos anteriores. Neste caso, o circuito equivalente foi separado em dois: um para estimar as características de capacidade e tempo de descarga da bateria e outro para estimar o comportamento I-V (corrente-tensão) da bateria. O circuito é ilustrado na Figura 2.2. Os autores realizaram também descargas por pulsos a cada 10% do SOC, o que possibilitou a obtenção dos parâmetros do modelo em função do SOC. O comportamento dos parâmetros em função do SOC foi representado por equações polinomiais-exponenciais. Foram obtidas boas aproximações entre o modelo e os dados experimentais, atingindo um erro máximo de 30 mV para uma bateria de íons de lítio e 15 mV para uma bateria de NiMH. Atualmente, o trabalho de Chen & Rincón-Mora (2006) é ainda uma das referências mais utilizadas nesta temática.

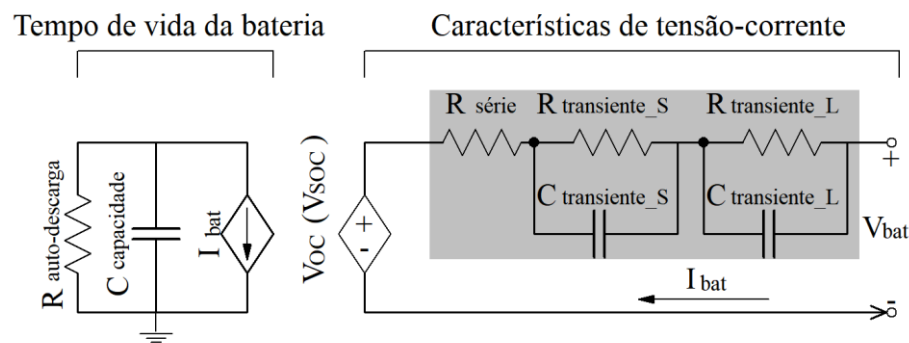


Figura 2.2: estrutura do modelo proposto por Chen & Rincón-Mora (2006).

Tremblay, Dessaint, & Dekkiche (2007) desenvolveram um modelo para aplicações com veículos elétricos que conta com uma fonte de tensão que varia de forma não linear com o SOC representando a V_{OC} da bateria, em série com somente um resistor, este com valor constante. Outra particularidade deste modelo é que os parâmetros foram obtidos a partir de folhas de dados de fabricantes de baterias, eliminando a necessidade da obtenção dos dados experimentais. Os parâmetros foram obtidos através da análise das curvas de descarga em comparação com a equação de V_{OC} .

Dubarry, Vuillaume, & Liaw (2009) realizaram um trabalho no qual, através do modelo de uma célula, pôde-se representar o comportamento de um pacote de três baterias ligadas em série. Os autores fizeram um trabalho estatístico para levantar as variações nas características das células em um lote de 100 células. Levando em consideração essas variações das células, foi possível estimar com boa precisão os níveis de tensão de um pacote de baterias através do modelo de uma única célula.

Em um determinado momento meta-heurísticas começaram a ser utilizadas para a otimização dos parâmetros dos modelos. Kumar & Bauer (2010) desenvolveram um algoritmo genético para otimizar os parâmetros do modelo como o ilustrado na Figura 2.1. Os autores utilizaram os dados de um catálogo do fabricante da bateria, sendo que a função objetivo do algoritmo genético era a minimização da diferença entre os valores de tensão calculados pelo modelo e aqueles apresentados no catálogo. Os parâmetros eram expressões polinomiais-exponenciais que variavam em função do SOC, com um total de 31 coeficientes destas equações

para serem otimizados pelo algoritmo genético. Os modelos aproximaram satisfatoriamente os dados do catálogo, porém somente descargas contínuas foram consideradas.

Windarko et al. (2011) propuseram um modelo onde os parâmetros RC para o circuito elétrico equivalente são diferentes para a bateria conectada na carga e a bateria em condição de repouso (desconectada da carga). Este modelo é uma interessante opção quando se observa que as curvas de descarga e repouso tem claramente formatos diferentes, assim os parâmetros RC que representam a descarga não poderão ser os mesmo que aqueles utilizados para a curva de repouso.

Hu, Li, & Peng (2012), utilizando baterias de íons de lítio, fizeram um estudo bastante abrangente ao testar o comportamento de doze diferentes estruturas de modelo. Para obter os parâmetros para os modelos, foram utilizados dados experimentais de descargas por pulsos híbridos, sendo que os parâmetros foram obtidos utilizando otimização por enxame de partículas (PSO, do inglês *particle swarm optimization*). Os resultados mostraram que o modelo de Thevenin com somente um ramo RC foi o que obteve melhores resultados, com erro quadrático médio de, aproximadamente, 6 mV para o caso da descarga por pulsos em somente uma célula, e aproximadamente 11 mV de erro quadrático médio para a generalização do modelo para um conjunto de oito células.

Zhang et al. (2017) traz um comparativo entre o modelo com um ramo RC e o modelo com dois ramos RC, utilizados para a modelagem de uma bateria de íons de lítio. O autor realizou um teste de capacidade com uma descarga contínua, a fim de verificar a capacidade atual da bateria, e realizou um teste HPPC para coletar os dados para o modelo. Para a obtenção dos parâmetros foi utilizado o método dos mínimos quadrados. O autor obteve valores de erro máximo de 1,88% para o modelo com um ramo RC e de 1,69 % para o modelo com dois ramos RC.

Santos et al. (2017) desenvolveu um trabalho com um circuito com dois ramos RC, modelando os parâmetros V_{OC} , R e C em função do SOC. Para obter os parâmetros utilizou as curvas de repouso da bateria retiradas de uma descarga por pulsos, utilizando as funções de ajuste de curva do Matlab para encontrar os parâmetros que mais ajustassem o modelo aos dados experimentais. Este trabalho é particularmente interessante pois detalha e apresenta de forma clara o procedimento de modelagem.

Em um trabalho mais recente, Fotouhi et al. (2018) fez testes com três diferentes modelos: somente um resistor, um resistor e um ramo RC e um resistor e dois ramos RC. Além disso, testou o tempo de identificação de três diferentes métodos de identificação dos parâmetros. O autor tinha como objetivo fazer uma análise comparativa entre acurácia e simplicidade de diferentes modelos, colocando lado a lado o erro obtido com o tempo computacional gasto na identificação dos parâmetros. O modelo com dois ramos RC obteve os menores erros (erro quadrático médio de 25,7 mV), por outro lado, o algoritmo com menor tempo computacional gasto foi o método de minimização preditiva do erro (PEM, do inglês *prediction error minimization*).

2.2 Modelos em circuito equivalente para baterias de Na-NiCl₂

Nesta seção são apresentados trabalhos de modelagem em circuito elétrico equivalente de baterias de Na-NiCl₂.

Benato et al. (2015) desenvolveu um modelo que representa o comportamento da bateria em aplicações estacionárias através da resistência interna em função da profundidade de descarga (DOD, do inglês *depth of discharge*), a V_{OC} em função da DOD e a temperatura da bateria em função da DOD e da taxa de descarga. O modelo foi implementado via Simulink e é totalmente baseado em dados: os dados de resistência e V_{OC} foram representados em grandes matrizes, onde as linhas representavam a variação em função do DOD e as colunas representavam a variação em função dos diferentes valores de corrente de descarga, e os dados em pontos específicos eram acessados através de funções interpoladoras. O modelo foi utilizado somente para descargas contínuas.

Dois anos mais tarde, Benato (2017) apresenta um modelo bastante similar ao anterior, porém o utiliza para descargas em regime permanente e estacionário. O modelo foi obtido para uma bateria de Na-NiCl₂ comercial de 240 células. Neste trabalho uma fonte de tensão representa a V_{OC} e uma resistência variável representa a queda de tensão típica das curvas de tensão da bateria. A resistência variável é representada através das matrizes citadas no parágrafo anterior. A principal desvantagem deste modelo é o grande volume de dados necessário para alimentar o modelo, pois diversas curvas de descarga foram necessárias, para nove diferentes taxas de descarga.

Musio & Damiano (2015) realizaram a modelagem para uma bateria comercial de Na-NiCl₂ de 240 células. Os autores seguiram métodos mais tradicionais de modelagem, que utiliza um modelo de Thevenin com dois ramos RC. Os autores utilizaram a descarga por pulsos para a obtenção dos parâmetros. Os parâmetros foram obtidos de maneira algébrica em função do SOC através das curvas de descanso após os pulsos, sendo que o método dos mínimos quadrados não linear foi utilizado para a otimização dos parâmetros. O erro percentual médio obtido foi de 0,19% e os autores apontam que as zonas mais problemáticas para a modelagem deste tipo de bateria estão abaixo de 20% do SOC, onde o comportamento da tensão tem comportamento altamente não-linear.

2.3 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foi apresentado um levantamento sobre trabalho a respeito da modelagem de baterias através de circuito elétrico equivalente. A maioria dos trabalhos se concentram nos modelos de Thevenin para baterias de íons de lítio – uma tecnologia com maior visibilidade comercial. Porém, tais modelos podem ser facilmente adaptados para baterias com outras

tecnologias, sendo necessário somente a obtenção dos parâmetros através dos dados experimentais.

Trabalhos que apresentam métodos de modelagem de uma célula única e a generalização do modelo para um conjunto de várias células são bastante relevantes, pois a obtenção de dados experimentais para o modelo de uma única célula é mais simples e econômica.

Para as baterias de Na-NiCl₂ foram apresentados 3 trabalhos, ambos para baterias formadas por grupos de 240 células. Não foram encontrados trabalhos de modelagem em circuito elétrico equivalente de uma única célula da bateria de Na-NiCl₂.

Capítulo 3

Armazenamento de Energia por baterias

Neste capítulo são abordadas as principais características das baterias. Abordam-se temas como o princípio de funcionamento das baterias em geral, classificações e principais terminologias utilizadas no estudo de baterias.

3.1 Aspectos gerais

Baterias são dispositivos eletroquímicos que convertem energia química diretamente em energia elétrica. O componente eletroquímico básico de uma bateria é chamado de célula, a bateria é um conjunto de células conectadas em série e em paralelo, de acordo com a diferença de potencial e capacidade que deseja-se atingir (Reddy, 2011). Assim, caso seja necessária uma maior tensão, conectam-se células em série, já para aumentar a capacidade e a corrente a uma mesma tensão, conectam-se células em paralelo.

Em baterias recarregáveis as reações eletroquímicas ocorrem para transformar energia química em energia elétrica e no sentido reverso no momento da recarga, transformando energia elétrica em energia química. Tais baterias que podem ser recarregadas são denominadas secundárias, enquanto baterias que não podem ser recarregadas são denominadas primárias (Kiehne, 2003).

Os principais componentes de uma bateria são os seguintes:

- Ânodo (eletrodo negativo) - conhecido como eletrodo de oxidação, cede elétrons para um circuito externo sendo assim oxidado durante a reação eletroquímica;
- Cátodo (eletrodo positivo) - conhecido como eletrodo de redução, recebe elétrons do circuito externo e é reduzido durante a reação eletroquímica;
- Eletrólito - Conhecido como condutor iônico, fornece o meio para a transferência de cargas (íons) dentro da célula, entre o ânodo e o cátodo. Em sua maioria os eletrólitos são líquidos, porém em algumas baterias, como no caso da bateria ZEBRA, o eletrólito é sólido e torna-se condutor de íons na temperatura de operação da bateria.

A Figura 3.1 ilustra o funcionamento geral de uma célula eletroquímica durante o processo de descarga. Ao conectar uma carga externa aos eletrodos inicia-se o fluxo de elétrons, gerando assim uma corrente elétrica. O ânodo é oxidado e perde elétrons, sendo que são estes elétrons que seguem através da carga externa, enquanto no cátodo estes elétrons são recebidos e ocorre a redução. O circuito elétrico é completo no eletrólito com o fluxo de ânions (íons negativos) até o cátodo e cátions (íons positivos) até o ânodo (Reddy, 2011).

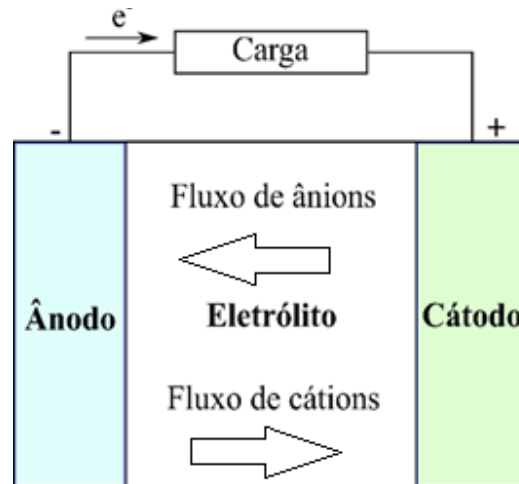


Figura 3.1: ilustração de uma bateria em processo de descarga.

Durante a carga ocorre o processo reverso, como ilustrado na Figura 3.2. Como o ânodo, por definição, é o eletrodo onde ocorre a oxidação e o cátodo o eletrodo onde ocorre a redução, no caso da recarga o eletrodo positivo (da direita em relação a Figura 3.2) é denominado ânodo e o negativo é denominado cátodo (Reddy, 2011). Observa-se também que uma fonte de corrente contínua deve ser utilizada para a recarga, realizando assim a reação inversa na bateria.

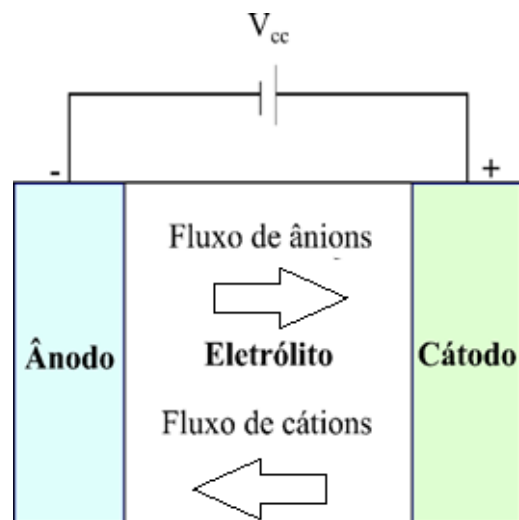


Figura 3.2: ilustração de uma bateria em processo de recarga.

Quando as reações de redução e oxidação ocorrem, uma quantidade total de energia está relacionada e depende das espécies envolvidas nas reações de carga e descarga. A energia livre de uma reação é a quantidade máxima de trabalho disponível da qual se pode extrair trabalho

útil durante uma reação química (Brodd, 2011), sendo que essa energia pode ser calculada através da Equação (3.1).

$$\Delta G = -zF \Delta E^o \quad (3.1)$$

Sendo que z é a quantidade de elétrons envolvidos na reação, F é a constante faradaica dada em Coulombs e ΔE^o é a diferença de potencial padrão da célula, calculada através da Equação (3.2) (Brodd, 2011).

$$\Delta E^o = E^o_{\text{cátodo}} - E^o_{\text{ânodo}} \quad (3.2)$$

Os valores de E^o do cátodo e do ânodo são os potenciais individuais de cada eletrodo e podem ser tanto de redução quanto de oxidação, ou seja, o potencial do eletrodo em receber elétrons ou ceder elétrons, respectivamente. Tais potenciais são obtidos experimentalmente tomando o potencial de acordo com um eletrodo de referência, sendo este eletrodo tipicamente de hidrogênio (Reddy, 2011). Assim, a diferença do potencial padronizado de cada um dos eletrodos resulta na diferença de potencial da célula. Na Tabela 3.1 são apresentados os potenciais padrão de alguns eletrodos típicos.

Tabela 3.1: potencial padrão de redução de alguns eletrodos a 25°C.

Reação no eletrodo	E^o (V)
$\text{Li}^+ + e \rightleftharpoons \text{Li}$	-3,01
$\text{Na}^+ + e \rightleftharpoons \text{Na}$	-2,71
$\text{K}^+ + e \rightleftharpoons \text{K}$	-2,92
$\text{Zn}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Zn}$	-0,76
$\text{S}^+ + 2e \rightleftharpoons \text{S}^{2-}$	-0,48
$\text{Ni}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Ni}$	-0,23
$\text{Cd}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Cd}$	-0,4
$\text{H}^+ + e \rightleftharpoons \text{H}$	0,0
$\text{Ag}^+ + e \rightleftharpoons \text{Ag}$	-0,8

Fonte: adaptado de (Reddy, 2011)

Sabe-se que para que uma reação seja espontânea, ou seja, não necessite de ação externa para ocorrer, a energia livre representada pela Equação 3.1 deve ser menor que zero, e, considerando que a constante F é positiva, para que isso ocorra o valor de ΔE^o deverá ser positivo (Reddy, 2011). Observa-se assim que durante a descarga, onde as reações que ocorrem nas baterias são espontâneas, o valor de ΔE^o deverá ser positivo, assim pode-se presumir quais eletrodos seriam melhores opções para o par ânodo-cátodo.

3.2 Propriedades e terminologia

Existem diversas propriedades e termos utilizados no meio das baterias. Tais termos são utilizados para diferenciar as baterias de acordo com suas características, facilitando assim a escolha para cada aplicação. Entre os termos utilizados podem-se citar principalmente a capacidade, energia específica, densidade de energia, tensão de operação, estado de carga, tempo de vida em uso cíclico, forma das curvas de descarga, entre outros termos.

3.2.1 Energia disponível, capacidade e taxa de descarga

A capacidade de uma bateria medida em Ah é definida por convenção como a quantidade de carga que pode ser extraída de uma bateria. Enquanto uma bateria é descarregada a uma corrente constante I , a capacidade C é calculada através da Equação (3.3) (Kiehne, 2003).

$$C = I\Delta t \quad (3.3)$$

Em uma definição geral, ao considerar uma corrente não constante $i(t)$, a capacidade é calculada através da Equação (3.4).

$$C = \int_0^t i(t) dt \quad (3.4)$$

A quantidade de energia disponível em uma bateria está intrinsicamente relacionada a capacidade de uma bateria. Considerando V_T a tensão nos terminais de saída da bateria, dada em volts (V), e q a quantidade de carga que pode ser fornecida, dada em coulombs (C), a quantidade de energia disponível em uma bateria é dada pela Equação (3.5).

$$E_{dis} = \int V_T dq \quad (3.5)$$

Os parâmetros de capacidade e energia disponível em uma bateria são fundamentais, pois é essencial conhecer a quantidade de carga que pode ser extraída de uma bateria (Huggins, 2015), assim como a quantidade de energia disponível para realização de determinada função.

Para complementar o termo "capacidade", devem-se mencionar quais seriam estas condições específicas de descarga. A taxa de descarga (C_r , *C-rate*) indica a corrente de carga ou descarga da bateria, dada em função de sua capacidade nominal. O parâmetro C_r define a taxa de carga ou descarga a corrente constante que uma bateria pode suportar por uma hora (Plett, 2015). Por exemplo, uma bateria com capacidade de 10Ah poderia fornecer por uma hora, a um C_r de 1C, uma corrente de 10A. Se o C_r fosse de 0,5C, a bateria seria completamente descarregada em duas horas fornecendo uma corrente de 5A. O parâmetro C_r é bastante utilizado no meio das baterias, sendo encontrado na grande maioria de catálogos de fabricantes.

A Figura 3.3 ilustra a relação dos valores de corrente, tensão e capacidade entregue pela bateria. Para correntes maiores a quantidade de carga entregue pela bateria será menor e a tensão

terá uma queda mais acentuada. As baterias possuem valores de tensão mínimos de funcionamento, e quando estes valores são atingidos a bateria é desconectada. Como para valores mais altos de correntes a tensão tem uma queda mais acentuada, esta tensão de corte é atingida mais rapidamente. Portanto, quanto maior a taxa de descarga menor a quantidade de energia entregue pela bateria e mais acentuada é sua queda de tensão.

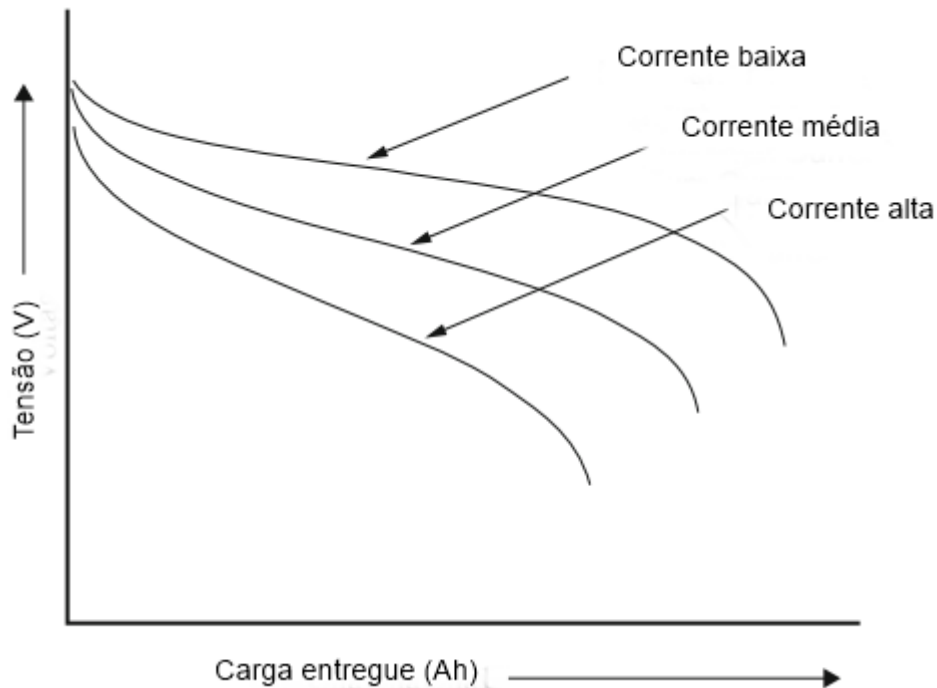


Figura 3.3: relação de tensão, carga e intensidade de corrente em uma bateria.

3.2.2 Estado de carga e profundidade de descarga

Dois parâmetros bastante utilizados são apresentados nesta seção: estado de carga (SOC, do termo em inglês *State of Charge*) e profundidade de descarga (DOD, do termo em inglês *Depth of Discharge*).

O SOC de uma bateria indica a capacidade disponível na bateria como porcentagem de sua capacidade nominal. Assim, ao considerar uma bateria de 100 Ah, se o SOC desta bateria se encontra em 30 % sabe-se que a capacidade disponível é de 30 Ah. Ao tomar como base este conceito e ao considerar $SOC(t)$ o estado de carga no instante atual, $SOC(t_0)$ o estado de carga no instante inicial, C_n a capacidade da bateria, dt o intervalo de tempo no qual a descarga ocorre e $\eta(t)$ a eficiência de coulomb, define-se a variação no SOC através da Equação (3.6).

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{1}{C_n} \int \eta i(t) dt \quad (3.6)$$

A Equação (3.6) é denominado método de contagem de coulomb para a estimativa do estado de carga de uma bateria (Musio & Damiano, 2015). A corrente $i(t)$ é considerada positiva para o processo de carga e negativa para o processo de descarga.

A eficiência de Coulomb é definida por Reddy (2011) como a razão entre a saída de uma bateria (em Ah, eficiência de carga) e a entrada necessária para estabelecer o *SOC* inicial, sob condições específicas. Em diversos modelos o valor de $\eta(t)$ é considerado unitário, pois os valores dessa eficiência aproximam-se bastante de 1.

No caso específico das baterias de Na-NiCl₂ a eficiência de carga é de 100%. Devido a presença de um eletrólito cerâmico, não ocorre auto descarga na bateria e seus eletrodos não estão envolvidos em reações paralelas, resultando na eficiência de Coulomb de 100% (Dustmann, 2004; M Musio & Damiano, 2015).

A definição do parâmetro DOD está relacionada ao SOC. A profundidade de descarga indica quanto da carga da bateria foi utilizada em relação a capacidade nominal. Define-se assim uma relação direta entre o SOC e a DOD, onde a DOD é igual a 100% menos o SOC (expresso em porcentagem), como apresentado na Equação (3.7).

$$DOD(t) = 100\% - SOC(t) \quad (3.7)$$

Assim, caso uma bateria esteja com um nível de 30% de SOC, o valor do DOD será igual a 70%.

3.2.3 Níveis de tensão

Quando se fala em valores de tensão em uma bateria, existem diferentes valores típicos utilizados para caracterizar os diferentes tipos de bateria. Como exemplo, os valores de E^0 indicados anteriormente apontam a diferença de potencial teórica entre os materiais que compõem os eletrodos da bateria, sendo que valores reais diferem deste.

Definem-se em (Reddy, 2011) as diferentes referências feitas à tensão em uma bateria:

- Tensão teórica: função dos materiais do ânodo e cátodo, composição do eletrólito e temperatura da célula eletroquímica.
- Tensão de circuito aberto (V_{OC} ou OCV, do inglês *Open Circuit Voltage*) - Tensão nos terminais de uma célula ou bateria sem uma carga conectada, geralmente bastante próxima da tensão teórica.
- Tensão de circuito fechado (V_T) - Tensão nos terminais de uma célula ou bateria sob uma carga.
- Tensão nominal - Considerada a tensão de operação da bateria, geralmente indicada no material pelo fabricante.
- Tensão de trabalho - Indica a tensão atual de operação sob carga, considerando a descarga durante o tempo, sendo menor que o valor de V_{OC} .

- Tensão de ponto médio - Tensão intermediária durante a descarga da célula ou bateria.
- Tensão de *cutoff* - Tensão que indica o fim da descarga. A operação é interrompida quando esta tensão é atingida.

3.2.4 Energia específica, densidade de energia e potência específica

A energia específica e a densidade de energia são parâmetros bastante utilizados na comparação de diferentes tecnologias de armazenamento de energia. A energia específica de uma bateria está relacionada a energia por quantidade de massa (Wh/kg) do dispositivo. A densidade energética relaciona a quantidade de energia ao volume (Wh/m³) que o dispositivo ocupa. Tais parâmetros são úteis para a comparação entre diferentes baterias (Kiehne, 2003).

Quando se buscam baterias menores como por exemplo para dispositivos portáteis, o objetivo é que a bateria seja menor possível, porém com uma grande quantidade de energia. Assim, procura-se uma bateria com grande densidade energética, ou seja, uma grande quantidade de energia para uma bateria que ocupa um volume pequeno no espaço.

