

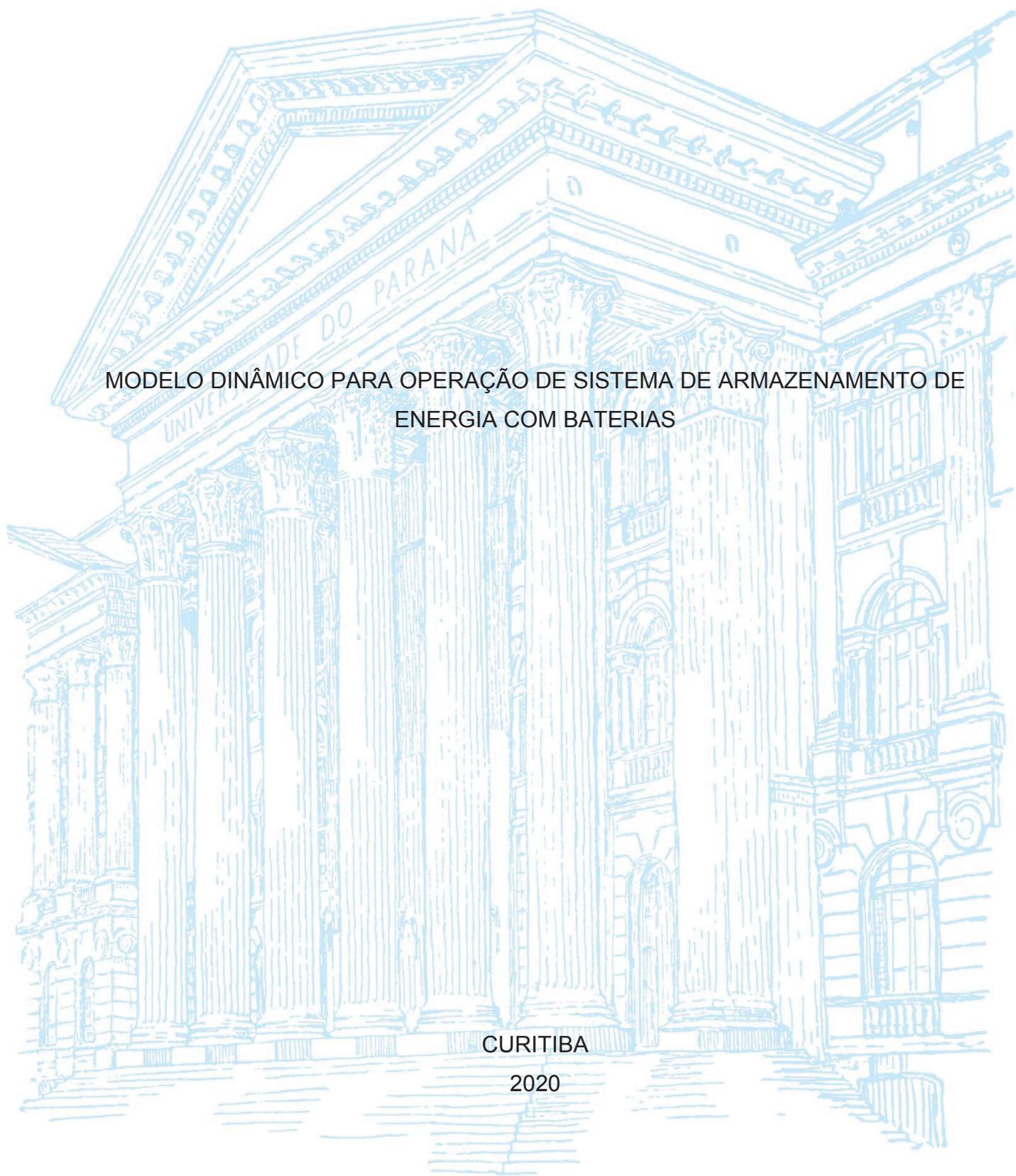
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO PAULO FUMAGALLI

MODELO DINÂMICO PARA OPERAÇÃO DE SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE  
ENERGIA COM BATERIAS

CURITIBA

2020



JOÃO PAULO FUMAGALLI

MODELO DINÂMICO PARA OPERAÇÃO DE SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE  
ENERGIA COM BATERIAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki  
Coorientador: Prof. Dr. Patricio Rodolfo Impinnisi

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

F976m

Fumagalli, João Paulo

Modelo dinâmico para operação de sistema de armazenamento de energia com baterias [recurso eletrônico] / João Paulo Fumagalli. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2020.

Orientador: Alexandre Rasi Aoki – Coorientador: Patricio Rodolfo Impinnisi

1. Baterias elétricas. 2. Energia elétrica – Conservação. 3. Energia elétrica – Distribuição. 4. Espectroscopia eletroquímica de impedância. I. Universidade Federal do Paraná. II. Aoki, Alexandre Rasi. III. Impinnisi, Patricio Rodolfo. IV. Título.

CDD: 621.31242

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **JOÃO PAULO FUMAGALLI** intitulada: **MODELO DINÂMICO PARA OPERAÇÃO DE SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA COM BATERIAS**, sob orientação do Prof. Dr. ALEXANDRE RASI AOKI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 29 de Julho de 2020.

Assinatura Eletrônica  
30/07/2020 11:31:42.0  
ALEXANDRE RASI AOKI  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
30/07/2020 17:51:55.0  
MILTON PIRES RAMOS  
Avaliador Externo (INSTITUTO GNARUS)

Assinatura Eletrônica  
30/07/2020 13:56:40.0  
THELMA SOLANGE PIAZZA FERNANDES  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
30/07/2020 12:02:05.0  
JOÃO AMERICO VILELA JUNIOR  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico este trabalho à minha avó materna, quem eu gostaria que ainda estivesse entre nós.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Nosso Pai Criador, aos meus Pais e Mães Orixás e toda minha egrégora espiritual por me darem forças, por me guiarem todos os dias e estarem sempre comigo.

À minha família por todo o apoio possível e inimaginável todos os dias. Por estarem comigo sempre e me darem todo suporte necessário.

À ANEEL, por apoiar financeiramente este estudo. Lembrando que este estudo é um produto do projeto PD – 2866-0444/2016 – ALGORTIMO MULTICRITÉRIO ESPACIAL PARA APLICAÇÃO DE BATERIAS PARA QUALIDADE DE ENERGIA DO FORNECIMENTO e faz parte da Chamada de Projeto Estratégico de P&D nº 21/2016 - "Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro". Sendo assim, meu muito obrigado à ANEEL em todos os sentidos.

Ao professor Dr. Alexandre Rasi Aoki pela orientação durante todo o trabalho. Também pelas conversas e momentos dedicados a prontamente me auxiliar na elaboração deste documento.

Ao professor e colega de trabalho PhD. Patrício Rodolfo Impinnisi, também, pelo grande auxílio e colaboração na elaboração deste documento e por também sempre estar presente quando necessário.

Ao colega de trabalho Dr. Juliano de Andrade por todas as providenciais colaborações neste trabalho, me guiando e direcionando de maneira importantíssima no decorrer da realização de minhas tarefas.

Aos Institutos Lactec por toda estrutura fornecida, seja em capital humano, financeiro ou estrutural. Agradeço por toda a colaboração e apoio em todos os momentos de necessidade.

Aos meus colegas de laboratório tanto nos Institutos Lactec quanto no PPGEE da UFPR, pelos momentos de diversão, seriedade e por todos os momentos compartilhados.

A Copel, pela bolsa de estudos fornecida e pela oportunidade de ficar durante três meses na Alemanha aprimorando meu conhecimento sobre baterias, o qual pude aplicar neste trabalho em alguns pontos importantes.

A todos que participaram direta ou indiretamente no desenvolvimento deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

“If you want to accomplish something that hasn't been accomplished you have to be relentlessly and unapologetically determined.” – Bruce Springsteen

## RESUMO

A constante necessidade de novas fontes de energia para serem utilizadas nos sistemas de distribuição de energia elétrica, nos faz observar o crescimento veloz do uso de sistemas de armazenamento de energia, principalmente baterias. Isto por que, em determinados casos, a energia deve ser armazenada para ser usada posteriormente ou, quando não há conexão com o sistema elétrico, toda energia gerada por fontes alternativas deve ser armazenada em baterias e, hoje, as mais comuns para isso são as de íons de lítio. Para serem utilizadas nos sistemas de potência, as baterias devem ser modeladas de acordo com sua aplicação e simuladas em algum software para que seu comportamento em função da tensão ou estado de carga, por exemplo, seja previsto. O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo dinâmico de operação de sistemas de armazenamento de energia por baterias (BESS) baseado em impedâncias, para avaliar como se comportam os níveis de tensão deste sistema após ser submetido a uma variação de corrente. Os tipos de modelagem para as baterias de íons de lítio foram abordados na revisão bibliográfica, provendo uma base sólida para a escolha do modelo baseado em impedância que foi utilizado. Após a escolha do modelo a ser utilizado, uma abordagem matemática utilizando as Leis de Kirchoff e equações de circunferência foi realizada nos processos de impedância eletroquímica para que a bateria utilizada fosse parametrizada e pudesse ser simulada no software MatLab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup>. Após a simulação do circuito equivalente baseado em impedância onde foi utilizada uma curva de corrente de carga/descarga elaborada especialmente para este caso, os resultados obtidos foram analisados. As conclusões comparativas sobre as percentagens de erro e diferenças entre as curvas foram apresentadas e o modelo aqui elaborado mostrou-se capaz de ser utilizado como um suprimento de energia em casos de *peak shaving*.

Palavras-chave: Baterias de íons de lítio. Modelagem. Circuito equivalente. Espectroscopia eletroquímica de impedância. Aplicação em rede de distribuição de energia elétrica.

## ABSTRACT

The constant need for new energy sources to be used in electricity distribution systems, makes us observe the rapid growth in the use of energy storage systems, especially batteries. This is because, in certain cases, the energy must be stored to be used later or, when there is no connection to the electrical system, all energy generated by alternative sources must be stored in batteries and, today, the most common for this are the lithium ion ones. To be used in power systems, batteries must be modeled according to their application and simulated in some software so that their behavior depending on the voltage or state of charge, for example, is predicted. The objective of this work is to develop a dynamic operation model of battery energy storage systems (BESS) based on impedances, to evaluate how the voltage levels of this system behave after being subjected to a current variation. The types of modeling for lithium ion batteries were addressed in the literature review, providing a solid basis for choosing the impedance-based model that was used. After choosing the model to be used, a mathematical approach using Kirchhoff's Laws and circumference equations was performed in the electrochemical impedance processes so that the battery used could be parameterized and could be simulated in the MatLab® / Simulink® software. After simulating the equivalent impedance-based circuit using a load / discharge current curve designed especially for this case, the results obtained were analyzed. The comparative conclusions about the error percentages and differences between the curves were presented and the model elaborated here was able to be used as an energy supply in cases of peak shaving.

Keywords: Lithium Ion Batteries, Modelling, Equivalent Circuit, Electrochemical Impedance Spectroscopy and Distribution Network Application.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA EM 2018. ....	17
FIGURA 2 – HISTÓRICO DE CONSUMO MUNDIAL DE ENERGIA PER CAPITA ..	22
FIGURA 3 – PRODUÇÃO MUNDIAL DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE VARIADAS FONTES.....	23
FIGURA 4 – QUANTIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA POR FONTES FOTOVOLTAICAS NO PERÍODO DE 1990 ATÉ 2017.....	24
FIGURA 5 – QUANTIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA POR FONTES EÓLICAS NO PERÍODO DE 1990 ATÉ 2017 .....	24
FIGURA 6 – ESTRUTURA BÁSICA DE UMA CÉLULA DE ÍONS DE LÍTIO.....	27
FIGURA 7 – INTERVALO DE OPERAÇÃO DE SOC E OS PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO DECORRENTES DE UMA OPERAÇÃO NÃO APROPRIADA. ....	29
FIGURA 8 – MODELO GENÉRICO DE BMS.....	30
FIGURA 9 – PARÂMETROS A SEREM CONSIDERADOS NA ESCOLHA DE UMA BATERIA DE ÍONS DE LÍTIO .....	33
FIGURA 10 – MODELO IDEAL DE BATERIA.....	38
FIGURA 11 – MODELO BASEADO EM TEMPO DE EXECUÇÃO .....	40
FIGURA 12 – MODELO GENÉRICO DE BATERIA.....	40
FIGURA 13 – MODELO GENÉRICO PARA CIRCUITO EQUIVALENTE BASEADO EM IMPEDÂNCIAS .....	41
FIGURA 14 - EXEMPLOS DE DIAGRAMA DE NYQUIST PARA VALORES DE IMPEDÂNCIA.....	43
FIGURA 15 - EXEMPLOS DE VALORES DE $ Z $ PARA DIFERENTES VALORES DE FREQUÊNCIA.....	43
FIGURA 16 - EXEMPLOS DE VALORES DE $\theta$ PARA DIFERENTES VALORES DE FREQUÊNCIA.....	44
FIGURA 17 - ARRANJO EXPERIMENTAL PARA OS PROCESSOS DE EIS, PDT, CDT E CURVA DE CARGA. ....	56
FIGURA 18 - CDT PARA CORRENTE DE 10A.....	57
FIGURA 19 - PDT PARA A CÉLULA L0193.....	58
FIGURA 20 – CIRCUITO UTILIZADO PARA MODELAR A CÉLULA DE ÍONS DE LÍTIO UTILIZADA NOS ENSAIOS .....	59
FIGURA 21 – CIRCUITO RC PARALELO.....	61

FIGURA 22 – ASSOCIAÇÃO DE VALORES À EQUAÇÃO 13 .....	63
FIGURA 23 - CIRCUITO RC COM UM RESISTOR SÉRIE .....	64
FIGURA 24 – OBTENÇÃO DOS VALORES DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE ATRAVÉS DE MODELAGEM MATEMÁTICA .....	66
FIGURA 25 – EXEMPLO DO PROCESSO DE EXTRAPOLAÇÃO PARA OBTENÇÃO DOS VALORES DE R, R <sub>s</sub> E C.....	67
FIGURA 26 - CÁLCULO DA TENSÃO V <sub>1</sub> PARA O MODELO DINÂMICO DE OPERAÇÃO DA CÉLULA DE ÍONS DE LÍTIO.....	68
FIGURA 27 – CÁLCULO DA TENSÃO NO RESISTOR SÉRIE R <sub>0</sub> .....	69
FIGURA 28 – DIAGRAMA DE BLOCOS COMPLETO PARA O MODELO DE OPERAÇÃO DINÂMICO DA CÉLULA DE ÍONS DE LÍTIO.....	70
FIGURA 29 – FLUXOGRAMA DE TRABALHO PARA ELABORAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DINÂMICO DE BATERIA DE ÍONS DE LÍTIO.....	71
FIGURA 30 - CURVAS DE IMPEDÂNCIA OBTIDAS ATRAVÉS DO PROCESSO DE EIS. ....	73
FIGURA 31 - VALORES DE OCV PARA DIFERENTES ESTADOS DE CARGA (SoC).....	74
FIGURA 32 - VALORES DE R <sub>0</sub> PARA DIFERENTES ESTADOS DE CARGA (SoC). .....	74
FIGURA 33 - VALORES DE R <sub>1</sub> PARA DIFERENTES ESTADOS DE CARGA (SoC). .....	75
FIGURA 34 - VALORES DE C <sub>1</sub> PARA DIFERENTES ESTADOS DE CARGA (SoC). .....	75
FIGURA 35 - GRÁFICO DE TENSÃO VERSUS TEMPO PARA DESCARGA DE 1C. .....	76
FIGURA 36 - GRÁFICO DE TENSÃO VERSUS TEMPO PARA DESCARGA DE 0.5C.....	76
FIGURA 37 - GRÁFICO DE TENSÃO VERSUS TEMPO PARA DESCARGA DE 0.25C.....	76
FIGURA 38 - CURVA DE CARGA ALEATÓRIA APLICADA A BATERIA L0193. ....	77
FIGURA 39 - RESPOSTA DE TENSÃO DA BATERIA EM RELAÇÃO A VARIAÇÃO DE CORRENTE DE CARGA.....	77
FIGURA 40 - VARIAÇÃO DOS VALORES DE SOC EM FUNÇÃO DO TEMPO. ....	78

FIGURA 41 - COMPORTAMENTO ESPERADO PARA A CURVA DE VALORES DE R0 E R1.....	79
FIGURA 42 - COMPORTAMENTO ESPERADO PARA A CURVA DE VALORES DE C1.....	79

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - ARTIGOS OBTIDOS APÓS SELEÇÃO DE PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO.....	46
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
BESS	- <i>Battery Energy Storage System</i> (Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias)
BMS	- <i>Battery Management System</i> (Sistema de Gerenciamento de Baterias)
C	- C Rate (Taxa C de Carga e Descarga)
CDT	- <i>Continuous Discharge Test</i> (Teste de Descarga Contínua)
CPE	- <i>Constant Phase Element</i> (Elemento de Fase Constante)
DoD	- <i>Depth of Discharge</i> (Profundidade de Descarga)
EIS	- <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> (Espectroscopia de Impedância Eletroquímica)
ESS	- <i>Energy Storage System</i> (Sistema de Armazenamento de Energia)
EUA	- Estados Unidos da América
GD	- Geração Distribuída
LFP	- Lítio Ferro Fosfato
LiFePO <sub>4</sub>	- Lítio Ferro Fosfato
NMH	- Níquel Metal Hidreto
OCV	- <i>Open Circuit Voltage</i> (Tensão de Circuito Aberto)
PDT	- <i>Pulse Discharge Test</i> (Teste de Descarga Pulsada)
SEI	- <i>Solid-Electrolyte Interface</i> (Interface Sólido Eletrólito)
SoC	- <i>State of Charge</i> (Estado de Carga)
SoH	- <i>State of Health</i> (Estado de Vida)
UPS	- <i>Uninterruptible Power Supply</i> (Fonte de Energia Ininterrupta)
VRLA	- <i>Valve-Regulated Lead-Acid Battery</i> (Bateria de Chumbo-Ácido)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1 CONTEXTO .....	17
1.2 JUSTIFICATIVA .....	19
1.3 OBJETIVOS .....	20
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	20
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>22</b>
2.1 PANORAMA MUNDIAL DE ENERGIA.....	22
2.1.1 Fontes Renováveis de Energia Elétrica.....	23
2.2 CARACTERÍSTICAS DAS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO .....	25
2.2.1 Química Básica das Baterias de Íons de Lítio .....	25
2.2.2 Tecnologia de Baterias de Íons de Lítio .....	26
2.2.3 Aplicações Comuns.....	27
2.2.4 Desempenho Elétrico .....	28
2.2.5 Comportamento Dinâmico.....	29
2.2.6 Eletrônica Embarcada e Sistemas de Gerenciamento de Baterias .....	29
2.2.7 Razões pelas quais se escolher a bateria com a química $\text{LiFePO}_4$ ou LFP .....	31
2.3 APLICAÇÕES EM SISTEMAS ELÉTRICOS.....	33
2.3.1 Controle de Frequência .....	34
2.3.2 Regulação de Tensão .....	34
2.3.3 Gerenciamento de Energia.....	35
2.4 MODELAGEM DE BATERIAS .....	35
2.4.1 Modelos Matemáticos e Eletroquímicos .....	36
2.4.2 Modelos Térmicos .....	36
2.4.3 Modelos Elétricos .....	37
2.4.3.1 Modelos Simples .....	37
2.4.3.2 Modelo baseado em Thévenin .....	38
2.4.3.3 Modelo baseado no tempo de execução .....	39
2.4.3.4 Modelo genérico de bateria .....	40
2.4.3.5 Modelos baseados em impedâncias.....	41
2.4.3.6 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica.....	41
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	44
<b>3 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>45</b>

3.1 ANÁLISE DA LITERATURA.....	46
3.1.1 Modelagem de Baterias de Íons de Lítio .....	47
3.1.2 Aplicações dos BESSs.....	49
3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	51
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>52</b>
4.1 MATERIAIS .....	52
4.1.1 Hardware Zahner .....	52
4.1.2 MatLab®.....	53
4.1.3 Origin® .....	54
4.2 MÉTODOS .....	54
4.2.1 Teste de Capacidade .....	55
4.2.2 Arranjo Experimental .....	55
4.2.3 Teste de Descarga Contínua (do inglês, <i>Continuous Discharge Test</i> - CDT) e Teste de Descarga de Pulso (do inglês, <i>Pulse Discharge Test</i> – PDT) .....	56
4.2.4 Método de Tratamento de Dados: Filtro de Savitzky-Golay .....	58
4.2.5 Modelo Proposto .....	59
4.2.5.1 Circuito Utilizado.....	59
4.2.5.2 Cálculo do Estado de Carga (SoC).....	60
4.2.5.3 Cálculo do Potencial de Circuito Aberto (OCV) .....	60
4.2.5.4 Valores de R0, R1 e C1 .....	60
4.2.5.5 Tensão no Ramo RC.....	68
4.2.5.6 Tensão Resistor Série .....	68
4.2.5.7 Saturadores .....	69
4.2.5.8 Fontes Controladas de Tensão e Corrente.....	69
4.2.5.9 Diagrama de Blocos Completo Simulink.....	70
4.2.5.10 Tensão Terminal da Bateria .....	70
4.2.6 Ensaios para Formação e Validação do Modelo Proposto.....	71
4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	72
<b>5 RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>73</b>
5.1 RESULTADOS .....	73
5.2 ANÁLISES DOS RESULTADOS .....	78
5.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	82
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>83</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>85</b>

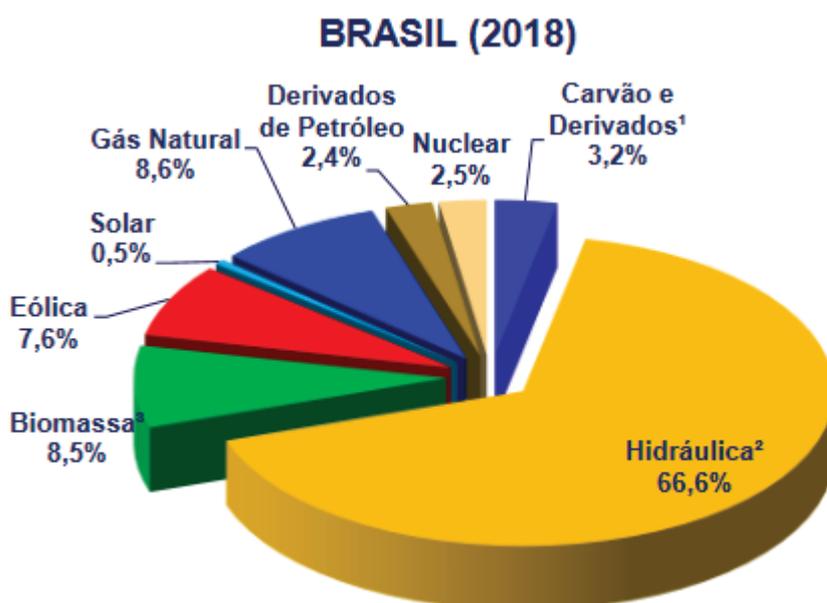
# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTO

Segundo a IEA - *International Energy Agency* (IEA, 2019), o planeta vem consumindo cada vez mais energia elétrica, sendo que em 2017 foi registrado o montante produzido de 23.696 TWh, com cerca de 78% deste valor gerado por combustíveis fósseis. Uma alternativa significativa para melhorar a sustentabilidade na geração de energia elétrica é através de fontes renováveis de energia, as quais também atendem à questão do suprimento de demanda crescente por energia elétrica.

As fontes renováveis de energia, normalmente alocadas como fontes de geração distribuída (GD), vêm aumentando cada dia mais, inclusive no Brasil, sendo que no mês de agosto de 2020, o Brasil conta com uma potência instalada de geração fotovoltaica de mais de 2920 MW (MME, 2019). A FIGURA 1 fornece uma ideia de como a matriz elétrica brasileira estava estabelecida no ano de 2018.

FIGURA 1 - MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA EM 2018.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2019).

No entanto, o aumento da penetração desse tipo de geração pode apresentar problemas operacionais na rede elétrica causados pela intermitência das mesmas, o

que requer atenção dos operadores do sistema elétrico no sentido de garantir a qualidade da energia que chega aos consumidores, assim como a confiabilidade das redes elétricas (ANEEL, 2016).

Divya e Østergaard (2009) afirmam que o Sistema de Armazenagem de Energia por Baterias (do inglês, *Battery Energy Storage System* – BESS) pode auxiliar no controle da confiabilidade dos sistemas elétricos onde há pontos de GD e, além disso, propiciar também uma melhor qualidade na energia que é entregue aos consumidores finais. Outro ponto importante para ser analisado com a utilização do BESS é a inserção dos bancos de baterias para executar o deslocamento de carga (do inglês, *load shifting*) (Luo et al. ,2015).

