

CAIO LUIZ GOMES DE SOUSA ALVES

**ANÁLISE TÉRMICA E AVALIAÇÃO DAS INCERTEZAS DOS PARÂMETROS DO
MODELO ELÉTRICO DA BATERIA DE LÍTIO-ÍON**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Juan Moises Mauricio
Villanueva

JOÃO PESSOA

2019

CAIO LUIZ GOMES DE SOUSA ALVES

**ANÁLISE TÉRMICA E AVALIAÇÃO DAS INCERTEZAS DOS PARÂMETROS DO
MODELO ELÉTRICO DA BATERIA DE LÍTIO-ÍON**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Juan Moises Mauricio
Villanueva

JOÃO PESSOA

2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A474a Alves, Caio Luiz Gomes de Sousa.
ANÁLISE TÉRMICA E AVALIAÇÃO DAS INCERTEZAS DOS
PARÂMETROS DO MODELO ELÉTRICO DA BATERIA DE LÍTIO-ÍON /
Caio Luiz Gomes de Sousa Alves. - João Pessoa, 2019.
68 f. : il.

Orientação: Juan Moises Mauricio Villanueva.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Modelo Elétrico de Bateria. 2. lítio-íon. 3.
temperatura. 4. Incertezas. 5. SoC. 6. OCV. I.
Villanueva, Juan Moises Mauricio. II. Título.

UFPB/BC

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

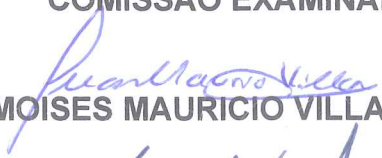
**ANÁLISE TÉRMICA E AVALIAÇÃO DAS INCERTEZAS DOS PARÂMETROS DO
MODELO ELÉTRICO DA BATERIA DE LÍTIO-ÍON**

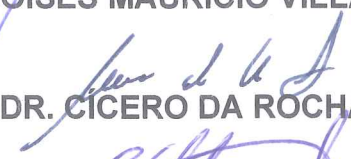
Elaborado por

CAIO LUIZ GOMES DE SOUSA ALVES

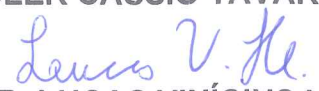
como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA


DR. JUAN MOISES MAURICIO VILLANUEVA (Presidente)


DR. CICERO DA ROCHA SOUTO


DR. EULER CASSIO TAVARES DE MACÊDO


DR. LUCAS VINÍCIUS HARTMANN

João Pessoa/PB, 08 de julho de 2019.

Dedico à minha mãe, ao meu pai (in memoriam), à minha filha Sophia e à minha
esposa Luana.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus, entidade de poder supremo, por ter me proporcionado a vida e os alicerces para os momentos mais difíceis, tanto as alegrias para os momentos mais felizes.

À minha filha, Sophia, por trazer a força quando mais precisávamos, alegrar nossas vidas e emanar de luz o que estava em escuridão.

À minha mãe e meu pai (in memoriam), por sempre darem o suporte, o amor, carinho e o conselho amigo para seguir em frente nessa fase, evidenciando que a educação é a porta para o sucesso.

À minha esposa, Luana Rodrigues, pela paciência, força e sempre estimulando em concluir essa fase da minha vida, dando todo o suporte necessário.

Aos meus irmãos, André, Vanessa e Carlos Antônio, por sempre estarem ao meu lado nessa etapa, sendo verdadeiros companheiros e entusiastas para o alcance dessa etapa da minha vida. Ao meu sobrinho, André Filho, por alegrar e enviar amor em todos os momentos.

Aos irmãos que a UFCG me deu, Cândido, Coriolano, Daniel, Leonardo, Jonas, Tarcisio e Wagner, por sempre estarem presentes, provendo apoio e suporte em todos os momentos desde o ingresso no curso de Engenharia Elétrica, na UFCG.

À Eduardo, Isabelle, José Igor, Rafael e Rajiv, a Patota de Oakland, pelo suporte, carinho e estímulo para finalizar essa etapa da minha vida.

Ao Grupo de Pesquisa em Inteligência Computacional Aplicada a Engenharia Elétrica (GICA), pela ajuda operacional e acadêmica durante o período de estudo, sendo um centro formador ideias. À Jonathan e Kaique, pelo suporte e apoio no desenvolvimento desse trabalho.

À Diego, Joel e Ricardo pelo ombro amigo e suporte no desenvolvimento do trabalho que culminou com a conclusão dessa fase da minha vida.

Ao meu orientador Dr. Juan Maurício, que, de forma incansável estimulou o desenvolvimento intelectual da Engenharia Elétrica, sendo mais que um orientador, um exemplo de profissional e pessoa a ser seguido.

Ao professor Dr. Euler Macêdo, pelo suporte e apoio no desenvolvimento das atividades, pela confiança e respeito, exemplo a ser seguido.

Ao professor Dr. José Maurício Neto, pelo exemplo de profissional e pessoa, pelo suporte e amizade estreitada ao longo dessa pesquisa.

À Fiat Chrysler Automobiles (FCA) e a Baterias Moura, pelo suporte financeiro e apoio no desenvolvimento desse trabalho.

À Raíssa Daher pelo apoio durante o período do intercâmbio, pela amizade criada e pelo estímulo na conclusão dessa etapa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela ajuda financeira disponibilizada na vigência da bolsa de Mestrado.

Ao Laboratório de Instrumentação e Controle (LINC), pelo suporte no desenvolvimento dos experimentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), pelo suporte e apoio no desenvolvimento desse trabalho.

A todos que, de uma forma ou de outra, igualmente contribuíram e torceram pela concretização do presente momento.

“A vitalidade é demonstrada não apenas pela persistência, mas pela capacidade de começar de novo.”