É importante diferenciar a densidade energética e a energia específica da densidade de potência, normalmente medida em W/h ou W/m³, que apresenta a taxa de energia transferida por massa ou por volume. Cavanagh (2015) adota como exemplo a interrupção da geração solar devido ao tempo fechado: a tecnologia de armazenamento de energia deverá ceder uma grande quantidade de energia elétrica em um curto intervalo de tempo, assim a tecnologia deve ter uma alta densidade de potência. A densidade de potência é, portanto, uma medida da potência de pico que um dispositivo pode fornecer, enquanto a densidade energética é uma medida da quantidade de energia que o dispositivo pode fornecer.

3.2.5 Temperatura de operação e auto descarga

A temperatura de operação é um parâmetro essencial para a seleção de uma bateria considerando sua aplicação. Cavanagh (2015) aponta que a temperatura de operação é a temperatura que determinada tecnologia necessita para uma operação segura e confiável, além de ser particularmente relevante para a química de certas baterias. Nas baterias de Na-NiCl₂, por exemplo, a temperatura mínima de operação é a temperatura necessária para a fusão do sódio.

A auto descarga refere-se a descarga espontânea que ocorre enquanto a bateria não está operando, parâmetro que varia para cada bateria.

3.2.6 Tempo de resposta e tempo de recarga

O tempo de recarga, com um nome autoexplicativo, é o tempo em que uma bateria leva para ser recarregada de um estado sem carga até sua máxima capacidade. O tempo de resposta, como apontado por Cavanagh (2015), é o tempo que uma tecnologia de armazenamento leva até atingir sua máxima potência de saída, como por exemplo, o tempo gasto para ir de um estado inativo até um estado de operação à máxima potência.

3.3 Principais tecnologias

São diversos os tipos de baterias existentes e disponíveis no mercado. Dentre as principais baterias, Palizban & Kauhaniemi (2016) citam:

- Baterias de chumbo-ácido - Estão disponíveis em grandes quantidades nos mais variados tamanhos e formatos. Possuem alta performance e a maior tensão por célula das baterias com tecnologia de eletrólito aquoso.
- Baterias de níquel-cádmio e níquel metal-hidreto - Tem maior custo que as baterias de chumbo-ácido, porém possuem boa retenção de carga e densidade energética, além de possuírem grande ciclo de vida.
- Baterias de íons de lítio - Capacidade de rápida recarga e grande densidade energética, além de não necessitarem de manutenção durante a operação e possuírem poucas perdas. Como ponto negativo está a performance baixa em altas temperaturas.
- Bateria de sódio-enxofre - Possuem grande eficiência energética e operação bastante flexível. A necessidade de operar a altas temperaturas (cerca de 350°C) pode trazer dificuldades e aumentos nos custos de implantação.

A bateria de sódio-enxofre citada é da mesma família da bateria de Na-NiCl₂, pois também utiliza sódio e opera a altas temperaturas.

Observa-se nos exemplos listados dois tipos de baterias bastante comuns no cotidiano: as baterias de chumbo-ácido e as baterias de lítio-íon. A primeira é comumente utilizada nos automóveis, a segunda é utilizada na maioria dos dispositivos portáteis, tais como celulares, computadores portáteis, entre outros.

A Tabela 3.2 apresenta um comparativo entre diferentes baterias, utilizando os parâmetros descritos anteriormente. A bateria de íons de lítio destaca-se por possuir baixo valor de auto descarga, alto valor de densidade de energia e um grande tempo de vida. A bateria de Na-NiCl₂ destaca-se também pelo grande tempo de vida e grande densidade energética.

Observa-se que, entre as tecnologias apresentadas na tabela, somente as baterias de sódio-enxofre e de NiCl_2 operam em altas temperaturas, ambas utilizam sódio como material ativo.

Tabela 3.2: comparação entre características de diferentes tipos de baterias.

Bateria	Tempo de vida (anos/ciclos)	Densidade de energia (Wh/kg / kWh/m ³)	Tempo de descarga típico	Tempo de recarga	Auto descarga (%/dia)	Temperatura de operação (°C)	Tensão crítica (V por célula)
Chumbo-ácido	3-15 / 2000	30-50/75	Min – h	8-16 h	0,1 – 0,3%	-10 - 40	1,75
Níquel-cadmio	15-20 / 2000	45-80 / <200	Seg – h	1 h	0,2 – 0,6	-40 – 45	2
Íons de lítio	8-15 / 500 – 6000	100-250 / 250 – 620	Min – h	9 h	0,1 – 0,3	-10 – 50	3
Sódio-enxofre	12 – 20 / <2000	150 – 240 / <400	Seg – h	9 h	20	300	1,75 – 1,9
Sódio-cloreto de níquel	12-20 / 4000-4500	125 / 150 - 200	Min – h	6 – 8 h	15	270 – 350	1,8 – 2,5

Fonte: adaptado de (Cavanagh et al., 2015).

3.4 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram abordados conceitos gerais sobre o armazenamento de energia através de baterias. Foram apresentados conceitos fundamentais para o entendimento das diferentes tecnologias de baterias. Ao fim do capítulo encontra-se uma tabela com um comparativo entre diferentes tecnologias de baterias. A bateria de sódio-cloreto de níquel destaca-se positivamente por sua grande vida útil, tanto em tempo de vida quanto em quantidade de ciclos possível.

Capítulo 4

Baterias de sódio-cloreto de níquel

Neste capítulo são apresentadas as características gerais e aspectos construtivos das baterias de sódio-cloreto de níquel.

4.1 Características gerais

As baterias de Na-NiCl₂, também conhecidas como baterias ZEBRA, são baterias de alta temperatura que utilizam sódio (Na) como eletrodo anódico e cloreto de níquel (NiCl₂) como eletrodo catódico. A sigla ZEBRA vem do nome *Zero Emission Battery Research Activities* (atividades de pesquisa para baterias de emissão zero) e a bateria recebeu este nome devido a motivação para seu desenvolvimento (Reddy, 2011).

O princípio da bateria de Na-NiCl₂ foi descoberto na África do Sul e sua primeira patente foi aplicada em 1978. As Baterias ZEBRA foram desenvolvidas na África do Sul e na Inglaterra nos anos 80 com o principal objetivo de desenvolvimento de baterias de alta performance para veículos elétricos de emissão zero (Roberto Benato et al., 2015; Dustmann, 2004).

A célula utiliza o eletrólito cerâmico sólido beta-alumina ($\beta''\text{Al}_2\text{O}_3$) cerâmico, o qual tem a função de separar os eletrodos e é o condutor para íons Na⁺ e isolante para elétrons (Roberto Benato et al., 2014; Dustmann, 2004).

A condutividade iônica do eletrólito beta-alumina aumenta significativamente a temperaturas a partir de 200°C, onde a temperatura de operação desta classe de baterias varia entre 250°C e 350°C (intervalo no qual o eletrólito contribuí minimamente na resistência interna da célula), fazendo com que tais baterias sejam também denominadas baterias de alta temperatura (Benato et al., 2014; Musio & Damiano, 2015).

Na Figura 4.1 ilustra-se uma célula da bateria de Na-NiCl₂ e seus principais componentes. Observa-se na imagem que o eletrólito sólido tem o formato de um tubo que envolve o eletrodo positivo (cloreto de níquel) e o separa do eletrodo negativo (sódio). Observa-se também que a carcaça da célula é também seu polo negativo.

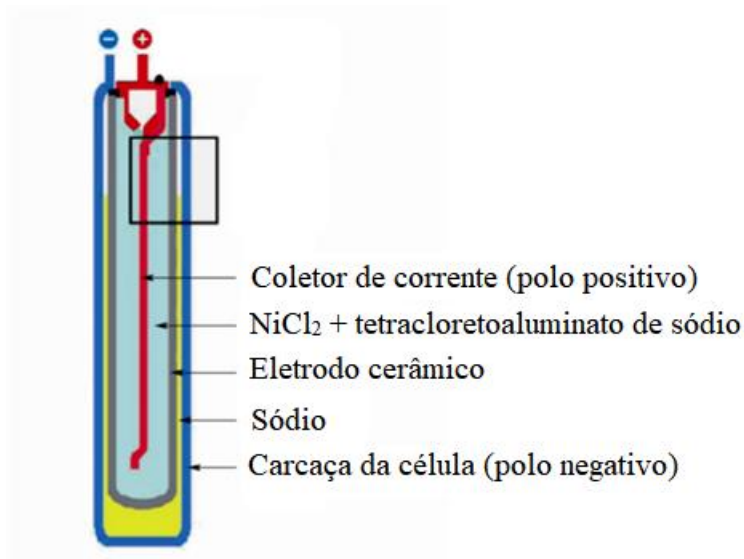


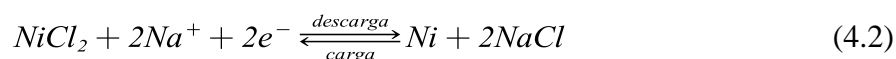
Figura 4.1: principais componentes de uma célula da bateria de Na-NiCl₂.

As reações que ocorrem durante o processo de carga e descarga, assim como a reação global na célula, são apresentadas nas equações a seguir:

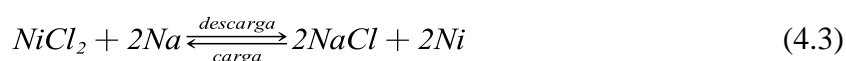
- A Equação (4.1) apresenta a reação no ânodo:



- A Equação (4.2) apresenta a reação no cátodo:



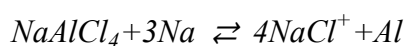
- A Equação (4.3) apresenta a reação global:



A equação que representa a reação global apresenta uma V_{OC} de cerca de 2,58 V a 300°C, além de uma energia específica teórica de 788 Wh/kg (Roberto Benato et al., 2014). Além do NiCl₂, o material catódico da bateria conta com a presença de ferro adicionado ao material ativo, o qual forma uma segunda célula de Na-FeCl₂ com V_{oc} de 2,35 V que possibilita uma maior reposta de potência (Ellis & Nazar, 2012; Galloway & Haslam, 1999). Se uma descarga de longa duração é realizada e a tensão fica abaixo de 2,35 V, a reação do ferro aumenta a reação principal do níquel e as células de níquel e ferro descarregam paralelamente (Ellis & Nazar, 2012).

Observa-se na Figura 4.1 a presença do sal tetracloroaluminato de sódio (NaAlCl₄), juntamente com o eletrodo de NiCl₂. Este sal, que se liquefaz a 154°C e que é condutivo para íons de sódio no estado líquido, é essencial para o funcionamento das baterias de Na-NiCl₂ e (Dustmann, 2004) aponta as funções principais do NaAlCl₄:

- Condutividade de íons de sódio no cátodo - O sal NaAlCl_4 no estado líquido é impregnado na mistura de sal e níquel que forma o cátodo, conduzindo íons Na^+ entre o eletrólito e a zona de reação dentro do cátodo, fazendo com que todo o cátodo fique disponível para o armazenamento de energia elétrica.
- Proteção contra falhas - Em caso de pequenas rachaduras no eletrólito de beta-alumina, o NaAlCl_4 entra em contato com o sódio líquido e a seguinte reação ocorre:



O alumínio formado pela reação acima preenche as rachaduras do eletrólito cerâmico, permitindo a operação da célula mesmo com o eletrólito rachado, diminuindo desta forma sua resistência interna. Assim, em uma série de células conectadas para formar uma bateria, somente a tensão de uma das células seria perdida, cerca de 2,58V, e a operação poderia continuar.

- Proteção de sobrecarga - Caso a tensão do carregamento continue a ser aplicada após o carregamento total da bateria, o NaAlCl_4 fornece uma reserva extra de sódio.
- Proteção de sobre descarga - O sódio extra proporcionado pelo NaAlCl_4 possibilita a manutenção do fluxo de corrente mesmo a tensões inferiores da tensão nominal que indica o fim da descarga.

4.2 Aspectos construtivos

Apresentam-se nessa sessão aspectos em relação a montagem das células das baterias de Na-NiCl₂. Ilustram-se na Figura 4.2 os componentes separados de uma célula, os quais são descritos por Benato et al. (2014):

- a) Coletor de corrente de níquel;
- b) Eletrólito cerâmico beta-alumina;
- c) Perfis capilares de aço e níquel com função de canal para o sódio fundido;
- d) Carcaça da célula em aço e níquel;
- e) Tetracloroaluminato de sódio;
- f) Cloreto de sódio e metais granulados.

As células são montadas no modo descarregado, assim os metais e o cloreto de sódio ilustrados na Figura 4.2 são colocados juntamente na parte interna da célula (dentro do eletrólito cerâmico). Durante a primeira recarga os materiais dos eletrodos são formados e separados. Observa-se que a célula em si tem o formato prismático, porém o eletrólito tem o formato de "quatro lóbulos", o que incrementa a área ativa de reação e minimiza a resistência interna (Roberto Benato et al., 2015).



Figura 4.2: componentes de uma célula da bateria de Na-NiCl₂.
Fonte: (Roberto Benato et al., 2014).

Observa-se também na Figura 4.2 que os perfis de aço apresentam um formato igual ao eletrólito após a montagem. Após a primeira recarga o material do ânodo (sódio) ficará situado entre o eletrólito e estes perfis, enquanto os materiais que compõem o cátodo ficarão na parte interna do eletrólito. O polo positivo será conectado ao coletor de corrente de níquel e a carcaça da célula representa o polo negativo (Roberto Benato et al., 2015).

A Tabela 4.1 apresenta as principais características elétricas desta célula. Já a Figura 4.3 apresenta a tensão de circuito aberto em função do SOC em uma célula durante um processo de descarga contínuo. Observa-se que até certo ponto a tensão na Figura 4.3 é igual a tensão de 2,58 V apresentada na Tabela 4.1, porém para valores de SOC baixos ou superiores a 100% a tensão é diferente. O que ocorre é que devido a presença do NaAlCl₄ e a possibilidade de sobrecargas e cargas menores a 0%, a tensão aumenta até cerca de 3,05 V e cai até aproximadamente 2,35 V (Roberto Benato et al., 2014).

Realizando um comparativo dos dados da Tabela 4.1 com as demais baterias da Tabela 3.2, observa-se que as células de Na-NiCl₂ operam à temperatura bastante superior em relação as demais, tendo temperatura similar somente a bateria de sódio-enxofre, que é da mesma família. Observa-se que a tensão por célula é superior as demais, sendo superada somente pela bateria de lítio.

Observa-se também que as baterias de Na-NiCl₂ possuem longo tempo de vida, principalmente em relação ao número de ciclos. Por fim, observa-se que as baterias de Na-NiCl₂ tem uma alta densidade energética, principalmente se comparadas as baterias de chumbo-ácido e um tempo de recarga relativamente baixo.

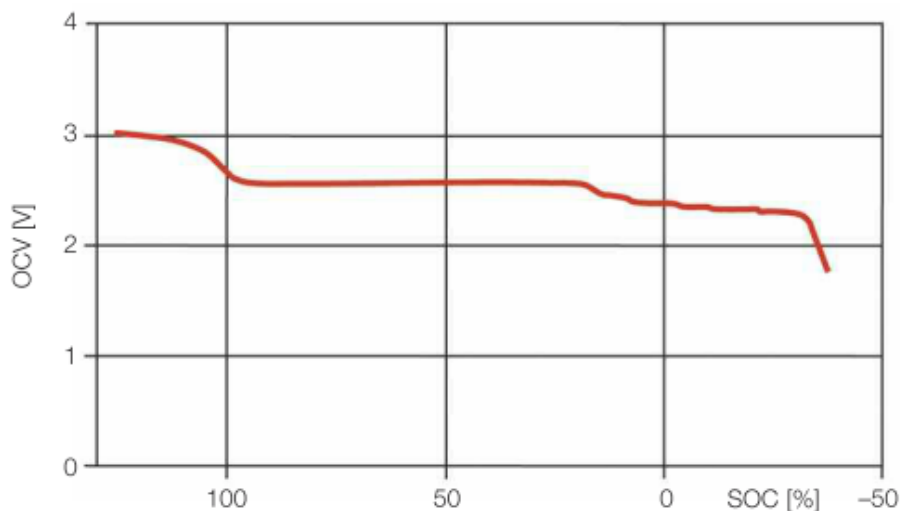


Figura 4.3: tensão de circuito aberto de uma célula da bateria de Na-NiCl₂ em uma descarga contínua.

Fonte: (Roberto Benato et al., 2014).

Tabela 4.1: características da célula de uma bateria de Na-NiCl₂ comercial.

OCV (V) (Carga completa / meia carga)	2,59 / 2,50
Tensão de fim de descarga (V)	1,90 a 2,25 de acordo com o regime de descarga
Capacidade nominal (Ah)	38
Regime de descarga	De 3 a 5 horas (Taxa de descarga de C/3 a C/5)
Rendimento (%)	90
Seção quadrada – lado (mm)	36
Comprimento (mm)	236
Peso (kg)	0,680
Volume (m ³)	3.10 ⁻⁴
Energia específica (Wh/kg)	140
Densidade energética (kWh/m ³)	280

Fonte: (Benato et al., 2015).

4.3 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram abordadas as principais características da tecnologia de interesse deste trabalho, a bateria de sódio-cloreto de níquel, ou bateria ZEBRA. Entre as principais características destaca-se que a bateria de sódio-cloreto de níquel é da família das baterias de alta temperatura, operando em temperatura acima de 270 °C. Outra particularidade está em seu eletrólito, a beta-alumina, que é um eletrólito sólido. Fato que chama a atenção é que a célula é montada desmontada e utiliza-se o cloreto de sódio na composição do material dos eletrodos, popularmente conhecido como sal de cozinha.

Capítulo 5

Modelagem elétrica de uma bateria

A modelagem matemática de baterias pode ser descrita como a obtenção de uma equação, ou um conjunto de equações, que descreve o desempenho da bateria (Reddy, 2011). Os modelos podem ser simplificados e descrever somente algumas variáveis internas, ou também podem ser complexos e descrever efeitos internos da bateria com um grande nível de detalhe.

Entre as duas formas mais comuns de modelagem de baterias estão os modelos em circuito elétrico equivalente e os modelos eletroquímicos (Seaman, Dao, & McPhee, 2014). Na primeira forma utilizam-se circuitos elétricos que representam analogamente os efeitos internos da bateria. Já o segundo, que possui um alto nível de precisão, utiliza equações diferenciais complexas para representar os efeitos internos da bateria.

Modelos eletroquímicos apresentam geralmente bastante acurácia, porém são de alta complexidade. Modelos em circuito equivalente possuem menor acurácia em relação aos modelos eletroquímicos, porém sua implementação é mais simples. Além disso, modelos em circuito equivalente são ideais para aplicações práticas que envolvam sistemas elétricos.

Este capítulo traz uma abordagem acerca dos modelos em circuito elétrico equivalente para baterias. Primeiramente uma descrição sobre alguns dos modelos é realizada, após isso os testes experimentais para a coleta de dados são apresentados e, por fim, é feita uma abordagem sobre alguns dos métodos utilizados para a extração de parâmetros a partir dos dados experimentais.

5.1 Modelos em circuito elétrico equivalente

A modelagem de baterias em circuito elétrico equivalente representa as características internas da bateria através de componentes como fontes de tensão, resistores e capacitores. Plett (2015) aponta que atualmente a grande maioria dos sistemas de gerenciamento de baterias (BMS, *Battery management systems*) para grandes conjuntos de baterias utilizam algum tipo de modelo em circuito equivalente como base para manter os limites de operação das células, sendo sua simplicidade e robustez as principais razões para isso.

A acurácia de modelos em circuito equivalente é inferior à de modelos eletroquímicos (erro de 1 a 5%), porém podem ser bastante eficazes em diversas aplicações, principalmente

àquelas da área elétrica (Chen & Rincon-Mora, 2006). Assim, por ser de mais fácil implementação e mesmo assim obter valores baixos de erro, os modelos em circuito elétrico são escolhidos em diversos casos. De fato, a escolha da forma de modelagem dependerá fortemente da aplicação e do nível de acurácia que se deseja obter.

Em geral, a modelagem em circuito equivalente segue a ordem ilustrada na Figura 5.1. Primeiramente, são necessários os dados do comportamento da bateria, os quais serão tratados e organizados. Com esses dados, um modelo é implementado e os parâmetros do modelo são obtidos. Com o modelo desenvolvido pode-se realizar a validação do modelo para verificar sua acurácia.

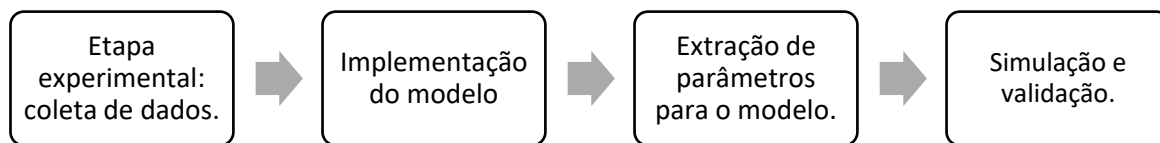


Figura 5.1: etapas para a elaboração de um modelo em circuito elétrico equivalente.

A forma mais simples de representação de uma bateria através de um circuito equivalente é o modelo R_{int} , ilustrado na Figura 5.2, no qual V_{OC} representa a V_{OC} da bateria, R_{int} representa a queda de tensão devido à resistência interna da bateria e V_T é a tensão nos terminais da bateria. Este modelo é suficientemente representativo para diversas simulações que envolvem sistemas simples, porém outros componentes devem ser adicionados para que o comportamento dinâmico da bateria seja devidamente representado (Plett, 2015).

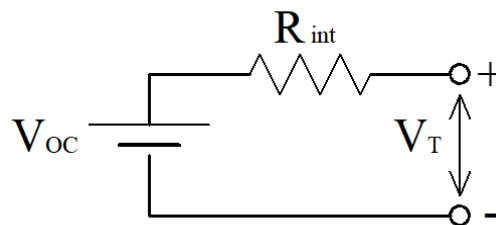


Figura 5.2: modelo R_{int} .

Para aumentar a precisão do modelo são utilizados diferentes componentes no circuito, como no caso do modelo de Thévenin ou modelo RC, ilustrado na Figura 5.3, onde ramos RC são conectados em série a R_{int} . Modelos RC representam o comportamento da relação entre a tensão nos terminais da bateria e a corrente de carga, onde os ramos RC são utilizados para modelar o relaxamento e os efeitos dinâmicos de polarização da bateria (Fotouhi et al., 2018; He, Xiong, & Fan, 2011; Musio & Damiano, 2015).

A Figura 5.3 ilustra um circuito RC com n ramos RC. Em geral, quanto maior o número de ramos RC conectados em série, maior a acurácia do modelo, porém maior também é o tempo computacional despendido pelo modelo. A escolha do modelo a ser utilizado é, portanto, uma escolha de acordo com o nível de precisão desejado e o custo computacional (Fotouhi et al., 2018; Musio & Damiano, 2015).

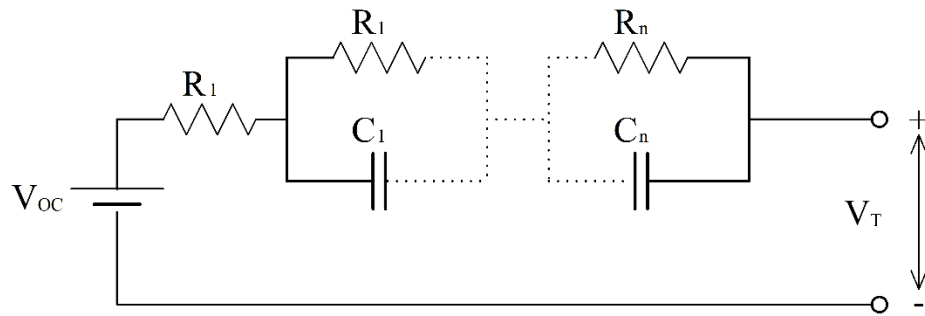


Figura 5.3: modelo de Thevenin com n ramos RC.

Assim, o número de ramos RC escolhido dependerá da aplicação desejada. Quando o modelo for utilizado em um sistema de gerenciamento de bateria, para calcular os parâmetros do sistema em tempo real, recomenda-se modelos com tempo de execução curtos, porém mantendo uma boa precisão (X. Hu et al., 2012). Em aplicações que não sejam em tempo real, como por exemplo para simular o comportamento da bateria em aplicações, um tempo de execução baixo já não será de suma importância, podendo assim buscar maior precisão sem maior preocupação com o tempo computacional.

Musio & Damiano (2015) apontam que em geral a utilização de dois ramos RC é suficiente para se obter bons valores de acurácia entre os dados reais de tensão da bateria e o modelo. Hu et al. (2012) apontam que em geral o modelo RC de primeira ordem é suficiente para se obter boa precisão, sendo que um modelo RC de segunda ordem traria pouco aumento de precisão para o número de parâmetros a mais que devem ser calculados.

Considerando um modelo de Thevenin com n pares RC em paralelo conectados ao resistor R_s , considerando que a corrente I_L assume valores negativos para a descarga, durante a descarga da bateria a tensão V_t nos terminais da bateria pode ser representada através da Equação (5.1).

$$V_T = V_{OC} + \sum_{i=1}^N R_i I_L \left(1 - e^{-\frac{t}{R_i C_i}} \right) \quad (5.1)$$

Assim, um próximo passo para a modelagem das baterias seria a extração dos parâmetros da bateria que se deseja modelar. A extração dos parâmetros é a etapa mais complexa da modelagem, devido principalmente à alta não-linearidade dos valores de tensão e capacitância. Na próxima seção serão discutidos alguns dos métodos de extração de parâmetros.

5.2 Testes experimentais para a modelagem

Durante os processos de carga e descarga de uma bateria, ocorrem diversas alterações nas propriedades dos materiais internos da célula. Tal comportamento é de particular interesse para usuários de uma bateria, pois as alterações internas da bateria estão diretamente relacionadas a mudanças na tensão de saída nos terminais da bateria.

A respeito das formas de descarga de uma bateria, Reddy (2011) aponta três principais tipos de descarga:

- Resistência constante: a resistência da carga permanece constante durante a descarga, a corrente diminui proporcionalmente à redução da tensão da bateria;
- Corrente constante: a corrente permanece constante durante a descarga;
- Potência constante: a corrente de descarga aumenta enquanto a tensão diminui, buscando manter o nível de potência de saída na bateria.