Como há picos de demanda nas redes elétricas durante períodos específicos do dia, o BESS pode fornecer a quantidade de energia necessária para que haja uma estabilização da demanda do sistema sem causar a exaustão das fontes geradoras já ligadas ao sistema elétrico.

O BESS tem como item principal do seu sistema as baterias de íons de lítio. Scrosati e Garche (2010) mostram que, além de servir como módulo de armazenamento de energia, as baterias de íons de lítio também ajudam a difundir a utilização dos veículos elétricos, sendo eles híbridos ou plugados na rede. Além disso, há muitos fatores limitadores a serem melhorados como potência das baterias, segurança e confiabilidade das mesmas. Tudo isso para que se possa extrair o máximo de aproveitamento possível destes sistemas.

As baterias de íons de lítio podem desempenhar um papel muito maior na sociedade moderna, mais especificamente como um componente chave no desenvolvimento para a sustentabilidade energética. Em combinação com a rede elétrica, as baterias de íons de lítio podem apoiar a integração de altas parcelas de energia fotovoltaica e eólica na matriz de energia, fornecendo capacidade de armazenamento e ajudando com os serviços ancilares. (Zubi et al. (2018))

Sendo assim, o estudo para utilização do BESS integrado aos sistemas energéticos atuais pode trazer bons resultados em questões como intermitência das fontes de energias renováveis, no controle da tensão que é fornecida aos consumidores e, principalmente, no deslocamento de carga durante os períodos de tempo de maior utilização da rede de energia elétrica.

Um exemplo de grande sucesso na instalação de um banco de baterias está na Austrália, onde a Tesla instalou o maior banco de baterias do planeta, atualmente

em utilização juntamente a uma usina de energia eólica. A instalação desta usina fez com que o preço da execução dos serviços auxiliares na Austrália caísse até 75% de seu valor em relação a cotação do ano de 2016. (The Guardian, 2018).

Outro exemplo palpável é a construção de uma usina virtual (do inglês, *virtual power plant*), também na Austrália, formada por painéis instalados em condomínios de pessoas de baixa renda. Este termo virtual é usado por se tratar de instalações individuais, mas que podem ser consideradas, por sua localização e capacidade de produção de energia, como uma usina de energia fotovoltaica. Estes painéis serão conectados ao um banco de baterias com capacidade de 250 MW e 650 MWh de armazenamento, tudo isto para que, em casos de necessidade, este banco de baterias seja utilizado para melhorar a estabilidade da rede de energia elétrica e fornecer energia quando a produção estiver abaixo do esperado (RENEWECOMY, 2018).

Muito ainda tem de ser estudado sobre os impactos das baterias sobre os sistemas elétricos, bem como o impacto dos sistemas elétricos sobre as baterias. Sendo assim, este trabalho irá se concentrar em analisar como se comportam os níveis de tensão de um BESS após ser submetido a níveis randômicos de carga e descarga.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A crescente demanda por energia elétrica assim como a utilização de combustíveis fósseis em larga escala para suprir esta demanda, faz com que as emissões de gases poluentes continuem altas e os recursos naturais sejam utilizados em sua máxima capacidade. Em função desta grande utilização, as fontes renováveis de energia são grandes oportunidades para auxiliar a redução de problemas de emissão de gases e demanda de energia.

As fontes de energia solar e eólica são exemplos de energias renováveis, sendo que estes modelos de produção de energia associados a um *BESS* podem auxiliar de maneira positiva o sistema elétrico. Exemplos deste auxílio são a diminuição dos impactos da intermitência na rede elétrica e o descongestionamento do sistema em horários de alta demanda.

Realizando estas tarefas, o *BESS* passa por ciclos de carga e descarga e uso intenso que provocam variações nos níveis de tensão fornecidos, portanto é

importante analisar a variação dos níveis de tensão de um BESS para, assim, prever seu comportamento quando conectado à uma carga qualquer.

Lembrando ainda que este estudo é um produto do projeto PD – 2866-0444/2016 – ALGORTIMO MULTICRITÉRIO ESPACIAL PARA APLICAÇÃO DE BATERIAS PARA QUALIDADE DE ENERGIA DO FORNECIMENTO e faz parte da Chamada de Projeto Estratégico de P&D nº 21/2016 - "Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro" e foi desenvolvido para complementar o projeto acima mencionado.

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é contribuir para análise dinâmica da operação de sistemas de armazenamento de energia com baterias. Como objetivos específicos deste estudo, podem ser citados:

- Demonstrar as características das baterias de  $\text{LiFePO}_4$  e o porquê de esta serem utilizadas;
- Levantar a bibliografia técnico-científica dos modelos utilizados para simulação dinâmica da operação das baterias de íons de lítio;
- Desenvolver um modelo dinâmico de operação de BESS para avaliar como se comportam os níveis de tensão de um BESS após ser submetido a uma variação de corrente;
- Validar o modelo proposto com dados experimentais.

### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: o capítulo de Número 1 apresenta a introdução juntamente com a justificativa e os objetivos geral e específicos e o capítulo subsequente fornece toda parte de fundamentação teórica utilizado para embasar este estudo. Já o capítulo 3 discorre sobre toda a revisão da literatura que foi obtida por meio de pesquisa a artigos científicos da área do estudo deste trabalho. No capítulo seguinte são apresentados todos os materiais e métodos utilizados para obter e tratar os parâmetros obtidos através do processo de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (do inglês, *Electrochemical Impedance Spectroscopy* – EIS). No capítulo 5 são mostrados os resultados obtidos seguidos de

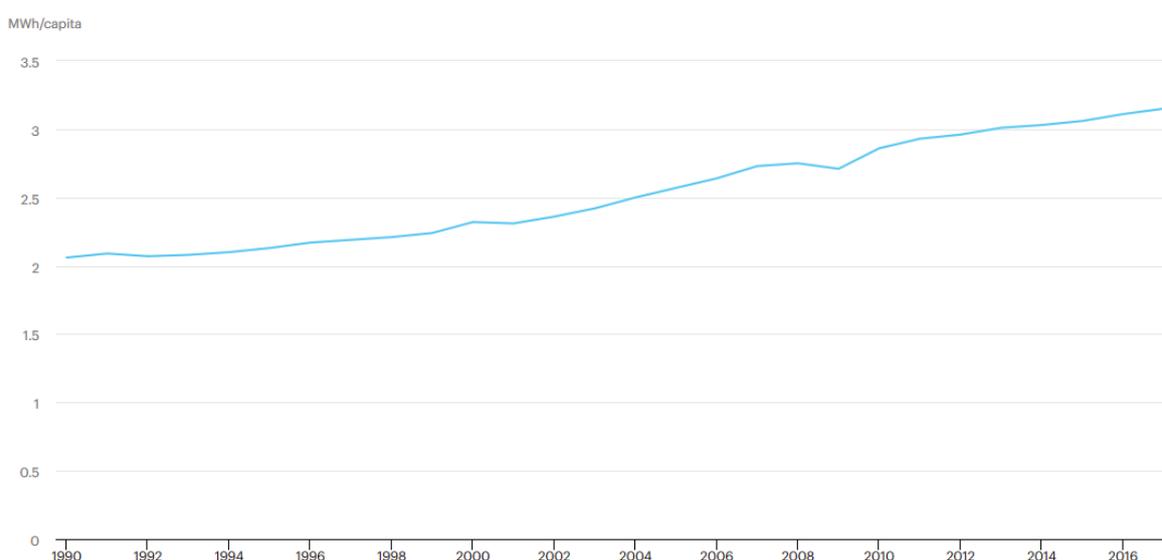
suas análises em relação a porcentagem de erro e a influência que os elementos passivos possuem no resultado geral. O último capítulo apresenta a conclusão deste estudo, em função de tudo o que foi estudado e feito nos experimentos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 PANORAMA MUNDIAL DE ENERGIA

Como se pode observar na FIGURA 2, o consumo mundial per capita de energia elétrica sobe a cada ano que passa. Em 2016 foram consumidos 3,1 MWh per capita e em 2017, 3,2 GWh (um aumento de cerca de 3,2%).

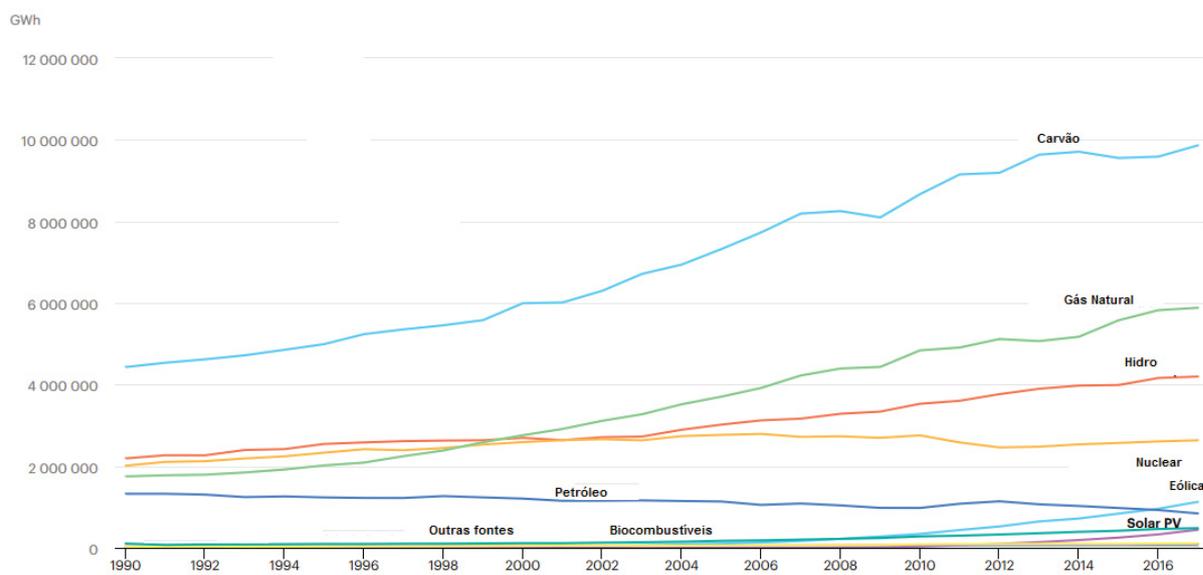
FIGURA 2 – HISTÓRICO DE CONSUMO MUNDIAL DE ENERGIA PER CAPITA



Fonte: *International Energy Agency (2020)*.

Um maior consumo significa uma maior demanda e, conseqüentemente, uma maior produção de energia elétrica. Como a demanda não para de aumentar, deve-se buscar a produção de energia nas mais variadas fontes para que se possa suprir todas as necessidades (industriais, residenciais, etc.). Uma comparação das quantidades de energia elétrica produzida por diversas fontes pode ser observada na FIGURA 3.

FIGURA 3 – PRODUÇÃO MUNDIAL DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE VARIADAS FONTES



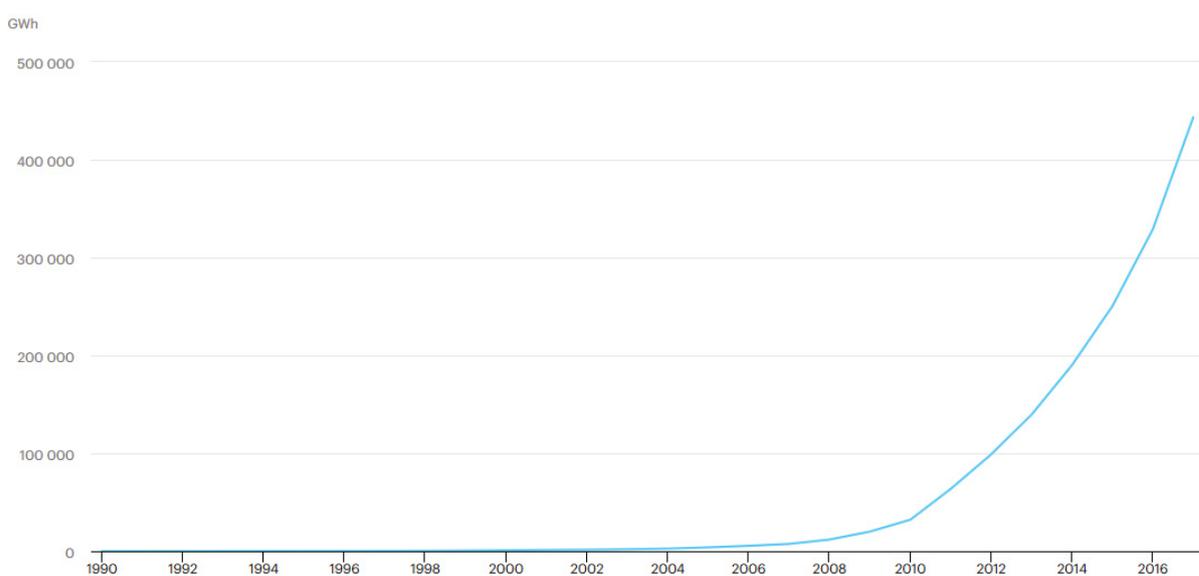
Fonte: *International Energy Agency* (2020).

Analisando a FIGURA 3 pode-se inferir que a produção de energia por queima de carvão, infelizmente, ainda continua a crescer (cresceu cerca de 2,8% no período 2016-2017). Por outro lado, a produção de energia por queima de petróleo diminuiu cerca de 10%, o que se pode considerar um grande avanço em termos ambientais. Uma saída para a diminuição da queima de carvão e derivados de petróleo são as fontes renováveis de energia elétrica, dentre elas pode-se citar a energia eólica, solar fotovoltaica e os biocombustíveis como etanol ou biodiesel.

### 2.1.1 Fontes Renováveis de Energia Elétrica

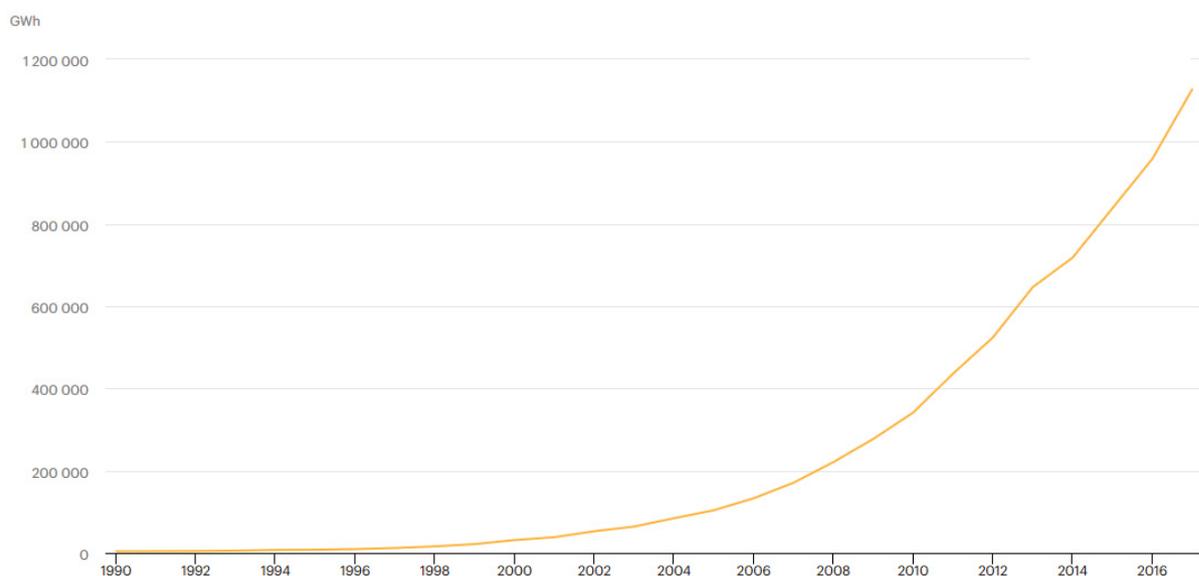
A produção de energia elétrica proveniente de fontes renováveis como energia eólica, solar fotovoltaica e os biocombustíveis seguem crescendo cada vez mais e isto contribui para uma matriz energética mais sustentável e que possa acompanhar a demanda global por mais energia. Este crescimento pode ser notado analisando-se as FIGURAS 4 e 5, onde são mostrados os dados referentes aos tipos de produção de energia provenientes de fontes renováveis (eólica e solar).

FIGURA 4 – QUANTIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA POR FONTES FOTOVOLTAICAS NO PERÍODO DE 1990 ATÉ 2017



Fonte: *International Energy Agency* (2020).

FIGURA 5 – QUANTIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA POR FONTES EÓLICAS NO PERÍODO DE 1990 ATÉ 2017



Fonte: *International Energy Agency* (2020).

Analisando os dados fornecidos pela *International Energy Agency*, a produção de energia elétrica por fontes fotovoltaicas aumentou em quase 35% de 2016 a 2017 e a produção de energia elétrica por fontes eólicas aumentou cerca de 18%. Isto demonstra um grande avanço na substituição das fontes da matriz energética mundial para que se possam substituir a energia proveniente de combustíveis fósseis.

Para que se possam ser usadas estas energias provenientes das fontes eólicas e fotovoltaicas, em alguns casos, as unidades consumidoras não possuem acesso à rede de distribuição, necessitando de uma maneira para que se possa armazenar esta energia e, posteriormente, possa ser usada quando houver necessidade. Já em outros casos, a utilização de sistemas de armazenamento de energia em baterias é utilizada para outras finalidades.

Para isso, existem várias formas de armazenagem de energia. As mais comuns são as baterias. Existem ainda outras formas de armazenamento de energia, como volantes de inércia, baterias de fluxo, armazenamento de energia por ar comprimido, armazenamento de energia magnética supercondutora e vários outros modelos de armazenagem de energia.

E já que o assunto principal deste estudo são as baterias de íons de lítio, será mostrado o por que foi escolhida este tipo de tecnologia para a elaboração do modelo dinâmico de armazenagem de energia elétrica.

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DAS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

As baterias recarregáveis são fontes de energia eletroquímica capaz de acumular, armazenar e liberar energia elétrica em função das reações eletroquímicas reversíveis que acontecem em seu interior. Estes processos se dão nos eletrodos negativos e positivos da célula eletroquímica. Normalmente cada eletrodo é composto de um material ativo (geralmente um meio poroso) em contato com um coletor de corrente. Os dois eletrodos são conectados galvanicamente pelo eletrólito que contém íons (cargas) e, em certos casos, parte do material ativo.

Baterias secundárias de íons de lítio (secundárias pois são recarregáveis), devido a sua grande performance, estão sendo utilizadas das mais variadas formas. Várias destas formas estão em itens eletrônicos portáteis, veículos elétricos e aplicações nos sistemas de potência envolvendo *smart grids*.

### 2.2.1 Química Básica das Baterias de Íons de Lítio

Segundo a tabela periódica, o lítio é um dos mais leves e reativos metais e ainda possui o maior potencial eletroquímico ( $E^0 = -3,045V$ ). Além disso, para baterias, fornece alta energia e densidade de potência. Em função do seu alto poder de reação

com água, as baterias mais modernas usam materiais de carbono em seus eletrodos negativos e óxidos de lítio metálico nos eletrodos positivos. Por outro lado, com solventes orgânicos o lítio reage de forma lenta e forma uma camada protetora chamada interface sólido-eletrólito (do inglês, *Solid-Electrolyte Interphase* – SEI) na superfície do lítio metálico, que permite o transporte dos íons de lítio para fornecer energia.

As primeiras baterias recarregáveis de íons de lítio comercializadas eram formadas por um sistema de Li/MoO<sub>2</sub> (lítio/óxido de molibdênio) que foi produzida pela empresa canadense Moli no final da década de 1980. Ela foi retirada do mercado por apresentar problemas relacionados a instabilidade do eletrodo metálico de lítio, esforço mecânico na SEI e pelo crescimento de dendritos que causavam o curto circuito dos separadores.

Durante a descarga da célula de lítio, o elemento de lítio é retirado do eletrodo negativo e na carga é inserido de volta no eletrodo negativo. Depois da recarga, o lítio redepositado não possui uma estrutura regular, o que leva a uma deformação do eletrodo durante os processos de carga e descarga. Este depósito não regular dos íons de lítio, em grande escala, pode levar a uma alta reatividade do eletrodo negativo. Ainda como consequência da recarga, os dendritos formados podem causar curto circuitos entre os eletrodos, levando a um aquecimento sem controle e reações violentas do eletrodo com o eletrólito.

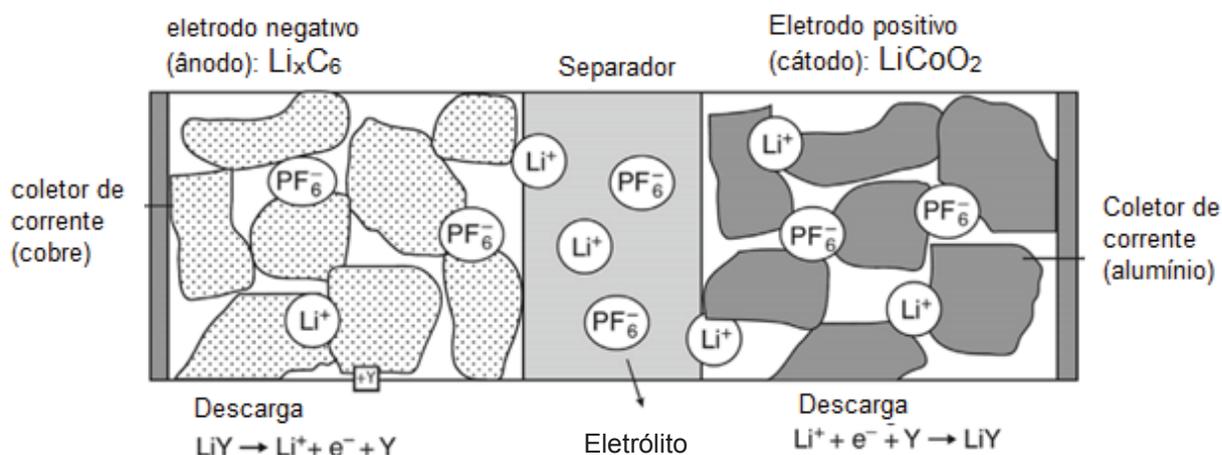
### 2.2.2 Tecnologia de Baterias de Íons de Lítio

As baterias mais recentes de íons de lítio não enfrentam problemas de segurança com relação ao alto poder de reação do lítio metálico, já que este não se encontra mais presente nos ciclos de carga e descarga das baterias. Os materiais ativos dos eletrodos negativo e positivo são compostos de lítio que possuem potenciais eletroquímicos diferentes em relação ao lítio metálico.

A maioria das baterias comerciais de íons de lítio utilizam compostos de intercalação baseados em lítio-carbono para o eletrodo negativo e, para o eletrodo positivo, utilizam óxido de lítio metálico. O desempenho das baterias é aumentado pelo tamanho reduzido das partículas, grande área de superfície e pelas distâncias reduzidas pelas quais os íons de lítio viajam entre as partículas e entre os eletrodos.

Para entender os processos de carga e descarga das baterias de íons de lítio, segue a FIGURA 6 mostra a estrutura básica de uma célula de íons de lítio.

FIGURA 6 – ESTRUTURA BÁSICA DE UMA CÉLULA DE ÍONS DE LÍTIO



Fonte: *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing* (2015).

O processo de carga de uma célula se dá pelo movimento dos íons de lítio do eletrodo positivo em direção ao eletrodo negativo. Já o processo de descarga se dá ao contrário: a movimentação é feita do eletrodo negativo para o eletrodo positivo. Este processo de transferência de íons entre os eletrodos, durante carga e descarga, é chamado de efeito cadeira de balanço (do inglês, *rocking-chair*) ou efeito “swing”. A tensão na bateria é gerada pela diferença na energia livre de Gibbs entre os íons  $\text{Li}^+$  nos dois eletrodos e vai diminuindo durante a descarga. Baterias comerciais comuns possuem uma tensão nominal de 3,7 V.

Quando a descarga da célula se dá por completo, a tensão da bateria cai para a tensão de corte de 2,7 V. Durante a descarga, o material do eletrodo positivo age como um receptor de elétrons (redução eletroquímica) e o material do eletrodo negativo se comporta como um doador de elétrons (oxidação eletroquímica).

### 2.2.3 Aplicações Comuns

As baterias de íons de lítio conquistaram o mercado de eletrônicos portáteis e, mais recentemente, estão sendo utilizadas em vários tipos de veículos híbridos. Desde o começo dos anos 1990 o uso deste modelo de baterias criou um mercado que não para de crescer. Estas baterias de íons de lítio vêm substituindo rapidamente

as células de níquel metal hidreto (NMH). Desde o começo do século XXI as baterias de íons de lítio vêm se tornando as novas fontes de potência para transportes, mercados de energia e reserva de energia.