F. Scott Fitzgerald.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	X
1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO GERAL.....	13
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	13
1.3 MOTIVAÇÃO	14
1.4 CONTRIBUIÇÃO	14
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 REVISÃO BIBLIOGRAFICA DE PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE BATERIAS.....	19
3 MATERIAL E MÉTODO	24
3.1 BANCADA DE ENSAIO.....	24
3.1.1 Fonte Fornecedora de Energia.....	25
3.1.2 Banho Térmico	28
3.1.3 Datalogger.....	29
3.1.4 Interface de Comunicação.....	31
3.2 PROCEDIMENTO DE ENSAIO	32
3.3 MODELO COMPUTACIONAL.....	33
3.3.1 Ruído Aditivo	36
3.3.2 Corrente e Temperatura	37
3.3.3 Modelo de Bateria	38
3.4 ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO EM CIRCUITO ELÉTRICO	42
4 RESULTADOS.....	49
4.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA CURVA CARACTERISTICA DE DESCARGA DA BATERIA.....	49
4.2 PARÂMETROS DO MODELO EM CIRCUITO ELÉTRICO	51
5 CONCLUSÕES	61
REFERÊNCIAS.....	63

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - GRÁFICO TENSÃO X SOC DO MANUAL DA CÉLULA.....	17
FIGURA 2 - PROCEDIMENTO DE ENSAIO PROPOSTO POR GIEGERICH, KOFFEL, ET AL. (2013)	20
FIGURA 3 - PERFIL DE CORRENTE PROPOSTO POR CHEN E LI	21
FIGURA 4 - PERFIL DE CORRENTE PROPOSTO POR JACKY, SAGINAW, ET AL.....	22
FIGURA 5 - DIAGRAMA DA BANCADA DE ENSAIO	24
FIGURA 6 - BANCADA DE ENSAIO.....	25
FIGURA 7 - OPERAÇÃO DA FONTE DE 4 QUADRANTES	27
FIGURA 8 - ILUSTRAÇÃO FONTE FORNECEDORA DE ENERGIA.....	27
FIGURA 9 – BANHO TÉRMICO	28
FIGURA 10 - EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO	30
FIGURA 11 - INTERFACE DE COMUNICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS COM O COMPUTADOR	31
FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO DE ENSAIO PROPOSTO	32
FIGURA 13 - DIAGRAMA DE BLOCO DA SIMULAÇÃO	34
FIGURA 14 - SIMULAÇÃO DA BANCADA DE ENSAIO	35
FIGURA 15 - HISTOGRAMA DA CORRENTE EM REPOUSO.....	36
FIGURA 16 - GRÁFICO DA CORRENTE DE EXPERIMENTO REAL DURANTE REPOUSO	36
FIGURA 17 - HISTOGRAMA DA CORRENTE DE DESCARGA	37
FIGURA 18 - CIRCUITO NÃO LINEAR DA CÉLULA DE BATERIA PROPOSTO POR OLIVER, LOIUS-A (2007)	39
FIGURA 19 - CURVA DE DESCARGA CARACTERÍSTICA PROPOSTO PELO MATLAB/SIMULINK	40
FIGURA 20 - CURVA DE CONFIGURAÇÃO DA CÉLULA DE BATERIA.....	41
FIGURA 21 - REGIÃO EXPONENCIAL DA CONFIGURAÇÃO DA CÉLULA DE BATERIA	42
FIGURA 22 - CURVA DE TENSÃO ENSAIO PROPOSTO PARA UMA DESCARGA PULSADA.....	42
FIGURA 23 - MODELO GERAL EM CIRCUITO ELÉTRICO DE CÉLULA DE BATERIA	43
FIGURA 24 - CURVA DE DESCARGA PULSADA COM DESTAQUE PARA ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS.....	45

FIGURA 25 - CURVA DE ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CÉLULA DE BATERIA	46
FIGURA 26 - TENSÃO VS CAPACIDADE COM EFEITO DA TEMPERATURA	50
FIGURA 27 - SOC VS TEMPO DE DESCARGA	51
FIGURA 28 - MODELO EM CIRCUITO ELÉTRICO DETERMINADO NESSE TRABALHO	52
FIGURA 29 - RESISTÊNCIA INTERNA DA CÉLULA DE BATERIA - EXPERIMENTAL	52
FIGURA 30 - RESISTÊNCIA INTERNA DA CÉLULA DE BATERIA - SIMULADO	53
FIGURA 31 - MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA RESISTÊNCIA INTERNA - SIMULADO	54
FIGURA 32 - CONSTANTE DE TEMPO PRIMEIRO RAMO R-C - EXPERIMENTAL	55
FIGURA 33 - CONSTANTE DE TEMPO DO PRIMEIRO RAMO R-C - SIMULADO	55
FIGURA 34 - MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA CONSTANTE DE TEMPO DO PRIMEIRO RAMO R-C - SIMULADO	56
FIGURA 35 - CONSTANTE DE TEMPO DO SEGUNDO RAMO R-C - EXPERIMENTAL	57
FIGURA 36 - CONSTANTE DE TEMPO DO SEGUNDO RAMO R-C - SIMULADO	58
FIGURA 37 - MÉDIA E DESVIO PADRÃO DO SEGUNDO RAMO R-C - SIMULADO	59

RESUMO

ANÁLISE TÉRMICA E AVALIAÇÃO DAS INCERTEZAS DOS PARÂMETROS DO MODELO ELÉTRICO DA BATERIA DE LÍTIO-ÍON

As baterias são sistemas eletroquímicos complexos, que tem como principal aplicação o armazenamento de energia para uso em diversas áreas, como veículos elétricos, dispositivos móveis, telecomunicações e rede elétrica. Para a determinação da condição de operação de uma célula de bateria, então são definidos e estimados alguns parâmetros inerentes ao comportamento da célula da bateria, tal como Estado de Carga, Estado de Saúde, Tensão de circuito aberto e temperatura interna. Quando a célula de bateria é submetida a diferentes valores de temperaturas, diferente da determinada como condição normal de temperatura e pressão, esses parâmetros apresentam um comportamento diferentes ao determinado pelo fabricante. Essa temperatura, considerada temperatura ambiente, afeta o comportamento dinâmico da célula de bateria, degradando o elemento, reduzindo seu ciclo de vida, reduzindo sua capacidade de fornecer energia a carga associada ao elemento, possibilitando que tenha a ocorrência de danos maiores como incêndio e explosão. Para se determinar os valores desses parâmetros que definem o comportamento da célula de bateria, baseando nas normas e nos trabalhos publicados na bibliografia, foi definido um perfil de carga para realizar os ensaios de laboratório ao qual foram medidos os valores das variáveis do elemento. Com o intuito de repetir os ensaios reais gerados por meio de uma bancada de teste, foi desenvolvido, em ambiente de simulação, um modelo computacional com os mesmos equipamentos presentes em ambiente real. Foi então proposto um modelo elétrico do elemento composto por componentes como resistência e capacitor, relacionando com o modelo térmico da célula da bateria, tendo como variáveis de entrada do modelo a temperatura ambiente e a corrente inserida na bateria. A partir dos valores dos componentes elétricos, foi possível determinar que para alguns desses componentes, há uma relação maior com a temperatura do que com o SoC. Porém, esses valores não apresentam normalmente uma consistência, havendo uma variação a cada temperatura ou SOC, sendo conhecida como incertezas. Esses valores dos parâmetros dos ensaios simulados foram comparados com os valores dos parâmetros dos ensaios reais e viu-se que há uma relação entre o comportamento dos gráficos dos dois tipos de ensaios. Através dessa análise, é possível avaliar que as baterias apresentam diferentes comportamentos de acordo com a variação das condições de operação e do ambiente.