Além dos tipos de descargas descritos acima, a descarga pode ser também contínua ou intermitente, como ilustrado na Figura 5.4. Na descarga contínua a corrente será sempre mantida e o comportamento da curva de descarga terá um comportamento mais previsível e irá variar sempre em direção ao menor nível de carga e tensão.

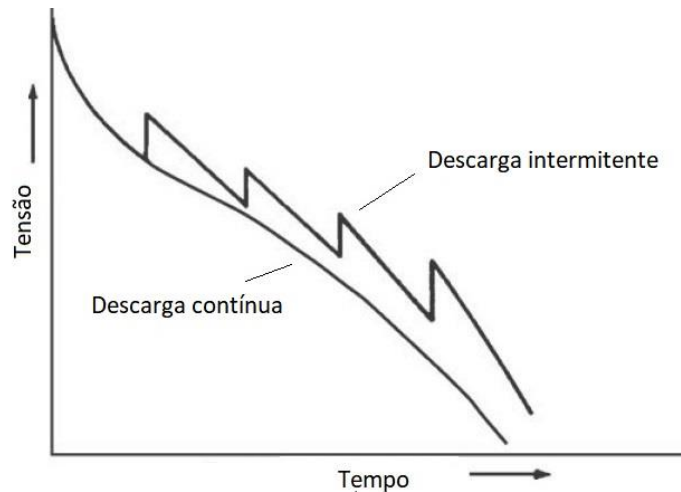


Figura 5.4: descargas contínua e intermitente.
Fonte: adaptado de (Reddy, 2011)

Na descarga intermitente a descarga será realizada por pulsos de corrente, resultando em uma forma da curva mais complexa. Na Figura 5.4 observa-se ainda que durante o pulso de descarga há uma queda de tensão instantânea e, no momento em que não há corrente, há uma recuperação instantânea na tensão. Este período em que a corrente é retirada é chamado de tempo de repouso ou tempo de descanso da bateria.

Em descargas intermitentes dois fenômenos típicos são observados: a depleção de carga e a recuperação de carga. Seaman et al. (2014) esclarecem estes dois fenômenos: a depleção de carga ocorre no início da descarga de uma bateria, devido a uma alta concentração de produtos químicos próximos ao cátodo e ao ânodo há uma queda de tensão brusca e, após isso, a tensão começa a diminuir gradualmente. Já a recuperação de carga é o efeito de aumento da tensão quando a descarga é interrompida, o que ocorre devido a difusão de produtos químicos através da bateria.

A recuperação de tensão na descarga intermitente pode incrementar o tempo de serviço de uma bateria, proporcionando descargas mais longas, porém, em descargas lentas, perdas de capacidade devido a auto descarga podem ocorrer (Reddy, 2011).

Em repouso a tensão nos terminais da bateria será igual a V_{OC} . Porém, ao aplicar uma corrente, os efeitos internos causam a queda instantânea de tensão, diminuindo o valor da tensão nos terminais. Esta queda instantânea de tensão é muitas vezes associada à resistência interna da bateria, a qual varia de acordo com a corrente de descarga.

Para a obtenção do modelo para a bateria é importante conhecer sua capacidade atual real, a qual será diferente da capacidade nominal. Para esta tarefa recomenda-se o teste de capacidade estática. Este teste verifica a capacidade da bateria em uma determinada taxa de descarga, através da descarga da bateria com uma corrente constante até que a tensão de corte seja atendida (Idaho, 2003). A carga extraída da bateria neste teste será adotada como a capacidade atual.

Em alguns trabalhos os próprios dados das folhas de dados dos fabricantes são utilizados para a modelagem, eliminando a necessidade do uso da coleta de dados experimentais. Porém, na maioria dos casos, a extração de parâmetros para o modelo está atrelada aos procedimentos experimentais. Dois tipos de descarga são amplamente utilizados para a extração de parâmetros de modelos: a descarga por pulsos e o teste HPPC.

No método de extração de parâmetros através de folhas de dados utilizam-se meta-heurísticas para a obtenção e otimização dos parâmetros do modelo. Brand, Zhang & Agarwal (2014) e Kumar & Bauer (2010) utilizam um algoritmo genético multi-objetivo para a obtenção dos parâmetros RC para um modelo RC de primeira ordem, os quais foram representados por equações polinomiais e exponenciais. O método utilizado pelos autores consiste em minimizar o erro entre os valores de tensão fornecidos pelo modelo e àqueles fornecidos pela folha de dados, otimizando os 31 coeficientes das equações que representam os parâmetros do circuito.

De maneira similar, Sangwan et al. (2017) utilizou meta-heurísticas para a obtenção de parâmetros para os modelos RC de primeira e segunda ordem, sendo que para o segundo 45 parâmetros deveriam ser otimizados. Além do algoritmo genético, neste trabalho os autores testaram outras meta-heurísticas, como a *Particle Swarm Optimization* (PSO).

Para problemas que não exigem tanta acurácia os métodos de obtenção de parâmetros através de *datasheets* podem ser satisfatórios, porém o método é limitado. Uma primeira dificuldade é o fato de o modelo utilizar somente descargas contínuas para a obtenção dos parâmetros, não levando em conta assim alterações devido a diferentes perfis de carga e descarga. Um segundo problema é a dificuldade de encontrar *datasheets* que contenham os dados de carga e descarga da bateria para diferentes valores de corrente, sendo que muitos fabricantes nem mesmo disponibilizam tais dados.

Para se obter parâmetros para modelos que consideram descargas intermitentes, são realizadas descargas por pulsos, sendo cada pulso separado por um período de descanso da

célula (sem carga). Este período sem carga deve ser suficientemente grande para que as condições estacionárias sejam obtidas, atingindo assim o potencial de equilíbrio da bateria.

Musio & Damiano (2015) realizaram a modelagem de uma bateria de Na-NiCl₂ de 240 células, cada célula contendo carga nominal de 38 Ah, utilizando um modelo RC de segunda ordem e a extração de parâmetros através da análise da resposta ao pulso. Pausas de duas horas foram realizadas após cada pulso de descarga.

Fotouhi et al. (2018) utiliza também a descarga através de pulsos para a obtenção dos parâmetros. Neste trabalho o autor traça uma interessante comparação entre três diferentes modelos e três diferentes métodos de extração e otimização dos parâmetros. O autor fornece uma análise detalhada sobre a comparação entre precisão e complexidade entre diferentes modelos.

O terceiro método citado é o teste HPPC, o qual é similar a análise da resposta ao pulso. O HPPC é proposto pelo manual de testes de baterias desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Idaho (INL) e utilizado por diferentes autores. Entre as principais utilidades do teste HPPC estão (Christopherson, 2015):

- Determinar a dinâmica da potência fornecida pela bateria na faixa de carga utilizável e dentro dos níveis de tensão nominal, considerando correntes de descarga e de regeneração;
- Estimar através das curvas de resposta a resistência ôhmica e a resistência de polarização em função do SOC da bateria.

As etapas do teste HPPC são descritas por Christopherson (2015): (i) aplica-se um pulso de corrente de descarga de 30 segundos, (ii) mantém-se a bateria em repouso por 40 segundos e (iii) aplica-se um pulso de corrente de carga de 10 segundos. A partir das curvas de tensão das três etapas, os parâmetros para o modelo podem ser obtidos.

A principal vantagem do HPPC é incluir os efeitos de regeneração, ou carga, no procedimento experimental. Assim, ao conduzir o HPPC em uma bateria pode-se extrair os parâmetros para a descarga e para a carga através de dados de somente um teste experimental. Com os dados experimentais da descarga por pulsos ou do HPPC já obtidos, utilizam-se os métodos de extração de parâmetros.

5.3 Métodos de extração de parâmetros

Com as curvas experimentais obtidas, o próximo passo é a extração de parâmetros. Diversos métodos matemáticos e computacionais são utilizados, porém aqui três serão abordados: o PSO, o algoritmo genético e o método dos mínimos quadrados não linear.

Algoritmos genéticos são algoritmos de busca baseados na evolução natural (Kumar & Bauer, 2010). De um modo geral, algoritmos genéticos são modelos baseados em populações

que utilizam operadores de seleção e recombinação entre indivíduos (soluções) para gerar novos indivíduos em um espaço de busca predeterminado, sendo largamente utilizados por pesquisadores como uma ferramenta de otimização (Whitley, 1994).

A busca por parâmetros que adaptem um modelo de bateria aos dados experimentais torna-se um problema de otimização, então algoritmos genéticos podem ser utilizados para esta tarefa. Em geral, a utilização do algoritmo genético busca encontrar os parâmetros RC do circuito elétrico equivalente que minimizem o erro existente entre os valores de tensão calculados pelo modelo e os dados experimentais, sendo então tal erro definido através da Equação (5.2) (Fotouhi et al., 2018).

$$\varepsilon = y(t_k) - \hat{y}(t_k; \theta) \quad (5.2)$$

A variável $y(t_k)$ é o valor de tensão medido no tempo k e $\hat{y}(t_k; \theta)$ é o valor de tensão estimado pelo modelo no tempo k , utilizando o vetor θ , o qual é composto pelos parâmetros RC do modelo. Assim, Fotouhi et al. (2018) aponta que uma possível função objetivo para este problema de otimização seria a minimização do erro quadrático médio (RMSE, do inglês *root mean square error*), o qual, considerando uma quantidade de N pontos de medida, pode ser calculado a partir da Equação (5.3).

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\varepsilon(t_k; \theta)|^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.3)$$

O algoritmo PSO, proposto originalmente por Eberhart & Kennedy (1995), baseia-se no comportamento de animais que comportam-se como enxames para obter a solução ótima global de um problema, utilizando operações matemáticas simples e pouco esforço computacional para tal. Dvorak (2017) utiliza o mesmo princípio mostrado para o algoritmo genético: utiliza o PSO para diminuir o RMSE otimizando os parâmetros RC do modelo.

O método dos mínimos quadrados não linear é amplamente utilizado para o ajuste de modelos em diversas áreas, sendo também bastante utilizado na modelagem de baterias. Marquardt (1963) aponta que este método está baseado no problema de minimização da soma dos quadrados da diferença entre os valores experimentais e aqueles estimados pelo modelo, ou seja, diminuição do erro (ϕ) apontado pela equação (5.4).

$$\phi = (y_i - y)^2 \quad (5.4)$$

5.4 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foi abordada a modelagem de baterias através de circuito elétrico equivalente. O modelo mais simples possível para uma bateria é composto por uma fonte de tensão contínua em série com um resistor variável, o qual representa a queda de tensão quando

a bateria é conectada a uma carga. Para se obter um modelo mais preciso, circuitos RC são conectados ao resistor em série: o resistor em série representa a queda instantânea de tensão da bateria ao ser conectada à uma carga, os circuitos RC em série representam os efeitos transientes da tensão.

Foram abordados também os métodos experimentais – utilizados para a obtenção dos parâmetros do modelo – e os métodos computacionais para a extração dos parâmetros a partir dos dados experimentais. Destacam-se a descarga por pulsos e o método dos mínimos quadrados não-linear, os quais foram utilizados como métodos neste trabalho.

Capítulo 6

Materiais e métodos

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. O procedimento segue as etapas ilustradas na Figura 6.1. Em um primeiro momento o método da etapa experimental é descrito, assim como os equipamentos utilizados nos procedimentos experimentais, os softwares e as características da célula utilizada. Após isso, são apresentados os métodos matemáticos e computacionais utilizados para a modelagem, extração de parâmetros e simulação.

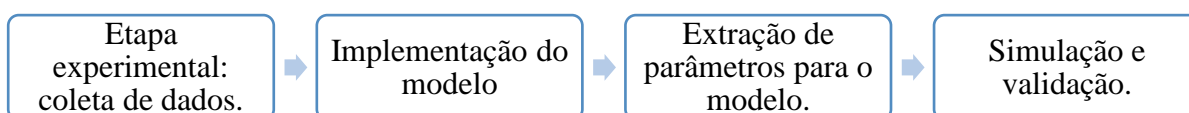


Figura 6.1: etapas do trabalho.

6.1 Etapa experimental

A Figura 6.2 ilustra as diferentes etapas dos testes experimentais. Inicialmente foi selecionada uma célula da bateria de Na-NiCl₂ para a realização de testes. As grandezas medidas em cada teste foram a tensão e a corrente através do tempo. O valor de capacidade foi estimado através da contagem de coulomb, definida no Capítulo 3, e a temperatura foi monitorada visualmente através do display do controlador de temperatura, responsável pelo aquecimento da célula e manutenção da temperatura.

Como esta célula não era nova, foram realizados testes de descarga preliminares para verificar seu estado atual. Estes testes consistiam na carga e descarga a célula em regime constante com corrente baixa (1 A). Os valores de tensão e corrente foram medidos e sua capacidade foi calculada. Através da curva de tensão pode-se selecionar uma célula que ainda estivesse em bom funcionamento e com capacidade próxima da nominal.

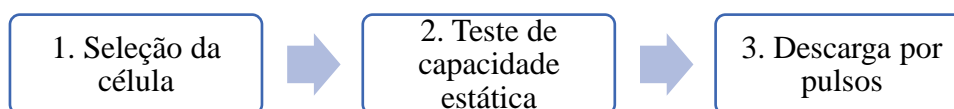


Figura 6.2: etapas do teste experimental.

A Tabela 6.1 apresenta as principais características da célula utilizada e parâmetros dos procedimentos realizados após a seleção da célula. As medidas foram tomadas para uma bateria comercial de Na-NiCl₂ de uma única célula (*single cell*). A bateria foi alocada em uma caixa térmica com isolamento para que se mantivesse aquecida na temperatura indicada. Como a bateria de Na-NiCl₂ é de alta temperatura e opera em temperaturas superiores a 270°C, o isolamento sempre se faz necessário para reduzir ao máximo as perdas de calor ao ambiente. O aquecimento inicial da célula foi feito através de uma resistência elétrica no corpo da bateria e outra na parte superior, garantindo o aquecimento uniforme de toda a célula. As imagens da Figura 6.3 ilustram a bancada experimental utilizada nos experimentos.

Tabela 6.1: principais características da célula e do procedimento experimental.

Testes realizados	Teste de capacidade e descarga por pulsos
Capacidade nominal	38 Ah
Temperatura	275 °C
Taxa de descarga	C/5 (7,6 A)
Tensão de fim de descarga	1,9 V
Intervalo de amostragem	1 s

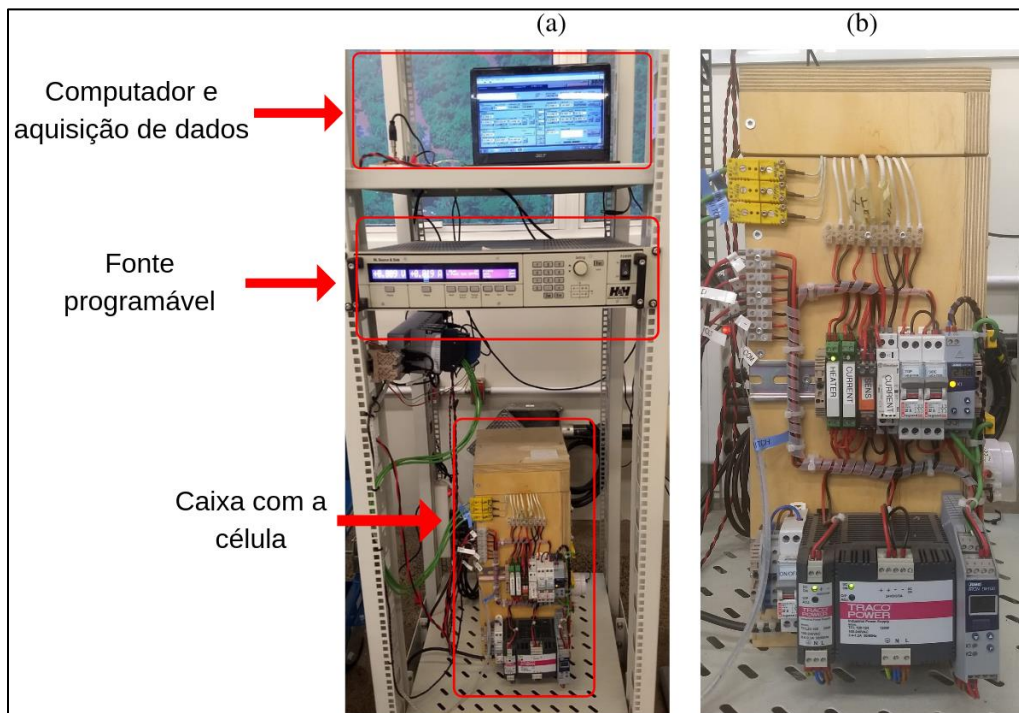


Figura 6.3: bancada experimental: (a) bancada completa, (b) caixa com a célula em detalhe.

Após a seleção da célula, um teste de capacidade estática (Idaho, 2003) foi realizado para a verificação da capacidade atual da bateria para a corrente de descarga ($I_{descarga}$) na qual se realizariam os testes experimentais. Diversas descargas em regime contínuo foram realizadas e o valor da capacidade da célula foi estimado em cada uma destas descargas, até que o valor de capacidade total extraída da célula se estabilizasse. Este valor estável foi definido como a capacidade da célula para a realização do teste de descarga por pulsos, denominada C_{total} .

Para o procedimento de obtenção dos parâmetros RC do modelo em circuito equivalente o teste de descarga por pulsos foi selecionado, utilizando o procedimento ilustrado na Figura 6.4. No teste de capacidade estática, a bateria foi carregada completamente e descarregada sucessivas vezes até a tensão de fim de descarga. Após cada descarga a capacidade descarregada pela bateria foi estimada. Quando a capacidade variou minimamente (variação inferior a 1%), a capacidade da última descarga foi adotada como capacidade atual da bateria. Com esse valor de capacidade estimado, o teste de descarga por pulsos foi realizado.

A curva de descarga por pulsos foi realizada a cada 10% do SOC, partindo da bateria completamente carregada (100% do SOC), para se obter o comportamento da tensão da bateria em diferentes níveis de carga. Entre cada pulso houve um período de repouso (t_r) onde os dados de tensão continuaram a ser coletados. Tal procedimento foi necessário para se obter o comportamento da tensão de circuito aberto da célula e para a obtenção das curvas de repouso, as quais são as curvas de tensão no período após o fim de um pulso de descarga. Foram realizados dois testes de descargas por pulsos, um com intervalo de repouso de 25 minutos e outro com intervalo de repouso de 120 minutos. A Figura 6.4 ilustra o procedimento de descarga por pulsos considerando um tempo de repouso de 120 minutos entre cada pulso.

A Figura 6.4 ilustra o procedimento experimental completo. Dentro do retângulo tracejado em vermelho observa-se o procedimento do teste de capacidade estática, já no retângulo tracejado em azul, observa-se o procedimento para o teste de descarga por pulsos.

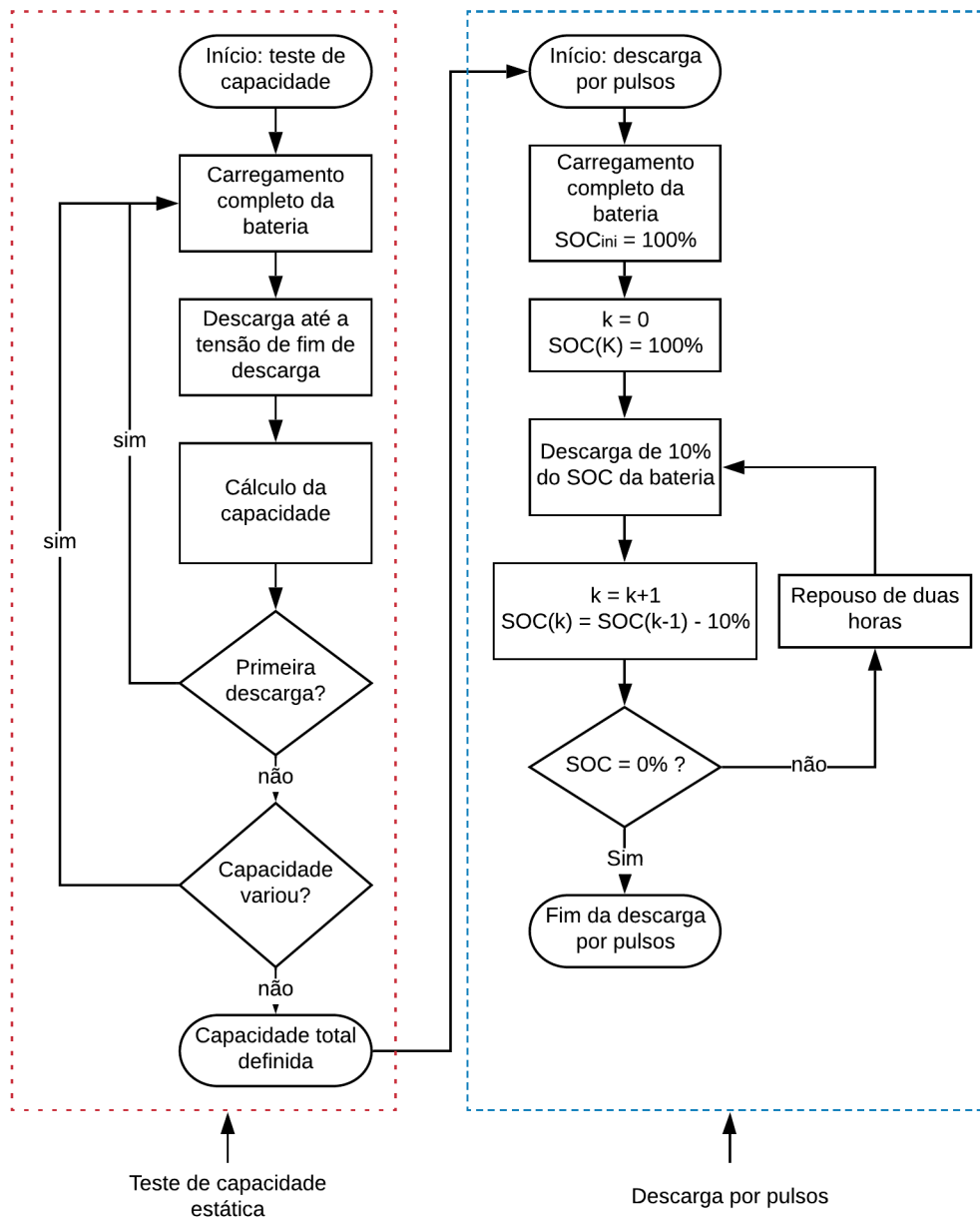


Figura 6.4: fluxograma ilustrativo do procedimento experimental.

A Figura 6.5 ilustra o perfil de corrente utilizado para a descarga por pulsos com tempo de repouso de duas horas, considerando que para a descarga o sinal a corrente é negativo. Observa-se que a corrente permanece constante em $-7,6$ A por um período suficiente para descarregar 10% do SOC e, após isso, permanece em repouso (corrente igual a zero) por duas horas. A capacidade a ser descarregada por cada pulso (C_{pulso}) é igual a capacidade total da bateria, obtida pelo teste de capacidade estática, dividido pela quantidade de pulsos, que é igual a dez neste trabalho. Então, a Equação (6.1) foi utilizada para o cálculo de C_{pulso} . Já a Equação (6.2) foi utilizada para o cálculo da duração de cada pulso de descarga (t_{pulso}).

$$C_{pulso} = \frac{C_{total}}{10} \quad (6.1)$$

$$t_{pulso} = \frac{C_{total}}{I_{descarga}} \quad (6.2)$$

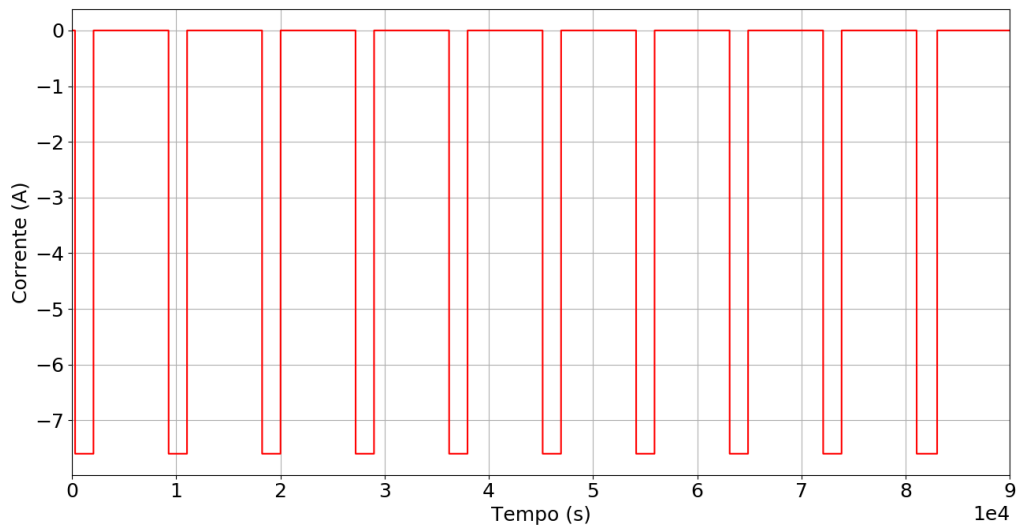


Figura 6.5: perfil de corrente para a descarga por pulsos.

A Figura 6.6 ilustra o processo de ciclagem e obtenção dos dados experimentais. Uma fonte programável foi utilizada para descarregar e carregar a bateria, de acordo com os perfis de corrente indicados no parágrafo anterior. Foi utilizado o software NLtool (Hoecherl & Hackl, n.d.), desenvolvido pelo próprio fabricante da fonte programável utilizada. No software os seguintes parâmetros foram inseridos para configurar a descarga: duração do pulso de descarga, duração do tempo de repouso, valor de corrente de descarga e valores de tensão máximo e mínimo. Para este trabalho foi utilizada a função de descarga dinâmica, onde um ciclo de carga e descarga pode ser construído através de uma tabela, permitindo um ciclo com várias etapas. Esta ferramenta foi ideal para a realização da descarga por pulsos.