#### 2.2.4 Desempenho Elétrico

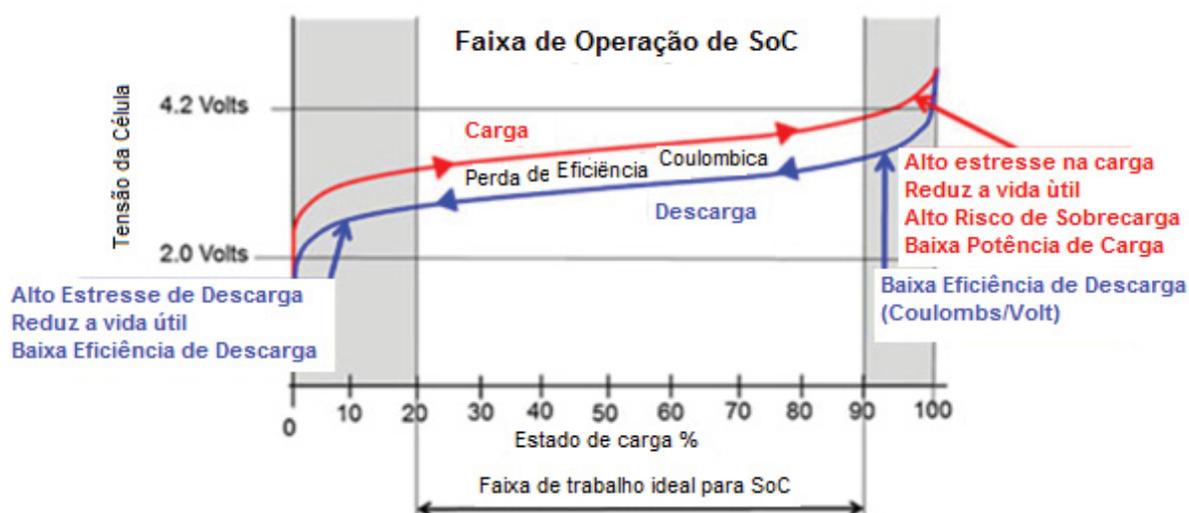
A eficiência elétrica de uma bateria de íons de lítio é medida através do produto da eficiência de tensão pela eficiência coulômbica. A eficiência coulômbica é definida como diferença entre a quantidade de carga que a bateria perde durante a descarga e a que ganha durante a recarga. Já a eficiência de tensão é dada como tensão média durante todo o processo de descarga dividida pela tensão média durante todo o processo de carregamento da célula. Esta eficiência de tensão determina a eficiência elétrica, a qual aumenta com o aumento da temperatura. A eficiência elétrica das baterias de íons de lítio aumenta de 90% (em 0°C) para 98% (em 40°C). Com o aumento da corrente de descarga a eficiência elétrica é reduzida.

Baterias de íons de lítio, de maneira ideal, deveriam ser armazenadas abaixo da temperatura ambiente, mas não deveriam ser congeladas (o que acontece em temperaturas próximas de -40°C). Uma bateria totalmente carregada perde por ano, aproximadamente, 6% de sua capacidade a 0°C, 20% em 25°C, 35% em 40°C e 40% em 60°C. Quando carregada em apenas 50% de sua capacidade a perda de capacidade cai para 2%, 4%, 15% e 25% para as mesmas temperaturas.

A eficiência de uma célula depende do fator carga (recíproco da eficiência coulômbica), DoD, corrente, tempo em carga flutuante, tempo de descarga e outros aspectos. As células secundárias de lítio podem realizar ciclos muito perto de 100% de sua capacidade e a potência total pode ser entregue com até 80% de DoD.

Em relação ao SoC, este pode influenciar de maneira significativa o envelhecimento da célula de íons de lítio tanto na perda de capacidade como na perda de potência fornecida. As restrições de tensões para carga e descarga são essenciais para evitar problemas futuros. A FIGURA 7 mostra os processos de degradação mais comuns que resultam do não gerenciamento do SoC em uma célula.

FIGURA 7 – INTERVALO DE OPERAÇÃO DE SOC E OS PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO DECORRENTES DE UMA OPERAÇÃO NÃO APROPRIADA.



Fonte: *Degradation mechanisms in Li-ion batteries: a state-of-the-art review* (2017).

### 2.2.5 Comportamento Dinâmico

As baterias de íons de lítio respondem rapidamente a uma necessidade súbita de diferentes valores de carga. Enquanto a tensão superior de limite não é atingida, as células podem ser carregadas em altas taxas, relativamente falando (correntes de carga de até 1C são comuns). Se as taxas de corrente forem muito altas, o metal pode ser galvanizado no eletrodo negativo. Este processo pode levar a extinção da capacidade da célula. Pelo mesmo motivo as taxas de carga deveriam ser reduzidas em baixas temperaturas. A taxa máxima de carregamento permitida é sempre menor do que a maior taxa de descarga permitida.

As células de íons de lítio devem ser descarregadas até um certo limite de tensão. Isto para prevenir danos irreversíveis na célula e até mesmo para que recarga não se torne perigosa.

### 2.2.6 Eletrônica Embarcada e Sistemas de Gerenciamento de Baterias

Células de íons de lítio são hermeticamente fechadas e não necessitam de manutenção. Entretanto estas células necessitam circuitos de proteção para prevenir sobrecarga e assim manter um boa vida útil e segurança. Outro motivo da presença dos circuitos é a limitação da DoD em uma certa tensão para evitar danos.

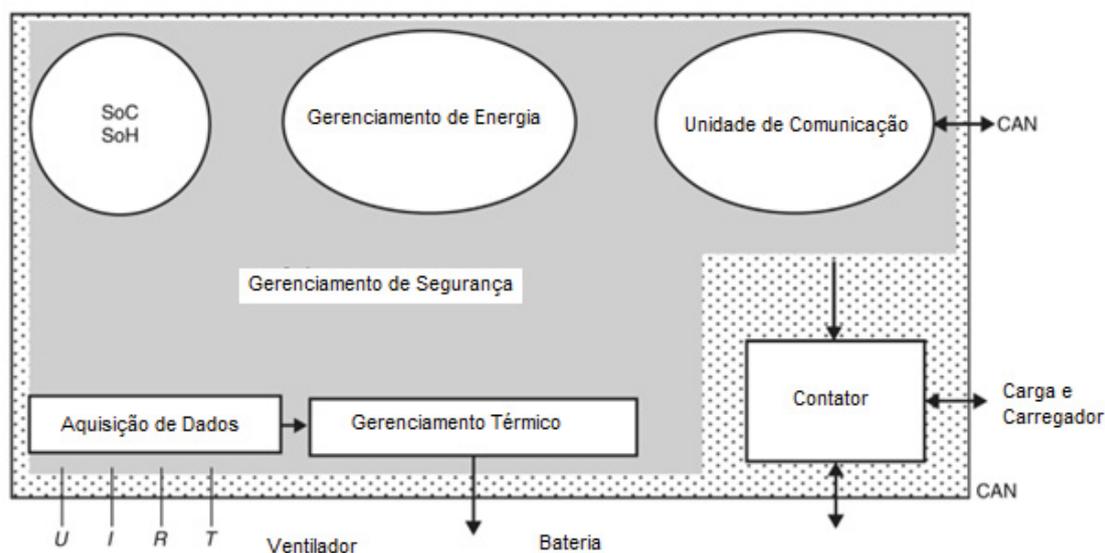
- Prevenir sobrecarga: as baterias secundárias de íons de lítio não toleram sobrecarga. O limite superior de tensão (aproximadamente 4,2 V) não deve ser excedido. Continuar carregando o elemento após a carga total pode ser perigoso. As cargas parciais são mais indicadas para estender a vida útil da bateria. Se a célula não tiver um uso prolongado, estando estacionada, deve-se armazenar as células com SoC de cerca de 40 a 60%.
- As células de íons de lítio nunca devem ser descarregadas abaixo de uma certa tensão limite (aproximadamente 2,7V) para se evitar danos irreparáveis. Esta eletrônica embarcada deve desligar o sistema de baterias em uma certa tensão pré-definida.

O Sistema de Gerenciamento de Baterias (do inglês, *Battery Management System* – BMS) possui quatro funções básicas:

- Distinguir os limites de corrente de carga e descarga;
- Controlar as tensões e temperaturas das células individualmente durante a carga e descarga e gerar um comando para a desconexão do sistema de baterias;
- Permitir níveis de corte interdependentes ou dependentes do tempo;
- Permitir o balanceamento/equilíbrio entre as células de íons de lítio.

A FIGURA 8 apresenta um modelo genérico de BMS.

FIGURA 8 – MODELO GENÉRICO DE BMS



Fonte:

Este dispositivo acima representado é composto de um módulo de potência (para carregar a bateria), que pode ser separado ou um dispositivo que venha integrado ao sistema; um circuito integrado de proteção, que vem conectado em série com a bateria e tem a função de não permitir que a bateria não opere em uma região não segura; se for necessário, um conversor DC/DC para ajustar a tensão não regulada da bateria (que fica entre 3-4,2V), propiciando uma tensão constante na carga; a carga, que converte a energia da bateria em outras formas de energia e um dispositivo indicador do SoC.

Para que não haja sobrecarga e uma descarga demasiadamente profunda todas as células devem ser monitoradas individualmente. Quando sobrecarregada, a célula de íons de lítio não possui um sistema para “gastar” esta energia extra. Assim há danos na célula em função desta sobrecarga.

Em baterias convencionais, com várias células conectadas em série/paralelo, se utiliza o processo de sobrecarga em baixas taxas C para que se possa equiparar a quantidade de carga em todas as células. Já nas baterias de íons de lítio, um circuito auxiliar é necessário para gerenciar esta carga e manter todas as células em um SoC similar. O balanceamento de carga em baterias com múltiplas células aumenta a eficiência e prolonga a vida útil das baterias.

Mesmo com processos de controle rígidos, as células em baterias têm níveis diferentes de auto descarga. A temperatura também pode ser diferente de célula para célula, modificando assim as taxas de auto descarga. No período de descarga, a célula com menor SoC vai determinar a capacidade da bateria. Já no período de carga a célula com maior SoC vai determinar o fim da recarga. Em uma bateria não balanceada, a capacidade será determinada pela célula com menor capacidade de carga. Células que possuem a mesma capacidade são consideradas balanceadas quando suas OCVs possuem os mesmos valores.

### 2.2.7 Razões pelas quais se escolher a bateria com a química $\text{LiFePO}_4$ ou LFP

Este estudo utilizará baterias tipo LFP para realizar os experimentos, mas ainda resta a dúvida de porquê foi escolhida a bateria com química  $\text{LiFePO}_4$  para ser elaborado este estudo sobre um modelo dinâmico de operação. Alguns dados podem ser mencionados e justificar a escolha desta bateria em específico:

- Segurança e Estabilidade: “As baterias LiFePO<sub>4</sub> são mais conhecidas por seu forte perfil de segurança, resultado de uma química extremamente estável. As baterias à base de fosfato oferecem estabilidade térmica e química superior, o que aumenta a segurança das baterias de íons de lítio fabricadas com outros materiais catódicos. As células de fosfato de lítio são incombustíveis, o que é uma característica importante no caso de manuseio incorreto durante a carga ou descarga. Eles também podem resistir a condições adversas.” (STA, 2020).

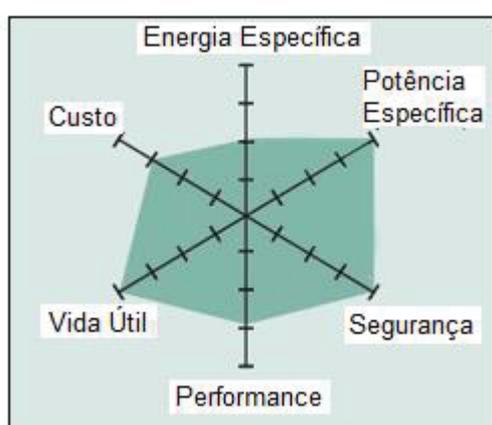
“Quando sujeitas a eventos perigosos, como colisão ou curto-circuito, elas não explodem ou pegam fogo, reduzindo significativamente qualquer chance de dano. Se você está selecionando uma bateria de lítio e antecipando o uso em ambientes perigosos ou instáveis, o LiFePO<sub>4</sub> é provavelmente sua melhor escolha” (STA, 2020).

- Desempenho: “O desempenho é um fator importante na determinação do tipo de bateria a ser usado em um determinado aplicativo. Longa vida, baixas taxas de auto descarga e menos peso tornam as baterias de lítio ferro uma opção atraente, já que se espera que elas tenham uma vida útil mais longa do que as baterias de íons de lítio. A vida útil geralmente é de cinco a dez anos ou mais, e o tempo de operação excede significativamente as baterias de chumbo-ácido e outras formulações de lítio. O tempo de carregamento da bateria também é consideravelmente reduzido, outro benefício de desempenho conveniente” (STA, 2020).
- Eficiência Espacial: “Também vale a pena mencionar as características de espaço eficiente do LiFePO<sub>4</sub>. Com um terço do peso da maioria das baterias de chumbo-ácido e quase a metade do peso do popular óxido de manganês, o LiFePO<sub>4</sub> oferece uma maneira eficaz de usar espaço e peso. Tornando seu produto mais eficiente no geral” (STA, 2020).
- Impacto Ambiental: “As baterias LiFePO<sub>4</sub> não são tóxicas, não contaminam e não contêm metais de terras raras, tornando-as uma escolha ambientalmente consciente. As baterias de chumbo-ácido e óxido de níquel carregam um risco ambiental significativo (especialmente as baterias de chumbo-ácido, pois os produtos químicos

internos degradam a estrutura da bateria e eventualmente causam vazamento)” (STA, 2020).

A FIGURA 9 mostra um quadro resumido dos parâmetros considerados mais importantes para se avaliar na escolha de uma bateria de íons de lítio e, no caso, mostra a bateria de  $\text{LiFePO}_4$ .

FIGURA 9 – PARÂMETROS A SEREM CONSIDERADOS NA ESCOLHA DE UMA BATERIA DE ÍONS DE LÍTIO



Fonte: *Battery University* (2019).

### 2.3 APLICAÇÕES EM SISTEMAS ELÉTRICOS

Os BESSs conectados à rede podem realizar várias funções. Funcionar como uma fonte de energia ininterrupta enquanto houver capacidade suficiente é uma delas. Comercialmente falando, o fornecimento de energia ininterrupta é o maior mercado atualmente para sistemas de armazenamento de energia por baterias. Outros mercados para os BESSs estão sendo desenvolvidos como por exemplo o seu uso no controle da frequência da geração, nivelamento dos picos de demanda e o deslocamento das cargas do sistema elétrico.

As especificações de cada ESS dependem diretamente de como este sistema vai ser utilizado. A capacidade de energia, a potência necessária, o número de ciclos por tempo, a razão entre energia e potência e o SoC característico são características que devem ser especificadas para cada aplicação.

Os BESSs se tornaram muito mais econômicos nos últimos anos e um desenvolvimento ainda maior, especialmente em baterias de íons de lítio, é esperado.

Algumas aplicações podem se tornar muito mais econômicas para os BESSs e os mercados para diferentes aplicações devem crescer consideravelmente nos próximos 10 anos.

Os BESSs são fontes alternativas de flexibilidade e possuem o potencial para substituir a geração convencional que é usada como ferramenta de estabilidade de um sistema elétrico.

### 2.3.1 Controle de Frequência

O controle de frequência é uma ferramenta dos sistemas de potência que serve para manter a demanda e o fornecimento de energia em um determinado equilíbrio. Frequentemente é mencionado como um dos serviços ancilares que são necessários para que se possa operar o sistema elétrico com uma maior confiabilidade.

A frequência do sistema aumenta se a geração de energia elétrica é mais alta do que a demanda e diminui se a demanda é mais alta do que a geração. Pequenas mudanças na frequência da carga não afetam a confiabilidade do sistema, mas grandes mudanças podem danificar equipamentos, diminuir a eficiência do sistema ou até mesmo levar a um colapso do sistema (Baxter, 2006).

BAXTER (2006) afirma que os sistemas utilizados para fornecer um controle efetivo de frequência devem possuir uma alta capacidade de ciclagem. Estes sistemas precisam carregar-descarregar a unidade com uma alta frequência para que as pequenas variações, que acontecem muito rapidamente no sistema, possam ser corrigidas com uma alta eficiência. Em função disso, o número de tecnologias capazes de realizar tal tarefa é limitada.

### 2.3.2 Regulação de Tensão

Manter os níveis de tensão e regulá-los constantemente é necessário para uma maior eficiência na transmissão de energia elétrica e para atender as necessidades dos clientes. Sem uma compensação adequada, estes dois itens podem impactar de maneira negativa a quantidade de energia que pode ser transmitida em um sistema de transmissão.

Para controlar estes níveis de tensão, é necessária a produção de potência reativa que será administrada para eventuais necessidades. Infelizmente, quando se produz potência reativa, o sistema deixa de entregar potência ativa e isto pode ser um problema durante períodos de alta demanda ou picos de potência no sistema. Os BESSs que possuem um menor tempo de reação são ideais para este tipo de aplicação.

Um exemplo da forma de injeção de potência reativa na rede é a utilização dos BESSs para injeção de potência ativa, liberando os geradores síncronos para produção de potência reativa.

### 2.3.3 Gerenciamento de Energia

O gerenciamento de energia se tornou algo tão importante que leva em conta a junção da importância de uma conta de eletricidade com valores menores e prevenir que os preços mais voláteis de energia atinjam as empresas e causem problemas financeiros. Como este estudo é focado nas baterias de íons de lítio, será utilizado o processo de *peak shaving* para exemplificar este gerenciamento pois esta é a aplicação que se encaixa dentro da utilização de BESSs de baterias de íons de lítio.

O *peak shaving* é o processo de reduzir a quantidade de energia comprada da concessionária durante as horas de pico de demanda. Faz-se isso alocando energia nos BESSs, a qual é armazenada em horário fora de pico para ser utilizada nos horários de pico. Sendo assim, empresas e residências utilizam esta energia nestes horários de maior demanda e maior preço para diminuir seus gastos com energia elétrica e, de maneira indireta, diminuir a geração necessária que é fornecida ao sistema de distribuição.

## 2.4 MODELAGEM DE BATERIAS

Depois de caracterizar a bateria a ser utilizada para armazenar energia e decidir qual será a aplicação da mesma, deve-se realizar uma simulação prévia do seu comportamento quando conectadas a rede de distribuição.

Para que se tenha uma ideia de como será o comportamento durante a operação (níveis de tensão, comportamento do SoC, aproximação do SoH) a bateria deve ser modelada, e uma das formas de fazer isso é representa-la por meio de

circuitos elétricos equivalentes, de forma que a resposta do circuito seja semelhante ao da bateria. Assim, o modelo de circuito elétrico equivalente pode ser inserido num *software* que irá receber os dados a respeito dos parâmetros necessários para a modelagem da bateria e, a partir disto, poderá ser simulado o comportamento de tensão da bateria em questão.

Segundo a literatura, existem vários tipos de modelos que podem ser utilizados para se modelar diferentes aspectos da operação de uma bateria. A seguir são apresentados os mais relevantes.

#### 2.4.1 Modelos Matemáticos e Eletroquímicos

Segundo Hinz (2019), estes modelos foram desenvolvidos com o objetivo de correlacionar as variáveis microscópicas com o comportamento macroscópico de uma bateria. Estes modelos representam, com maior ou menor fidelidade os mecanismos fundamentais por trás da operação das baterias. Hinz (2019) ainda afirma que estes modelos são importantes em função da contribuição em relação a aspectos construtivos dos componentes da bateria como, por exemplo, o *design* físico da célula. Para a elaboração destes modelos é necessário conhecer uma grande variedade de parâmetros internos das células eletroquímicas que compõem a bateria, além de aplicar métodos computacionais complexos (em geral as equações diferenciais utilizadas nestes modelos são não lineares e acopladas). Independentemente da precisão que possa ser alcançada com estas simulações, estes modelos não são os preferidos para reproduzir o comportamento elétrico da bateria (HINZ (2019)).

#### 2.4.2 Modelos Térmicos

Sobre os modelos térmicos, Hinz (2019) mostra que estes ganharam notoriedade nos últimos anos em função do uso em larga escala em veículos elétricos e híbridos. Estes modelos são focados na análise da geração, transmissão e dissipação do calor dentro das células. Portanto, como os modelos matemáticos e eletroquímicos, estes modelos também precisam de simulações complexas e de uma parametrização detalhada.

### 2.4.3 Modelos Elétricos

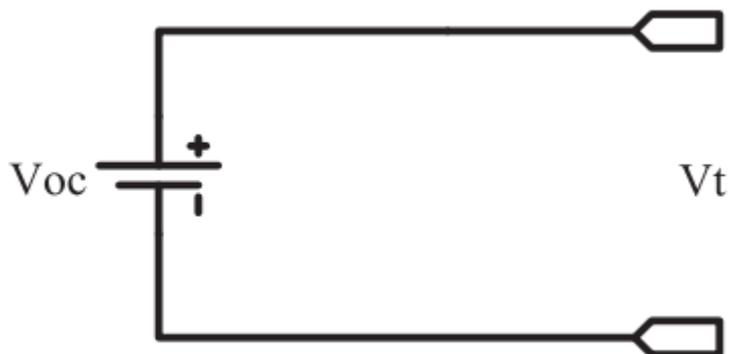
Hinz (2019) descreve que, em comparação com os modelos apresentados anteriormente, os modelos elétricos das baterias são intuitivos e mais simples de serem utilizados. Um aspecto comum a todos eles é que são construídos baseados em circuitos elétricos equivalentes formados por elementos passivos como fontes de tensão, resistores, indutores e capacitores e, em determinadas situações, utilizam elementos mais sofisticados como os denominados de fase constante. Em função disso, são os mais amplamente utilizados nas simulações em *softwares* na engenharia elétrica. A precisão nas respostas em tensão ou corrente e na determinação do SoC (através da integração da corrente no tempo) alcançável com esses modelos é suficiente para simular de maneira eficiente o comportamento das baterias nas aplicações mais comuns relacionadas à engenharia elétrica.

Mousavi G.; Nikdel (2014) informam em sua pesquisa que dentre os muitos modelos existentes de baterias que utilizam circuitos elétricos equivalentes, existem alguns que são clássicos pela sua abrangência e simplicidade como o denominado de Thévenin, além de outros semelhantes como os denominados modelos de tempo de execução ou o que utilizam a impedância como fundamento, que fazem parte do grupo de modelos denominados genéricos (servem para qualquer tipo de bateria).

#### 2.4.3.1 Modelos Simples

O modelo de circuito equivalente mais simples é o modelo denominado ideal, isto porque os parâmetros internos das baterias não são considerados. Este modelo é representado apenas por uma fonte de tensão ideal. Seu uso em simulações é direcionado a casos onde a energia a ser liberada pela bateria é infinita. A FIGURA 10 exemplifica o modelo ideal de uma bateria.

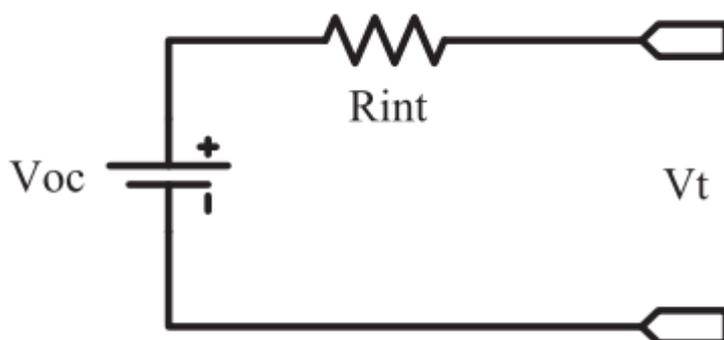
FIGURA 10 – MODELO IDEAL DE BATERIA.



Fonte: Mousavi G.; Nikdel (2014)

Além do modelo ideal, dentro dos modelos simples está um modelo que é mais comumente utilizado, que é o modelo que possui uma fonte de tensão e uma resistência interna ( $R_{int}$ ). A FIGURA 11 exemplifica este modelo.