Descritores: Modelo Elétrico de Bateria, lítio-íon, temperatura, Incertezas, SoC, OCV.

ABSTRACT

Thermal Analysis and Uncertainty Evaluation of the Lithium-ion Battery Electric Model Parameters

Batteries are complex electrochemical systems, whose main application is the storage of energy for use in several areas, such as electric vehicles, mobile devices, telecommunications and power grid. To determine the operating condition of a battery cell, then some parameters inherent to the behavior of the battery cell are determined and estimated, such as State of Charge, Status of Health, Open Circuit Voltage and internal temperature. When the battery cell is subjected to different temperature values, different from that determined as normal temperature and pressure condition, these parameters exhibit a behavior different from that determined by the manufacturer. This temperature, which is considered the ambient temperature, affects the dynamic behavior of the battery cell, degrading the element, reducing its life cycle, reducing its capacity to provide energy to the load associated with the element, allowing greater damages such as fire and explosion. To determine the values of these parameters that define the behavior of the battery cell, based on standards and published works in the bibliography, a load profile was defined to perform the laboratory tests to which the values of the element variables were collected. To repeat the real tests generated through a test bench, a computational model with the same equipments in real environment was developed in a simulation environment. It was then constructed an electric model of the element composed of components as resistance and capacitor, relating to the thermal model of the battery cell, having input variables of the model at room temperature and the current inserted into the battery. With the values of the electrical components, it was possible to determine that for some of these components, there is a higher relation with temperature than with SoC. However, these values do not normally present a consistency, having a variation at each temperature or SOC, being known as uncertainties. These values of the parameters of the simulated tests were compared with the values of the parameters of the actual tests and it was found that there is a relationship between the behavior of the graphs of the two types of tests. Through this analysis, it is possible to evaluate that the batteries present different behaviors according to the variation of the operating conditions and the environment.

Key words: Battery Electric Model, Ion-Lition, Uncertainty, Temperature, SoC, OCV

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

O crescimento nas aplicações envolvendo acumuladores de energia deu-se devido às novas formas de geração de energia, que podem ser: turbinas aerogerador (eólicas), e placas fotovoltaicas (solares). As formas de geração apresentam uma geração de energia intermitente, tendo suas fontes de energia um ciclo não constante de emissão de radiação solar ou de ventos durante o dia (García-Plaza, Serrano-Jiménez, Carrasco, & Alonso-Martínez, 2015).

Para proteger o acumulador de energia e prolongar a vida útil, se faz necessário a utilização de um equipamento responsável pela proteção das baterias, coordenando os processos de carga e descarga, medindo e gerenciando os parâmetros da bateria, esse equipamento é conhecido como BMS (*Battery Management System*). Esse dispositivo tem como principais funções a de medir as grandezas físicas, estimar os principais parâmetros e realizar a tomada de decisão, tais como o balanceamento das células de bateria em um banco de acumuladores e a proteção contra sobrecarga e sobre descarga (Yamin & Rachid, 2014).

Para realizar estudos sobre acumuladores de energia é necessário monitorar algumas grandezas físicas relacionadas aos acumuladores, como: corrente de saída da bateria, tensão entre os terminais, temperatura ambiente e temperatura da bateria. Também há parâmetros indicadores da real situação da bateria, porém que não podem ser medidos, sendo estimados através de métodos e algoritmos, fazendo-se necessário a utilização dos dados coletados das grandezas físicas (Xing, He, Pecht, & Tsui, 2014).

Estes indicadores do estado da bateria são conhecidos através das siglas, em inglês: SOC (Estado de Carga), SOH (Estado de Saúde) e SOL (Estado de Vida).

O Estado de Carga, conhecido através da sigla SOC (*State Of Charge*), é o indicador atrelado a capacidade da bateria, representando o real estado da bateria quando está sendo descarga ou carregada. Esse indicador pode ser representado na forma porcentual, tal como na forma adimensional.

O Estado de Vida, pela sigla SOL (*State-of-Life*), é um dos indicadores de envelhecimento da bateria, sendo empregado para evidenciar se a bateria está em sua condição normal de operação ou já está ao final de sua vida útil de utilização.

O Estado de Saúde, conhecido como SOH (*State-of-Health*), é um dos indicadores associados a bateria de como ela está levando em consideração o SOC e SOL.

Esses dados e parâmetros estimados não possuem sempre resultados iguais, apresentando variações desses valores a cada ciclo de carga e descarga, sob as mesmas condições de operação. Esse fenômeno é relacionado às incertezas associadas a uma medição das grandezas da bateria.

Essas incertezas são inerentes a natureza da bateria, pois elas apresentam propriedades físico química que são instáveis e randômicas. Um fator que contribui para esse fenômeno, é o processo de fabricação da célula de bateria, os componentes utilizados na fabricação e as condições ao qual esse elemento foi ou está sendo submetido, como grandes variações na temperatura, diversos ciclos de carga e descarga.

1.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem como objetivo realizar a análise térmica e de incertezas dos componentes do modelo em circuito elétrico de bateria lítio-íon.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

1. Determinar a partir dos ensaios experimentais os parâmetros para um modelo elétrico da célula da bateria;
2. Analisar as incertezas dos componentes do modelo elétrico da bateria, por meio da construção de um modelo computacional, com a variação da temperatura ambiente para cada um dos valores de SOC;
3. Analisar as incertezas dos componentes do modelo elétrico da bateria, para valores experimentais, com a variação da temperatura ambiente para cada um dos valores de SOC.