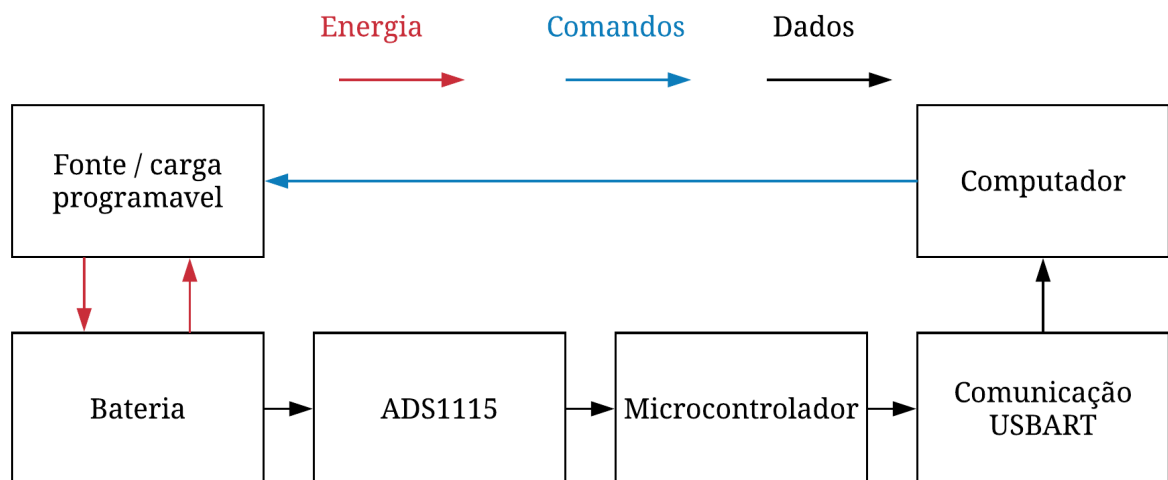


Figura 6.6: Ilustração do processo de obtenção de dados através da bancada experimental.

Para a leitura da tensão da célula foi utilizado o circuito integrado ADS1115 (Texas Instruments, n.d.). O circuito integrado ADS1115 proporcionou medidas de tensão com boa

qualidade devido a seu conversor analógico digital (ADC, do inglês *Analog to Digital converter*) de 16 bits, alcançando uma precisão na medida de tensão de até 125 μV . Um microcontrolador ATMEGA8-16pu foi utilizado para receber os dados do ADS1115 e enviar para o computador, através de um módulo de comunicação USB. Os dados são enviados para o computador em um arquivo de texto, no formato CSV (valores separados por vírgula, do inglês *comma separated values*). A Figura 6.7 ilustra os principais dispositivos utilizados no circuito de medição de tensão, enquanto no Apêndice A encontra-se o diagrama esquemático deste mesmo circuito.

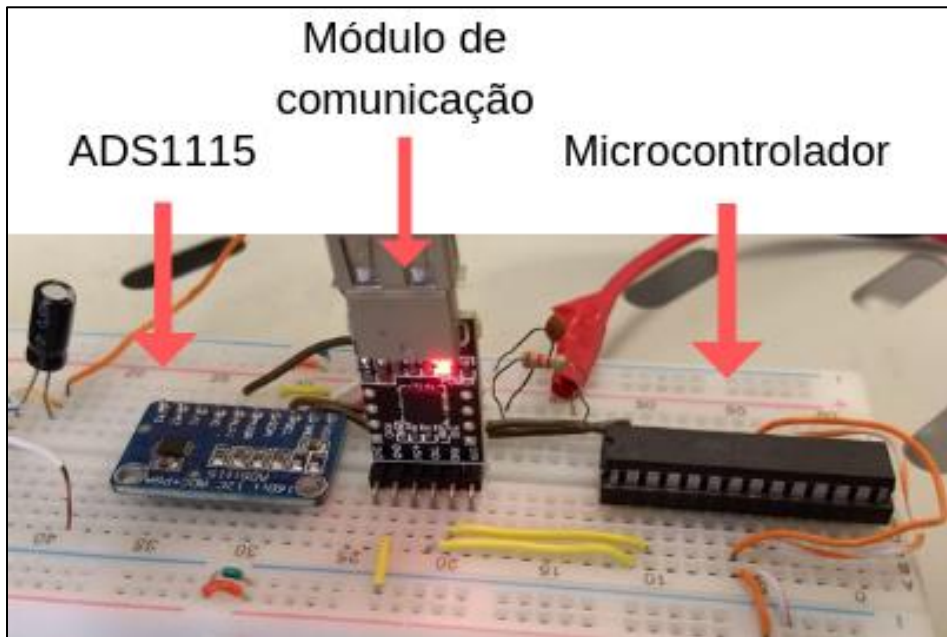


Figura 6.7: circuito montado para a medição da tensão.

O microcontrolador, responsável por receber as informações do ADC e enviá-los ao computador, foi programado através do software BASCOM (MCS Electronics, n.d.) – O código fonte deste programa encontra-se no Apêndice B. O programa de interface no computador responsável por receber os dados através da porta USB e organizá-los em um arquivo do tipo CSV foi desenvolvido com a linguagem de programação Python – o código fonte deste programa encontra-se no apêndice C.

6.2 Modelo e extração de parâmetros

Com os dados obtidos através dos procedimentos da seção anterior, primeiramente os dados foram tratados. Um código em Python foi desenvolvido para receber os dados da descarga por pulsos e separar as curvas de descarga e de repouso para cada pulso realizado.

Para a obtenção dos parâmetros do modelo optou-se pela utilização do pacote LMFIT (do inglês *Non-Linear Least-Squares Minimization and Curve Fiting for Python*) (Zenodo, 2014) para Python. O pacote LMFIT proporciona ao usuário ferramentas de fácil utilização que auxiliam na construção de modelos complexos através de dados de medidas reais, utilizando

métodos como o método mínimos quadrados não linear (Zenodo, 2014). Além do método dos mínimos quadrados, o usuário pode optar por outros algoritmos para a solução dos problemas.

Foram selecionados os modelos de Thevenin de primeira, segunda e terceira ordem, os quais são ilustrados na Figura 6.8. Os modelos utilizados contêm, respectivamente, um, dois e três ramos RC em série, utilizados para modelar os efeitos de polarização da bateria. Tais modelos são suficientes para os objetivos deste trabalho e uma comparação entre a eficácia dos três será realizada.

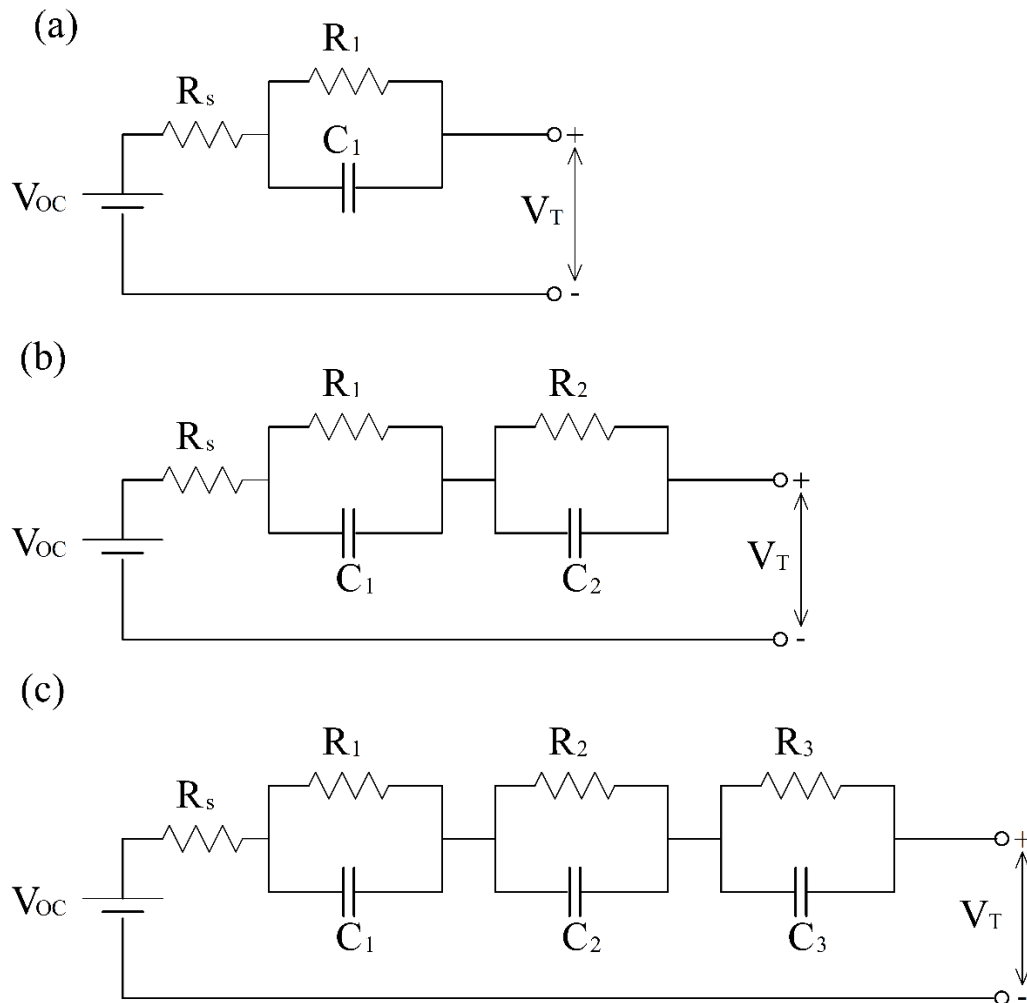


Figura 6.8: modelo de Thevenin de (a) primeira ordem, (b) segunda ordem e (c) terceira ordem.

Para os três modelos os parâmetros foram obtidos através da curva de descarga e da curva de repouso da descarga por pulsos. Um exemplo de um pulso de descarga é ilustrado na Figura 6.9. A tensão de circuito aberto V_{OC} é medida no instante que antecede a aplicação do outro pulso, pois assim a tensão próxima do equilíbrio é obtida. Observa-se nas curvas da Figura 6.9 que as constantes de tempo τ são claramente diferentes para a descarga e para o repouso. Adotou-se então o método proposto por Windarko et al (2011), onde consideram-se parâmetros RC distintos para a descarga e para o repouso. A curva de repouso é composta pela curva de

tensão obtida após o fim do pulso de descarga, ou seja, no instante em que a corrente aplicada é zero.

Durante o período de descarga, a corrente I_d é não-nula e igual a corrente exigida pela carga conectada a bateria. No período anterior ao pulso de descarga, considera-se os capacitores em série completamente descarregados. Enquanto a bateria estiver sendo descarregada, os capacitores série são carregados, representando a diferença entre a tensão nos terminais da bateria e a tensão de circuito aberto. No período de repouso a corrente é nula, sendo assim a queda de tensão no resistor R_s é igual a zero. Portanto, a diferença de tensão entre a tensão nos terminais V_T e a tensão no circuito aberto é devido a tensão acumulada no(s) capacitor(es) do(s) circuito(s) RC conectado(s) em série. Quando um tempo suficientemente grande passar, os capacitores de cada circuito RC serão completamente descarregados e a tensão nos terminais voltará a ser igual a tensão de circuito aberto.

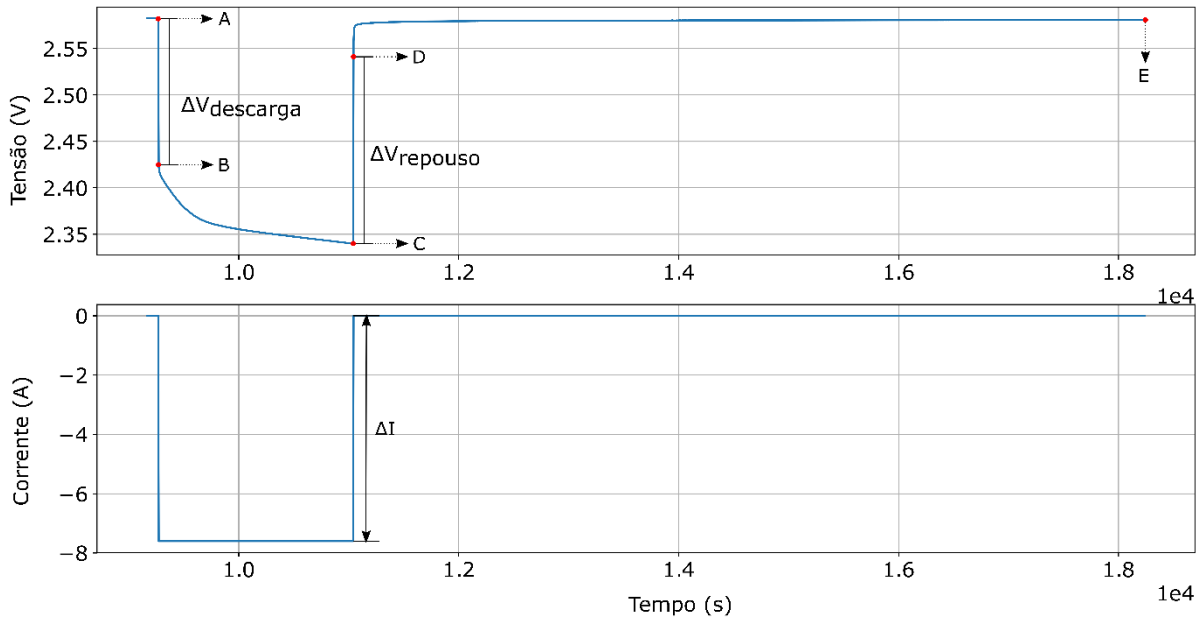


Figura 6.9: pulso de descarga em uma célula de Na-NiCl₂.

Então, primeiramente, considerando a curva ilustrada na Figura 6.9, a tensão V_{oc} é igual a tensão V_A para cada nível de SOC, como mostra a Equação (6.3). Já resistência R_s responsável pela queda de tensão instantânea na descarga é calculada através da Equação (6.4).

$$V_{OC} = V_A \quad (6.3)$$

$$R_s = \frac{V_A - V_B}{\Delta I} \quad (6.4)$$

Considerando o trecho entre os pontos B e C da Figura 6.9, os valores de R_n e C_n podem ser obtidos (considerando n o número de ramos RC do modelo). Considerando $R_{d,i}$ e $C_{d,i}$ a resistência e a capacitância do i -ésimo circuito RC conectado em série para a bateria em descarga, $\tau_{d,i}$ a constante de tempo do i -ésimo circuito RC, a tensão de na descarga $V_{t,d}$ neste trecho da curva por ser descrito através da Equação (6.5).

$$V_{T,d} = V_B + \sum_{i=1}^n R_{d,i} I_L \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{d,i}}} \right) \quad (6.5)$$

Através do método dos mínimos quadrados não linear os valores de R_i e τ_i são obtidos para cada pulso de descarga. O parâmetro $C_{d,i}$ é calculado através da Equação (6.6).

$$C_{d,i} = \frac{\tau_{d,i}}{R_{d,i}} \quad (6.6)$$

Como os pulsos de descarga foram realizados a cada 10% do SOC, os parâmetros RC são também obtidos para cada 10% do SOC. A Tabela 6.2 apresenta as equações utilizadas para as curvas de descarga de cada modelo e os parâmetros obtidos.

Tabela 6.2: resumo das equações para as curvas de descarga dos modelos e parâmetros a serem obtidos.

Modelo de Thevenin	Equação para a curva de descarga	Parâmetros a serem obtidos
Primeira ordem	$V_{T,d} = V_B - R_d I_L (1 - e^{-\frac{t}{R_d C_d}})$	V_B, R_d, C_d
Segunda ordem	$V_{T,d} = V_B - R_{d,1} I_L (1 - e^{-\frac{t}{R_{d,1} C_{d,1}}}) - R_{d,2} I_L (1 - e^{-\frac{t}{R_{d,2} C_{d,2}}})$	$V_B, R_{d,1}, C_{d,1}, R_{d,2}, C_{d,2}$
Terceira ordem	$V_{T,d} = V_B - R_{d,1} I_L (1 - e^{-\frac{t}{R_{d,1} C_{d,1}}}) - R_{d,2} I_L (1 - e^{-\frac{t}{R_{d,2} C_{d,2}}}) - R_{d,3} I_L (1 - e^{-\frac{t}{R_{d,3} C_{d,3}}})$	$V_B, R_{d,1}, C_{d,1}, R_{d,2}, C_{d,2}, R_{d,3}, C_{d,3}$

De forma similar ao período de descarga o valor de tensão durante o repouso ($V_{T,r}$) é calculado. Com os capacitores dos circuitos RC agora carregados, considerando V_i a tensão inicial em cada capacitor e, considerando a constante de tempo $\tau_{r,i}$ de cada circuito RC no período de repouso da bateria, a tensão nesta curva pode ser calculada através da Equação (6.7).

$$V_{T,r} = V_{OC} - \sum_{i=1}^n V_i e^{-\frac{t}{\tau_{r,i}}} \quad (6.7)$$

Novamente através do método dos mínimos quadrados não linear os valores de V_i e τ_i são obtidos para cada pulso de descarga e para cada valor de SOC. Ao fim do processo de descarga o capacitor está completamente carregado e atua como circuito aberto. Assim, a tensão inicial no capacitor ao fim da descarga, ou no início do período do repouso, é calculada através da

Equação (6.7). Com o parâmetro V_i calculado através do método dos mínimos quadrados, o valor de $R_{r,i}$ é calculado através da Equação (6.8). O parâmetro $C_{r,i}$ é calculado através da Equação (6.9).

$$R_{r,i} = \frac{V_i}{I_L} \quad (6.8)$$

$$C_{r,i} = \frac{\tau_{r,i}}{R_{r,i}} \quad (6.9)$$

A Tabela 6.3 apresenta as equações utilizadas para as curvas de repouso de cada modelo e os parâmetros que foram obtidos. A tensão V_{oc} da equação (6.3) e a resistência R_s da equação (6.4) são iguais para os três modelos e dependem somente dos dados experimentais.

Para a avaliação dos parâmetros obtidos, o coeficiente R^2 foi utilizado, o qual é um coeficiente que mede estatisticamente a qualidade de ajuste de curva do modelo em relação aos dados experimentais (Devasthali, 2018). Em geral, quanto mais próximo de 1 o valor de R^2 , mais representativo é seu modelo em relação aos dados experimentais.

Todos os parâmetros foram obtidos em função do estado de carga da bateria. Como os pulsos da descarga foram aplicados a cada 10% do SOC e os parâmetros foram obtidos a partir das curvas de repouso em cada nível de SOC, os parâmetros foram calculados para 10 níveis de SOC diferentes. Para que os parâmetros possam ser estimados em diferentes níveis de SOC, curvas exponenciais e polinomiais foram obtidas para a representação dos parâmetros em qualquer valor de estado de carga entre zero e 100%.

Tabela 6.3: resumo das equações para as curvas de repouso dos modelos e parâmetros a serem obtidos.

Modelo de Thevenin	Equação para a curva de repouso	Parâmetros a serem obtidos
Primeira ordem	$V_{T,d} = V_{OC} - V_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}}$	V_{OC}, R_1, C_1
Segunda ordem	$V_{T,d} = V_{OC} - V_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} - V_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}}$	$V_{OC}, R_1, C_1, R_2, C_2$
Terceira ordem	$V_{T,d} = V_{OC} - V_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} - V_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} - V_3 e^{-\frac{t}{\tau_3}}$	$V_{OC}, R_1, C_1, R_2, C_2, R_3, C_3$

Portanto, após obtidos os parâmetros, uma equação deve ser obtida para se estabelecer uma relação entre os parâmetros e a variação do SOC. Equações polinomiais similares as propostas por Chen & Rincón-Mora (2006) e Santos et al. (2017) podem ser utilizadas para a representação dos parâmetros do modelo em função do SOC.

6.3 Modelo e simulação

Com as equações dos parâmetros do modelo obtidos, a última etapa está relacionada à simulação do comportamento da bateria para um determinado perfil de descarga. A tensão nos terminais da bateria calculada pelo modelo ($V_{T,m}$) na descarga é calculada pela Equação (6.10), na qual consta também a queda instantânea de tensão devido ao resistor R_s . Já na curva de repouso $V_{T,m}$ é calculada pela Equação (6.11).

$$V_{T,m} = V_{OC} - R_{s,i} I_L - \sum_{i=1}^n R_i I_L \left(1 - e^{-\frac{t}{R_i C_i}} \right) \quad (6.10)$$

$$V_{T,m} = V_{OC} - \sum_{i=1}^n V_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (6.11)$$

A Figura 6.10 ilustra o processo para a simulação da descarga da bateria utilizando os parâmetros estimados. Na entrada devem ser inseridos os vetores $t(k)$, $I(t_k)$ e o valor do estado de carga inicial (SOC_{ini}), sendo que k representa a k -ésima medida do vetor. Com o SOC_{ini} calculam-se os parâmetros RC do modelo. Com os parâmetros obtidos, estima-se a tensão no terminal da bateria com a Equação de (6.10) ou a Equação (6.11). Após isso, os próximos valores de corrente e tempo dos vetores de entrada são assumidos, e com eles calcula-se o novo SOC. Caso a corrente seja igual a corrente anterior, os parâmetros RC são mantidos iguais. Caso a corrente se altere, novos parâmetros RC são calculados. Este processo se repete até que o fim dos vetores de entrada seja atingido. A saída será a estimativa na tensão nos terminais da bateria.

O erro do modelo (e_k) foi estimado em cada ponto k de amostra do valor de tensão para observar a variação do erro nos diferentes níveis de SOC. O erro foi obtido através da diferença entre o valor k de tensão experimental (V_{T_k}) e o valor de tensão estimado pelo modelo (V_{T,m_k}). O erro médio (\bar{e}_k) também foi calculado para fins de análise, além do erro percentual e do erro percentual médio. Portanto, considerando os n valores de tensão mensurados, o erro em cada ponto é calculado através da Equação (6.12).

$$e_k = V_{T_k} - V_{T,m_k} \quad (6.12)$$

O erro médio absoluto é estimado através da Equação (6.13).

$$\bar{e}_k = \frac{|e_k|}{n} \quad (6.13)$$

O erro percentual para cada ponto é estimado através da Equação (6.14).

$$e_k (\%) = \frac{|e_k|}{V_{T_k}} \cdot 100\% \quad (6.14)$$

O erro percentual médio é estimado através da Equação (6.15).

$$\bar{e}_k (\%) = \frac{e_k (\%)}{n} \quad (6.15)$$

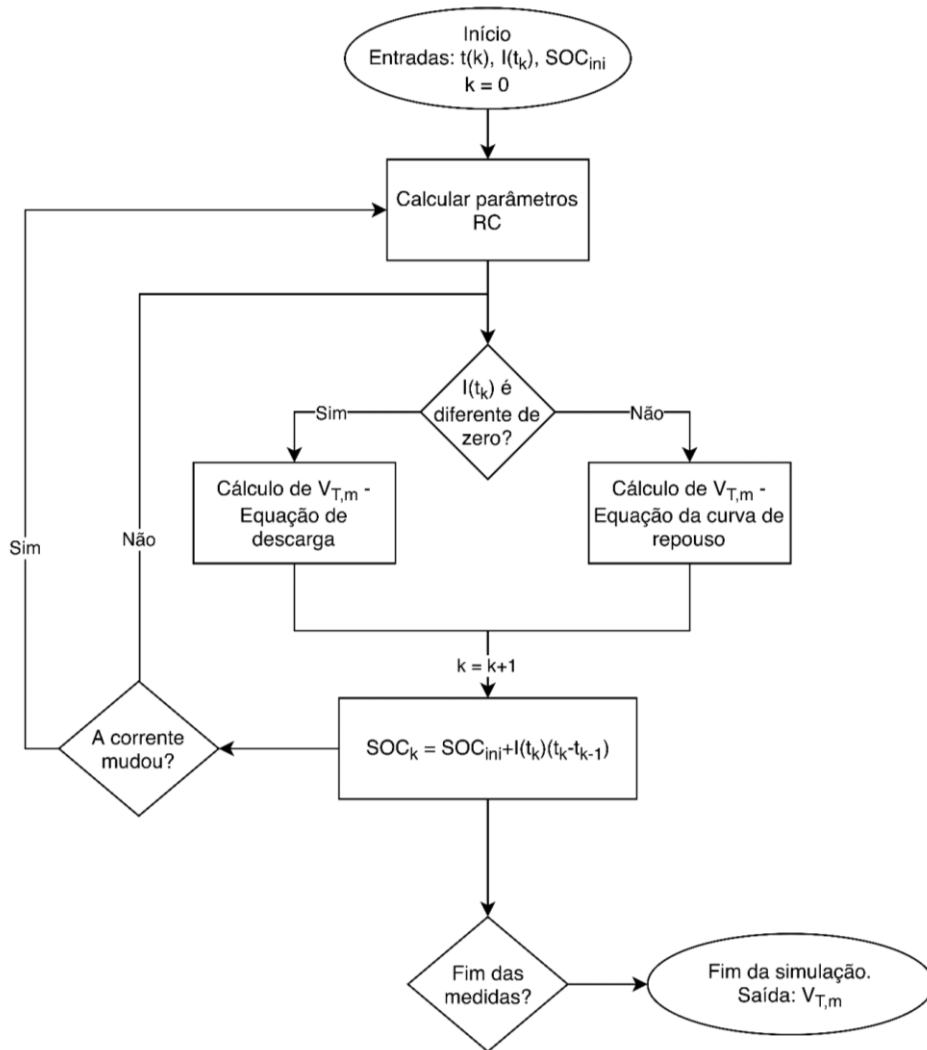


Figura 6.10: fluxograma do processo de simulação da descarga da bateria.

6.4 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram abordados os materiais e métodos utilizados para a obtenção dos resultados deste trabalho. Os métodos estão divididos em experimentais e computacionais. Entre os métodos experimentais foram utilizados o teste de capacidade estática – para a verificação da capacidade atual da bateria – e o teste de descarga por pulsos – para a obtenção dos parâmetros do modelo em diferentes níveis de SOC.

O método dos mínimos quadrados não-linear foi utilizado para a obtenção dos parâmetros, utilizando a linguagem de programação Python. Além da extração dos parâmetros,

Python foi utilizado também para o tratamento dos dados experimentais, separação das curvas de repouso e de descarga e obtenção das tabelas e gráficos dos resultados. No próximo capítulo são apresentados os resultados obtidos.