FIGURA 11 – MODELO DE BATERIA COM UMA FONTE DE TENSÃO E UMA RESISTÊNCIA INTERNA



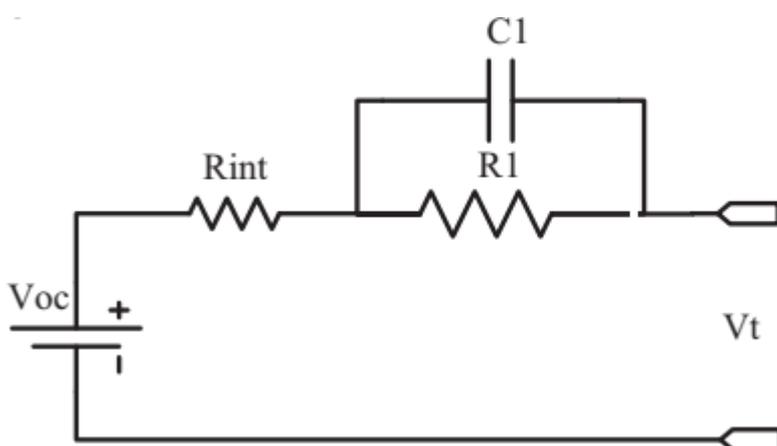
Fonte: Mousavi G.; Nikdel (2014)

#### 2.4.3.2 Modelo baseado em Thévenin

Os fenômenos transitórios das baterias não fazem parte da elaboração dos dois modelos anteriores. O modelo de bateria Thévenin é o passo seguinte na evolução destes modelos. Ele é composto por uma fonte de tensão ideal ( $V_{oc}$ ), uma resistência interna ( $R_{int}$ ), uma segunda resistência ( $R_1$ ) relacionada ao sobrepotencial interno da bateria e um capacitor ( $C_1$ ) que permite considerar efeitos transitórios. Este modelo é mostrado na FIGURA 12. Apesar do avanço na complexidade do modelo

(em relação aos modelos anteriores), possui deficiências que limitam sua capacidade de simular corretamente a operação de baterias. O principal ponto fraco do modelo de Thévenin é de que os valores dos elementos passivos do circuito são considerados constantes, sendo que estes, em realidade deveriam ser dependentes dos valores de estado de carga (SoC), da temperatura, da capacidade de armazenamento, do estado de degradação (SoH), entre outros fatores relacionados à operação da bateria.

FIGURA 12 – MODELO BASEADO EM THÉVENIN



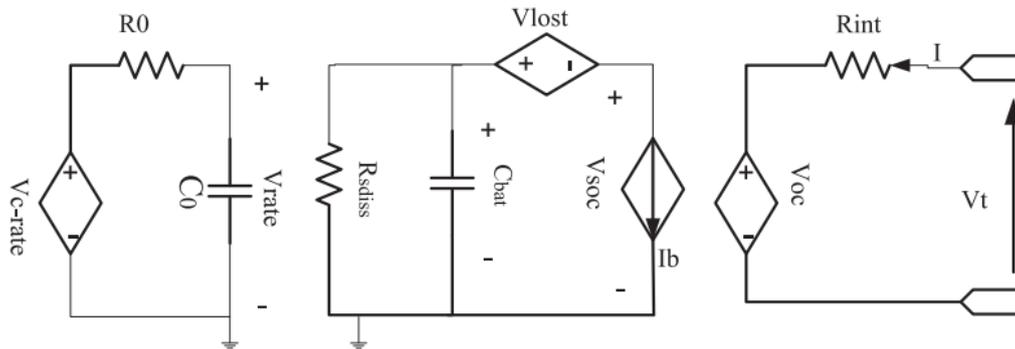
Fonte: Mousavi G.; Nikdel (2014)

#### 2.4.3.3 Modelo baseado no tempo de execução

O circuito elétrico equivalente, apresentado na FIGURA 13, é chamado de circuito equivalente baseado no tempo de execução. É um modelo que possui um maior nível de complexidade para a simulação em tempo real, quando submetido a uma descarga de corrente constante. Este tipo de circuito produz uma resposta transitória limitada.

Neste modelo os seguintes efeitos são considerados: tensão dependente do estado de carga (SoC), a capacidade da bateria depende corrente de descarga, a quantidade total de carga fornecida à bateria depende da frequência de descarga (quanto mais descargas realizadas na bateria menor sua capacidade de fornecer a mesma capacidade de quando ainda estava nova).

FIGURA 11 – MODELO BASEADO EM TEMPO DE EXECUÇÃO

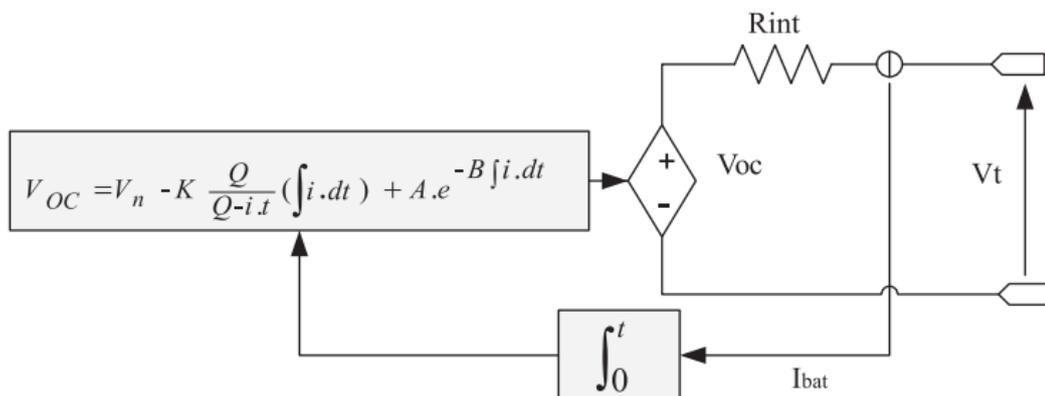


Fonte: Mousavi G.; Nikdel (2014)

#### 2.4.3.4 Modelo genérico de bateria

Este modelo, mostrado na FIGURA 14 consiste em uma fonte de tensão controlada conectada a uma resistência e que pode ser aplicado para modelar vários tipos de baterias eletroquímicas. A parametrização pode ser realizada com as curvas de descarga fornecidas pelo fabricante e pode ser implementado em um *software* de simulação dinâmica como Matlab/Simulink.

FIGURA 12 – MODELO GENÉRICO DE BATERIA



Fonte: Mousavi G.; Nikdel (2014)

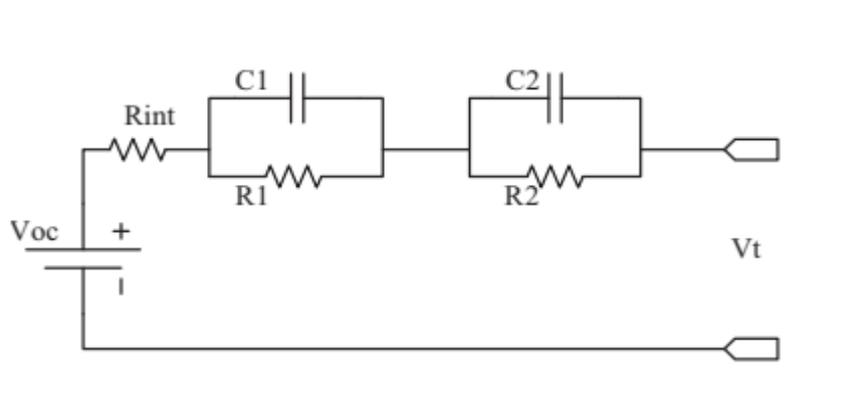
Os valores de resistência interna deste modelo não mudam durante a carga e descarga. Efeitos baseados em temperatura e em relação a lei de Peukert também não são levados em consideração. Além disso, os efeitos de memória e auto descarga também não estão incluídos.

### 2.4.3.5 Modelos baseados em impedâncias

Esta modelagem de circuito equivalente foi utilizada para a elaboração do modelo dinâmico de operação deste estudo pois sua parametrização utiliza métodos não destrutivos e o processo de EIS é bastante sensível e exato para a obtenção dos parâmetros da bateria. Além do que, os circuitos elétricos equivalentes baseados em impedâncias podem variar em complexidade, contendo um, dois, três ou mais ramos RC e ainda podem conter um tipo particular de elemento de fase constante chamado de impedância de Warburg.

A impedância interna da bateria depende dos processos eletroquímicos internos que acontecem dentro das células. Um modelo genérico do modelo baseado em impedâncias é mostrado na FIGURA 15.

FIGURA 13 – MODELO GENÉRICO PARA CIRCUITO EQUIVALENTE BASEADO EM IMPEDÂNCIAS



Fonte: Mousavi G.; Nikdel (2014)

Os ramos RC são adicionados para aumentar a precisão do modelo, ou, um ramo RC pode ser substituído por uma resistência quando a precisão não é importante.

### 2.4.3.6 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

Os valores para os elementos passivos dos circuitos equivalentes baseados em impedâncias são obtidos através de medidas de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (do inglês, *Electrochemical Impedance Spectroscopy* – EIS), o qual consiste na aplicação de uma tensão ou corrente alternada, de frequência simples, à

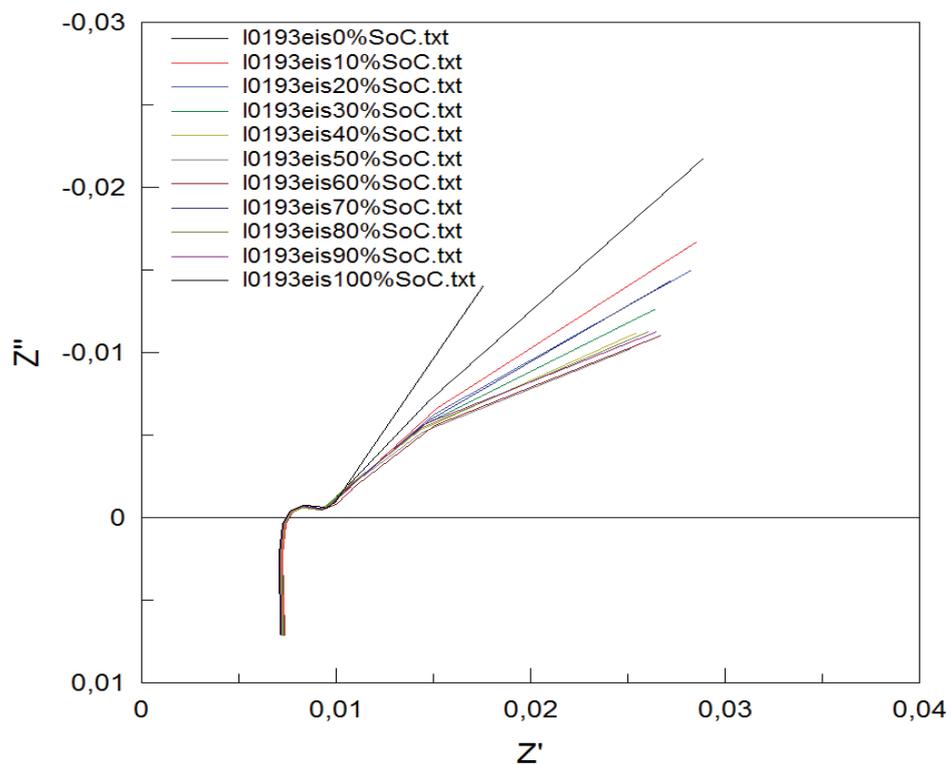
interface da célula de íons de lítio e medir a mudança de fase e a amplitude apresentadas.

Os resultados podem ser representados em gráficos chamados diagramas de Nyquist ou de Bode. No caso dos gráficos de Nyquist, estes consistem em um eixo real que representa a resistência da célula e o eixo imaginário que representa a reatância da célula. Cada ponto nesta área é indicado com a resposta de impedância em uma frequência específica.

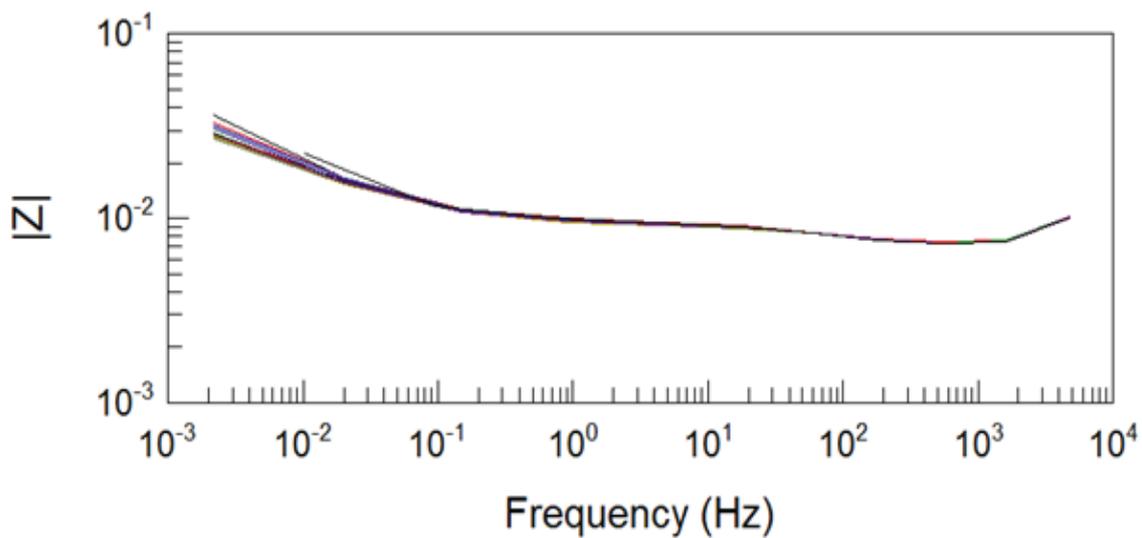
Os dados EIS para células eletroquímicas, como células de combustível, são mais frequentemente representados nos gráficos de Nyquist e Bode. Os gráficos de Bode referem-se a uma representação da magnitude da impedância (ou dos componentes reais ou imaginários da impedância) e do ângulo de fase função de frequência. Como tanto a impedância quanto a frequência geralmente atingem certas ordens de grandeza, elas são frequentemente plotadas em uma escala logarítmica. Os gráficos de Bode mostram explicitamente a dependência da frequência da impedância do dispositivo em teste. Um plano complexo ou gráfico de Nyquist representa a impedância imaginária, que é indicativa do caráter capacitivo e indutivo da célula, versus a impedância real da célula.

A FIGURA 16 mostra um exemplo de diagramas de Nyquist e as FIGURAS 17 e 18 mostram o diagrama de Bode para valores de módulo e o diagrama de Bode para os valores de ângulos das impedâncias, respectivamente. Os dados obtidos para que os gráficos a seguir fossem elaborados foram retirados de uma bateria de íons de lítio de 10Ah, semelhante a que foi utilizada na elaboração deste estudo e o circuito utilizado foi o mesmo da FIGURA 19 (pg. 66). Isto apenas para exemplificar qual o comportamento dos gráficos de Nyquist e dos diagramas de Bode quando são aferidas as impedâncias das baterias utilizando o processo de EIS.

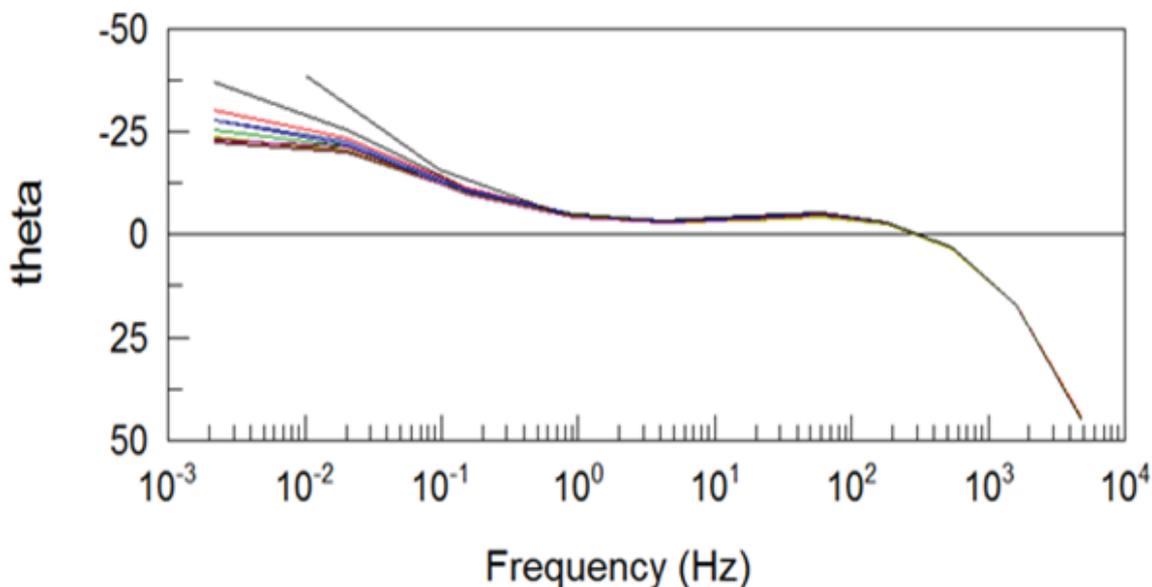
FIGURA 14 - EXEMPLOS DE DIAGRAMA DE NYQUIST PARA VALORES DE IMPEDÂNCIA.



Fonte: O autor (2019).

FIGURA 15 - EXEMPLOS DE VALORES DE  $|Z|$  PARA DIFERENTES VALORES DE FREQUÊNCIA.

Fonte: O autor (2019).

FIGURA 16 - EXEMPLOS DE VALORES DE  $\theta$  PARA DIFERENTES VALORES DE FREQUÊNCIA.

Fonte: O autor (2019).

Neste estudo, o processo de EIS foi realizado utilizando-se uma corrente alternada com uma amplitude de frequência de 10mHz até 10kHz e com valor de 750mA, sendo utilizada uma taxa de amostragem de 30 passos por década e quatro aferições por medida. Além disso, para a aquisição de dados do circuito equivalente, apenas uma faixa de frequência foi utilizada e não toda a faixa de frequência utilizadas nas aferições, isto por que os dados utilizados para a parametrização se concentravam em apenas uma determinada seção do gráfico de Nyquist.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo teve por objetivo apresentar o atual panorama de energia elétrica no mundo, em especial, as energias renováveis modernas (eólica e fotovoltaica), bem como, os aspectos gerais de construção de baterias de íons de lítio, as aplicações em sistemas elétricos e os métodos de modelagem computacional para que se possa simular as baterias e se obter um resultado prévio do seu comportamento dinâmico de operação.

O modelo de impedâncias foi escolhido para ser utilizado pois se trata de um modelo de certa forma exato, o laboratório utilizado para todos os experimentos possui equipamentos habilitados para este tipo de processo

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Os BESSs representam, hoje, uma ótima alternativa para resolver vários entraves que estão presentes nos sistemas de distribuição, podendo ser citados a redução do consumo de energia em horário de pico (do inglês, *peak shaving*), o controle da qualidade de energia e o controle de frequência da rede. Como o item principal dos BESSs, no caso deste trabalho, são as baterias de íons de lítio, este trabalho visa demonstrar como irá se comportar um ESS que está conectado a um sistema de distribuição em específico e como ele será modelado.

Para modelar este BESS foi necessário pesquisar a literatura existente sobre modelagem de baterias de íons de lítio e também espectroscopia de impedância eletroquímica. A pesquisa foi composta de uma base de artigos científicos da área de modelagem de baterias de íons de lítio que foram indicados por contribuição dos professores orientadores deste estudo, pesquisadores da área de baterias de íons de lítio e outros artigos mais que foram obtidos por pesquisas relacionadas aos artigos indicados.

Estes artigos relacionados aos artigos indicados foram obtidos pelo processo de pesquisa no site de periódicos da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) através do seu portal na internet.

Para esta busca no site de periódicos da CAPES foram utilizadas palavras chaves em função da problemática envolvida e da técnica utilizada para a resolução do problema. Para a problemática foram estipuladas as palavras-chave *Lithium Ion Batteries* e *LiFePO4 Batteries*. Já para a técnica foram definidas as palavras-chave *Modelling*, *Equivalent Circuit*, *Electrochemical Impedance Spectroscopy* e *Distribution Network Application*.

Depois deste processo de indicação de artigos e de seleção no portal de periódicos foram obtidos 57 artigos para avaliação detalhada. A seleção por leitura de títulos diminuiu este número para 46 artigos. A próxima etapa foi a leitura de *abstracts*, a qual diminuiu este número para 34 artigos. Após a leitura dos *abstracts*, a leitura das introduções e conclusões foi realizada e o número de artigos foi diminuído para 27. E, finalmente, após a execução da última etapa, que consistiu na leitura dos artigos em sua totalidade, o número final de artigos foi definido para 16.

Os artigos selecionados encontram-se na TABELA 1.

QUADRO 1 - ARTIGOS OBTIDOS APÓS SELEÇÃO DE PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO.

<b>Título do artigo</b>	<b>Periódico</b>
Modelling of Lithium ion cells – a simple equivalent-circuit model approach	Solid State Ionics, 2004
Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and <i>I-V</i> Performance	IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006
Characterization of li-ion batteries for intelligent management of distributed grid-connected storage	IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010
Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I: Experimental Investigation	Journal of Power Sources, 2011
Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. II: Modelling	Journal of Power Sources, 2011
Proposal of novel equivalent circuit for electrochemical impedance analysis of commercially available lithium ion battery	Journal of Power Sources, 2012
Battery storage system for residential electricity peak demand shaving	Energy and Buildings, 2012
Battery Model Parameter Estimation Using a Layered Technique: An Example Using a Lithium Iron Phosphate Cell	SAE 2013 World Congress & Exhibition, 2013
Battery energy storage station (BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations	IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013
A comparative study of lithium ion to lead acid batteries for use in UPS applications	2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2014
Various Battery models for various simulation studies and applications	Renewable and sustainable Energy Reviews, 2014
Analysis of Lithium-Ion Battery Models Based on Electrochemical Impedance Spectroscopy	Energy Technology, 2016
Application of a LiFePO <sub>4</sub> battery energy storage system to primary frequency control: Simulations and experimental results	Energies, 2016
Use cases for stationary battery technologies: A review of the literature and existing projects	Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016
Lithium-ion Battery Dynamic Model for Wide Range of Operating Conditions	2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)
Equivalent circuit model parameters extraction for lithium ion batteries using electrochemical impedance spectroscopy	Journal of Energy Storage, 2018

### 3.1 ANÁLISE DA LITERATURA

As baterias de íons de lítio estão cada vez mais presentes no mercado de eletrônicos portáteis, utensílios e agora, mais do que nunca, em soluções para tornar o sistema elétrico mais confiável e menos congestionado.

Para que se possa ter uma base de conhecimento sobre o comportamento destes bancos de baterias em função de seu uso contínuo, os tipos de materiais utilizados na construção das baterias assim como quais são os materiais que despontam no cenário tecnológico podem auxiliar a escolher de maneira mais adequada qual bateria é a melhor em função de sua utilização. Outro aspecto de grande importância é o estudo dos tipos de processos de degradação assim como exemplos de aplicações, que são importantes para contextualizar e compreender o porquê do uso destes sistemas de armazenamento.

### 3.1.1 Modelagem de Baterias de Íons de Lítio

O estudo publicado por Liaw et al. (2004) sugere um modelo de circuito equivalente com apenas um ramo RC e uma resistência série e, além disso, discorre sobre como se comportam os valores destes elementos passivos em função do SoC e como obtê-los através de equações analisando-se as curvas obtidas nos gráficos de EIS. Após obterem estas curvas, as curvas são analisadas e é mostrada a relação dos valores obtidos com o SoC através de equações e como estes se comportam após mensurados.

Continuando na área de aplicação de EIS para modelagem, Buller et al. (2005) discorrem de maneira geral sobre o processo de espectroscopia de impedância eletroquímica. Através de gráficos mostram o comportamento resistivo, capacitivo e indutivo das baterias em determinadas frequências. Após isso sugerem um modelo de circuito equivalente, realizam sua implementação em *software* e simulam o circuito baseado em uma curva de corrente experimental e atingem, em determinado momento, uma eficiência de cerca de 97%.

Chen; Rincón-Mora (2006) discorrem sobre a variedade de modelos de circuitos equivalentes existentes como os baseados em impedâncias e baseados em Thévenin. Depois de embasar seu estudo, propõem um modelo baseado em OCV (*Open Circuit Voltage* - Tensão de Circuito Aberto), capacidade e resposta transiente. Para elaborar o modelo utilizam centenas de curvas de descarga com vários SoC, correntes, temperaturas e números de ciclos e, depois disso, simulam o circuito e o comparam com uma curva experimental, obtendo erros de no máximo 0,4%.

Sobre o processo de investigação utilizando EIS, Andre; Meiler; Steiner; Wimmer; et al. (2011) discorrem sobre como o processo de EIS é utilizado dentro dos

processos eletroquímicos. Realizam vários experimentos mostrando uma variedade imensa de gráficos que mostram os mais variados comportamentos da EIS em diferentes temperaturas e SoCs. Em suas conclusões inferem observações sobre como as aferições de impedâncias mudam drasticamente em baixas temperaturas e SoCs abaixo de 30%

Na sequência do trabalho anterior, Andre; Meiler; Steiner; Walz; et al. (2011) publicam mais um estudo, desta vez seguindo a linha da modelagem dos circuitos equivalentes, elaborados através dos valores de elementos passivos obtidos pela leitura dos gráficos de EIS. Após análise das curvas de EIS, os autores mostram como obter os valores dos elementos passivos e, após modelar o circuito equivalente, fazem a validação do modelo e a simulação fazendo uma comparação com uma curva experimental. Depois desta comparação, os autores obtiveram erros na casa de 2,3% até 3,3%.