1.3 MOTIVAÇÃO

1.4 CONTRIBUIÇÃO

Realizar o comparativo entre os valores dos componentes do modelo em circuito elétrico provenientes de dados do ambiente de simulação com os componentes do modelo adquiridos de dados experimentais.

Será feita uma análise da influência da temperatura no comportamento das baterias de lítio-íon quando são submetidas a perfis de cargas e descargas.

E como última contribuição, a proposição de um procedimento de ensaio que serão utilizados nos experimentos laboratoriais e simulados, com a finalidade de coletar os dados para determinar os componentes do modelo em circuito elétrico da bateria.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

No capítulo 2, será explanado os conceitos fundamentais sobre bateria para o entendimento deste trabalho, o sistema para medição dos parâmetros relativos ao elemento de bateria de lítio-íon, as normas de ensaios estabelecidas pelas agências regulatórias nacionais e internacionais, outros trabalhos que serviram de norte para realização dos ensaios.

No capítulo 3, será apresentado o tipo de modelo que será utilizado para fazer a análise da bateria, sendo apresentado também o processo de estimação dos parâmetros do modelo. Nesse capítulo também será apresentado como foi realizado os procedimentos de simulação usando como base o ensaio proposto no capítulo 2, como a replicação do setup de ensaio em ambiente simulado. Ao final, serão mostrados os resultados coletados através dessa simulação e do processo de estimação dos parâmetros.

No capítulo 4, utilizando os dados coletados no ensaio experimental gerado pelas normas, será explanada a determinação dos componentes elétricos que compõem o modelo elétrico fazendo assim uma relação com a variação dos valores dos parâmetros em relação para cada uma da temperatura e do SoC.

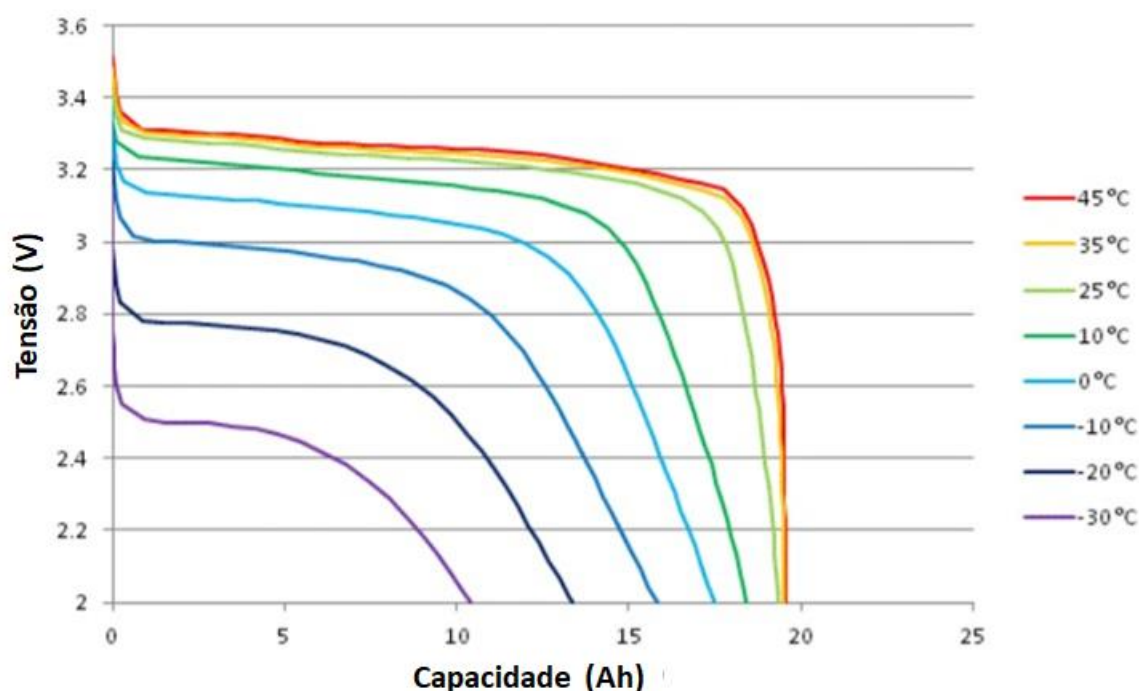
Ao final, na conclusão, serão feitas abordagens gerais sobre este trabalho, relacionando os valores adquiridos no ensaio experimental e os valores encontrados através do ambiente simulado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com o Manual A123 Energy Solutions (2014), a célula apresenta um aumento da capacidade fornecida com o aumento da temperatura.

FIGURA 1 - GRÁFICO TENSÃO X SOC DO MANUAL DA CÉLULA



Através da Figura 1 é possível visualizar o comportamento da célula de bateria durante um processo de descarga, então para temperaturas até 0 °C a célula apresenta uma variação da sua tensão quando a célula de bateria fornece energia, permanecendo por um pequeno intervalo de tempo no instante que a tensão da célula de bateria apresenta um comportamento linear do seu gráfico, quando está operando entre a tensão de 3,0 V a 3,3 V.

Para temperaturas acima de 0°C, a variação de temperatura é menor, ao qual a mesma tem uma variação de 3,6 V para 3,3 V, isso reflete na suavização do seu tempo de permanência no estado linear, ao qual, se mantém praticamente estática a tensão ao decorrer da capacidade, mas ao final de sua capacidade, a queda em sua tensão é quase instantânea, fazendo a célula de bateria atingir ao seu valor mínimo de capacidade em um pequeno intervalo de tempo.

De acordo com Hu, Li, & Peng (2012), os tipos de modelos de bateria podem ser associados para diferentes finalidades de análise, como: elétrico, eletroquímico, térmico.

O modelo elétrico, utilizando princípios de análise de circuito elétricos, com componentes passivos de resistência e capacitância, também tendo como variáveis de cálculo: a corrente, temperatura e do SoC. Esse último tipo de modelo são os mais utilizados, pois requer um menor esforço computacional, estimando os parâmetros em tempo real, possibilitando a análise do comportamento dinâmico da célula de bateria. (Bester, Hajjaji, & Mabwe, 2015)

Considerando o modelo elétrico, de acordo com Hu, Li, & Peng, (2012), ele é desenvolvido usando as leis de circuitos elétricos e componentes elétricos, tais como: resistor, capacitor, fonte de corrente. Sendo constituído por uma quantidade de resistores em paralelo com capacitores. Esse modelo será apresentado no capítulo 3.