Capítulo 7

Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados deste trabalho. O capítulo está dividido em resultados dos procedimentos experimentais, extração de parâmetros dos modelos de Thevenin e a simulação da descarga da bateria com os parâmetros calculados.

7.1 Resultados dos procedimentos experimentais

A Figura 7.1 ilustra quatro descargas realizadas no procedimento de teste de capacidade estática. Em destaque observa-se a região de fim de descarga, zona próxima a tensão de fim de descarga (1,9 V), para melhor diferenciação das curvas. A partir da contagem de coulombs a capacidade média de cada descarga foi obtida, sendo que a capacidade média obtida foi de 37,4 Ah, valor que foi utilizado nos testes de descargas por pulsos.

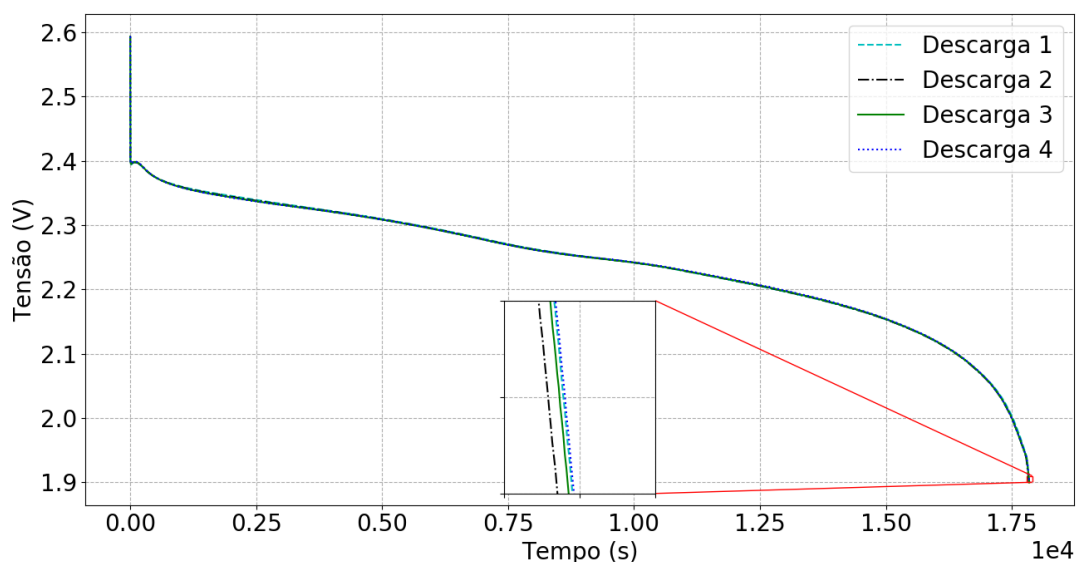


Figura 7.1: descargas contínuas do teste de capacidade estática.

Com a capacidade total, através da Equação (6.1) foi determinada a capacidade a ser descarregada em cada pulso (3,74 Ah) e a Equação (6.2) foi utilizada para a determinação do intervalo de cada pulso de descarga (1771,6 s ou 27,53 minutos).

Com os valores do teste de capacidade estática e duração dos pulsos definidos, o teste de descarga por pulsos foi conduzido. A Figura 7.2 ilustra a curva de tensão mensurados nos terminais da célula (a) e o perfil de corrente de descarga da fonte programável (b) da descarga por pulsos com intervalo de repouso de 25 minutos, já a Figura 7.3 ilustra o mesmo experimento com tempo de repouso de duas horas. Os perfis de corrente ilustrados nas duas figuras foram aqueles inseridos na programação da fonte programável, não são valores mensurados.

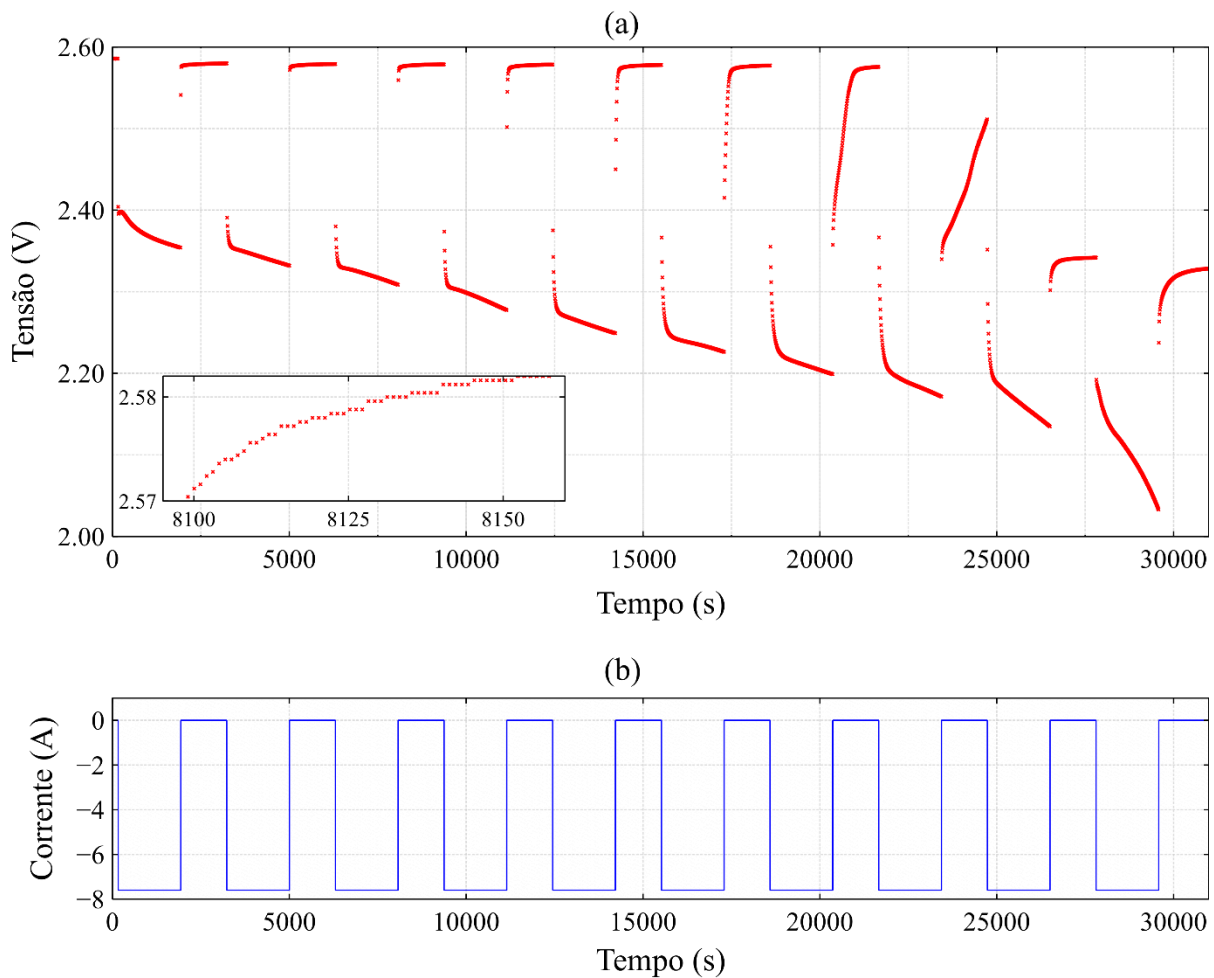


Figura 7.2: teste de descarga por pulsos com tempo de repouso de 25 minutos: perfil de (a) tensão nos terminais da célula e de (b) corrente de descarga.

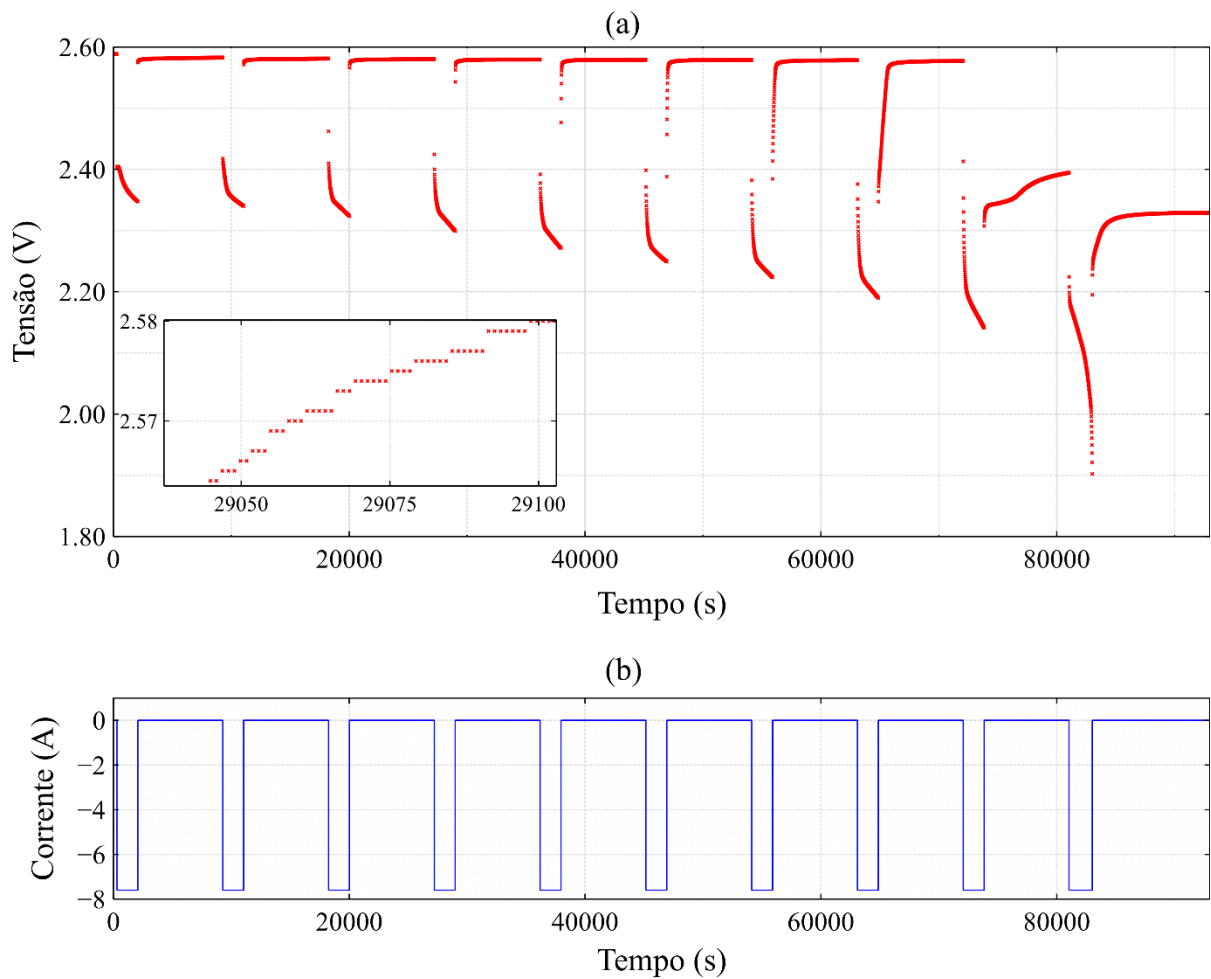


Figura 7.3: teste de descarga por pulsos com tempo de repouso de duas horas: perfil de (a) tensão nos terminais da célula e de (b) corrente.

7.2 Extração dos parâmetros do modelo

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para a obtenção dos parâmetros para os três diferentes modelos. São apresentados gráficos dos dados experimentais comparados as curvas do modelo, os gráficos dos parâmetros obtidos para os diferentes estados de carga e as equações que representam os parâmetros do modelo em função do estado de carga. Todos os parâmetros foram obtidos utilizando os dados da descarga por pulsos com tempo de repouso de duas horas (Figura 7.3).

7.2.1 Resultados para a tensão V_{OC} e R_s

A tensão V_{OC} e a resistência R_s tem o mesmo valor para os três modelos e suas variações em função do SOC são ilustrados na Figura 7.4. A variação do SOC é representada entre 0 e 100 %, onde o SOC de 100% representa a bateria com a carga completa.

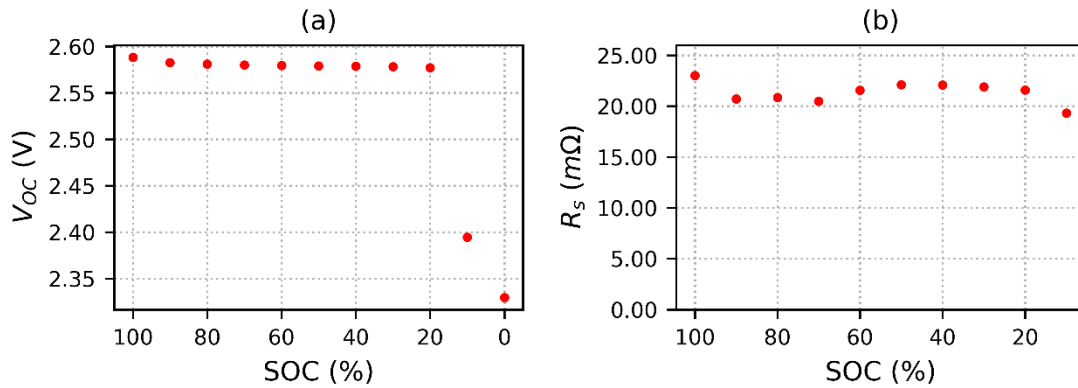


Figura 7.4: parâmetros comuns a todos os modelos: (a) V_{OC} e (b) R_s .

7.2.2 Modelo de Thevenin de primeira ordem

Os gráficos da Figura 7.5 até a Figura 7.7 ilustram as curvas de repouso obtidas experimentalmente em comparação com as curvas de repouso obtidas com os parâmetros estimados do modelo em circuito equivalente. O parâmetro R^2 para os diferentes ajustes de curva também é apresentado. Na Figura 7.5 estão ilustradas as curvas para os estados de carga de 90 a 60%, já na Figura 7.6 estão ilustradas as curvas para os estados de carga de 50 a 20%, e na Figura 7.7 estão ilustradas as curvas para os estados de carga de 10 e 0%.

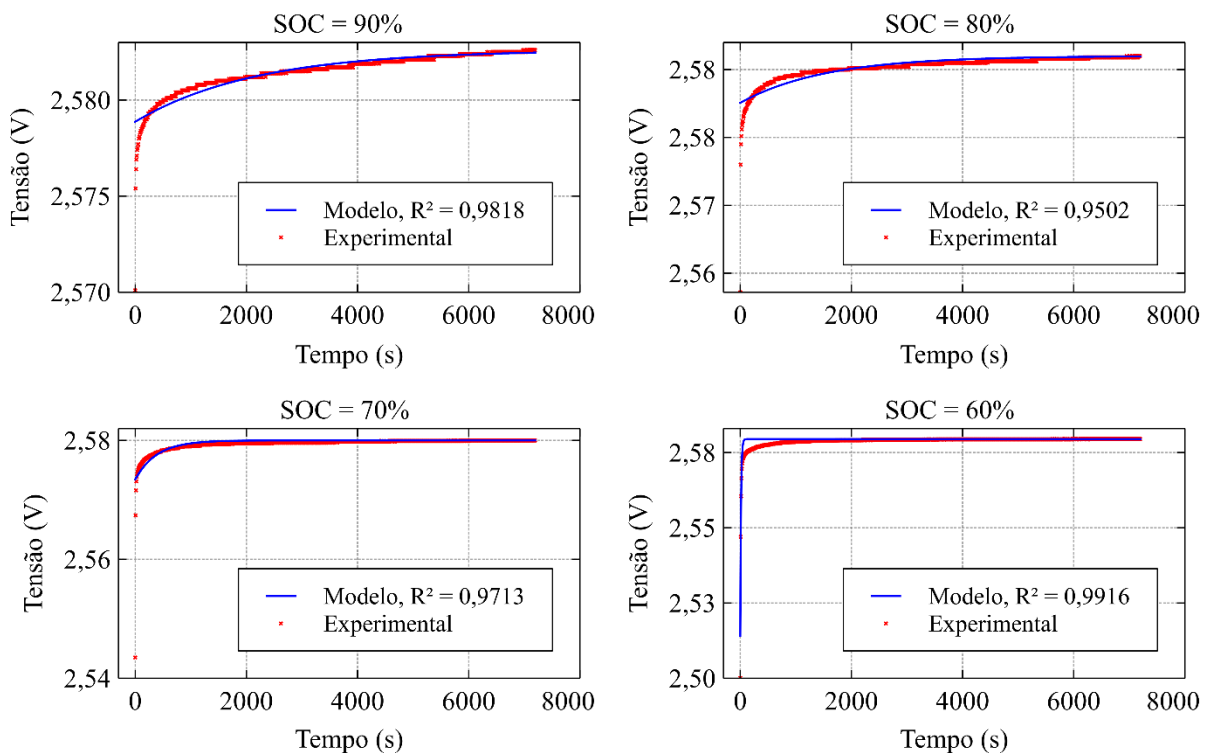


Figura 7.5: ajustes de curva para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de primeira ordem: SOC de 90 a 60%.

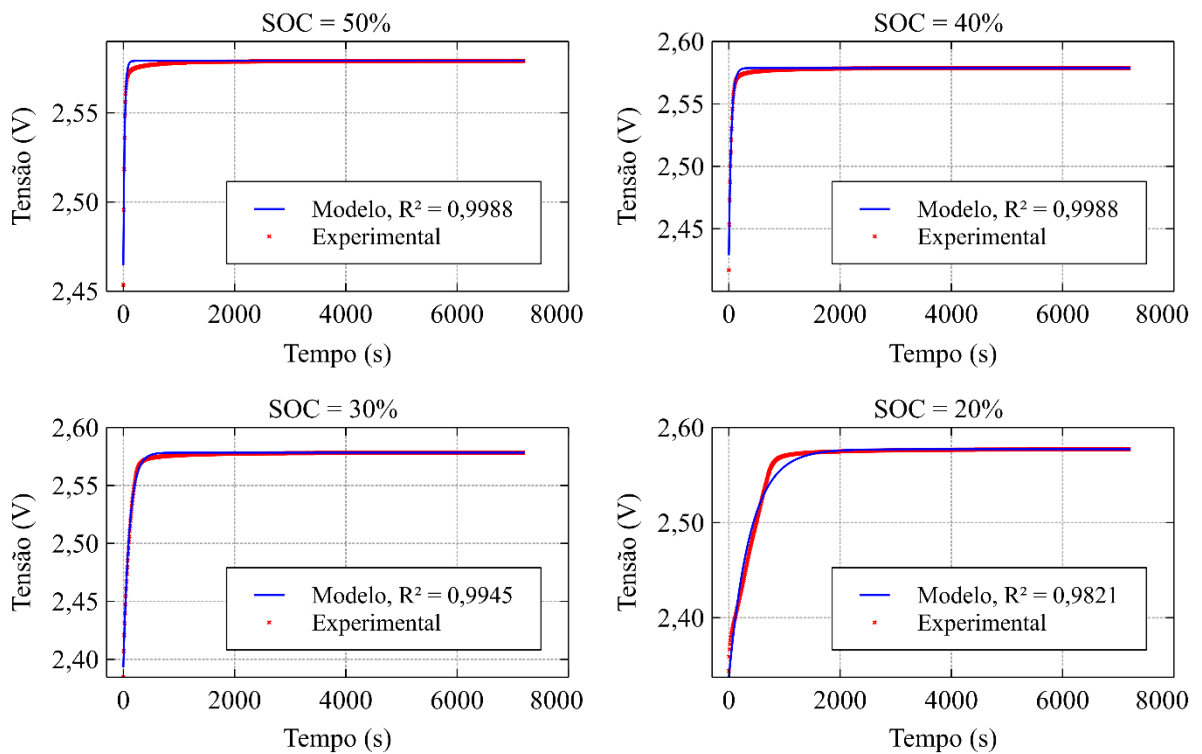


Figura 7.6: ajustes de curva para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de primeira ordem: SOC de 50 a 20%.

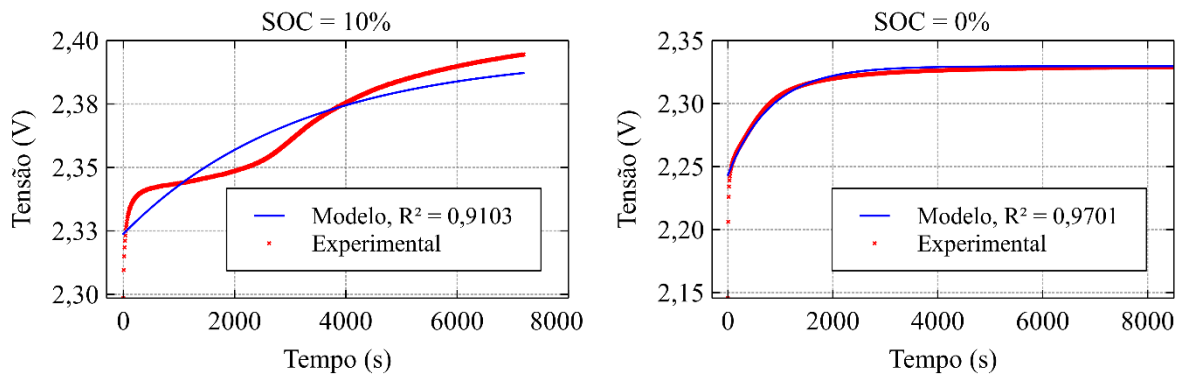


Figura 7.7: ajustes de curva para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de primeira ordem: SOC de 10 e 0%.

Já os gráficos da Figura 7.8, da Figura 7.9 e da Figura 7.10 ilustram as curvas de descarga obtidas experimentalmente em comparação com as curvas de descarga obtidas com os parâmetros estimados do modelo em circuito equivalente. Na Figura 7.8 estão ilustradas as curvas para os estados de carga de 100 a 70%, já na Figura 7.9 estão ilustradas as curvas para os estados de carga de 60 a 30%, e na Figura 7.10 estão ilustradas as curvas para os estados de carga de 20 e 10%.

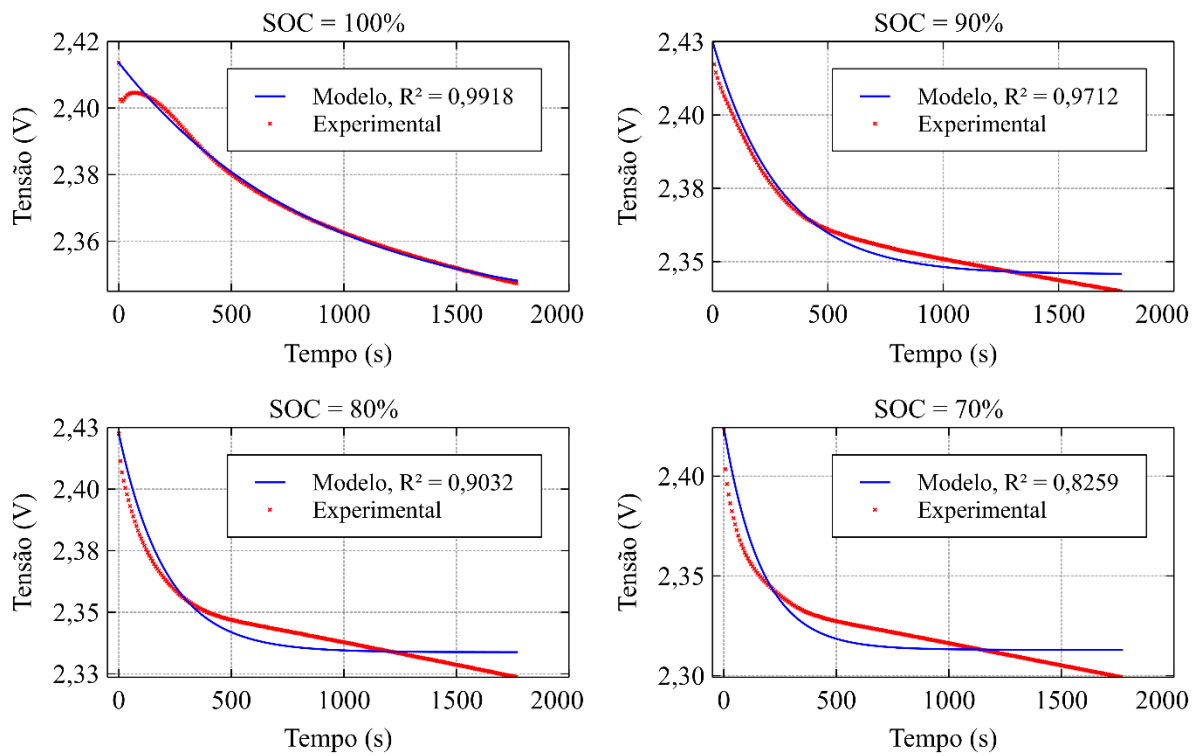


Figura 7.8: ajustes de curvas para as curvas de descarga do modelo de Thevenin de primeira ordem: SOC de 100 a 70%.