Osaka et al. (2012) propõe uma sistemática para elaboração de um circuito equivalente para baterias de íons de lítio, sendo este circuito composto por indutor, resistores, *constant phase elements* (CPEs) e elementos Warburg. Utilizaram frequências de aferição de impedância entre 10 kHz e 0,1 Hz e utilizaram também o *software* Excel® para realizar o *fitting* dos dados para se obter o menor erro possível.

Ceraolo et al. (2013) mostram outra maneira de modelagem de circuitos equivalentes para baterias de íons de lítio que não seja utilizando o processo de EIS. Mostram como a descarga através de pulsos de acordo com certos níveis de SoC é utilizada neste processo para obtenção das curvas a serem analisadas. Depois de obtidas as curvas de tensão *versus* tempo para descarga, o autor sugere como estipular a quantidade de ramos RC em um circuito equivalente e com obter os demais valores do circuito equivalente. Após isso, realiza uma simulação e compara com uma curva experimental, obtendo erros de no máximo  $3 \times 10^{-3}$ .

Mousavi G.; Nikdel (2014) mostram neste estudo os vários tipos de modelos de circuito equivalentes que são utilizados para modelagem e simulação de baterias. Afirmam que há os modelos simples de baterias, os modelos de Thévenin, os modelos baseados em tempo de execução, modelos genéricos e os modelos baseados em impedâncias. Mostram em suas conclusões que existem modelos mais apropriados para cada um dos diferentes casos de temperatura, estado de carga, tipo de simulação e quais os elementos passivos que podem ser obtidos para elaborar cada um destes modelos de circuito equivalentes.

Kurbach et al. (2016) realizam análises e modelagem de baterias de íons de lítio utilizando o processo de EIS e pelo uso de funções objetivo para otimização da obtenção dos parâmetros. Após a análise dos gráficos obtidos e das simulações realizadas, inferem que os melhores modelos para integração a *smart grids* e redes de distribuição são os modelos que contém um ou dois ramos RC em seu modelo equivalente.

Stroe et al. (2017) mostram um modelo de operação dinâmica para baterias de íons de lítio que pode ser usado em uma grande janela de condições de operação. Afirmam que parâmetros como capacidade, tensão de circuito aberto (OCV) e resistência interna interferem diretamente na modelagem de uma bateria. Através de equações e análise de gráficos realizam a obtenção dos parâmetros necessários para que a modelagem possa ser feita, os comportamentos dos valores de resistência interna, resistência série e capacitância e, após isso, realizam a simulação do modelo comparando-a com uma curva experimental.

Finalmente, Vyroubal; Kazda (2018) mostram um maneira de como extrair os parâmetros para um circuito equivalente de baterias de íons de lítio analisando-se os gráficos obtidos pelo processo de EIS. Ao decorrer do estudo mostram como se comportam as curvas de EIS para cada um dos elementos passivos de um circuito equivalente como resistores, capacitores e indutores. Através de equações, uso de um *software* específico e com o uso das curvas de EIS, extraem os parâmetros para modelagem do circuito equivalente. Após a modelagem realizam uma comparação entre as curvas obtidas por simulação e as curvas obtidas experimentalmente, obtendo resultados muito próximos.

### 3.1.2 Aplicações dos BESSs

Para o início desta seção, Dogger et al. (2011) testam baterias de íons de lítio realizando ciclos de carga e descarga com DoDs específicos. A partir disto inferem que associações de baterias são mais eficientes do que baterias usadas individualmente. Isto porque se o DoD possuir uma janela muito ampla, a degradação será maior. Ainda mencionando a carga, mais capacidade pode ser perdida antes que a bateria não consiga mais atender aos seus requisitos. Outro fato é que se os valores de corrente utilizadas para carga/descarga forem reduzidos, a vida útil da bateria será estendida.

Leadbetter e Swan (2012) apresentam um BESS baseado em baterias de íons de lítio que foi instalado em uma residência canadense seguindo certas restrições e curvas de demanda de energia elétrica, para que suavizasse os picos de demanda. Lembrando que o BESS neste caso não é combinado com qualquer fonte de GD. São realizados cálculos para dimensionar o BESS e estimar sua vida útil de acordo com as características das curvas de demanda da residência escolhida. E como uma das conclusões os autores colocam que o desempenho seria melhorado se houvesse uma fonte de GD associada a este BESS.

Li et al. (2013) dimensionam um BESS formado de baterias de íons de lítio para ser aplicado em um sistema de suavização de intermitência de geração de energia fotovoltaica e geração de energia eólica. Trabalham também com variações no SoC dos BESSs com cinco níveis de carga pré-estabelecidos. Com estes dados os autores trabalharam em métodos de controle do SoC de acordo com as necessidades dos sistemas em questão e um despacho ótimo para os BESSs que foram utilizados.

Já Stan et al. (2014) testam baterias de íons de lítio e VRLA para uso em sistemas de fornecimento de energia ininterrupto (UPS). Os autores testam estas unidades em diferentes temperaturas ambientes e *C-Rates*, realizam medições de IR, de OCV e analisam dados como eficiência e estabelecem uma previsão de tempo de vida. Após isso afirmam que os fatores determinantes para estender a vida útil de uma bateria usada para UPS são a corrente de carga e as condições ambientais onde o sistema de armazenamento está operando.

Malhotra et al. (2016) fazem uma revisão bibliográfica e apresentam exemplos de onde vários tipos de ESSs estão presentes, incluindo os de baterias de íons de lítio. Os dados mostram que mais de 60% de todos os projetos a nível mundial são formados de baterias de íons de lítio e mais de 50% do total estão localizados nos EUA. As aplicações em sua maioria são para arbitragem de preços, fornecer qualidade de energia e regulação de frequência.

Gatta et al. (2016) realiza um estudo sobre a aplicação de baterias de íons de lítio baseadas em  $\text{LiFePO}_4$  para regulação de frequência na ENTSO-e (Rede Europeia de Gestores de Redes de Transporte de Eletricidade). Primeiramente foram realizados ensaios *off line* para se obter as características do sistema e, a partir disso, foi dimensionado um BESS para atender a esta regulação. O BESS foi testado sob vários valores de *C-Rates*, valores de percentagem de variação de frequência e na temperatura de 20°C (sob refrigeração). Conclui que o BESS testado tem factibilidade

e pode ser replicado para usos em outros sistemas, mas sua viabilidade econômica depende de qual mercado energético está inserido.

### 3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Recentemente os estudos nas áreas de modelagem de baterias e de utilização das mesmas em *smartgrids* tem propiciado um grande avanço no desenvolvimento de novos métodos de análise para que se possa simular o comportamento das baterias inseridas nas redes inteligentes.

Este estudo tem por objetivo, depois de toda a revisão bibliográfica aqui apresentada e além dos objetivos já citados na introdução deste estudo, parametrizar uma bateria de íons de lítio, submeter esta mesma bateria a uma curva de corrente randômica e comparar esta curva com a curva obtida por meio de simulação.

A lacuna que este estudo visa preencher é a de que a resposta em frequência de uma bateria, sendo considerada um circuito equivalente, pode ser analisada de forma algébrica, utilizando-se outro método, diferente do utilizado em Stroe et al. (2017).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados para a experimentação das células de íons de lítio assim como os procedimentos operacionais e computacionais para a elaboração do modelo de vida destas células.

### 4.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a elaboração do modelo dinâmico de operação foram:

- 1 célula de íons de lítio, de química  $\text{LiFePO}_4$ , número L0193, com capacidade de 10Ah, da marca UNICOBA;
- Hardware Zahner® juntamente com seu software ThalesXT®;
- Computador DELL® com processador Intel Core i5®, software MatLab® e software Origin®.

#### 4.1.1 Hardware Zahner

Para fazer o processo de ciclagem, o hardware usado foi o equipamento chamado Zahner. Pode-se alternar o carregamento e a descarga de uma bateria combinada com os espectros de impedância de gravação durante as fases de rampa e descanso para analisar os efeitos do envelhecimento nas características da bateria. Os dados de medição DC (Tempo, Potencial, Corrente e Carga) são armazenados como um arquivo de lista de dados ASCII. As gravações de todas as fases são armazenadas em outro arquivo ASCII. Os espectros de impedância gravados são armazenados em conjunto com os arquivos ASCII em uma determinada pasta de projeto. (“© Zahner 01/2012” (2012))

Com o *software* e *hardware* da Zahner, pode-se realizar a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS). Ele pode ser usado para avaliar certas propriedades comportamentais agregadas de uma bateria, como SoC, grau de degradação e falhas de produção. Uma vez que um espectro de impedância de faixa de frequência ampla é analisado nos limites do modelo relevante, ele fornece um conjunto de estimativas de parâmetros que refletem todos os aspectos da operação da bateria. No caso ideal em que o modelo captura todos os aspectos dos espectros de impedância, o conjunto

de valores de parâmetros do modelo representa a melhor compressão de dados e redução de ruído possível para os dados espectrais. (“© Zahner 01/2012” (2012))

#### 4.1.2 MatLab®

A modelagem e simulação de baterias podem ser feitas por diferentes abordagens, de acordo com os recursos do *software* e com o objetivo das simulações. A literatura apresenta alguns trabalhos que utilizam as ferramentas de simulação para analisar a aplicação do BESS em sistemas elétricos de distribuição. Esses trabalhos apresentam como as baterias são modeladas, sua equação equivalente e suas restrições operacionais. As principais restrições operacionais observadas para o BESS são seus limites de SoC e seu tempo de resposta durante a carga e a descarga, ambos relacionados ao fim da vida útil da bateria. (Simulink, 2020)

Este trabalho é focado no modelo dinâmico da bateria, assim, as ferramentas computacionais que serão descritas aqui são focadas na dinâmica da bateria.

O Matlab é uma ferramenta de *software* comumente usada com uma linguagem de programação que expressa matemática matricial e matriz diretamente. O MatLab contém uma caixa de ferramentas denominada Simulink, que é um ambiente de diagrama de blocos para simulação de múltiplos domínios e projeto baseado em modelo. Ele suporta *design* de nível de sistema, simulação, geração automática de código e teste e verificação contínuos de sistemas embarcados. O Simulink fornece um editor gráfico, bibliotecas de blocos personalizáveis e solucionadores para modelagem e simulação de sistemas dinâmicos. Ele é integrado ao MATLAB, permitindo que o usuário incorpore algoritmos do MATLAB em modelos e exporte os resultados da simulação para o MATLAB para análise posterior. A ferramenta Matlab, mais específica com a caixa de ferramentas Simulink, apresenta uma série de aplicações e modelagem para BESS. (Simulink, 2020)

Os modelos de bateria baseados em circuitos equivalentes são preferidos para aplicações de desenvolvimento e controle em nível de sistema devido à sua relativa simplicidade. Os engenheiros usam circuitos equivalentes para modelar o comportamento termoelétrico das baterias, parametrizando seus elementos não-lineares com técnicas de correlação que combinam modelos e medições experimentais via otimização. Usando o Simulink é possível definir um modelo BESS muito detalhado e permite modelar as informações específicas relacionadas às

tecnologias BESS, como sua degradação ao longo dos anos de operação. O primeiro passo no desenvolvimento de um modelo de bateria preciso é construir e parametrizar um circuito equivalente que reflita o comportamento não-linear da bateria e as dependências de temperatura, estado de carga (SoC), estado de saúde (SoH) e corrente. Essas dependências são exclusivas da química de cada bateria e precisam ser determinadas usando medições feitas em células de bateria exatamente do mesmo tipo daquelas para as quais o controlador está sendo projetado (Simulink, 2020)

No caso do Matlab, a caixa de ferramentas do Simulink apresenta a possibilidade de ser integrada à programação de linha de comando ou realizar toda a simulação e controlar somente usando a estrutura do bloco.

#### 4.1.3 Origin®

Origin® é um *software* de análise gráfica e de dados utilizado por cientistas e engenheiros de indústrias, universidades e laboratórios governamentais em todo o mundo. O Origin® oferece uma interface fácil de usar. Os gráficos de origem e os resultados da análise podem atualizar automaticamente os dados ou alterações de parâmetros, permitindo criar modelos para tarefas repetitivas ou executar operações em grande escala a partir da interface do usuário, sem a necessidade de programação. Além disso pode se conectar com outros aplicativos, como MATLAB™ e Microsoft © Excel (Origin, 2019).

## 4.2 MÉTODOS

O modelo a ser utilizado para este estudo foi o modelo baseado em impedâncias. O primeiro detalhe a ser estabelecido é o fato de que este modelo dinâmico foi elaborado com certas condições de contorno. A principal condição é de que ele não ultrapassa o valor de descarga de 1C. Sendo assim, as cargas serão efetuadas em 2,5A (valor máximo estabelecido em *datasheet*) e descargas de até 10A.

Outra condição importante a ser mencionada é de que este é um modelo isotérmico, ou seja, foi realizado em apenas uma temperatura. A temperatura ambiente do laboratório, onde estavam sendo executados os ensaios, era de 25°C.

Para que fosse possível elaborar um modelo dinâmico confiável e que este abrangesse aspectos de impacto relevante no ciclo de operação da bateria, alguns ensaios foram realizados para que se comprovasse se as células de íons de lítio possuíam o comportamento adequado para uma célula de íons de lítio em sua primeira utilização.

#### 4.2.1 Teste de Capacidade

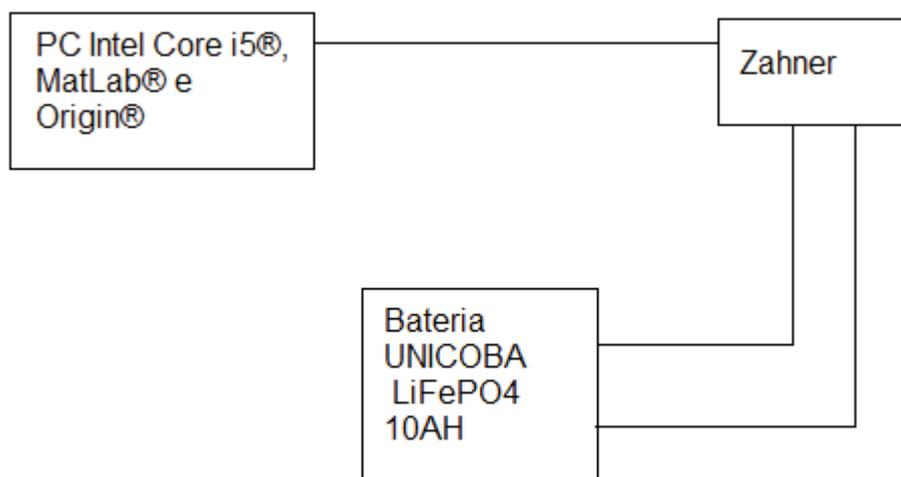
Primeiramente foi realizado um ensaio de capacidade para averiguar se a bateria possuía realmente a capacidade de 10Ah. Os ensaios ocorreram de acordo com a norma IEC 61960-3:2017, seção 7.2 (*International Electrotechnical Commission* (2017)). Esta norma sugere procedimentos, em uma determinada ordem e que seguem uma certa especificidade. Os procedimentos são baseados em uma descarga constante até que se atinja o valor de *cutoff* da tensão da bateria. Após isso ela deve ser carregada e um tempo de espera deve ser mantido. Este procedimento deve ser executado quatro (4) vezes e os ensaios não devem demonstrar uma capacidade menor do que 100% do valor de capacidade indicado pelo fabricante.

Após os testes de capacidade da unidade utilizada (L0193), o valor de capacidade encontrado foi maior do que o apresentado na identificação da bateria, atendendo às exigências da norma utilizada.

#### 4.2.2 Arranjo Experimental

O arranjo experimental organizado para todos os processos de carga, descarga e medição de impedância foi o mesmo em todas as situações. A FIGURA 19 apresenta a organização da bancada experimental.

FIGURA 17 - ARRANJO EXPERIMENTAL PARA OS PROCESSOS DE EIS, PDT, CDT E CURVA DE CARGA.



Fonte: O autor (2019).

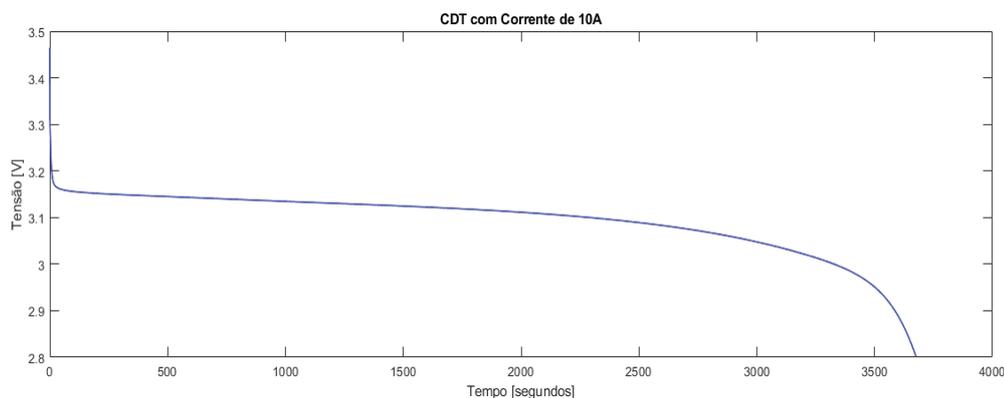
#### 4.2.3 Teste de Descarga Contínua (do inglês, *Continuous Discharge Test* - CDT) e Teste de Descarga de Pulso (do inglês, *Pulse Discharge Test* – PDT)

O processo de CDT é realizado para se obter os dados sobre a descarga contínua da bateria, como o tempo de duração da descarga, qual seria a capacidade total obtida durante este processo e o comportamento da curva de descarga.

O tempo de descarga utilizando-se uma corrente de descarga de  $10^a$ , pelo período de uma hora (1h) atendeu às exigências da norma IEC 61960-3:2017 para o teste de capacidade.

A FIGURA 20 mostra a resposta ao processo de CDT realizado na bateria utilizada neste trabalho.

FIGURA 18 - CDT PARA CORRENTE DE 10A.



Fonte: O autor (2019).

Ceraolo et al. (2013) fornece uma base de conhecimento para que possam ser estabelecidos os intervalos de SoC a serem utilizados quando realizado o PDT e, assim, poder extrair os parâmetros do circuito equivalente a ser simulado.

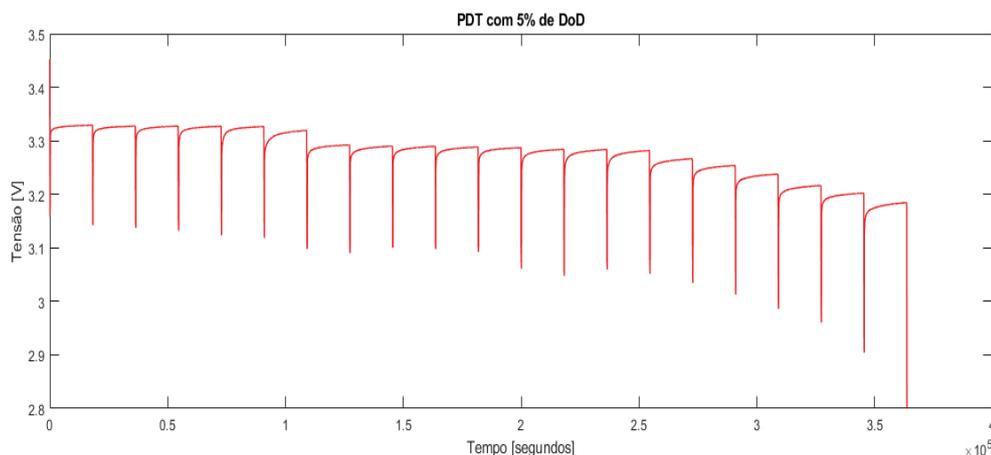
O processo do PDT é utilizado para que se possa estabelecer uma relação entre OCV e SoC. Como a célula em questão tem uma capacidade de 10Ah, foi estimado que para uma descarga total, fossem realizadas descargas em pulso, utilizando-se uma corrente de 10A, com duração de três minutos cada pulso, seguidos de um tempo de relaxação de 5h entre cada pulso de descarga. Isto corresponderia, teoricamente, a descargas de 5% no SoC da bateria que está sendo utilizada.

Foi utilizado um período de 5h de relaxação para se obter os valores de OCV que serão mostrados na FIGURA 33 (pg. 83). Este tempo de relaxação foi estabelecido de maneira empírica, observando-se a estabilidade e variações do OCV em SoC.

O período de amostragem dos testes de CDT e PDT teste foi estabelecido em 1s.

A FIGURA 21 mostra o processo de PDT realizado na bateria utilizada neste trabalho. O resultado obtido nos processos de CDT e PDT foi condizente com o comportamento esperado e estes resultados indicam que o processo de parametrização pode ser iniciado.

FIGURA 19 - PDT PARA A CÉLULA L0193.



Fonte: O autor (2019).

#### 4.2.4 Método de Tratamento de Dados: Filtro de Savitzky-Golay

Como será mostrado no próximo capítulo, a aquisição de dados foi de certa forma ruidosa e não muito fácil de ser analisada. Sendo assim, estes dados necessitaram de tratamento para que fossem utilizados da melhor maneira possível. Uma boa ferramenta a ser utilizada para o tipo de dados deste trabalho é o filtro de Savitzky-Golay.

Savitzky e Golay propuseram um método de suavização (do inglês, *smoothing*) de dados com base na aproximação polinomial local dos mínimos quadrados. Eles mostraram que ao fazer o *fitting* de um polinômio em um conjunto de amostras utilizadas como entradas e, em seguida, avaliar o polinômio resultante em um único ponto dentro o intervalo de aproximação, este processo é equivalente ao processo de convolução discreta de resposta ao impulso (Schafer (2011)). Os filtros passa-baixa obtidos por este método são largamente conhecidos como filtros de Savitzky-Golay. Estes dois pesquisadores estavam interessados em suavizar sinais ruidosos obtidos a partir de analisadores de espectros químicos. Eles demonstraram que o método dos mínimos quadrados reduz os ruídos e ao mesmo tempo mantém o formato e a amplitude das formas de onda submetidas a este filtro. (Schafer (2011))

#### 4.2.5 Modelo Proposto

Esta seção irá tratar de todos os modelos matemáticos que foram utilizados para a formulação do modelo simulado no Software MatLab®/Simulink®.

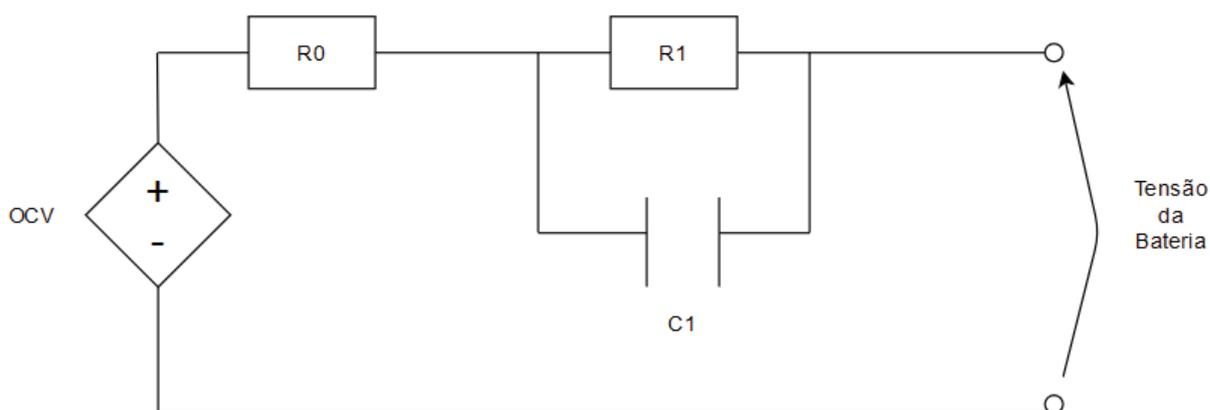
##### 4.2.5.1 Circuito Utilizado

Neste trabalho, um modelo de circuito elétrico equivalente (mostrado na Figura 22), a célula simplificada de Randles (Randles (1947)), é sugerido para fins de simulação e para modelar o comportamento de uma célula de bateria de lítio ferro fosfato - LiFePO<sub>4</sub> (LFP). Kurbach et al. (2016) em seus estudos, sugerem ainda que este modelo com um ramo (1) RC ou dois (2) ramos RC são os mais indicados para se realizar a conexão e uso em *smartgrids*.

O modelo utilizado neste estudo é composto de diferentes partes, como resistência interna DC em série (R0) ou resistência ôhmica, uma fonte de tensão CC e um ramo paralelo RC.

A FIGURA 22 mostra um exemplo de circuito com apenas um ramo RC.

FIGURA 20 – CIRCUITO UTILIZADO PARA MODELAR A CÉLULA DE ÍONS DE LÍTIO UTILIZADA NOS ENSAIOS



Fonte: O autor (2019).