Estes modelos são utilizados para estimar algum dos indicadores da bateria, como o SOC ou SOH, os quais podem ser variáveis de saída do modelo ou mesmo condições de entrada para o modelo ser executado.

Para realizar a estimação do estado de carga (SOC), de acordo com Yang, Xing, Wang, & Tsui, (2016), pode se utilizar algoritmos que não necessitem de modelo, porém os mais eficazes são os que utilizam modelo, pois são possíveis de se auto-corrigirem, isto é, eles conseguem ajustar os parâmetros de acordo com o valor calculado na iteração anterior, esses modelos são empregado nos filtros de Kalman, que são utilizados para sistemas não lineares.

Truchot, Dubarry, & Liaw, (2014) realizaram ensaios experimentais em uma junção de 3 células em série, com diferentes valores de corrente, com a finalidade de estimar os SOC dessa junção e de cada célula em separado. Ao mesmo passo, realizar o estudo sobre as incertezas no SOC que é proveniente da tensão e corrente.

De acordo com Tong, Koh, Birgersson, Mujumdar, & Yap, (2015), foi realizada a análise da incerteza e do efeito da temperatura utilizando o método estocástico, através da simulação de Monte Carlo com análise estatística. Esse modelo mecânico é simulado com valores randômicos.

Hadigol, Maute, & Doostan (2015) utiliza o método de aproximação polinomial associado aos dados da simulação de Monte Carlos para avaliar os parâmetros da capacidade, tensão e as concentrações utilizadas.

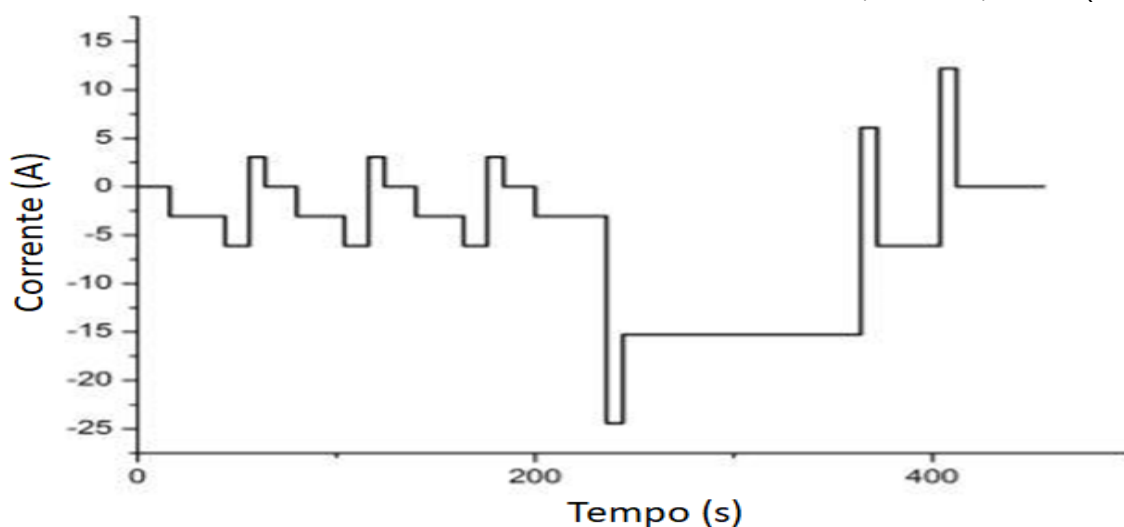
Chaoui & Gualous, (2017) verificaram que há uma grande variação, ao longo do tempo, nos parâmetros do modelo elétrico da bateria, então eles propõem um método de estimação do SOC de forma adaptativa. Eles têm como método de compensação a utilização da variação da temperatura para atingir a estimação do SOC com estabilidade.

Yan, Zhang, Zhao, Weddington, & Niu, (2017) utilizaram o método de análise do ruído, fazendo a correção dos valores e adaptação dos parâmetros baseado no princípio de diagnostico de falhas sendo desenvolvido usando um algoritmo de filtragem de partículas.

2.1 REVISÃO BIBLIOGRAFICA DE PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE BATERIAS

Segundo GIEGERICH, KOFFEL, *et al.* (2013) propuseram um procedimento de ensaio de acordo com a ISO/DIS 12405-2, conhecido como caracterização de pulsos de alta performance (HPPC), que estabelece testes para baterias de lítio-íon para veículos elétricos.

Na Figura 2 é ilustrado o perfil proposto por GIEGERICH, KOFFEL, *et al.* (2013), na qual a célula apresenta uma descarga gradativa, sendo compensada com uma carga gradativa. A corrente tende a ser elevada a tal ponto que a célula seja carregada. Esse perfil tende a simular a ocorrência de um processo de carga e descarga para um veículo elétrico.

FIGURA 2 - PROCEDIMENTO DE ENSAIO PROPOSTO POR GIEGERICH, KOFFEL, ET AL. (2013)¹

O experimento começa com um período curto de repouso, sendo precedidos por período de descargas com valor inicial em torno de 2,5 A (0,1C) e então, feita uma descarga por um período menor com uma corrente de 5 A (0,2C), com o fim desse segundo período de descarga, é então feito um procedimento de carga de 2,5 A (0,1C), sendo considerado o período de recuperação da energia do veículo. Esse processo se repete por mais três ciclos, sendo feito um pico de descarga com a corrente na ordem de 25 A, em um curto período. Logo em seguida, é permanecido na descarga por um período mais longo, com corrente de 15 A.

Por fim, são feitas cargas com curtos períodos, sendo cada carga precedida por uma descarga de corrente em torno de 2,5 A com ocorrência prolongada, finalizando com um período de repouso da célula de bateria.