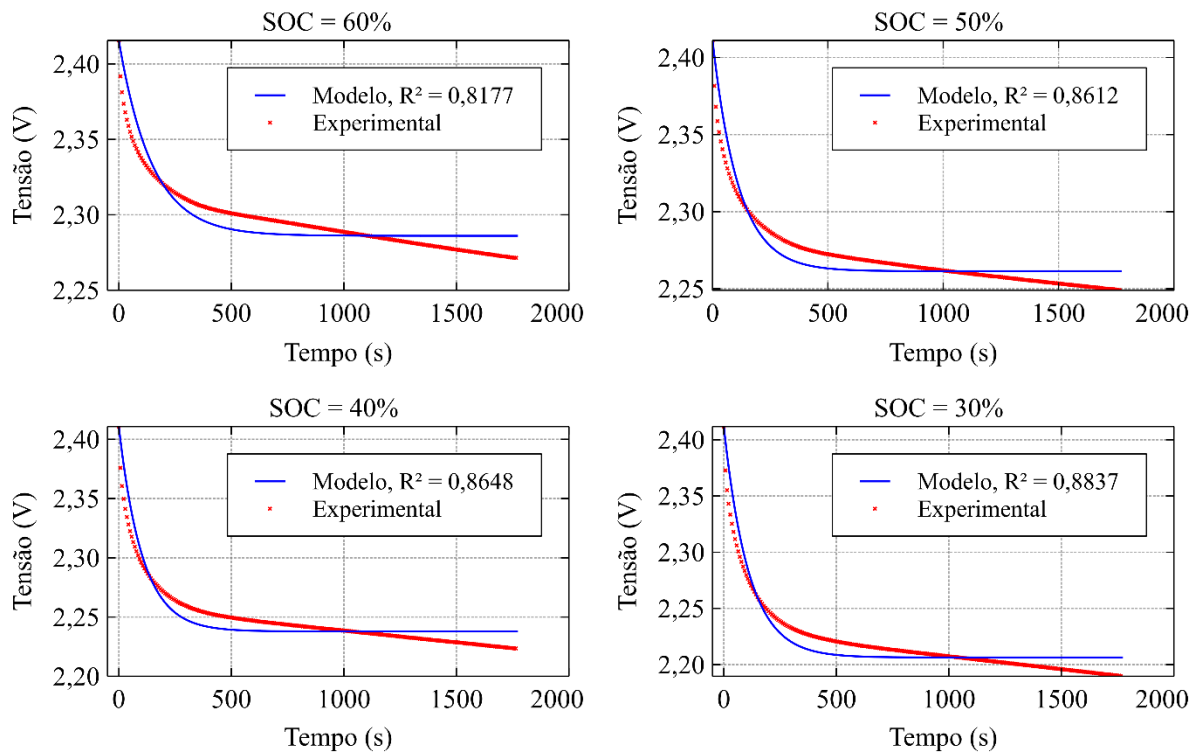


Figura 7.9: ajustes de curva para as curvas de descarga do modelo de Thevenin de primeira ordem: SOC de 60 a 30%.

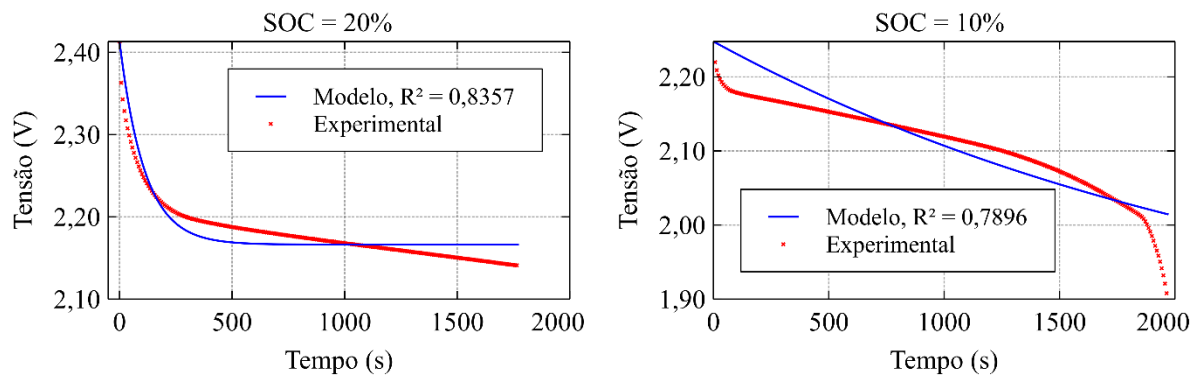


Figura 7.10: ajustes de curva para as curvas de descarga do modelo de Thevenin de primeira ordem: SOC de 20 e 10%.

A Tabela 7.1 apresenta os parâmetros obtidos através do ajuste para os diferentes níveis de SOC, tanto para a curva de descarga quanto para a curva de repouso. Os parâmetros R_r e C_r foram obtidos para a curva de repouso, indicados na Tabela 6.3, e os parâmetros R_d e C_d foram obtidos para a curva de descarga, indicados na Tabela 6.2.

Tabela 7.1: parâmetros obtidos para as curvas de repouso (V_l e τ_l) e de descarga (R_l e C_l).

SOC (%)	R_r (m Ω)	C_r (F)	R_d (m Ω)	C_d (F)
100	--	--	9,93	88411,46
90	0,49	4398708,73	10,45	27720,06
80	0,45	3386569,32	11,67	17922,14
70	0,86	448288,31	14,66	11351,21
60	8,61	1572,53	17,04	8638,22
50	14,99	1590,93	19,70	5736,24
40	19,62	2257,21	22,76	4601,47
30	24,25	4481,81	27,03	4115,39
20	31,56	12313,70	32,48	3415,71
10	9,30	340403,19	56,9	44681,93
0	11,35	72509,63	--	--

7.2.3 Modelo de Thevenin de segunda ordem

Os gráficos das Figuras 7.11 a 7.13 ilustram as curvas de repouso obtidas experimentalmente em comparação com as curvas de repouso obtidas com os parâmetros estimados do modelo em circuito equivalente. O parâmetro R^2 para os diferentes ajustes de curva também é apresentado. Na Figura 7.11 estão ilustradas as curvas para os estados de carga de 90 a 60%, já na Figura 7.12 estão ilustradas as curvas para os estados de carga de 50 a 20%, e na Figura 7.13 estão ilustradas as curvas para os estados de carga de 10 e 0%.

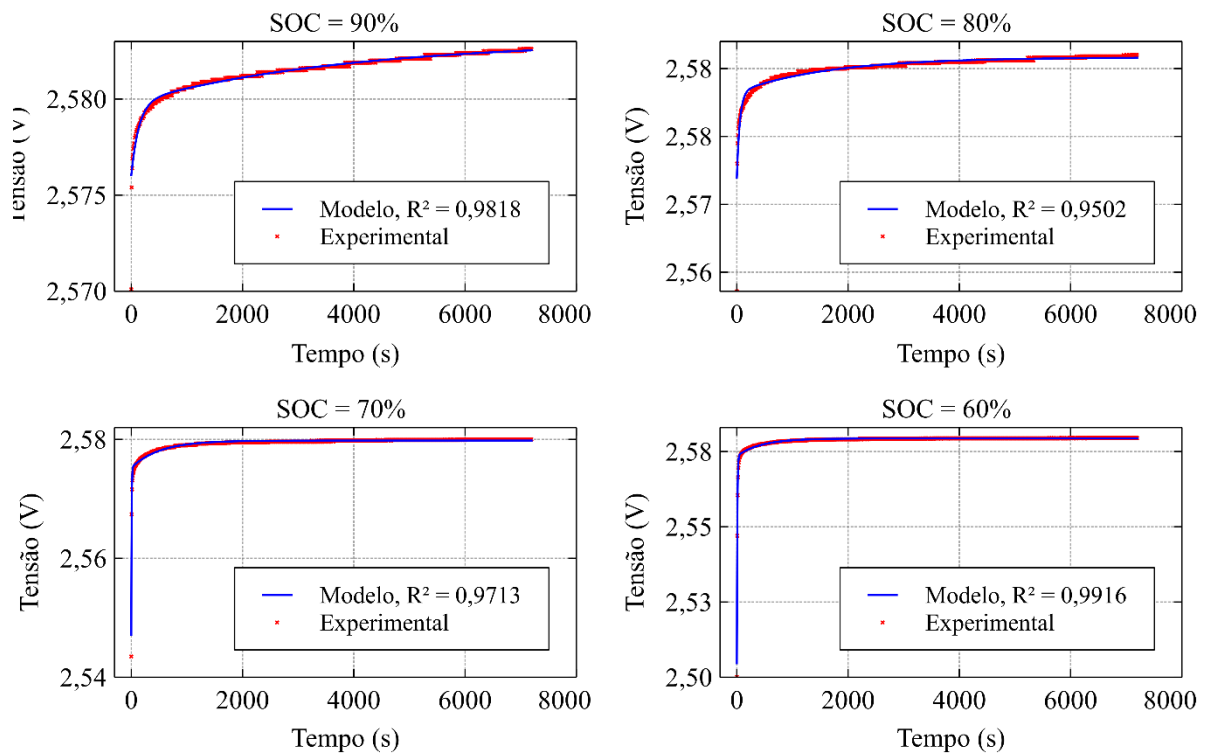


Figura 7.11: ajustes de curva para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de segunda ordem: SOC de 90 a 60%.

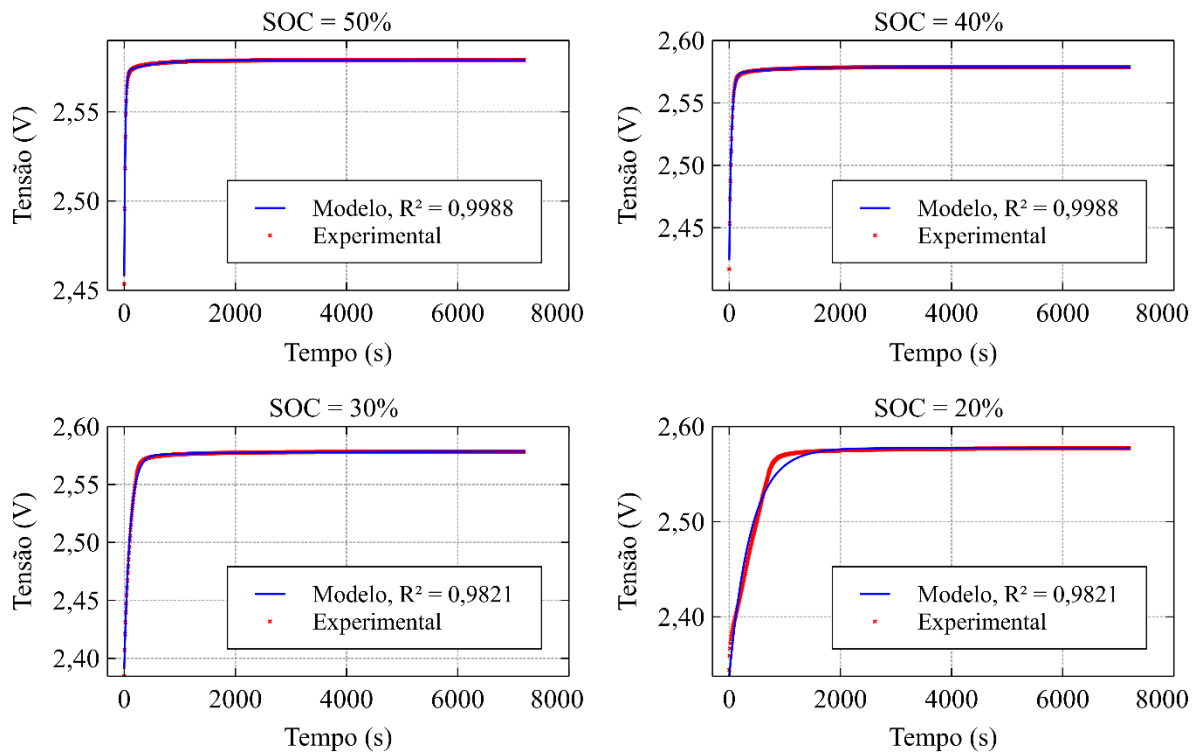


Figura 7.12: ajustes de curva para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de segunda ordem: SOC de 50 a 20%.

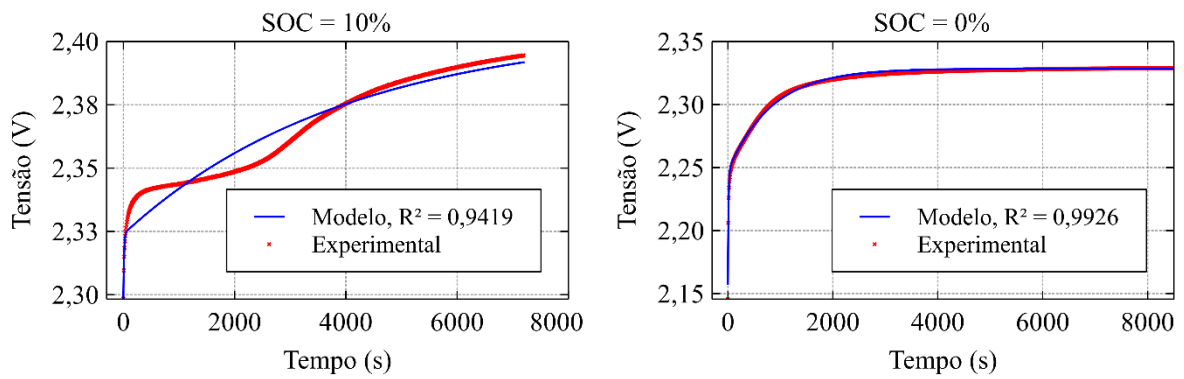


Figura 7.13: ajustes de curva para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de segunda ordem: SOC de 10 e 0%.

A Tabela 7.2 apresenta os parâmetros para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de segunda ordem, para diferentes níveis de SOC.

Tabela 7.2: parâmetros estimados para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de segunda ordem.

SOC (%)	$R_{r,1}$ (m Ω)	$C_{r,1}$ (F)	$R_{r,2}$ (m Ω)	$C_{r,2}$ (m Ω)
90	0,50	279667,68	0,42	9245365,54
80	0,83	65668,74	0,34	4930736,26
70	3,70	1660,32	0,60	858234,95
60	9,06	928,13	0,77	568984,80
50	15,02	1263,98	0,84	587683,42
40	19,49	1984,19	0,75	924209,64
30	24,15	4259,35	0,43	4863731,91
20	11,39	34225,78	20,18	19313,88
10	3,38	3690,07	10,70	373669,22
0	11,78	969,79	10,67	77877,94

Já os gráficos das Figuras 7.14 a 7.16 ilustram as curvas de descarga obtidas experimentalmente em comparação com as curvas de descarga obtidas com os parâmetros estimados do modelo em circuito equivalente. Na Figura 7.14 estão ilustradas as curvas para os estados de carga de 100 a 70%, já na Figura 7.15 estão ilustradas as curvas para os estados de carga de 60 a 30%, e na Figura 7.16 estão ilustradas as curvas para os estados de carga de 20 e 10%. Na Tabela 7.3 são apresentados os parâmetros RC para as curvas de descarga para diferentes níveis de SOC.

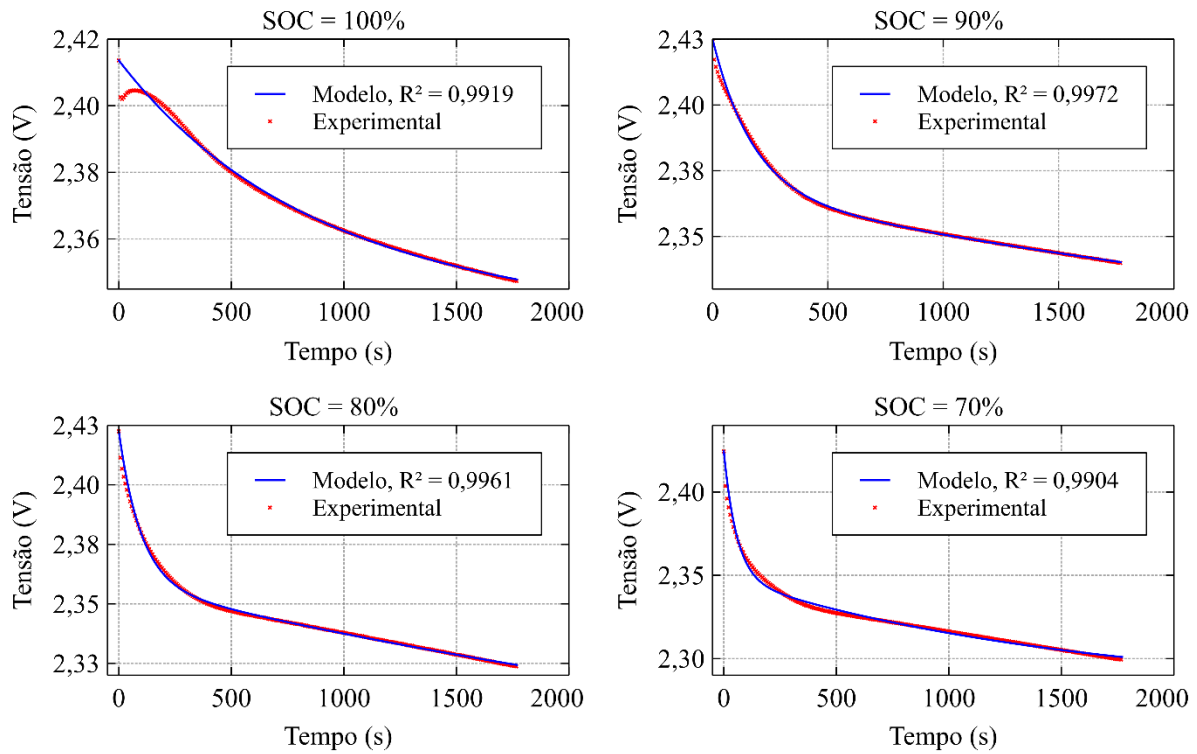


Figura 7.14: ajustes de curva para as curvas de descarga do modelo de Thevenin de segunda ordem: SOC de 100 a 70%.

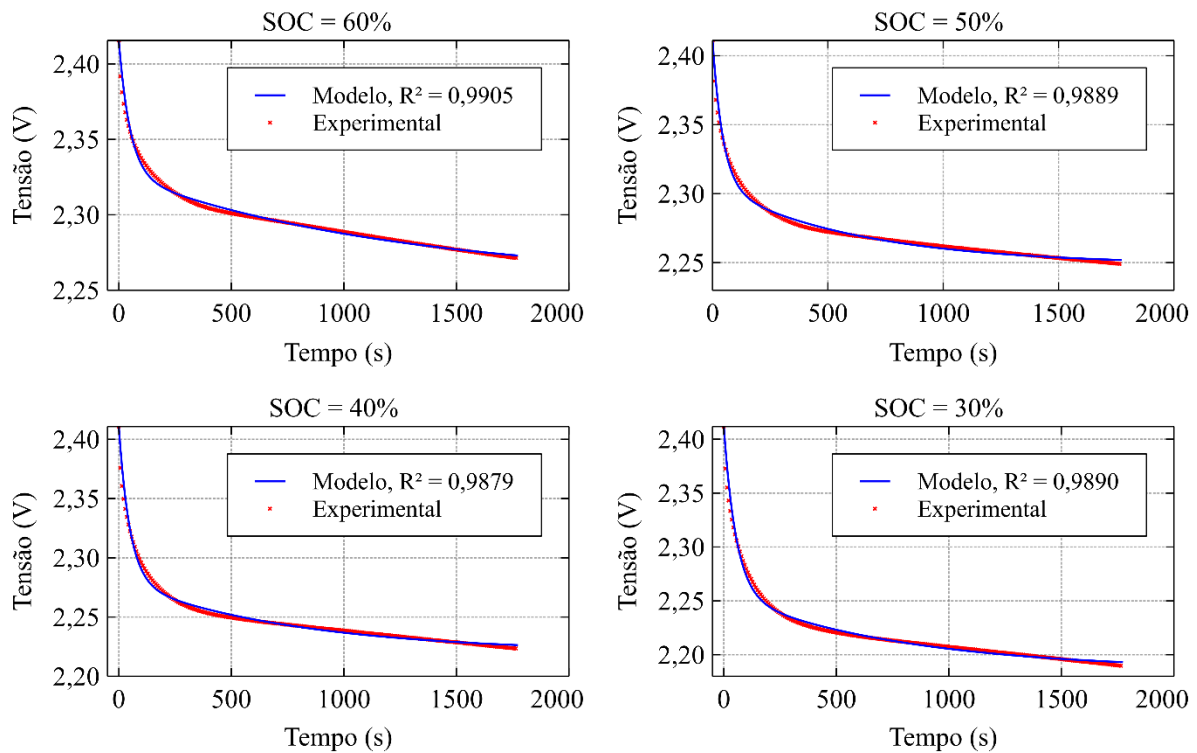


Figura 7.15: ajustes de curva para a curva de descarga do modelo de Thevenin de segunda ordem: SOC de 60 a 30%.

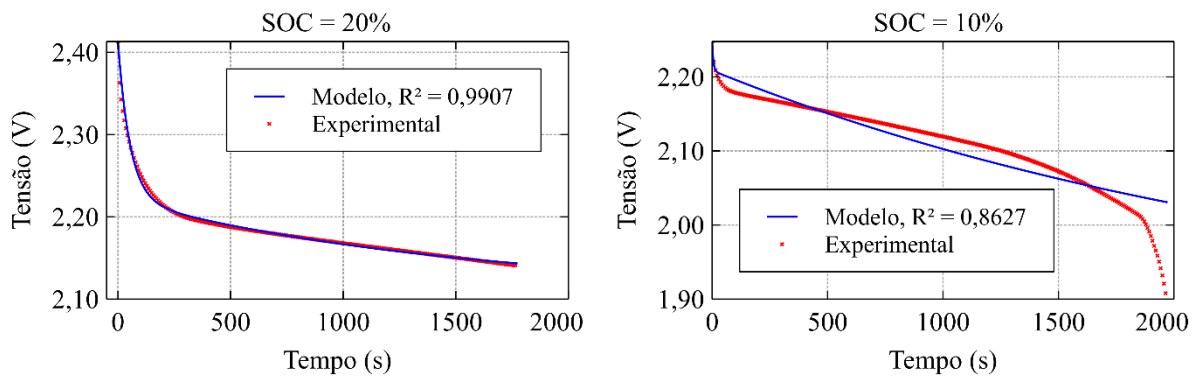


Figura 7.16: ajustes de curva para a curva de descarga do modelo de Thevenin de segunda ordem: SOC de 20 e 10%.

Tabela 7.3: parâmetros estimados para as curvas de descarga do modelo de Thevenin de segunda ordem.

SOC (%)	$R_{d,1}$ (m Ω)	$C_{d,1}$ (m Ω)	$R_{d,2}$ (m Ω)	$C_{d,2}$ (m Ω)
100	8,330	92365,66	8,71	1429216,13
90	8,40	11710,23	13,01	319101,75
80	9,180	902,01	8,39	49454,66
70	9,950	5733,07	9,19	166527,19
60	11,680	4314,59	9,21	131535,52
50	13,810	3250,76	7,59	82542,93
40	17,110	2871,50	7,96	96800,27
30	20,400	2687,97	9,34	83551,92
20	25,140	2133,05	14,85	100233,28
10	5,160	997,16	45,75	60212,82

7.2.4 Modelo de Thevenin de terceira ordem

Os gráficos da Figura 7.17, Figura 7.18 e Figura 7.19 ilustram as curvas de repouso obtidas experimentalmente em comparação com as curvas de repouso obtidas com os parâmetros estimados do modelo em circuito equivalente. O parâmetro R^2 para os diferentes ajustes de curva também é apresentado. Na Figura 7.17 estão ilustradas as curvas para os estados de carga de 90 a 60%, já na Figura 7.18 estão ilustradas as curvas para os estados de carga de 50 a 20%, e na Figura 7.19 estão ilustradas as curvas para os estados de carga de 10 e 0%.

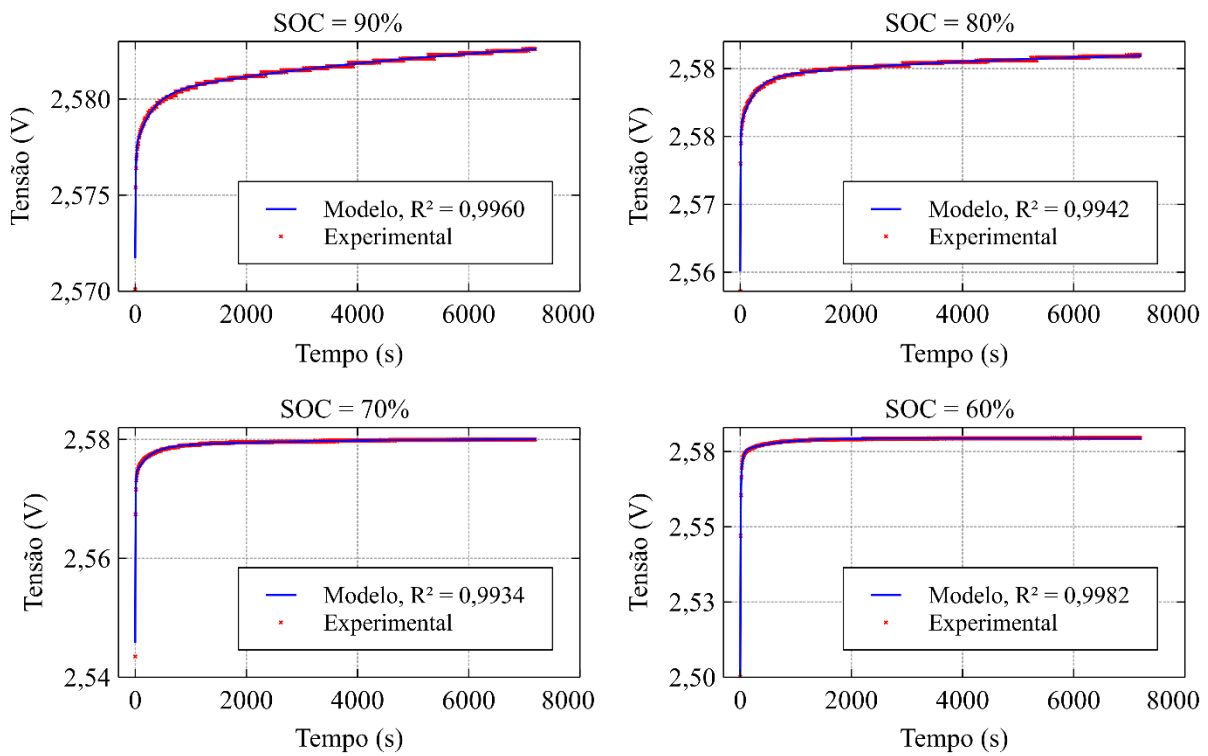


Figura 7.17: ajustes de curva para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de terceira ordem: SOC de 90 a 60%.