Este modelo foi utilizado em função de que a bateria utilizada para este estudo ainda é relativamente nova (possui uma quantidade de ciclos inferior a 50 ciclos). Por ser nova, ainda não possui a SEI muito bem estabelecida e, portanto, as curvas geradas pela EIS não conseguem reproduzir certos comportamentos que podem levar

a identificação de novos elementos para utilização no circuito equivalente utilizado para modelagem e simulação das baterias (Ruiz et al. (2017)). Sendo assim, as curvas obtidas, que serão mostradas posteriormente, apenas nos fornecem dados para a construção do modelo proposto.

#### 4.2.5.2 Cálculo do Estado de Carga (SoC)

A Equação (1) é usada para o cálculo de SoC, onde SoC0 é o SoC inicial, I representa o valor de corrente e  $\alpha U$  é a capacidade utilizável. Há a entrada nesse subsistema, que é o SoC inicial (SoC0). Uma *lookup table* é usada para caracterizar o efeito da capacidade da bateria.

$$SOC = SOC0 - \int \frac{I*100}{\alpha U*3600} dt \quad (1)$$

#### 4.2.5.3 Cálculo do Potencial de Circuito Aberto (OCV)

O potencial de circuito aberto (do inglês, *Open Circuit Voltage* – OCV) nada mais é do que a tensão nos terminais da bateria, isto em momentos onde não há valores positivos ou negativos de corrente. A bateria está apenas “descansando”.

Os valores de OCV foram estabelecidos de acordo com as leituras dos dados obtidos durante o PDT. Para uma melhor aproximação, o intervalo de PDT foi feito usando-se um intervalo de apenas 5% de SoC, fazendo com que houvesse mais pontos e o modelo fosse o mais preciso possível.

#### 4.2.5.4 Valores de R0, R1 e C1

Como dito anteriormente, neste trabalho foi utilizado o método de EIS para a aquisição de dados referentes aos valores de resistências (R0 e R1) e capacitância da bateria.

Depois de se aplicar o método de EIS para obter os comportamentos das curvas e seus valores, será mostrado como serão obtidos os valores de R0, R1 e C1 através de uma análise matemática.

Como se pode observar na FIGURA 32 (pg. 81), as curvas de impedância reproduzidas pelo processo de EIS, neste caso, não possuem um comportamento uniforme esperado de uma semicircunferência. A partir disto, foi utilizado um processo de extrapolação, utilizando-se o *software* Origin®. O processo de extrapolação visa ampliar o comportamento da curva de impedância para que se possa ser observado um semicírculo e, deste semicírculo, obter os valores de R0, R1 e C1 para cada nível de SoC.

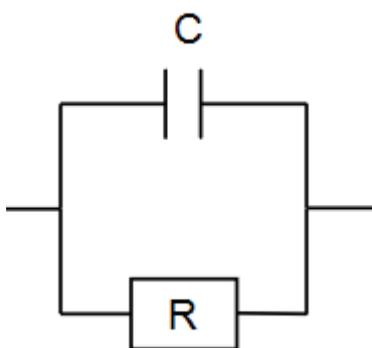
Os semicírculos aparecem nos gráficos de impedâncias de Nyquist simplesmente pela razão de esta ser uma análise realizada no domínio dos números complexos (com eixo Re e Im).

Utilizando os números complexos para representar as correntes e tensões do circuito em questão, uma corrente senoidal pode ser expressa da seguinte maneira, pela Equação 2.

$$I = I_0 \cos \omega t = \text{Re} \{I_0 e^{i\omega t}\} \quad (2)$$

A partir da Equação 2 pode-se realizar o estudo de um circuito RC como o mostrado na FIGURA 23.

FIGURA 21 – CIRCUITO RC PARALELO



Fonte: O autor (2020).

A queda de tensão neste capacitor é dada pela Equação 3.

$$V = \frac{q}{c} = \frac{1}{c} \int i dt \quad (3)$$

Substituindo  $i$  por  $I_0 e^{i\omega t}$  na Equação 3 e resolvendo a integral, obtém-se uma nova equação para a tensão, que é dada pela Equação 4.

$$V = \frac{1}{C} \int \frac{I_0 e^{i\omega t}}{i\omega} = -i \frac{I_0}{\omega C} e^{i\omega t} = -i \frac{I}{\omega C} \quad (4)$$

Como uma impedância pode ser obtida pela equação  $Z = V/I$ , para o capacitor em questão, a impedância é dada pela Equação 5.

$$Z_C = \frac{-i}{\omega C} \quad (5)$$

Já a queda de tensão no resistor é dada pela Equação 6.

$$V = R * I \therefore Z_R = R \quad (6)$$

Logo, segundo a regra para a soma de impedâncias, no caso do circuito mostrado na FIGURA 25 (pg. 73), tem-se:

$$Z_{paralelo} = \frac{Z_C * Z_R}{Z_C + Z_R} = \frac{R}{i\omega C} * \frac{i}{R + \frac{1}{i\omega C}} = \frac{R}{1 + iR\omega C} \quad (7)$$

Depois disto, pode-se separar as partes real e imaginária da impedância dada pela Equação (7), que são dados pelas Equações (8) e (9), respectivamente.

$$Z_{Re} = \frac{R}{1 + R^2 \omega^2 C^2} \equiv X \quad (8)$$

$$Z_{Im} = -\frac{R^2 \omega C}{1 + R^2 \omega^2 C^2} \equiv Y \quad (9)$$

As Equações (8) e (9) são equações paramétricas de uma circunferência. Com isto afirmado, isola-se  $\omega$  em X.

$$X \equiv \frac{R}{1 + R^2 \omega^2 C^2} \rightarrow \omega = \frac{\sqrt{\frac{R}{X} - 1}}{RC} \quad (10)$$

Depois de se isolar  $\omega$  em X na Equação (10), substitui-se o valor encontrado de  $\omega$  na Equação (9) para obtermos a Equação (11).

$$Y \equiv -\frac{R^2\omega C}{1+R^2\omega^2 C^2} \rightarrow Y = -\frac{R^2\left(\sqrt{\frac{R}{X}-1}\right)C}{1+R^2\frac{X-1}{R^2 C^2}} \therefore Y = X\sqrt{\frac{R}{X}-1} \quad (11)$$

Com estes dados em mãos e utilizando o recurso do complemento de quadrados, pode-se mostrar que:

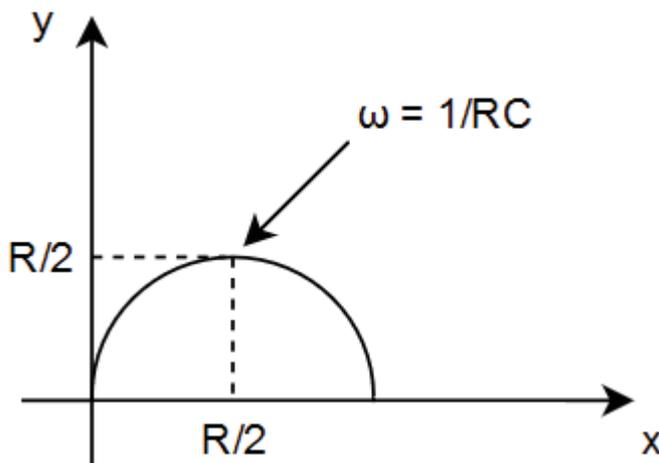
$$Y^2 = \left(\frac{R}{X}-1\right)X^2 \therefore Y^2 = XR - X^2 \therefore Y^2 = -\left(X - \frac{R}{2}\right)^2 + \frac{R^2}{4} \quad (12)$$

$$Y^2 + \left(X - \frac{R}{2}\right)^2 = \frac{R^2}{4} \therefore \left(X - \frac{R}{2}\right)^2 + Y^2 = \frac{R^2}{4} \quad (13)$$

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (14)$$

Analisando a Equação (13) e comparando-a com a Equação (14) (que é uma equação de circunferência), pode-se observar que o mesmo comportamento é encontrado nas duas equações. Sendo assim, pode-se representar os valores da Equação (13) na FIGURA 24.

FIGURA 22 – ASSOCIAÇÃO DE VALORES À EQUAÇÃO 13



Fonte: O autor (2020).

Na representação da FIGURA 26, de acordo com a Equação (13),  $a = R/2$ ,  $b = 0$  e  $r = R/2$ .

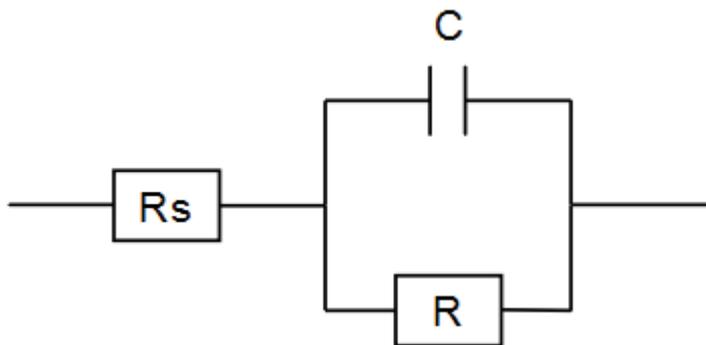
Como se pode observar na FIGURA 26, já é possível a obtenção do valor da capacitância do circuito através da relação matemática  $\omega = 1/RC$ . Sabendo ainda que  $\omega = 2\pi f$ , pode ser realizada a substituição e, com isso, obtemos a relação matemática da Equação (15).

$$2\pi f = 1/RC \quad (15)$$

Sabe-se que há um valor específico de frequência para o ponto  $\omega = 1/RC$  indicado na FIGURA 26, então para cada curva de SOC específico (95%, 90%, 85%, etc.) existe um valor específico de capacitância a ser observado.

Dando continuidade à modelagem matemática, quando se adiciona mais um resistor ao circuito da FIGURA 23 (pg. 70), obtemos a FIGURA 25, com um resistor em série ( $R_s$ ) a um ramo RC.

FIGURA 23 - CIRCUITO RC COM UM RESISTOR SÉRIE



Fonte: O autor (2020).

Analisando o circuito da FIGURA 25 da mesma forma que o circuito da FIGURA 23 foi analisado, obtém-se as Equações (15) e (16) para as partes real e imaginária da impedância do circuito.

$$Z_{Re} = R_s + \frac{R}{1 + R^2\omega^2C^2} \equiv X \quad \omega \quad (15)$$

$$Z_{Im} = -\frac{R^2\omega C}{1 + R^2\omega^2C^2} \equiv Y \quad (16)$$

Como feito na Equação (10), isola-se  $\omega$  na Equação (15) também e, assim, se obtém a Equação (17).

$$\omega = \frac{\sqrt{\frac{R}{X-R_S}-1}}{RC} \quad (17)$$

Depois de obtido o valor de  $\omega$ , substitui-se este valor na Equação (16) e se obtém a relação da Equação (18) a seguir.

$$Y = (X - R_S) \sqrt{\frac{R}{X-R_S} - 1} \quad (18)$$

Como feito na Equação (12), se faz novamente na Equação (19) para que se possa obter uma equação que possa ser novamente relacionada com a equação da circunferência.

$$Y^2 = (X - R_S)^2 \left( \frac{R}{X-R_S} - 1 \right) = (X - R_S)R - (X - R_S)^2 \quad (19)$$

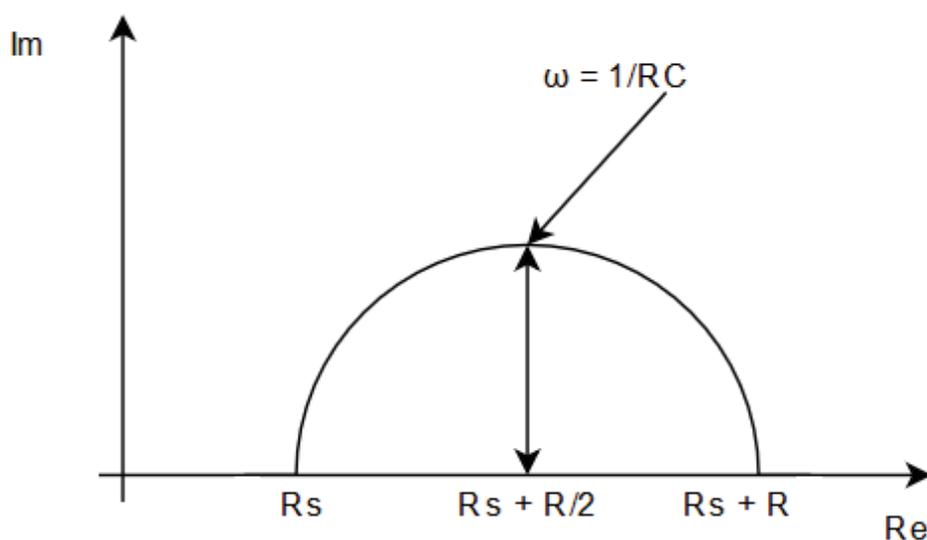
$$Y^2 = XR - R_S R - x^2 + 2xR_S - R_S = -x^2 + x(R + 2R_S) - R_S R - R_S^2 \quad (20)$$

$$Y^2 = -\left(x - \frac{R+2R_S}{2}\right)^2 + \left(\frac{R+2R_S}{2}\right)^2 - R_S R - R_S^2 \quad (21)$$

$$Y^2 + \left(x - \frac{R+2R_S}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}(R^2 + 4RR_S + 4R_S^2) - RR_S - R_S^2 = \frac{R^2}{4} \quad (22)$$

Com os dados obtidos durante esta modelagem matemática, mais especificamente da Equação 22, pode-se inferir que há uma semicircunferência deslocada em R para a direita e centrada em  $\frac{R+2R_S}{2}$  e com diâmetro de  $(R + R_S) - R_S$ . A FIGURA 26 exemplifica de maneira clara e objetiva esta afirmação.

FIGURA 24 – OBTENÇÃO DOS VALORES DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE ATRAVÉS DE MODELAGEM MATEMÁTICA

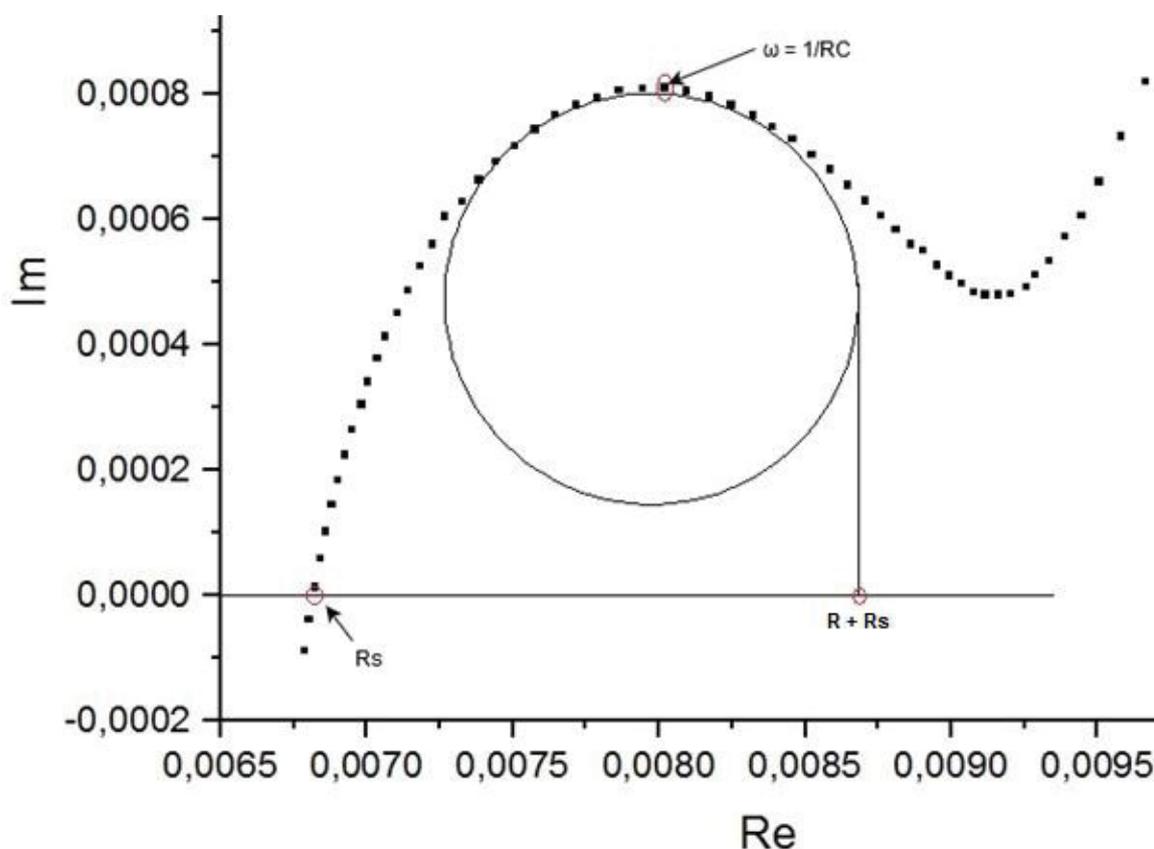


Fonte: O autor (2020).

Depois de elaborado o processo de obtenção dos parâmetros do circuito equivalente a ser utilizado, houve ainda o processo de extrapolação para que pudessem ser obtidos os valores destes parâmetros.

Como se sabe que as curvas de impedância obtidas pelo processo de EIS não formam um semicírculo perfeito, há a necessidade de se extrapolar as curvas para se obter os valores de  $R$ ,  $R_s$  e  $C$ . Segue um exemplo deste processo, mostrado na FIGURA 27, realizado com o auxílio do *software* Origin®.

FIGURA 25 – EXEMPLO DO PROCESSO DE EXTRAPOLAÇÃO PARA OBTENÇÃO DOS VALORES DE R,  $R_s$  E C.



Fonte: O autor (2020).

Este processo foi replicado para todas as curvas de EIS obtidas da bateria utilizada. Depois de obtidos todos os valores de parâmetros para os SOC correspondentes, montou-se uma tabela para ser utilizada pelo *software* Simulink®.

Comparando-se as FIGURAS 26 e 27 não há uma correlação exata entre as posições dos pontos de referência para a obtenção dos valores dos elementos do circuito equivalente. Sendo assim, correlacionando as duas figuras, pode-se estabelecer que:

- O valor de  $R_s$  é obtido onde a curva de impedância cruza o eixo real;
- O valor de R é obtido traçando-se uma reta tangente a extrapolação da curva de impedância e, com esta reta tangente, realiza-se o cruzamento do eixo real novamente;
- O valor de capacitância do circuito equivalente se dá no ponto máximo de frequência  $f$  que deverá ser convertido em frequência angular  $\omega$  e assim o valor de capacitância poderá ser obtido.

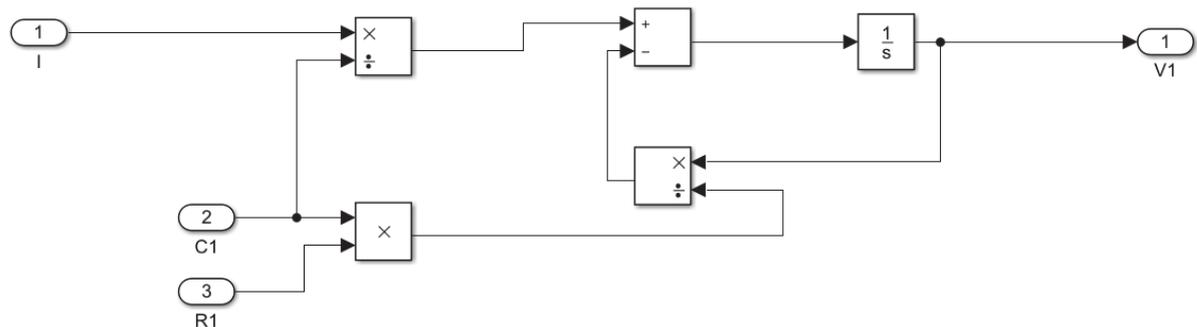
#### 4.2.5.5 Tensão no Ramo RC

As tensões dos ramos RC correspondem à resposta transitória da tensão da bateria. Para estabelecer o subsistema, o circuito do ramo RC é analisado. Usando o domínio de Laplace, a tensão do ramo RC pode ser expressa conforme a Equação 23.

$$I = \frac{V}{R} + sCV \therefore \frac{I}{sC} = \frac{V}{sCR} + V \therefore V = \left(\frac{1}{s}\right) \left[\frac{I}{C} - \frac{V}{RC}\right] \quad (23)$$

A FIGURA 28 mostra como foi realizado este cálculo, utilizando o diagrama de blocos no *software* Simulink®.

FIGURA 26 - CÁLCULO DA TENSÃO V1 PARA O MODELO DINÂMICO DE OPERAÇÃO DA CÉLULA DE ÍONS DE LÍTIO.



Fonte: O autor (2020).

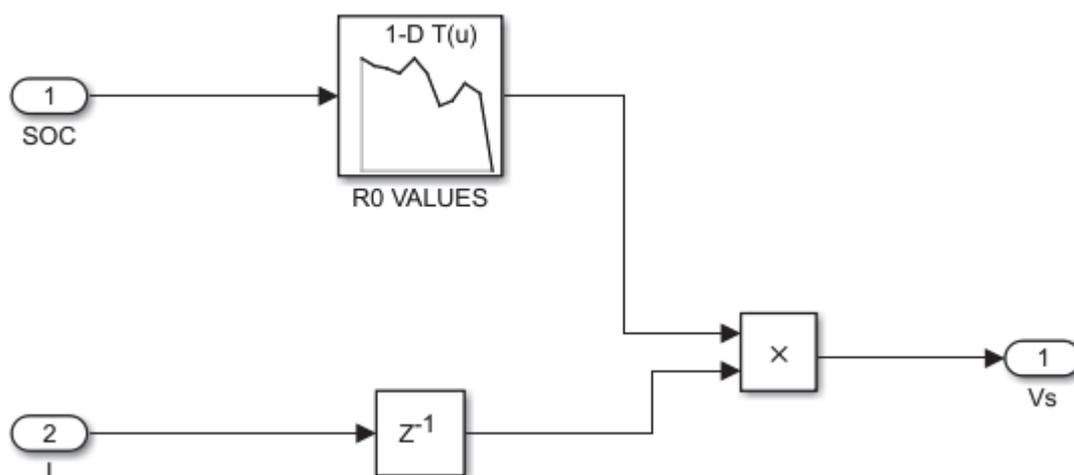
#### 4.2.5.6 Tensão Resistor Série

$V_{RS}$  representa a queda de tensão da resistência interna DC ( $R_0$ ). O valor de  $V_{RS}$  pode ser calculado usando a Equação 24. Nesta seção, o valor de  $R_0$  depende do SoC. Portanto, uma *lookup table* é usada para representar o valor de  $R_0$ . O valor mais adequado para  $R_0$  será determinado com o método de pesquisa de interpolação-extrapolação, utilizado pelo *software* Simulink®.

$$V_{RS} = I * R_S \quad (24)$$

Devido a problemas numéricos intrínsecos do software, um *delay* ( $z^{-1}$ ) foi utilizado para que estes problemas fossem resolvidos. A FIGURA 29 mostra como foi calculada a queda de tensão no resistor série R.

FIGURA 27 – CÁLCULO DA TENSÃO NO RESISTOR SÉRIE R0



Fonte: O autor (2020).

#### 4.2.5.7 Saturadores

Dois blocos de saturação foram utilizados na elaboração do diagrama de blocos deste modelo dinâmico de bateria de íons de lítio. O bloco de saturação apenas delimita valores máximos e mínimos para um certo parâmetro que está sendo utilizado. No caso do circuito em questão, há um saturador para o nível do estado de carga (SoC) e outro para o nível de tensão de saída a bateria. Os valores de SoC devem estar entre 0% e 100% e os valores de tensão de saída bateria devem estar entre 2,8V e 3,6V (valores estes especificados em *data sheet*).