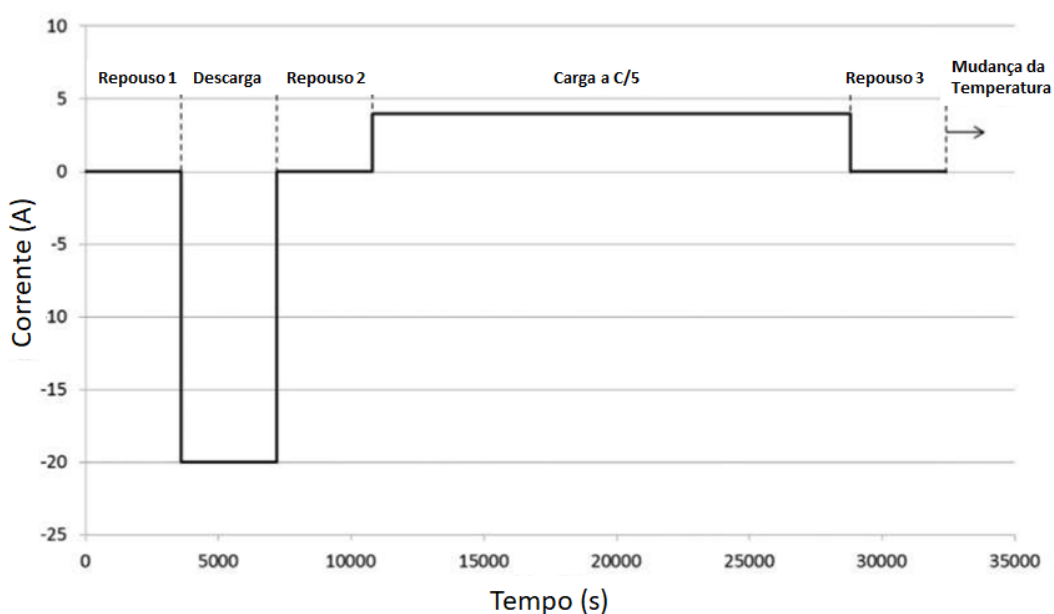
A partir desses ensaios, os autores conseguiram determinar os parâmetros do modelo RC da célula de lítio-íon, onde a tensão de circuito aberto do modelo apresentou os mesmos valores coletados pelo experimento.

De outro lado, analisando o procedimento de ensaio proposto por CHEN e LI (2014), foi elaborado um procedimento de ensaios misto de pulsos com diferentes

¹ Adaptado para o português de Giegerich, Koffel, et al. (2013)

tempos de duração, tal como com valores diferentes para a carga e para a descarga. Quanto ao tempo de repouso da bateria, eles propuseram deixá-la por 2 horas em corrente zero, para que as reações químicas no interior da bateria possam se estabilizar. Na Figura 3, é ilustrada o perfil de corrente da célula da bateria, que inicia com um período de repouso, respeitando o tempo de 2 horas, após esse tempo, é feita uma descarga com diferentes correntes que são: 1C, 2C e 3C, até chegar ao valor mínimo de tensão da célula. Ao final desse processo, há um novo repouso, com duração de até 2 horas, sendo sucedido por uma carga de corrente igual a C/5. Assim que a célula estiver na sua tensão máxima, é finalmente iniciado o processo de repouso da célula.

FIGURA 3 - PERFIL DE CORRENTE PROPOSTO POR CHEN E LI²

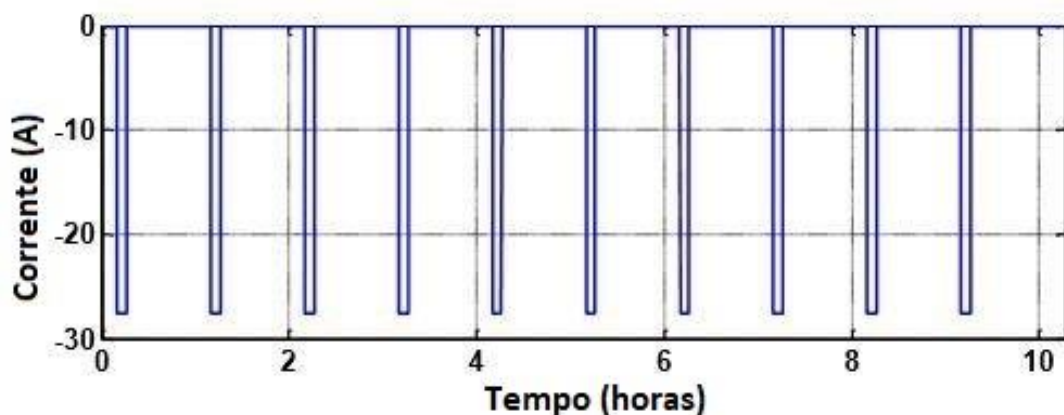


Segundo JACKKEY, SAGINAW, *et al.* (2013), para determinar os parâmetros do modelo em circuito elétrico com ramos R-C, podem ser utilizado ensaios de descarga pulsada, sendo o perfil de corrente do procedimento ilustrado Figura 4. Esses pulsos são gerados com intervalos de tempo curtos, sendo precedidos por um intervalo de repouso para o reestabelecimento das propriedades químicas da

² Adaptada para o português de Chen e Li (2014)

bateria. O valor de corrente usado para realizar o procedimento é selecionado de acordo com a quantidade de capacidade que deseja que a célula forneça naquele instante de tempo.

FIGURA 4 - PERFIL DE CORRENTE PROPOSTO POR JACKEY, SAGINAW, ET AL.³



Para o procedimento de ensaio de descarga pulsada, inicialmente, a célula de bateria é submetida ao repouso para que assim possa haver uma consolidação da tensão da célula em 100 % do SOC.

Após o repouso são realizadas 10 descargas em curtos períodos sendo precedidas por períodos longos de repouso. Essas descargas são feitas com a finalidade de determinar os parâmetros do modelo em circuito elétrico para cada um dos valores de SOC de 100 % até 0 %, com decréscimos de 10%. O repouso é necessário para determinar as constantes de tempo do modelo em circuito elétrico.