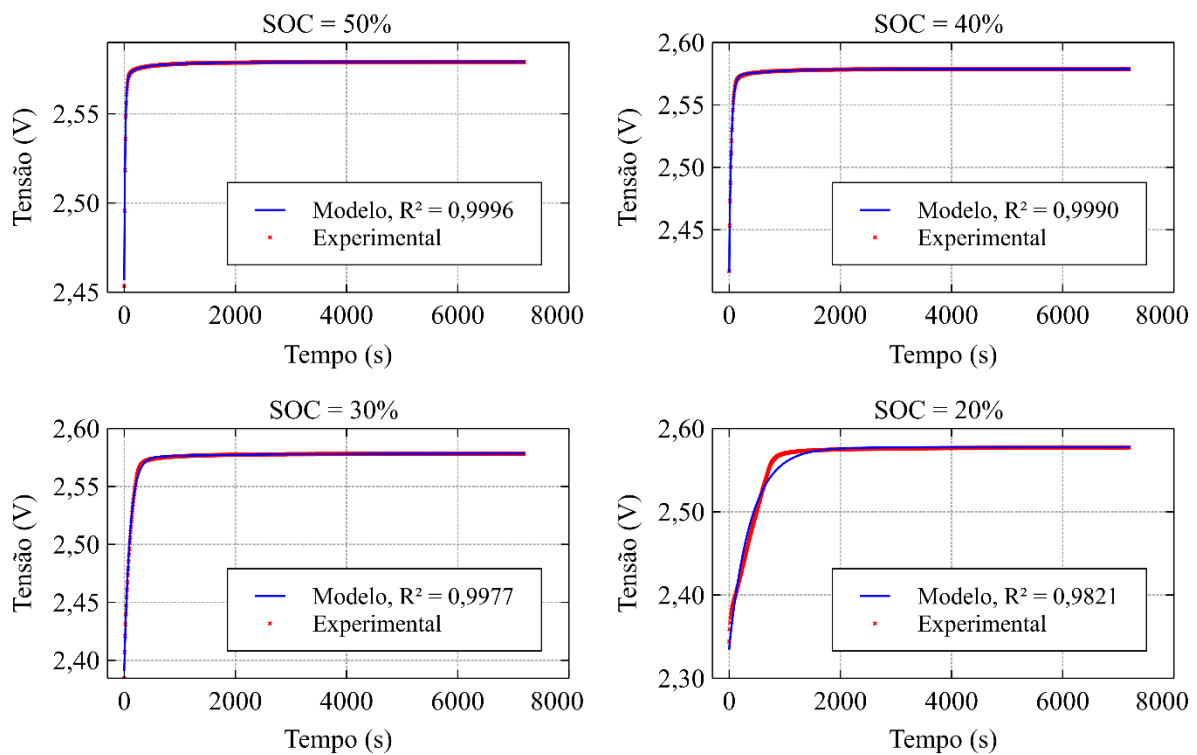


Figura 7.18: ajustes de curva para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de terceira ordem: SOC de 50 a 20%.

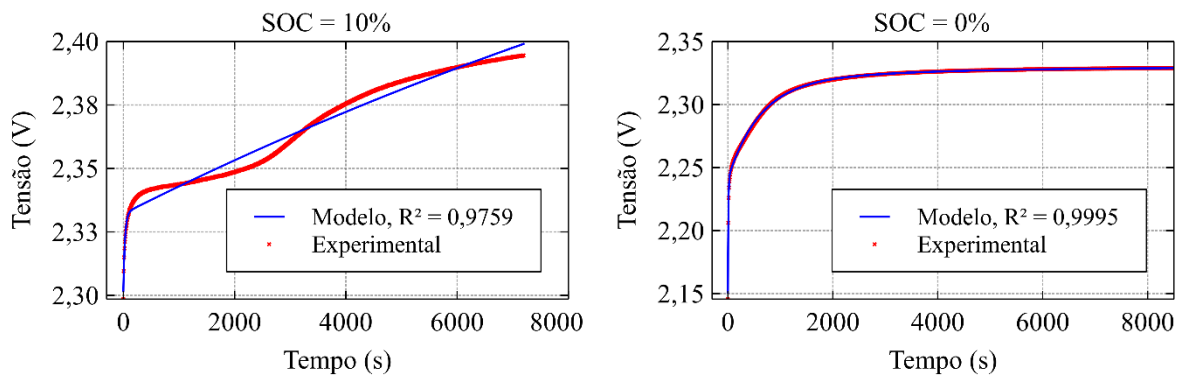


Figura 7.19: ajustes de curva para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de terceira ordem: SOC de 10 e 0%.

A Tabela 7.4 apresenta os parâmetros para as curvas de repouso do modelo de Thevenin de terceira ordem, para diferentes níveis de SOC.

Tabela 7.4: parâmetros estimados para as curvas de repouso de do modelo de Thevenin de terceira ordem.

SOC (%)	$R_{r,1}$ (m Ω)	$C_{r,1}$ (F)	$R_{r,2}$ (m Ω)	$C_{r,2}$ (F)	$R_{r,3}$ (m Ω)	$C_{r,3}$ (F)
90	0,74	11489,36	0,37	769066,06	0,46	13649063,71
80	1,39	4227,94	0,47	509870,35	0,27	16332460,75
70	3,70	1382,73	0,61	382416,12	0,19	13046979,23
60	8,28	742,30	1,47	24757,97	0,57	1057362,01
50	14,76	1212,45	0,81	174822,14	0,46	1846133,00
40	1,37	1079,71	19,24	2041,57	0,73	974734,06
30	24,01	4282,64	0,13	781650,85	0,43	4858364,51
20	0,13	7600,89	0,13	76000,71	31,55	12357,58
10	3,88	7490,01	0,13	76000,08	29,31	687206,45
0	11,88	718,73	9,79	61265,92	1,83	1542183,71

Já os gráficos da Figura 7.20, Figura 7.21 e Figura 7.22 ilustram as curvas de descarga obtidas experimentalmente em comparação com as curvas de descarga obtidas com os parâmetros estimados do modelo em circuito equivalente. Na Figura 7.20 estão ilustradas as curvas para os estados de carga de 100 a 70%, já na Figura 7.21 estão ilustradas as curvas para os estados de carga de 60 a 30%, e na Figura 7.22 estão ilustradas as curvas para os estados de carga de 20 e 10%.

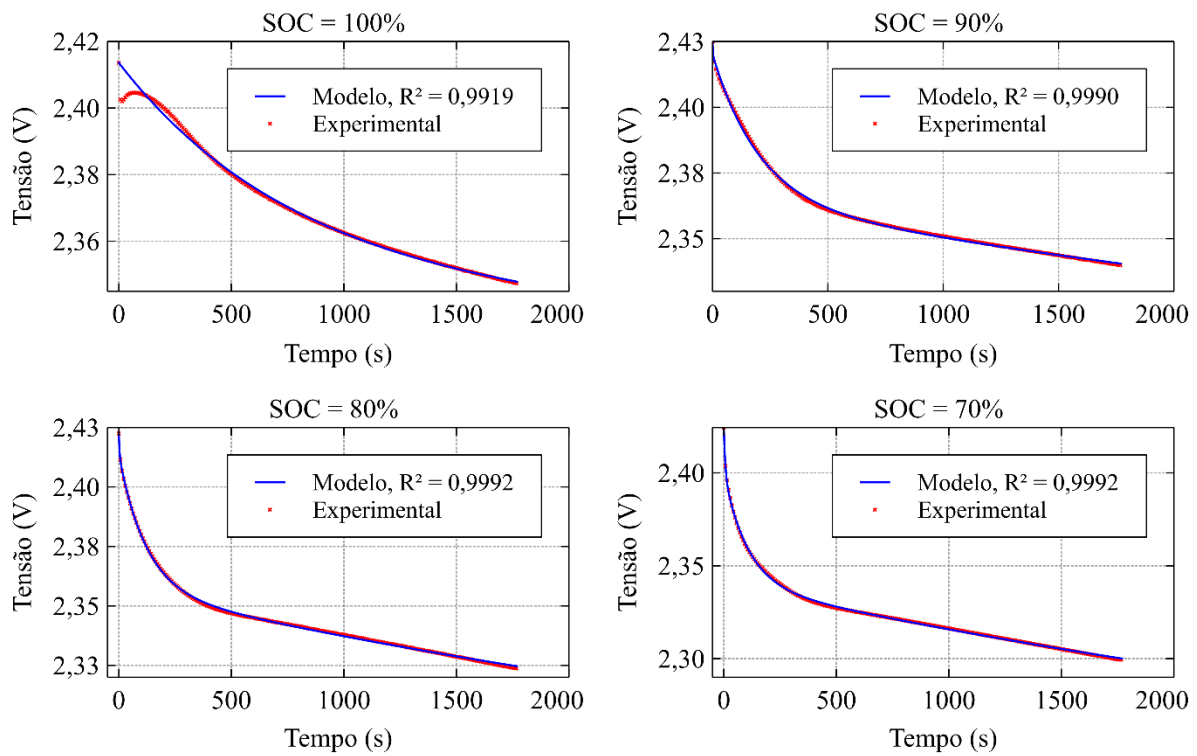


Figura 7.20: ajustes de curva para a curva de descarga do modelo de Thevenin de terceira ordem: SOC de 100 a 70%.

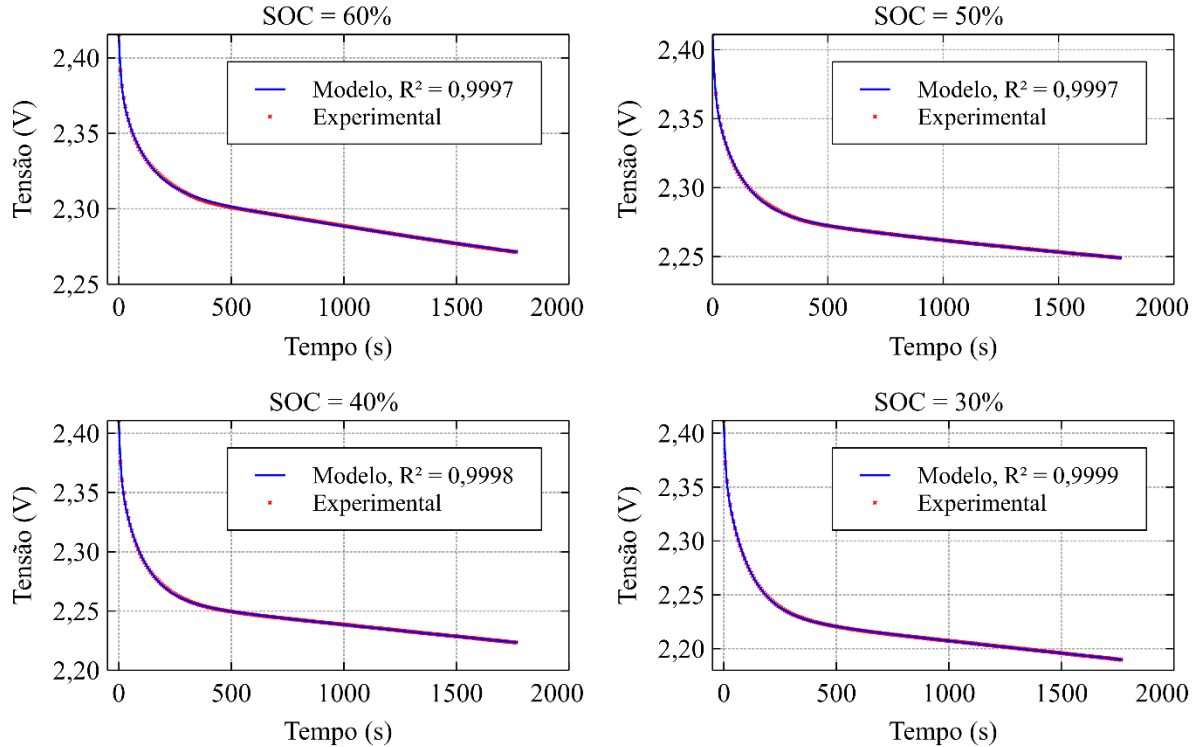


Figura 7.21: ajustes de curva para a curva de descarga do modelo de Thevenin de terceira ordem: SOC de 60 a 30%.

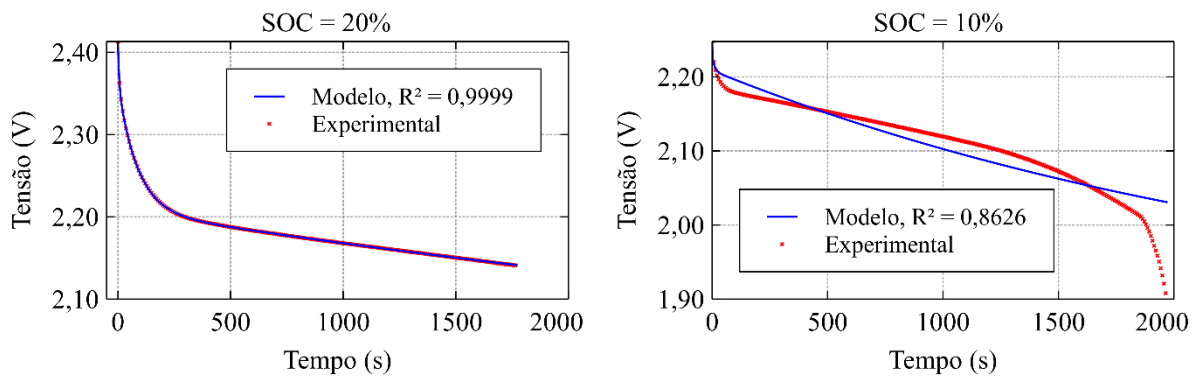


Figura 7.22: ajustes de curva para a curva de descarga do modelo de Thevenin de terceira ordem: SOC de 20 e 10%.

A Tabela 7.5 apresenta os parâmetros para as curvas de descarga do modelo de Thevenin de terceira ordem, para diferentes níveis de SOC.

Tabela 7.5: parâmetros estimados para as curvas de descarga de do modelo de Thevenin de terceira ordem.

SOC (%)	$R_{d,1}$ (m Ω)	$C_{d,1}$ (F)	$R_{d,2}$ (m Ω)	$C_{d,2}$ (F)	$R_{d,3}$ (m Ω)	$C_{d,3}$ (F)
100	5,68	134614,06	2,54	301008,25	6,48	1283157,47
90	0,65	2182,35	7,28	27496,61	11,21	469985,22
80	1,17	2885,92	7,41	16172,15	13,01	339774,51
70	3,22	2057,03	7,81	13560,22	16,47	274820,48
60	4,52	2151,36	8,77	12287,11	18,99	262514,62
50	5,89	1784,12	10,97	10250,11	11,33	314038,20
40	6,28	1442,61	13,56	7631,99	24,66	331237,30
30	6,57	1234,61	17,00	6222,90	25,72	279581,34
20	6,74	785,80	20,27	4238,20	35,83	176472,53
10	2,38	420,78	2,79	3580,42	45,75	60265,15

7.3 Simulação da descarga por pulsos

Nesta seção são apresentados os resultados para a simulação da descarga por pulsos completa, utilizando os parâmetros obtidos na seção anterior. São apresentados resultados para os três modelos e para a descarga por pulsos com intervalo de repouso de duas horas.

As figuras desta seção ilustram os valores de tensão experimentais e os valores de tensão estimados pelos modelos para a descarga por pulsos. Nos gráficos são também ilustradas as variações dos erros calculados pela Equação (6.12) para cada ponto de amostragem. A Figura 7.23 ilustra a simulação para o modelo de Thevenin de primeira ordem, a Figura 7.24 ilustra a

simulação para o modelo de Thevenin de segunda ordem e a Figura 7.25 ilustra a simulação para o modelo de Thevenin de terceira ordem.

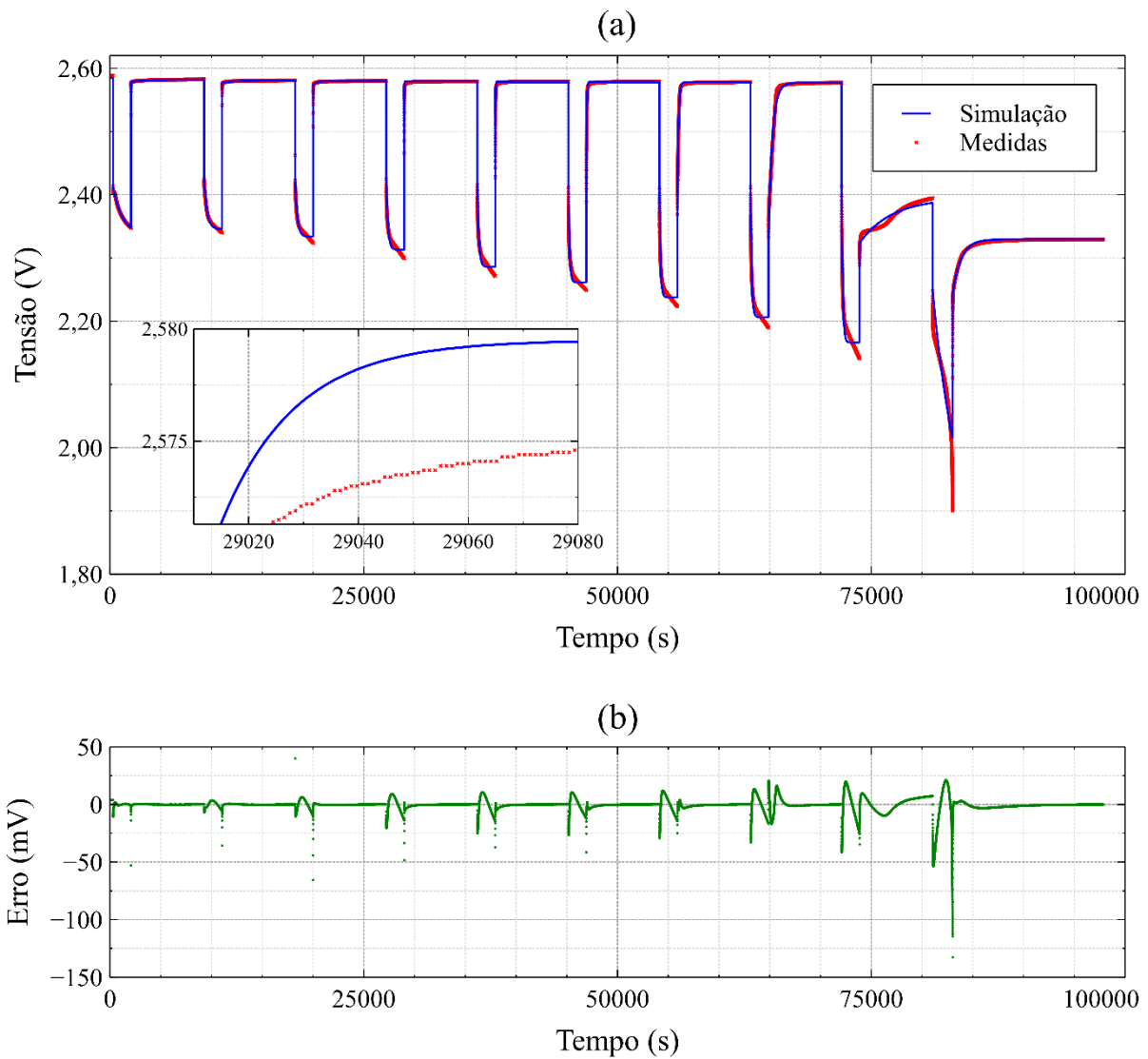


Figura 7.23: comparação entre os dados de tensão experimentais e do modelo de primeira ordem: (a) variação da tensão e (b) variação do erro.

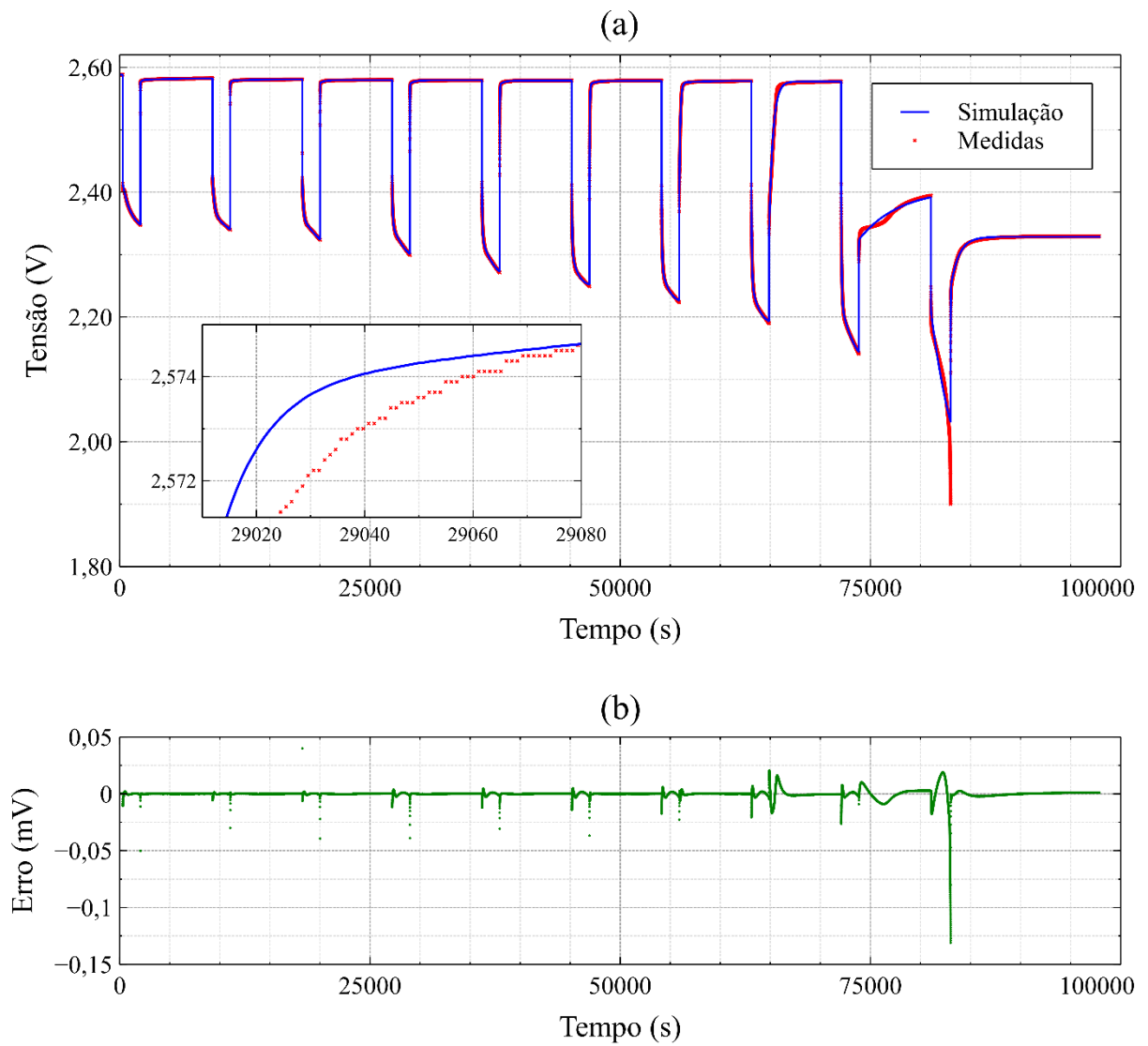


Figura 7.24: comparação entre os dados de tensão experimentais e do modelo de segunda ordem: (a) variação da tensão e (b) variação do erro.

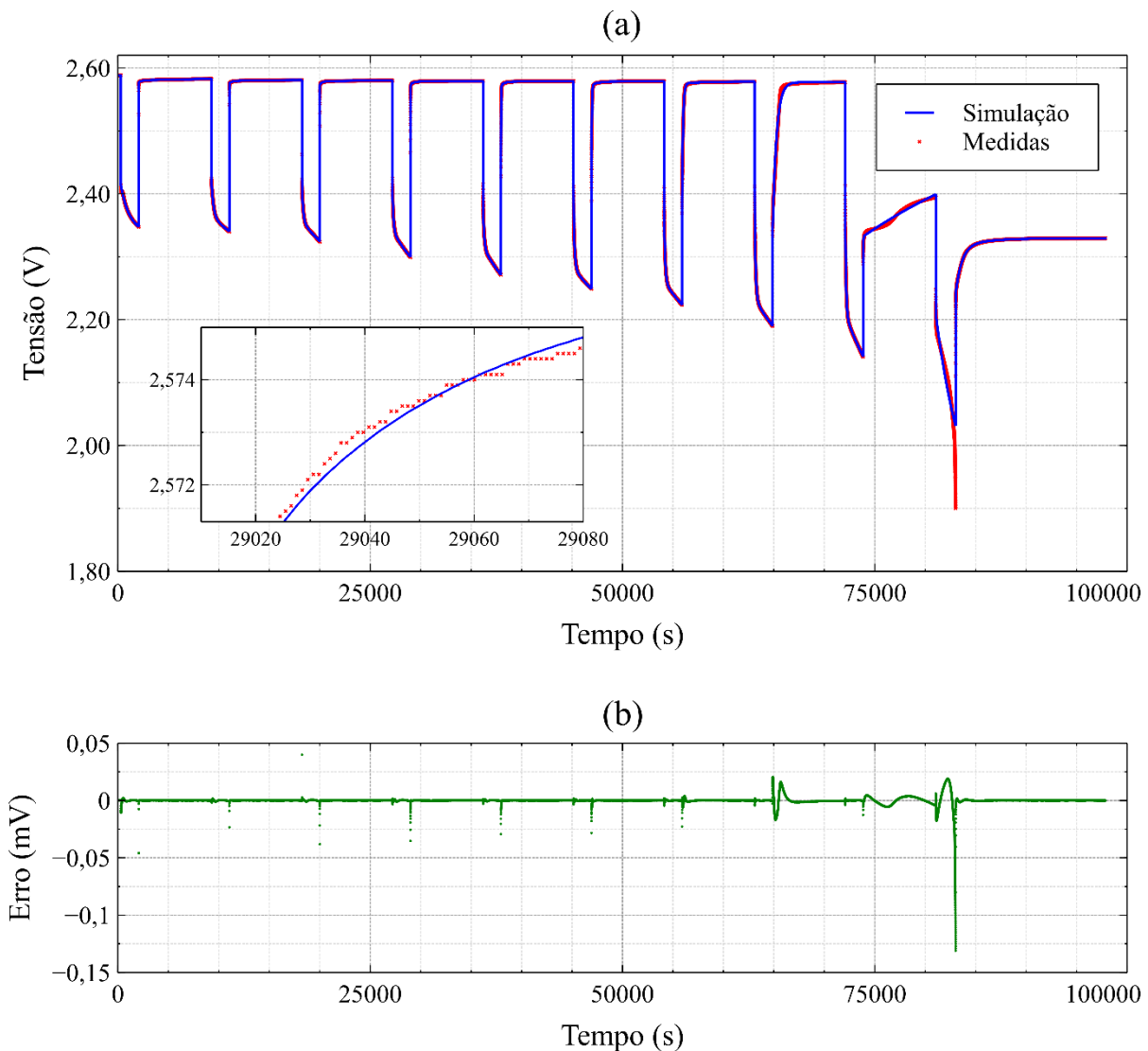


Figura 7.25: comparação entre os dados de tensão experimentais e do modelo de terceira ordem: (a) variação da tensão e (b) variação do erro.