#### 4.2.5.8 Fontes Controladas de Tensão e Corrente

No diagrama de blocos utilizado para modelar a bateria, foi utilizada uma fonte controlada de tensão. Esta fonte serve para manter a tensão da bateria sempre em 2,8 V. Isto se faz por que a bateria de íons de lítio (especificamente esta amostra que está sendo modelada) não deve possuir a tensão menor do que o valor de 2,8V em

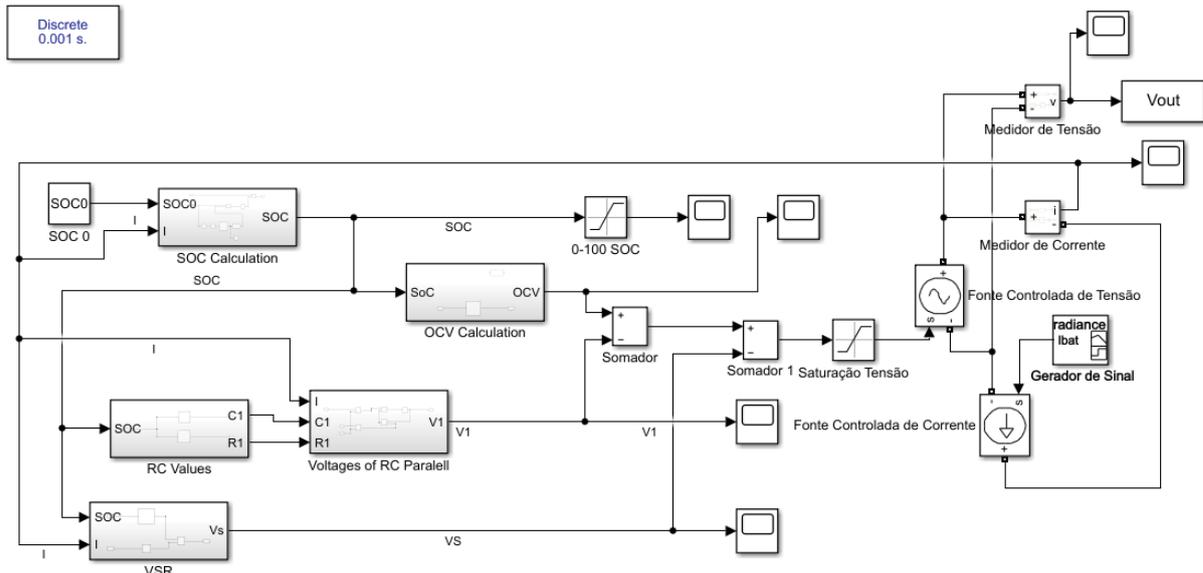
função da alta degradação que pode ocorrer se for descarregada a níveis de tensão inferiores a este valor de tensão.

Já a fonte controlada de corrente está sendo utilizada apenas para realizar a conversão do gerador de sinal e assim injetar os valores de corrente desejados para que a simulação possa ser realizada.

#### 4.2.5.9 Diagrama de Blocos Completo Simulink

Com a demonstração, anteriormente, de todas as partes do diagrama blocos, o mesmo, completo, pode ser observado na FIGURA 30.

FIGURA 28 – DIAGRAMA DE BLOCOS COMPLETO PARA O MODELO DE OPERAÇÃO DINÂMICO DA CÉLULA DE ÍONS DE LÍTIO



Fonte: O autor (2020).

#### 4.2.5.10 Tensão Terminal da Bateria

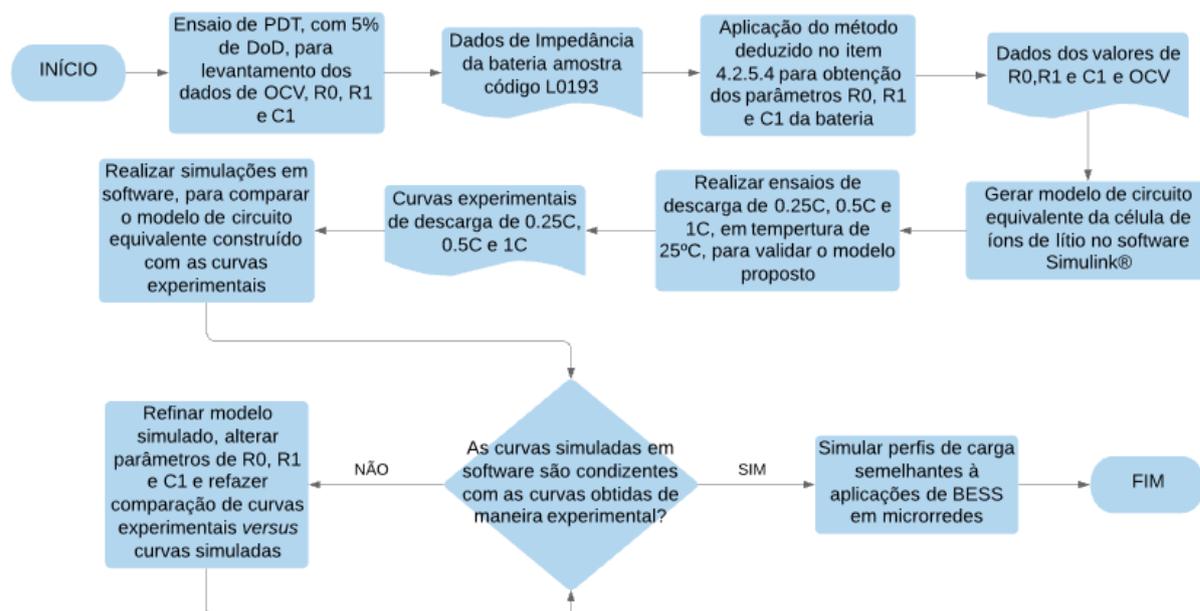
Com todas as equações dos itens anteriores, a tensão nos terminais da bateria é dada pela Equação 25:

$$V_{Battery} = OCV - V_{RC} - V_{RS} \quad (25)$$

#### 4.2.6 Ensaios para Formação e Validação do Modelo Proposto

Para a formação e validação do modelo proposto, os ensaios realizados seguiram o fluxograma mostrado na FIGURA 31.

FIGURA 29 – FLUXOGRAMA DE TRABALHO PARA ELABORAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DINÂMICO DE BATERIA DE ÍONS DE LÍTIO



Fonte: O autor (2020).

Para o levantamento dos dados para alimentar o modelo no software Simulink, foi realizado um PDT de 5% de DoD na célula de íons de lítio utilizada. Depois de cada pulso, uma EIS foi realizada e um diagrama de Nyquist foi gerado. Com este diagrama de Nyquist, os valores de  $R_0$ ,  $R_1$  e  $C$  foram obtidos e, com estes dados, o modelo foi alimentado para que as simulações pudessem ser realizadas.

Também foram realizados ensaios de carga e descarga com valores de 0.25C, 0.5C e 1C na mesma célula de íons de lítio para que, com estas curvas, se pudesse validar o modelo e confirmar se o modelo pode ser utilizado para representar uma aproximação do modelo dinâmico de operação da bateria.

### 4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Esta seção teve por meta demonstrar os materiais, processos e embasamento teórico utilizados para que fossem obtidos os parâmetros necessários para a construção de um modelo de operação dinâmico de uma bateria de íons de lítio que fosse capaz de reproduzir o comportamento da sua operação em tempo real.

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

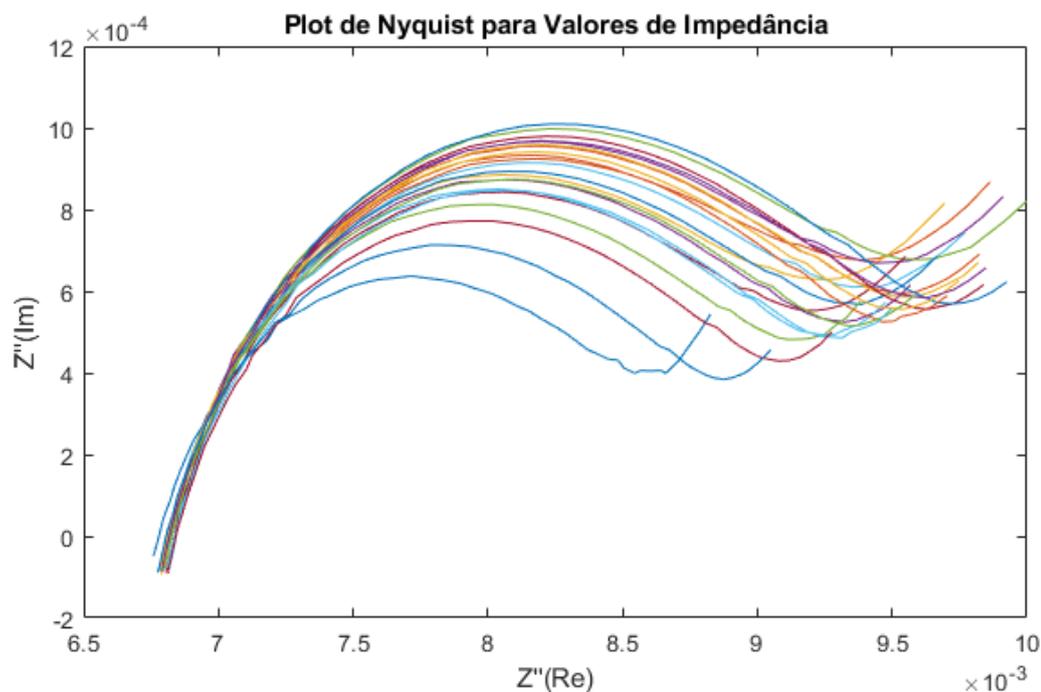
Neste capítulo serão apresentados os dados de parametrização do circuito equivalente da bateria e, em seguida, uma análise crítica será realizada.

### 5.1 RESULTADOS

Como estabelecido no fluxograma no capítulo anterior, os primeiros resultados obtidos foram os resultados provenientes do processo de EIS que foi aplicado à célula durante a realização da descarga através do PDT. Estes dados de EIS foram obtidos aplicando-se uma corrente de descarga de 10A em intervalos de três (3) minutos e tempo de relaxação de oito (8) horas.

Seguem, na FIGURA 32, todas as curvas dos valores das impedâncias, de 0% a 100% de SoC. Estas são dadas pelo plot de Nyquist, contendo valores do eixo real  $Z'$  (Re) e eixo do eixo imaginário  $Z''$  (Im).

FIGURA 30 - CURVAS DE IMPEDÂNCIA OBTIDAS ATRAVÉS DO PROCESSO DE EIS.



Fonte: O autor (2019).

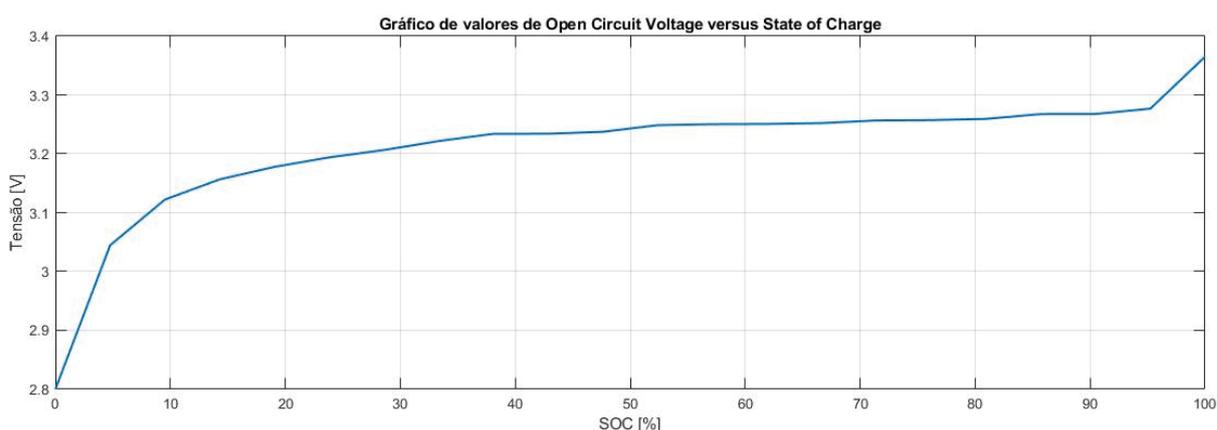
Aparentemente, os gráficos presentes são iguais, mas não são. No semicírculo formado por cada um, alguns tem este um pouco mais côncavo, outros são

ligeiramente mais elípticos, outros estão mais deslocados para a direita assim como outros estão mais à esquerda. Isto nada interfere nesta análise pois trata-se de um comportamento usual para os valores de impedância em função do SoC. Então, pode-se inferir que as curvas de EIS estão dentro da normalidade.

Depois de organizados e filtrados, os dados de impedância foram submetidos ao método matemático descrito no capítulo anterior e ao uso do filtro de Savitzky-Golay e, com isto, foram obtidos os dados dos valores de  $R_0$ ,  $R_1$  e  $C_1$ . Os valores de OCV não necessitaram tratamento pois comportaram como esperado comparando-se com material encontrado na literatura.

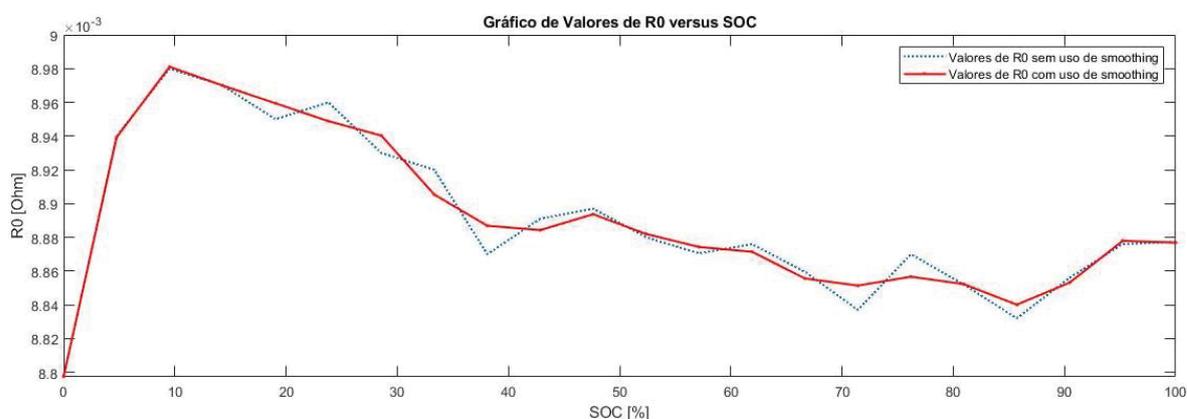
Os valores de OCV,  $R_0$ ,  $R_1$  e  $C_1$  e são mostrados, respectivamente, nas FIGURAS 33, 34, 35 e 36.

FIGURA 31 - VALORES DE OCV PARA DIFERENTES ESTADOS DE CARGA (SoC).



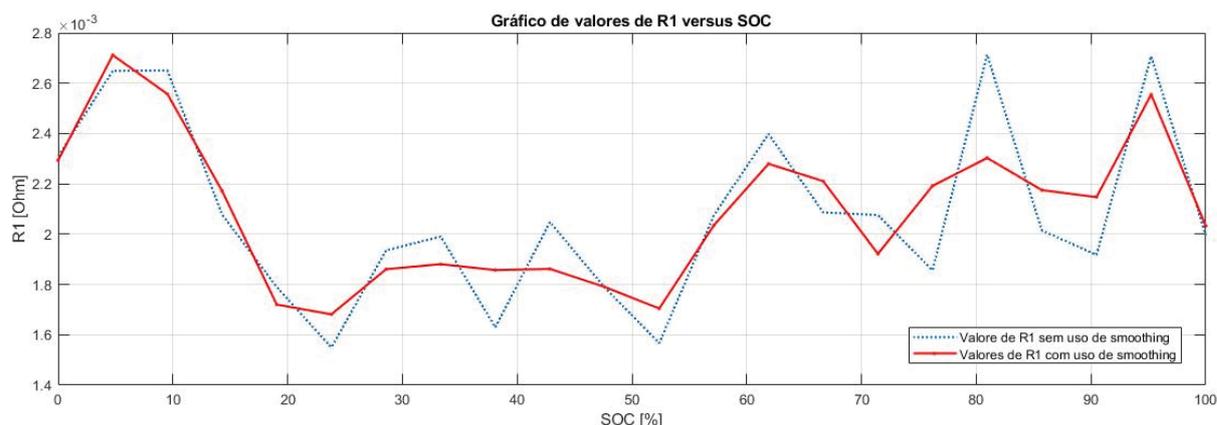
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 32 - VALORES DE  $R_0$  PARA DIFERENTES ESTADOS DE CARGA (SoC).



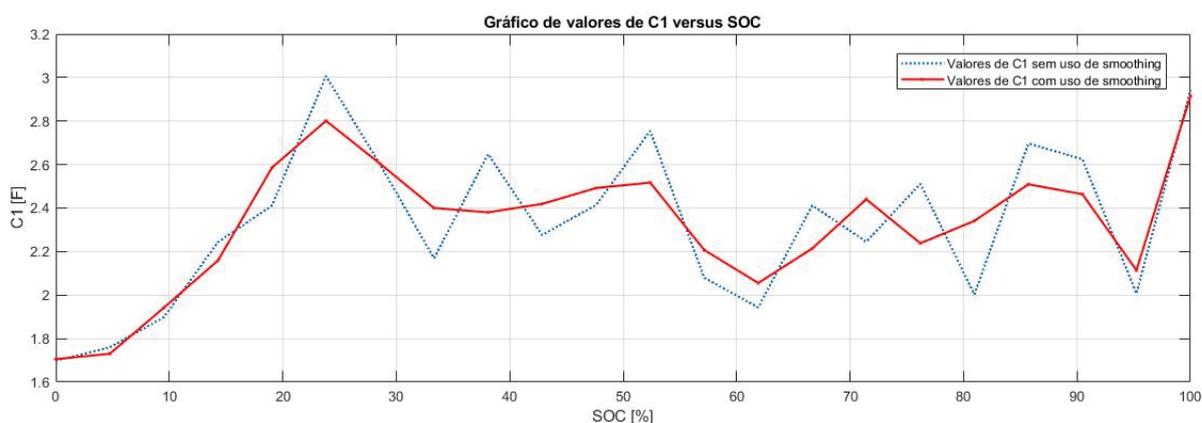
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 33 - VALORES DE R1 PARA DIFERENTES ESTADOS DE CARGA (SoC).



Fonte: O autor (2019).

FIGURA 34 - VALORES DE C1 PARA DIFERENTES ESTADOS DE CARGA (SoC).

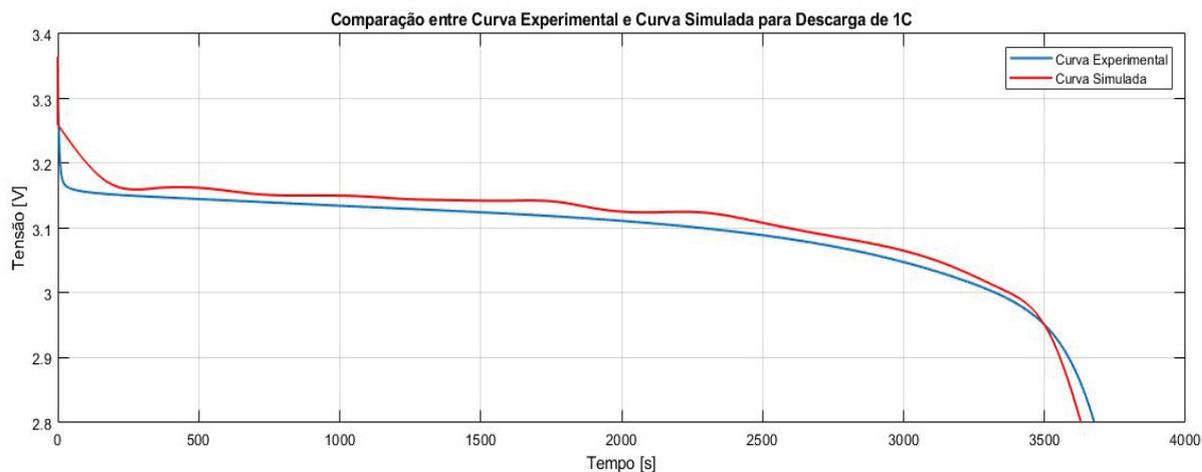


Fonte: O autor (2019).

Os dados apresentados nas FIGURAS 34, 35 e 36 se mostram ruidosos e divergentes do esperado quando analisada a literatura em que se baseou este trabalho. Pode-se dizer que, de certa forma, serão um pouco mais difíceis de serem analisados.

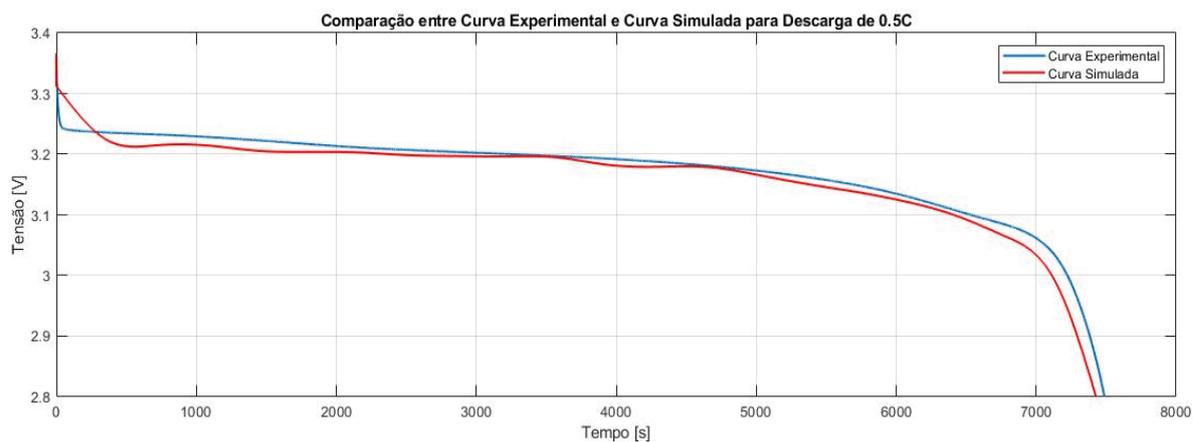
Como primeiro passo para validação do modelo construído, foi necessário comparar as curvas obtidas experimentalmente para as descargas de 1C, 0,5C e 0,25C com as curvas simuladas em *software*, depois de alimentado com os dados necessários. As três curvas mencionadas se encontram, respectivamente, nas FIGURAS 37, 38 e 39.

FIGURA 35 - GRÁFICO DE TENSÃO VERSUS TEMPO PARA DESCARGA DE 1C.



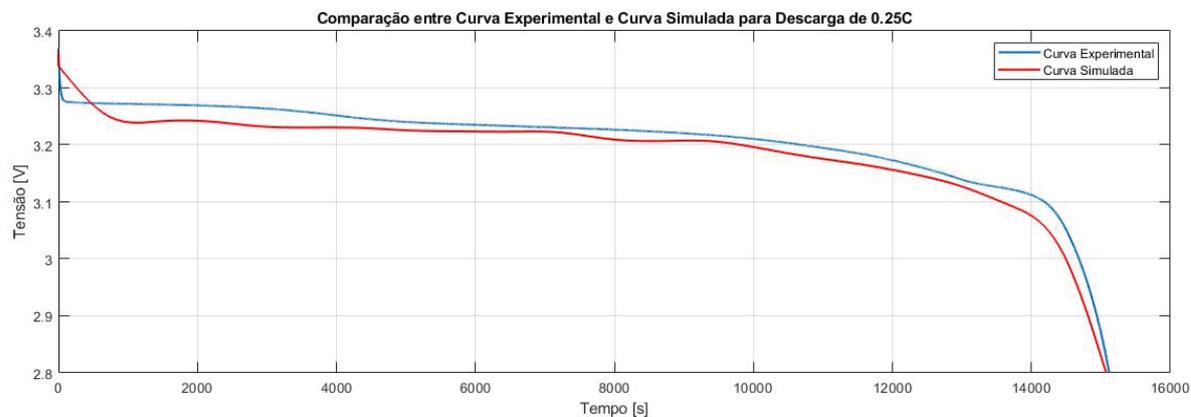
Fonte: O autor (2019).

FIGURA 36 - GRÁFICO DE TENSÃO VERSUS TEMPO PARA DESCARGA DE 0.5C.



Fonte: O autor (2019).

FIGURA 37 - GRÁFICO DE TENSÃO VERSUS TEMPO PARA DESCARGA DE 0.25C.

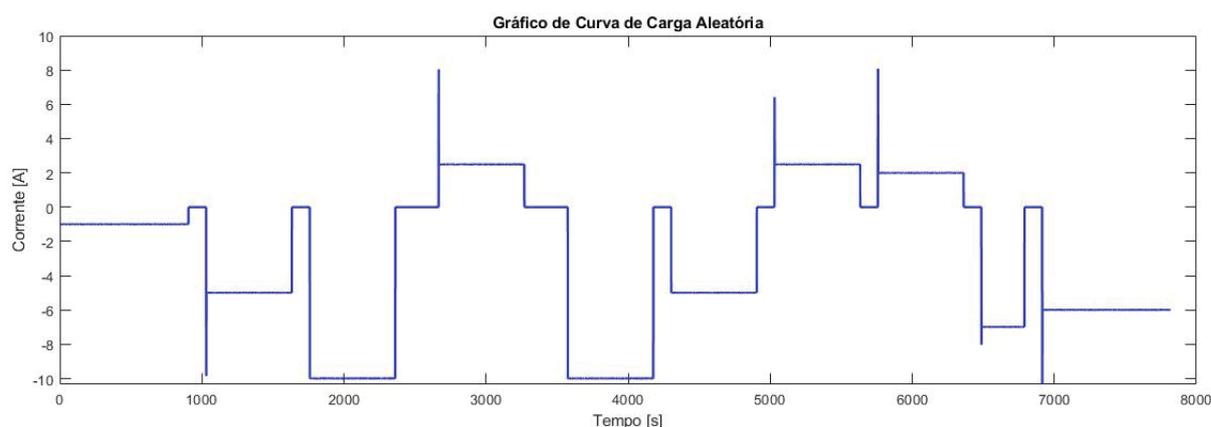


Fonte: O autor (2019).