³ Fonte: Adaptado para o português de JACKEY, SAGINAW, et al. (2013)

3 MATERIAL E MÉTODO

3 MATERIAL E MÉTODO

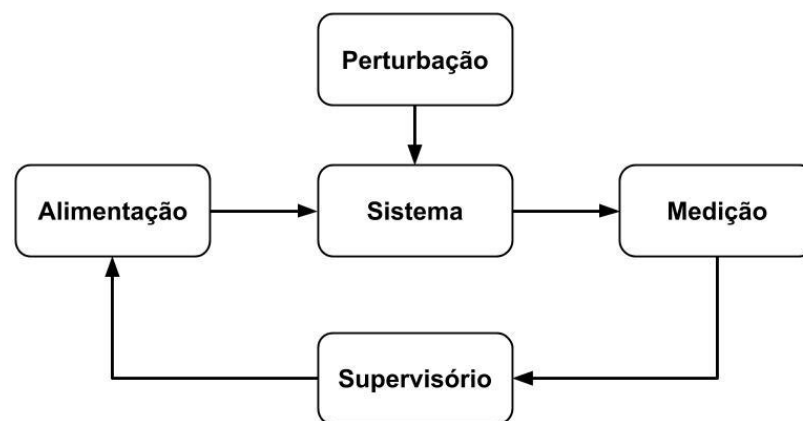
Nesse capítulo será descritos as funcionalidades dos equipamentos que foram utilizados e o procedimento de ensaio que foi proposto para determinar os componentes do modelo em circuito elétrico da bateria.

3.1 BANCADA DE ENSAIO

Foi desenvolvida uma bancada de ensaio para a realização de experimentos propostos com diferentes condições de carga e descarga da bateria, assim como a variações da temperatura como parâmetro para analisar o comportamento do modelo da bateria. Na bancada de ensaio e possível realizar a coleta dos dados experimentais com a finalidade de construir o modelo do circuito equivalente.

A bancada de ensaio é composta pela fonte de energia do sistema, o sistema que se deseja realizar o experimento, a perturbação que irá influenciar o comportamento do sistema, a medição dos dados de saída do sistema, e um sistema que controla a fonte de energia e coleta os dados provenientes da medição. Como é ilustrado na Figura 5.

FIGURA 5 - DIAGRAMA DA BANCADA DE ENSAIO

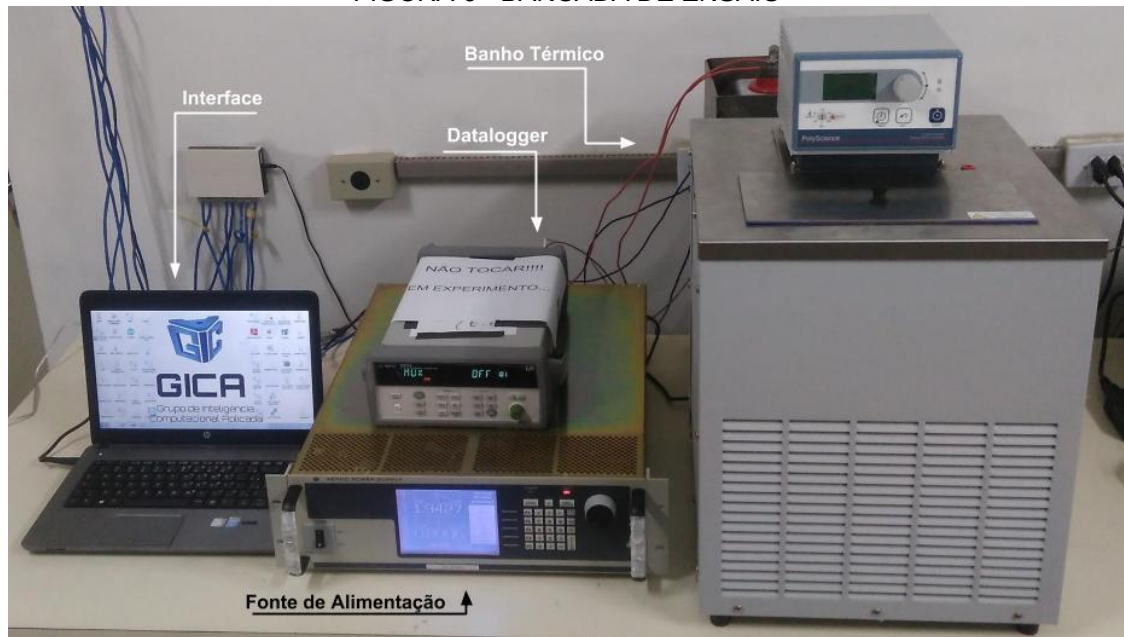


A fonte de energia fornece ao sistema corrente e tensão, necessários para a realização do experimento das baterias. A perturbação é o fenômeno que incidirá no modelo da bateria, alterando o comportamento de seus parâmetros. Na bancada de ensaios, este fenômeno de perturbação foi emulado por meio da utilização de um banho térmico.

Para o sistema de aquisição de dados, foi utilizado o datalogger, na qual foram medidas as grandezas de tensão e temperatura. O supervisor sendo um programa de computador executando comandos para configurar a operação da fonte fornecedora de energia e realizar a coleta e armazenamento dos dados.

Por fim, o sistema sendo uma célula de bateria de lítio-íon, inserida no banho térmico e conectada eletricamente pela alimentação e medição. A bancada de ensaio com os equipamentos é ilustrada na Figura 6.

FIGURA 6 - BANCADA DE ENSAIO



Ao longo desse capítulo será detalhada a funcionalidade de cada um dos equipamentos utilizados nos procedimentos experimentais e que serão modelados em ambiente de simulação. Sendo a bateria detalhada no capítulo 2.

3.1.1 Fonte Fornecedora de Energia

Dispositivo eletrônico que tem como função fornecer energia elétrica a uma carga ao qual está conectada a ele.