7.3.1 Análise e discussão do erro

Na Figura 7.26 pode-se observar nos detalhes que o modelo de primeira ordem é o que representa de forma menos fiel o comportamento da tensão da bateria. A presença de somente um circuito RC em série faz com que o comportamento exponencial – tanto das curvas de descarga quanto das curvas de repouso – não seja representado de maneira adequada. Então, comprova-se que quanto maior o número de circuitos RC, menor será o erro do modelo. Observa-se também que o modelo de terceira ordem é o que conseguiu representar de forma mais adequada o comportamento da tensão. Nos modelos com mais de um circuito RC em série, as constantes de tempo de cada circuito são diferentes, pois os capacitores possuem diferentes valores de capacitância.

Pode-se notar também a diferença entre os modelos nas curvas de ajuste apresentadas na seção 7.2. Para o modelo de Thevenin de primeira ordem, os coeficientes R^2 foram notavelmente menores em relação aos outros dois modelos. Já o modelo de terceira ordem obteve resultados de R^2 expressivamente maiores, quase sempre acima de 0,99.

Na Tabela 7.6 são apresentados os erros para os diferentes modelos. Observa-se que, como esperado, a maior eficácia foi obtida pelo modelo de terceira ordem, observando os valores de erro médio e erro percentual médio. Uma quantidade maior de circuitos RC em série aumenta a capacidade do modelo de prever o comportamento transiente da tensão da bateria, tanto na descarga quanto no repouso. Como cada capacitor tem diferentes valores de capacitância, suas constantes de tempo também serão diferentes, resultando em diferentes intervalos de descarga. Assim, os capacitores podem representar tanto os comportamentos transientes de curta duração, como no começo da curva de repouso, quanto os comportamentos transientes de longa duração, como no período de repouso onde a tensão já é quase constante.

Nota-se na Tabela 7.6 que os erros máximos são bastante similares para os três modelos. Tal valor ocorre no fim de descarga, devido à queda brusca de tensão e alta não-linearidade que ocorrem quando o estado de carga é bastante próximo de zero.

Tabela 7.6: síntese dos erros para os modelos RC.

Modelo RC	Erro médio (V)	Maior erro (V)	Erro percentual médio (%)	Maior erro percentual (%)
Primeira ordem	0,00248	0,133	0,1081	6,29
Segunda ordem	0,00122	0,131	0,053	6,89
Terceira ordem	0,000819	0,131	0,0358	6,89

Para fins de comparação, na Tabela 7.7 são apresentados os erros caso fosse considerada a descarga por pulsos até 10% do SOC somente. Observa-se que o maior valor de erro cai acentuadamente, caindo de 6,89% para 1,816% no caso do modelo RC de terceira ordem. Os erros médios também diminuem, porém não de forma acentuada como o erro máximo.

Tabela 7.7: síntese dos erros considerando a descarga até 10% do SOC.

Modelo RC	Erro médio (V)	Maior erro (V)	Erro percentual médio (%)	Maior erro percentual (%)
Primeira ordem	0,00227	0,065	0,0969	2,617
Segunda ordem	0,00094	0,050	0,0392	1,985
Terceira ordem	0,00061	0,0459	0,0249	1,816

Pode-se dizer então, que os modelos representam de forma fiel o comportamento da tensão da bateria até 10% do SOC, abaixo disso erros maiores podem ocorrer. Como muitas

vezes as baterias não são descarregadas até o estado de carga zero, estes modelos serão suficientes para a grande maioria das situações.

Analisando a Figura 7.23 e os dados da Tabela 7.6, nota-se que o modelo RC de primeira ordem tem um aumento considerável do erro em diversas situações, principalmente nos níveis mais baixos de SOC. Somente um circuito RC em série não é suficiente para representar de maneira fiel os efeitos transientes da tensão da bateria. Porém, em casos onde a exigência de acurácia não seja tão grande, o modelo RC de primeira ordem pode ser utilizado, tendo como principal vantagem o pequeno número de parâmetros a ser estimado.

O modelo RC de segunda ordem apresentou um erro médio 50% inferior ao erro médio do modelo de primeira ordem. O modelo RC de terceira ordem é ainda mais baixo. Pode-se observar na Figura 7.25, de fato, o erro durante toda a descarga para o modelo de terceira ordem é bastante inferior aos demais. Porém o modelo de segunda ordem apresentou também um erro médio bastante baixo e um bom ajuste de curva nos trechos exponenciais da curva de descarga, oferecendo a vantagem de um menor número de parâmetros em relação ao modelo de segunda ordem. Portanto, o modelo RC de segunda ordem será quase sempre suficiente para descrever o comportamento dinâmico da tensão da bateria.

7.4 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos neste trabalho. Foram apresentados os resultados experimentais, os resultados para os parâmetros VOC e RS, os resultados da obtenção dos parâmetros para os modelos de Thevenin de primeira, segunda e terceira ordem, a simulação da descarga por pulsos para os três modelos e uma análise e comparação do erro.

O modelo que obteve os piores resultados foi o de Thevenin de primeira ordem, resultado que era de fato esperado. O modelo de terceira ordem foi o que obteve os melhores resultados. Nos três modelos ao fim da descarga há uma discrepância maior entre dados experimentais e dados obtidos pelo modelo. Porém, para valores de SOC de 100 a 10%, o modelo apresentou uma boa eficácia.

Capítulo 8

Conclusões

Neste trabalho foram desenvolvidos três diferentes modelos em circuito elétrico equivalente para a representação do comportamento corrente-tensão de uma bateria de célula única de Na-NiCl₂. Para tal, uma fonte programável foi utilizada em conjunto com um sistema de medição projetado para obter dados de tensão com boa precisão.

No procedimento experimental foram obtidas curvas de descarga contínua e de descarga por pulsos. As curvas obtidas foram utilizadas tanto para a obtenção dos parâmetros do modelo quanto para a verificação do erro da tensão estimada pelo modelo. Além disso, estas curvas poderão ser úteis para outros trabalhos, pois caracterizam a bateria em diferentes situações de descarga.

Os modelos foram desenvolvidos e foram capazes de simular o comportamento da tensão da bateria em uma descarga por pulsos com boa precisão. O modelo com maior precisão foi o modelo de Thevenin de terceira ordem, o qual obteve um erro médio abaixo dos demais modelos e bastante próximo de zero em grande parte da descarga. Porém, o modelo de segunda ordem também se mostrou bastante eficaz, sendo que este possui um menor número de parâmetros a serem estimados.

O modelo de Thevenin de primeira ordem se mostrou menos eficaz que os demais. A presença de somente um circuito RC em série não permite um bom ajuste do modelo aos dados experimentais, principalmente nos pontos onde a tensão tem um comportamento exponencial mais evidente.

Em todos os modelos verificou-se uma grande discrepância entre o valor medido e o valor estimado pelo modelo no fim da descarga. Devido a uma zona de alta não-linearidade e uma queda brusca de tensão, o modelo não conseguiu se ajustar aos dados experimentais nesta região. Porém os modelos apresentaram bom ajuste em uma grande faixa do estado de carga da bateria, compreendendo a região entre estado de carga de 100% até o estado de carga de 10%.

Para dar continuidade a este trabalho, os seguintes trabalhos futuros são previstos: (i) aprimoramento do modelo e testes em outros perfis de descarga, (ii) testes comparativos com outras células para a avaliação da robustez do modelo, (iii) verificação da possibilidade de adaptação do modelo de uma célula para uma bateria com múltiplas células – sem a necessidade do desenvolvimento de outro modelo, (iv) utilização e teste do modelo em diferentes aplicação

e (v) a reprodução dos métodos de modelagem da descarga para se obter um modelo para a carga da bateria.

Referências bibliográficas

- ANEEL. (n.d.). Banco de Informações de Geração. Retrieved from <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>
- Benato, R., Cosciani, N., Crugnola, G., Dambone Sessa, S., Lodi, G., Parmeggiani, C., & Todeschini, M. (2015). Sodium nickel chloride battery technology for large-scale stationary storage in the high voltage network. *Journal of Power Sources*, 293, 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.05.037>
- Benato, R., Dambone Sessa, S., Necci, A., & Palone, F. (2017). A general electric model of sodium-nickel chloride battery. In *AEIT 2016 - International Annual Conference: Sustainable Development in the Mediterranean Area, Energy and ICT Networks of the Future*. Industrial Engineering Department, University of Padova, Italy. <https://doi.org/10.23919/AEIT.2016.7892755>
- Benato, R., Sessa, R. D., Cosciani, N., Lodi, G., Parmeggiani, C., & Todeschini, M. (2014). La tecnologia sodio-cloruro di nichel (Na-NiCl₂) per l'accumulo elettrochimico stazionario sulla rete di trasmissione. *L'Energia Elettrica*, 91, 71–84.
- Benato, R., Sessa, S. D., Crugnola, G., Todeschini, M., & Zin, S. (2015). Sodium nickel chloride cell model for stationary electrical energy storage. In *2015 AEIT International Annual Conference (AEIT)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AEIT.2015.7415241>
- Brand, J., Zhang, Z., & Agarwal, R. K. (2014). Extraction of battery parameters of the equivalent circuit model using a multi-objective genetic algorithm. *Journal of Power Sources*, 247, 729–737. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.09.011>
- Brodd, R. (2011). Secondary Batteries. *Linden's Handbook of Batteries*, 15.10-15.11.
- Cadence. (n.d.). PSPICE. Retrieved from <https://www.pspice.com/>
- Cavanagh, Kate; Ward, John; Behrens, Sam; Bhatt, Anand; Ratnam, Elizabeth; Oliver, Erin; Hayward, J. (2015). *Electrical energy storage: Technology overview and applications*.
- Chen, M., & Rincon-Mora, G. A. (2006). Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(2), 504–511. <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.874229>
- Chen, M., & Rincón-Mora, G. A. (2006). Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(2), 504–511. <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.874229>
- Christopherson, J. P. (2015). *Battery Test Manual Electric Vehicles*. <https://doi.org/INL/EXT-07-12536>
- Devasthali, R. (2018). Coefficient of Determination (R-squared) Explained. Retrieved from <https://towardsdatascience.com/coefficient-of-determination-r-squared-explained-db32700d924e>

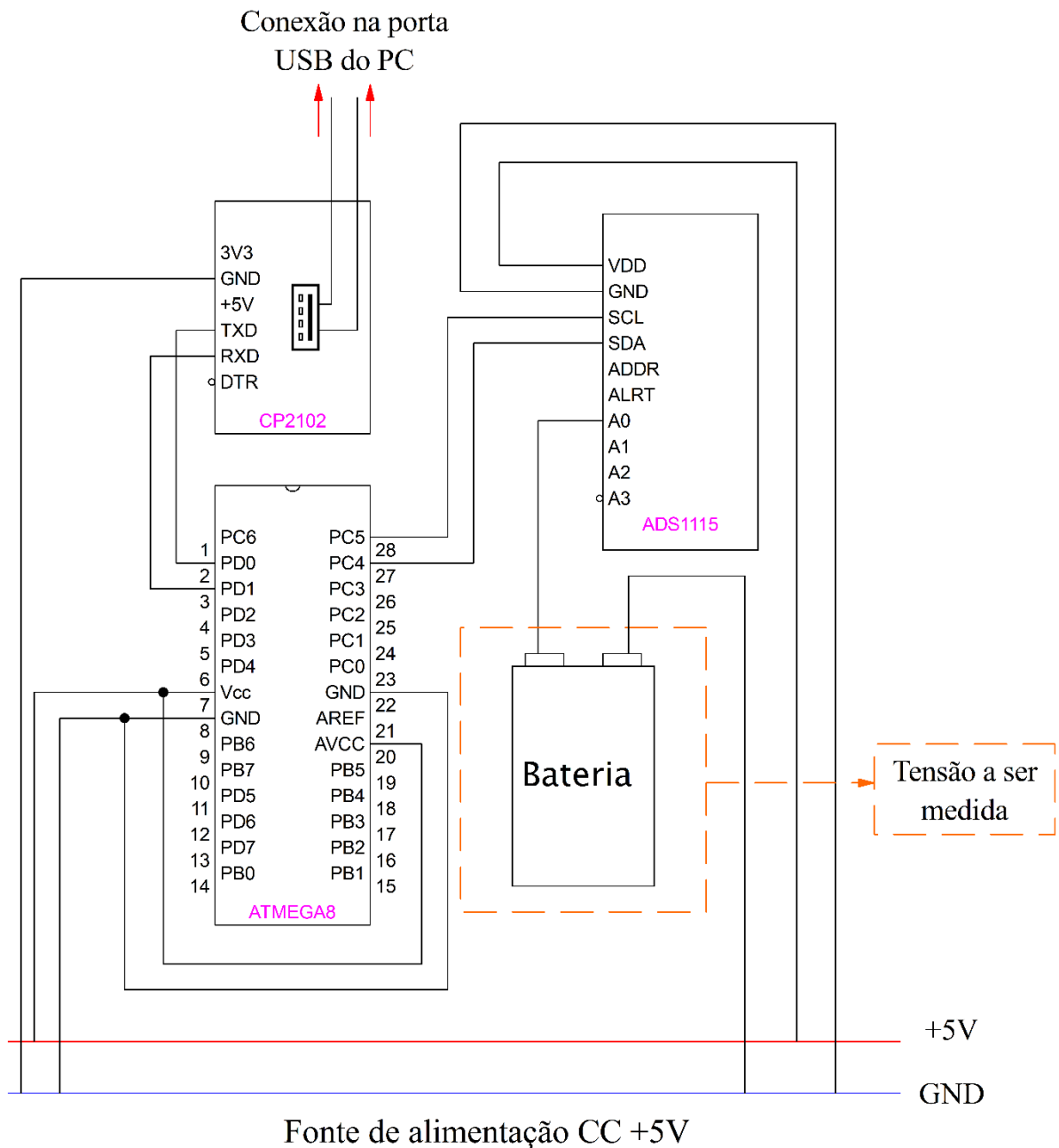
- Dubarry, M., Vuillaume, N., & Liaw, B. Y. (2009). From single cell model to battery pack simulation for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 186(2), 500–507. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.10.051>
- Dustmann, C. H. (2004). Advances in ZEBRA batteries. *Journal of Power Sources*, 127(1–2), 85–92. <https://doi.org/j.jpowsour.2003.09.039>
- Dvorak, D., Bauml, T., Holzinger, A., & Popp, H. (2017). A Comprehensive Algorithm for Estimating Lithium-Ion Battery Parameters from Measurements. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. Center for Low-Emission Transport, AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Vienna, Vienna Austria 1210 (e-mail: dominik.dvorak@ait.ac.at). <https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2761406>
- Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995). A New Optimizer Using Particle Swarm Theory, 39–43.
- Ellis, B. L., & Nazar, L. F. (2012). Sodium and sodium-ion energy storage batteries. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 16(4), 168–177. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2012.04.002>
- Empresa de Pesquisa Energética - EPE. (2016). Balanço Energético Nacional, 296. Retrieved from https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf
- Environmental Idaho National Engineering and Laboratory. (2003). FreedomCAR Battery Test Manual For Power-Assist Hybrid Electric Vehicles. *Doe/Id-11069, Draft*. <https://doi.org/11069>
- Fotouhi, A., Auger, D. J., Member, S., Propp, K., Longo, S., & Member, S. (2018). Accuracy Versus Simplicity in Online Battery Model Identification, 48(2), 195–206.
- Fotouhi, A., Auger, D. J., Propp, K., & Longo, S. (2018). Accuracy Versus Simplicity in Online Battery Model Identification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 48(2), 195–206. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2016.2599281>
- Galloway, R. C., & Haslam, S. (1999). The ZEBRA electric vehicle battery : power and energy improvements, (November 1998), 164–170.
- Gao, L. J., Liu, S. Y., & Dougal, R. A. (2002). Dynamic lithium-ion battery model for system simulation. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 25(3), 495–505. <https://doi.org/10.1109/tcapt.2002.803653>
- He, H. W., Xiong, R., & Fan, J. X. (2011). Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach. *Energies*, 4(4), 582–598. <https://doi.org/10.3390/en4040582>
- Hoecherl & Hackl. (n.d.). Retrieved from <https://en.hoecherl-hackl.de/downloads/>
- Hu, X., Li, S., & Peng, H. (2012). A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 198, 359–367. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.10.013>
- Hu, X. S., Li, S. B., & Peng, H. (2012). A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 198, 359–367. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.10.013>
- Huggins, R. A. (2015). *Energy Storage: Fundamentals, Materials and Applications* (2nd ed.).
- Kiehne, H. A. (2003). *Battery Technology Handbook*.

- Kumar, P., & Bauer, P. (2010). Parameter extraction of battery models using Multiobjective Optimization genetic algorithms. In *Proceedings of EPE-PEMC 2010 - 14th International Power Electronics and Motion Control Conference* (pp. T9106–T9110). <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2010.5606653>
- Liaw, B. Y., Nagasubramanian, G., Jungst, R. G., & Doughty, D. H. (2004). Modeling of lithium ion cells - A simple equivalent-circuit model approach. *Solid State Ionics*, *175*(1–4), 835–839. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2004.09.049>
- Marquardt, D. W. (1963). An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear parameters, *11*(2).
- MCS Electronics. (n.d.). BASCOM. Retrieved from <https://www.mcselec.com>
- Musio, M., & Damiano, A. (2015). A non-linear dynamic electrical model of Sodium-Nickel Chloride Batteries. In *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)* (Vol. 5, pp. 872–878). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2015.7418535>
- Musio, M., & Damiano, A. (2015). A non-linear dynamic electrical model of Sodium-Nickel Chloride Batteries. In *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2015* (pp. 872–878). Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Cagliari, Piazza D'Armi, Cagliari, Italy. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2015.7418535>
- Ould Amrouche, S., Rekioua, D., Rekioua, T., & Bacha, S. (2016). Overview of energy storage in renewable energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*(45), 20914–20927. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.243>
- Palizban, O., & Kauhaniemi, K. (2016). Energy storage systems in modern grids—Matrix of technologies and applications. *Journal of Energy Storage*, *6*(2015), 248–259. <https://doi.org/10.1016/j.est.2016.02.001>
- Plett, G. L. (2015). *Battery Management Systems: Battery Modeling*. Artech House.
- Reddy, T. B. (2011). *Linden's Handbook of Batteries* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Sangwan, V., Sharma, A., Kumar, R., & Rathore, A. K. (2017). Estimation of battery parameters of the equivalent circuit models using meta-heuristic techniques. In *1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, ICPEICES 2016*. <https://doi.org/10.1109/ICPEICES.2016.7853240>
- Santos, R. M. S., Alves, C. L. G. D. S., Macedo, E. C. T., Villanueva, J. M. M., & Hartmann, L. V. (2017). Estimation of lithium-ion battery model parameters using experimental data. In *INSCIT 2017 - 2nd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers: Chip on the Sands, Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/INSCIT.2017.8103527>
- Schweighofer, B., Raab, K. M., & Brasseur, G. (2003). Modeling of high power automotive batteries by the use of an automated test system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *52*(4), 1087–1091. <https://doi.org/10.1109/TIM.2003.814827>
- Seaman, A., Dao, T. S., & McPhee, J. (2014). A survey of mathematics-based equivalent-circuit and electrochemical battery models for hybrid and electric vehicle simulation. *Journal of Power Sources*, *256*, 410–423. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.057> Review
- Texas Instruments. (n.d.). ADS111x datasheet. Retrieved from <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>

- Tremblay, O., Dessaint, L. A., & Dekkiche, A. I. (2007). A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. In *VPPC 2007 - Proceedings of the 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (pp. 284–289). <https://doi.org/10.1109/VPPC.2007.4544139>
- Whitley, D. (1994). A genetic algorithm tutorial.
- Windarko, N. A., Choi, J., & Chung, G. B. (2011). SOC estimation of LiPB batteries using Extended Kalman Filter based on high accuracy electrical model. In *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia: "Green World with Power Electronics", ICPE 2011-ECCE Asia* (pp. 2015–2022). <https://doi.org/10.1109/ICPE.2011.5944483>
- Zenodo. (2014). Non-Linear Least-Square Minimization and Curve-Fitting for Python. <https://doi.org/http://doi.org/10.5281/zenodo.11813>
- Zhang, L. J., Peng, H., Ning, Z. S., Mu, Z. Q., & Sun, C. Y. (2017). Comparative Research on RC Equivalent Circuit Models for Lithium-Ion Batteries of Electric Vehicles. *Applied Sciences-Basel*, 7(10). <https://doi.org/10.3390/app7101002>
- Zhang, L., Peng, H., Ning, Z., Mu, Z., & Sun, C. (2017). Comparative research on RC equivalent circuit models for lithium-ion batteries of electric vehicles. *Applied Sciences (Switzerland)*, 7(10). <https://doi.org/10.3390/app7101002>

Apêndice A

Diagrama esquemático do sistema de medição de tensão, apresentado no Capítulo 6.



Apêndice B

Código embarcado no microcontrolador para a leitura da tensão através do ADS 1115 e envio para o computador através da porta USB. Implementado utilizando o software BASCOM (MCS Electronics).

```
'Cabeçalho principal
$regfile = "m8def.dat"
$crystal = 8000000
$hwstack = 40
$swstack = 16
$framesize = 32
$baud = 9600

Config Single = Scientific , Digits = 4

'Declaração de variáveis
Dim A As Byte
Dim High_low As Integer
Dim Hbyte As Byte At High_low Overlay
Dim Lbyte As Byte At High_low + 1 Overlay
Dim W_addr As Byte
Dim R_addr As Byte
Dim Voltage As Single
Dim I As Integer
Dim M As Integer
Dim Soma As Single

'Declaração de funções

'Endereço para envio para o ads1115
W_addr = &H90

'Endereço para leitura do ads1115
R_addr = &H91

'Configura os pinos para uso do I2C

Config Scl = Portc.5           'Is serial clock SCL
Config Sda = Portc.4         'Is serial data SDA
I2cinit

'*****
'Seleciona a referência de 4,096 V
Const Config_high = &B11000010   '4096

Const Config_low = &B00000000

'Configuração do I2C
I2cstart
I2cwbyte W_addr           'Envia o endereço do dispositivo I2c (ADS1115)
```

```

I2cwrite &B00000001      'Endereço que permite a configuração do I2C do ADS1115
I2cwrite Config_high    'Envia o endereço da tensão de referência (MSB)
I2cwrite Config_low     'Envia o endereço do valor zero de referência (LSB)
I2cstop

Waitms 25
'*****
A = Waitkey()           ' Aguarda a tecla do usuário para iniciar
I = 1
Soma = 0

Do
  Gosub Read_ad
  Voltage = High_low
  Print Voltage
  Waitms 500           ' Intervalo entre duas leituras no microcontrolador
Loop
End

Read_ad:
  I2cstart              ' Inicia o I2C
  I2cwrite W_addr      ' Envia o endereço
  I2cwrite 0
  I2cstart              ' Inicia o I2C
  I2cwrite R_addr      ' slave address (endereço)
do ADS1115)
  I2cwrite Lobyte , Ack
  I2cwrite Hobyte , Nack
  I2cstop
Return

```

Apêndice C

Programa desenvolvido para realizar a leitura dos dados provenientes do microcontrolador através da porta USB, além da geração de arquivos de texto para cada série de leitura de tensão realizada. Código implementado através da linguagem de programação Python.

```
import serial
import time

#####
# Converte o valor binário obtido da porta serial #
#####
def bintodec(bin_voltage):
    voltage = (float(bin_voltage)*0.125)/1000 # Referência de 4,096 V
    return voltage

# Cria o arquivo com a data e horário das medidas realizadas
# Exemplo: PyLog_03122018_075952.txt
# Arquivo de teste iniciado no dia 03/12/2018 as 07h59min52seg
filename =
"PyLog"+"_"+str(time.strftime("%d%m%Y"))+"_"+str(time.strftime("%H%M%S"))+".txt"
# Cria o arquivo
print(filename)

# Pede ao usuário para inserir a porta COM na qual o USBART está conectado
porta = input("Digite a porta COM na qual o data logger está conectado: ")
print("Começando!\n\n")
time.sleep(5)

# Abertura da porta serial
ser = serial.Serial(port=porta,
                    baudrate=9600,
                    parity=serial.PARITY_NONE,
                    stopbits=serial.STOPBITS_ONE,
                    bytesize=serial.EIGHTBITS)
print("connected to: " + ser.portstr)

ser.write(bytes("\1a", encoding='ascii')) # Envia para o microcontrolador uma
tecla, dando início a coleta de dados
print("Step Tempo(s) Tensao(V)")
file = open(filename, 'w')
file.write("Step,tempo(s),tensao(V) \n")
file.close()
step = 1
tensao = 0
start_time = time.time() # Tempo de início das medidas

while True:
    file = open(filename, 'a') # Abre o arquivo
```

```
# Imprime na tela os valores de step, tempo e tensão
print(step,
      "%.2f" % (time.time()-start_time),
      "%.4f" % (bintodec(ser.readline().decode('utf-8'))))

# Envia para o arquivo os mesmos valores impressos na tela
# Os valores no arquivo estarão separados por vírgula
file.write("%s" % step +
          ", "
          + "%.2f" % (time.time()-start_time)
          + ", " +
          "%.4f" % (bintodec(ser.readline().decode('utf-8'))))
          + "\n")
file.close() # Fecha o arquivo após escrever os dados
step = step + 1
```