Os dados de comparação para as descargas de 1C, 0.5C e 0.25C se mostraram promissores e, com estes dados em mãos, foi possível alimentar o modelo no *software* Simulink® e assim simular uma curva de carga aleatória para que se pudesse observar o comportamento da curva de tensão e realizar a comparação entre a curva simulada e a curva obtida experimentalmente.

A curva de carga aleatória segue na FIGURA 40.

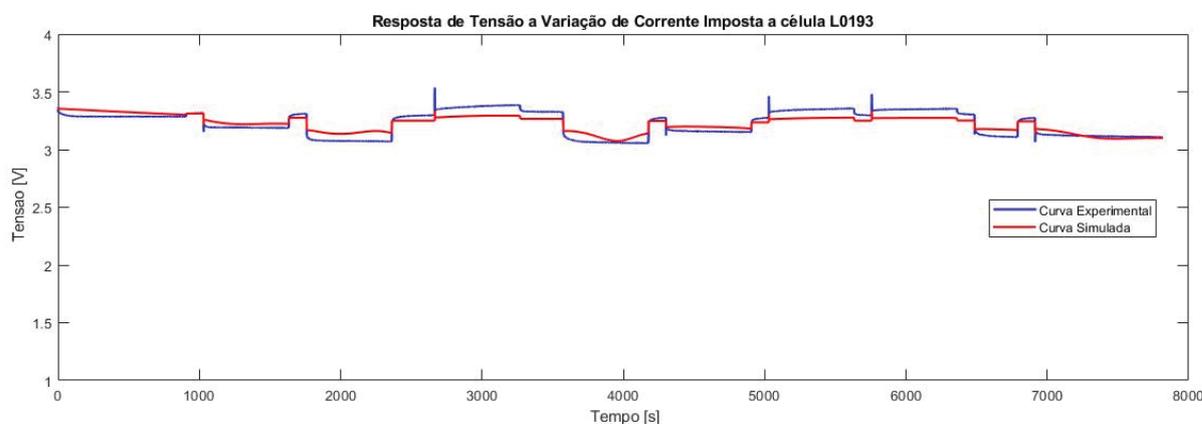
FIGURA 38 - CURVA DE CARGA ALEATÓRIA APLICADA A BATERIA L0193.



Fonte: O autor (2019).

Após aplicar esta curva de carga aleatória ao modelo aqui construído, a resposta obtida experimentalmente junto da resposta obtida através de simulação se encontra na FIGURA 41.

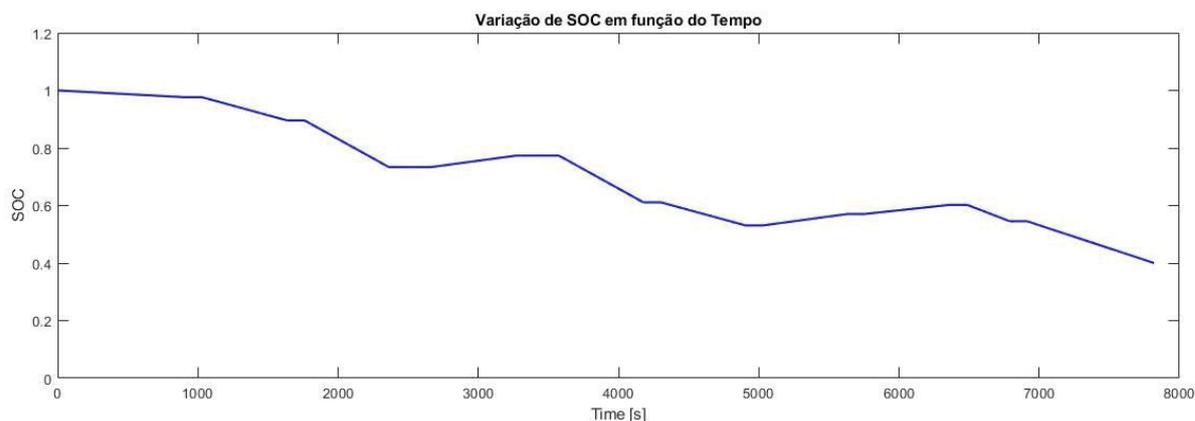
FIGURA 39 - RESPOSTA DE TENSÃO DA BATERIA EM RELAÇÃO A VARIAÇÃO DE CORRENTE DE CARGA.



Fonte: O autor (2019).

Além do comportamento dos valores de tensão, foram monitorados também os valores de SOC em função do tempo. A variação destes valores se contra na Figura 42.

FIGURA 40 - VARIAÇÃO DOS VALORES DE SOC EM FUNÇÃO DO TEMPO.



Fonte: O autor (2019).

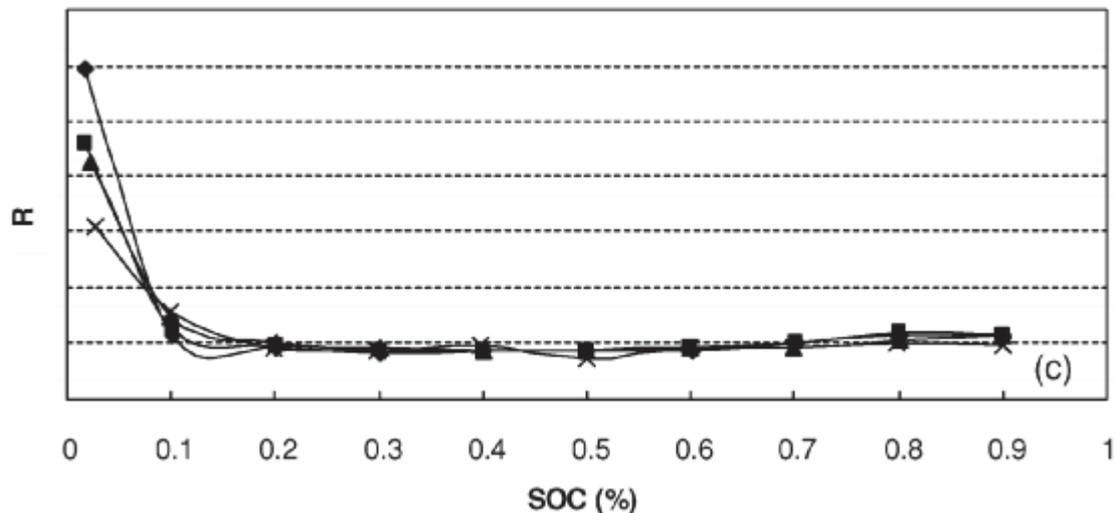
## 5.2 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Seguidas dos resultados, coloca-se em pauta as análises em relação aos valores de R0, R1, C1, as curvas de descarga constantes e a curva de carga aleatória.

A FIGURA 43 mostra uma tendência de encolhimento e estabilização nos valores de R0 e R1 em função do aumento do SoC. Sendo assim, os valores de R0 mostrados na FIGURA 34 seguiram em partes uma tendência de diminuição, mas ainda assim apresentando variações não esperadas para o comportamento da curva. Os valores de R1 obtidos experimentalmente, mostrados na FIGURA 35, não seguiram tendência alguma e se mostraram totalmente desconexos, mesmo sendo monitorados em intervalos de descarga regular e obedecendo aos tempos de descanso para estabilização de reações químicas.

A FIGURA 43 foi utilizada apenas para demonstração de tendência dos valores de R0 e R1, não possuindo valores.

FIGURA 41 - COMPORTAMENTO ESPERADO PARA A CURVA DE VALORES DE R0 E R1.

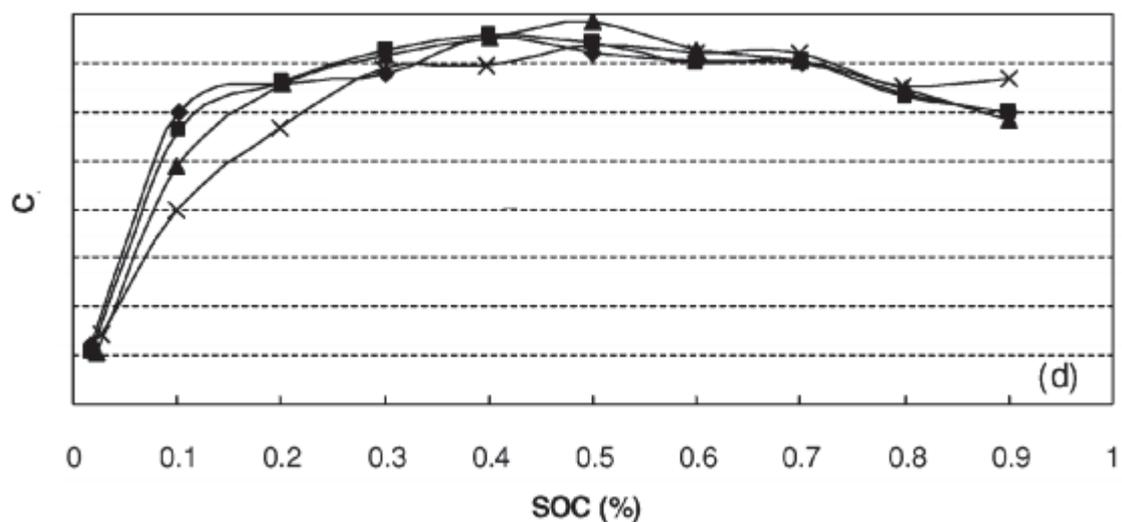


Fonte: Adaptado de Chen; Rincón-Mora (2006).

A FIGURA 44 mostra uma tendência de aumento e estabilização nos valores de C1 em função do aumento do SoC. Portanto, os valores de C1 obtidos experimentalmente, mostrados na FIGURA 36, mostraram ao longo da curva um comportamento de certa forma tendencioso, mas não condizente com o comportamento mostrado na FIGURA 44.

A FIGURA 44 foi utilizada apenas para demonstração de tendência dos valores de C1, não possuindo valores.

FIGURA 42 - COMPORTAMENTO ESPERADO PARA A CURVA DE VALORES DE C1.



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

Para a curva de descarga característica da FIGURA 37, em 1C, pode-se inferir, utilizando-se de uma análise baseada em observações do gráfico de comportamento das curvas de tensão obtidas pelo software MatLab, que:

- O erro de tempo de simulação em relação ao erro experimental foi de, aproximadamente, 37 segundos, para menos. Utilizando-se a Equação 26, temos:

$$erro_{tempo} = \frac{3639s}{3676s} - 1 \cong 1,01\% \quad (26)$$

- $erro_{tensão\uparrow}$  e  $erro_{tensão\downarrow}$  são, respectivamente, o maior erro e o menor erro de tensão. Neste caso, os erros de tensão foram para mais. Utilizando as Equações 27 e 28, se pode aproximar os valores de erros.

$$erro_{tensão\uparrow} \cong \frac{3,186V}{3,245V} - 1 \cong 0,02372 \cong 1,8181\% \quad (27)$$

$$erro_{tensão\downarrow} \cong \frac{3,127V}{3,145V} - 1 \cong 0,04527 \cong 0,5723\% \quad (28)$$

Já para a curva de descarga característica da FIGURA 38, em 0.5C, pode-se inferir, utilizando-se da mesma análise da curva de descarga anterior, que:

- O erro de tempo de simulação em relação ao erro experimental foi de, aproximadamente, 60 segundos, para menos. Utilizando-se a Equação 29, temos:

$$erro_{tempo} = \frac{7428}{7488} - 1 \cong 0,8\% \quad (29)$$

- $erro_{tensão\uparrow}$  e  $erro_{tensão\downarrow}$  são, respectivamente, o maior erro e o menor erro de tensão. Utilizando as Equações 30 e 31 abaixo, se pode aproximar os valores de erros.

$$erro_{tensão\uparrow} \cong \frac{3,234V}{3,309V} - 1 \cong -2,266\% \quad (30)$$

$$erro_{tensão\downarrow} \cong \frac{3,181V}{3,195V} - 1 \cong -0,4381\% \quad (31)$$

Para a terceira curva de descarga característica da FIGURA 39, em 0.25C, pode-se inferir, utilizando-se das mesmas análises das curvas de descarga anteriores, que:

- O erro de tempo de simulação em relação ao erro experimental foi de, aproximadamente, 43 segundos, para menos. Utilizando-se a Equação 32, temos:

$$erro_{tempo} = \frac{15075}{15118} - 1 \cong 0,28\% \quad (32)$$

- $erro_{tensão\uparrow}$  e  $erro_{tensão\downarrow}$  são, respectivamente, o maior erro e o menor erro de tensão. Utilizando as Equações 33 e 34, se pode aproximar os valores de erros.

$$erro_{tensão\uparrow} \cong \frac{3,287V}{3,335V} - 1 \cong -1,4392\% \quad (33)$$

$$erro_{tensão\downarrow} \cong \frac{3,224V}{3,235V} - 1 \cong 0,34\% \quad (34)$$

E, finalmente, para curva de descarga randômica da FIGURA 41, pode-se inferir, utilizando-se das mesmas análises das curvas de descarga anteriores, que:

- Não há erro de tempo pois as duas foram simuladas com o mesmo período de tempo estipulado, que foi de 7817 segundos;
- $erro_{tensão\uparrow}$  e  $erro_{tensão\downarrow}$  são, respectivamente, o maior erro e o menor erro de tensão. Utilizando as Equações 35 e 36 abaixo, se pode aproximar os valores de erros.

$$erro_{tensão\uparrow} \cong \frac{3,292V}{3,375V} - 1 \cong -2,459\% \quad (35)$$

$$erro_{tensão\downarrow} \cong \frac{3,3115mV}{3,3162V} - 1 \cong 0,1417\% \quad (36)$$

Analisando-se os resultados obtidos e acima descritos, pode-se dizer que o modelo de circuito equivalente utilizado, mesmo não sendo o mais apropriado em relação à representação de grande parte dos comportamentos eletroquímicos que acontece dentro de uma célula de íons de lítio, é, de certa forma, eficiente na representação do comportamento das curvas de tensão em função do tempo. Isto nos dá um resultado aproximado que pode ser utilizado para verificação em caso de operação de uma célula.

Analisando também a influência dos valores de OCV, R0, R1 e C1 no comportamento das curvas, pode-se dizer que os valores de OCV possuem uma influência muito maior do que os valores dos elementos passivos do circuito aqui escolhido. Pode-se inferir também, que os valores de R0, R1 e C1 são utilizados para fazer o ajuste fino das curvas. Isso quer dizer que, sua função é de auxiliar na reprodução de maneira mais aproximada possível os comportamentos de troca de valores de corrente de carga como os trechos com comportamentos exponenciais e com a troca súbita de valores de tensão.

### 5.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Analisando os procedimentos utilizados para a obtenção dos parâmetros utilizados no modelo dinâmico de operação construído neste estudo pode-se inferir que os mesmos foram realizados sob supervisão de pessoas com conhecimento e experiência que forneceram sua opinião técnica e aprovaram os dados que foram obtidos, mesmos estes (em alguns casos) não seguindo o comportamento esperado.

Já o modelo dinâmico de operação de bateria de íons de lítio apresentado neste estudo se mostrou eficiente para reproduzir o comportamento da curva de tensão obtida através do arranjo experimental, mas, infelizmente, não tão preciso o quanto se esperava. Os erros presentes na curva de tensão simulada, mesmo possuindo valores de percentagem pequenos, são significativos e podem ser observados na FIGURA 41.

Em comparação aos estudos publicados por Buller et al. (2005), Ceraolo et al. (2013) e Stroe et al. (2017) pode-se dizer que o estudo proposto e realizado neste trabalho e utilizando o método empregado se mostrou eficiente mas ainda precisa ser refinado em alguns aspectos como a implementação de mais elementos passivos que possam proporcionar uma maior precisão e exatidão no modelo aqui desenvolvido.

A pesquisa realizada neste trabalho empregou um método não utilizado de forma recorrente (não foram encontrados estudos na pesquisa bibliográfica que faziam o uso deste método), mas que pode ser efetivo para a obtenção dos parâmetros de baterias de íons de lítio a serem utilizados em simulações de modelos dinâmicos de operação.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um método de levantamento de parâmetros internos para baterias de íons de lítio baseado no processo de EIS e, também, a construção de um modelo de circuito equivalente para simulação do comportamento da tensão de um BESS, sem software de gerenciamento, para uma eventual curva de carga randômica.

Uma outra forma de monitoramento de OCV *versus* SoC, para que se possa acompanhar o comportamento dos valores de tensão das células de íons de lítio, pode ser encontrada em softwares de BMS, que estão presentes em grande parte dos BESS comercializados hoje em dia. O trabalho aqui realizado visou prover uma forma de acompanhar o comportamento da tensão de uma bateria sem a presença de um BMS e, assim, fornecer uma ferramenta para que se possa prever o comportamento da curva de tensão em função do SOC para que não haja uma possível degradação da célula em uso e para que se possa operá-la dentro de uma área de tensão e SoC seguros, como mostrado na FIGURA 7 (pg. 39).

A EIS é um método utilizado em grande escala para analisar processos de corrosão de cátodos e ânodos, reações internas de baterias, processos eletroquímicos em geral. No caso deste estudo, o método não se mostrou muito preciso para obter os dados dos valores dos elementos do circuito utilizado nas simulações. Isto em função da comparação dos valores obtidos em relação a um comportamento já esperado, como mostrado nas figuras da seção anterior.

Os resultados deste estudo mostram que os objetivos foram atingidos e o modelo pode ser utilizado para previsão do comportamento de tensão do BESS. É um circuito simples, que não reproduz todos os fenômenos físicos de uma célula de íons de lítio, porém este, ainda assim, pode ser utilizado para demonstrar o comportamento aproximado da bateria durante sua operação. Assim, a utilização deste trabalho permite prever com certo nível de precisão como será o comportamento dos níveis de tensão e operar a bateria de maneira controlada.

Este modelo ainda não está perto do seu potencial e exatidão totais, mas pode ser usado como ferramenta, por exemplo, para uso em um sistema de *peak shaving*. Isto pode ser dito pois a resposta deste modelo dinâmico de operação não é rápida o suficiente para suprir mudanças bruscas de frequência em um sistema de geração e as mudanças de tensão em uma rede de distribuição. Ainda assim é capaz de

trabalhar de maneira eficiente em um sistema onde o BESS é utilizado para suprir a demanda durante os horários de picos em uma rede de distribuição.

Seguindo a tendência deste trabalho, sugerem-se como trabalhos futuros:

- Aumentar em tamanho e proporção a quantidade de baterias, para escalar em capacidade e tensão e assim poder representar algo que possa ser utilizado em grande escala;
- Propor outro modelo de circuito equivalente, adicionando-se mais ramos RC e/ou outros componentes como um CPE ou elemento *Warburg*;
- Realizar ensaios em outras temperaturas e níveis de umidade, podendo-se criar modelos para uso em regiões específicas;
- Aumentar a amostragem dos parâmetros, realizando as curvas de EIS não em 5% de SoC, mas em 2% de SoC;
- Realizar ensaios em outros níveis de corrente para que se possa elaborar um modelo para uso em níveis de descarga mais altos.

## REFERÊNCIAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Qualidade na Distribuição**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/qualidade-na-distribuicao>>. Acesso em 10 Out. 2018.

© Zahner 01/2012. ., p. 1–17, 2012.

ANDRE, D.; MEILER, M.; STEINER, K.; WIMMER, C.; et al. Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I. Experimental investigation. **Journal of Power Sources**, v. 196, n. 12, p. 5334–5341, 2011. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.12.102>>.

*Battery University. BU-205. Types of Lithium-ion.* [https://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion)

BULLER, S.; THELE, M.; DE DONCKER, R. W. A. A.; KARDEN, E. Impedance-based simulation models of supercapacitors and li-ion batteries for power electronic applications. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 41, n. 3, p. 742–747, 2005.

CERAOLO, M.; GAZZARRI, J.; HURIA, T.; et al. Battery model parameter estimation using a layered technique: An example using a lithium iron phosphate cell. **SAE Technical Papers**, v. 2, 2013.

CHEN, M.; RINCÓN-MORA, G. A. Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 21, n. 2, p. 504–511, 2006.

DIVYA, K. C.; ØSTERGAARD, J. Battery energy storage technology for power systems-An overview. **Electric Power Systems Research**, v. 79, n. 4, p. 511–520, 2009.

DOGGER, J. D.; ROOSSEN, B.; NIEUWENHOUT, F. D. J. Characterization of li-ion batteries for intelligent management of distributed grid-connected storage. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 26, n. 1, p. 256–263, 2011.

GATTA, F. M.; GERI, A.; LAMEDICA, R.; et al. Application of a LiFePO<sub>4</sub> battery energy storage system to primary frequency control: Simulations and experimental results. **Energies**, v. 9, n. 11, 2016.

HINZ, H. Comparison of Lithium-Ion Battery Models for Simulating Storage Systems in Distributed Power Generation. **Inventions**, 2019.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61960-3 2017**. 2017.

KURBACH, K.; KURRAT, M.; LIENESCH, F.; WESTERHOFF, U. Analysis of Lithium-Ion Battery Models Based on Electrochemical Impedance Spectroscopy. **Energy Technology**, v. 4, n. 12, p. 1620–1630, 2016.

LEADBETTER, J.; SWAN, L. Battery storage system for residential electricity peak demand shaving. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 685–692, 2012. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.035>>.

LI, X.; HUI, D.; LAI, X. Battery energy storage station (BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 4, n. 2, p. 464–473, 2013.

LIAW, B. Y.; NAGASUBRAMANIAN, G.; JUNGST, R. G.; DOUGHTY, D. H. Modeling of lithium ion cells - A simple equivalent-circuit model approach. **Solid State Ionics**, v. 175, n. 1–4, p. 835–839, 2004.

LUO, X.; WANG, J.; DOONER, M.; CLARKE, J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. **Applied Energy**, v. 137, p. 511–536, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>>.

MALHOTRA, A.; BATTKE, B.; BEUSE, M.; STEPHAN, A.; SCHMIDT, T. Use cases for stationary battery technologies: A review of the literature and existing projects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 56, p. 705–721, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.085>>.

MOUSAVI G., S. M.; NIKDEL, M. Various battery models for various simulation studies and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 32, p. 477–485, 2014. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.048>>.

OSAKA, T.; MOMMA, T.; MUKOYAMA, D.; NARA, H. Proposal of novel equivalent circuit for electrochemical impedance analysis of commercially available lithium ion battery. **Journal of Power Sources**, v. 205, p. 483–486, 2012. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.070>>.

RANGLES, J. E. B. Kinetics of Rapid Electrode Reactions. **Discussions of the Faraday Society**, v. 95, n. 1, p. 11–19, 1947. Disponível em: <<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.95.134414>>.

RUIZ, V.; KRISTON, A.; ADANOUI, I.; et al. Degradation Studies on Lithium Iron Phosphate - Graphite Cells. The Effect of Dissimilar Charging – Discharging Temperatures. **Electrochimica Acta**, v. 240, p. 495–505, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2017.03.126>>.

SCHAFER, R. W. What is a savitzky-golay filter? **IEEE Signal Processing Magazine**, v. 28, n. 4, p. 111–117, 2011.

SCROSATI, B.; GARCHE, J. Lithium batteries: Status, prospects and future. **Journal of Power Sources**, v. 195, n. 9, p. 2419–2430, 2010.

SIMULINK. **Documentation.** Disponível em [https://www.mathworks.com/help/simulink/index.html?s\\_tid=srchtitle](https://www.mathworks.com/help/simulink/index.html?s_tid=srchtitle) Acesso em 30 Jul 2020.

STA - SISTEMAS E TECNOLOGIA APLICADA. **Vantagens e desvantagens da bateria de litio-ferro (LiFe ou LiFePO<sub>4</sub>).** Disponível em <http://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-de-litio/vantagens-e-desvantagens-da-bateria-de-litio-ferro-life-ou-lifepo4->> Acesso em 20 Jan 2020.

STAN, A.-I.; SWIERCZYNSKI, M.; STROE, D.-I.; et al. A comparative study of lithium ion to lead acid batteries for use in UPS applications. **Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2014 IEEE 36th International**, p. 1–8, 2014.

STROE, A. I.; STROE, D. I.; SWIERCZYNSKI, M.; TEODORESCU, R.; KÆR, S. K. Lithium-Ion battery dynamic model for wide range of operating conditions. **Proceedings - 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2017 and 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, ACEMP 2017**, p. 660–666, 2017.

VYROUBAL, P.; KAZDA, T. Equivalent circuit model parameters extraction for lithium ion batteries using electrochemical impedance spectroscopy. **Journal of Energy Storage**, v. 15, p. 23–31, 2018.

ZUBI, G.; DUFO-LÓPEZ, R.; CARVALHO, M.; PASAOGLU, G. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 89, n. March, p. 292–308, 2018.