São aplicadas em diversas áreas, tais como: residencial, comercial, médico, industrial e em ensaios de laboratório. Sendo encontradas em aparelhos eletrônicos, tais como televisão, computadores, em teste de bateria e motores

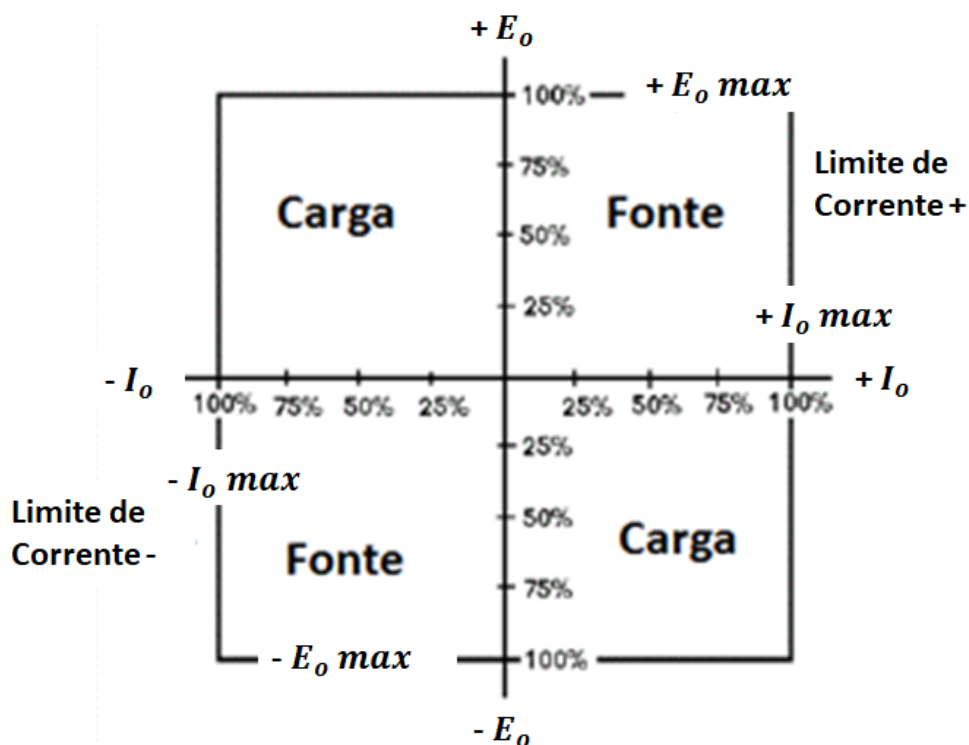
elétricos, pesquisa em painel solar, alimentação de equipamentos médicos, dentre outros.

As fontes são classificadas de acordo com o seu tipo de tensão de entrada e saída, podendo ser: AC/DC, AC/AC e DC/DC. Para a nossa aplicação foi utilizado o tipo AC/DC, pois fornece uma tensão ou corrente constante, dependendo do modo escolhido. Esse tipo de fonte realiza as funções de: retificação para converter a tensão AC em tensão DC, transformação de tensão que fornece o nível de tensão correta, filtragem para suavizar o *ripple* da tensão da função de retificação, regulação que controla o nível de tensão da saída em constante.

Nosso propósito é realizar processos de carga e descarga em uma célula de bateria, que é um elemento de corrente contínua. Então, a fonte de alimentação utilizada deve ter uma saída de corrente contínua, que é fornecida de forma constante durante todo o processo, sendo sua entrada de alimentação, corrente alternada, vinda da rede elétrica.

Para isso, é necessária uma fonte bipolar, pois a corrente pode fluir pelo polo positivo ou para o polo negativo, apresentando a possibilidade de tanto funcionar como fornecedor de energia e de funcionar como carga.

Foi utilizada uma fonte do tipo de 4 quadrantes, que tem sua operação que é ilustrada na Figura 7, onde E_0 é a tensão máxima suportada e I_0 é a corrente máxima. Os quadrantes 1 e 3 funcionando como gerador e os quadrantes 2 e 4 como carga, sempre respeitando os limites da corrente e da tensão ao qual a fonte foi especificada.

FIGURA 7 - OPERAÇÃO DA FONTE DE 4 QUADRANTES⁴

A fonte utilizada foi a BOP 1KW, da fabricante Kepco Inc., que é ilustrada na Figura 8, possuindo limites de corrente entre -10,0A a +10,0A e tensão de -100V a +100V, podendo ser operada tanto no modo de corrente constante como de tensão constante.

FIGURA 8 - ILUSTRAÇÃO FONTE FORNECEDORA DE ENERGIA⁵

⁴ Manual Fabricante

⁵ Site do Fabricante

Esse equipamento possibilita uma comunicação via protocolo RS-232 com o computador para realiza o controle do procedimento de ensaio, enviando comandos SCPI (*Standard Commands for Programmable Instruments*).

3.1.2 Banho Térmico

Como equipamento para realizar o controle e a variação da temperatura foi utilizado um banho térmico (com solução aquosa), na qual foi introduzida a bateria durante os ensaios experimentais, como se ilustra na Figura 9. Este procedimento permitiu inserir uma perturbação no sistema por meio da variação da temperatura.

FIGURA 9 – BANHO TÉRMICO



A solução aquosa líquida é formado por 40% de etilenoglicol e 60% de água destilada, sendo necessário para evitar perdas de líquido, por evaporação, quando aquecido.

O controlador de temperatura, da empresa *Polyscience*, possibilita realizar a alteração da temperatura do líquido entre uma faixa de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, proporcionando uma ativação dos cicladores para realizar a troca de calor dentro do recipiente de maneira uniforme.

A temperatura do líquido no interior do recipiente é considerada como temperatura da bateria, e é monitorada através do sensor de temperatura presente

no controlador da temperatura do líquido. Complementarmente, foi medida a temperatura sobre superfície da célula da bateria com o auxílio de um termopar.

A utilização do banho térmico como forma de mudar a temperatura da bateria na qual está operando, foi estudado também por CHEN e LI (2014) que realizou um experimento para comparar dois métodos de controle de temperatura com soluções aquosas que envolvem a bateria. Foi utilizado nesse estudo o ar e a água com etilenoglicol, conhecido como aditivo de radiador. Esse estudo mostrou que a variação térmica na bateria, durante uma descarga, é maior quando o meio ao qual ela está inserida é o ar, em contrapartida do uso da solução aquosa com etilenoglicol, que nas mesmas condições, há uma variação na ordem de 0,1 °C quando é drenando uma corrente de 5 A.

Essa prática é comumente utilizada entre os maiores fabricantes de acumuladores de energia, sendo realizada a análise da influência da temperatura na capacidade nominal da bateria desse lote. Esse teste, que é referenciado pelas normas nº.: 601 da ANATEL, tem como propósito a elaboração dos relatórios técnicos para submissão da aprovação da bateria nos órgãos regulatórios ao qual elas serão empregadas, tal como ANATEL (Telecomunicações), ANEEL (Energia Elétrica) e outras agências, e pelo Regulamento Técnico Metrológico e de Avaliação da Conformidade - RTAC 0001652, do INMETRO, de 2011.

O requisito de avaliação RTAC 001652 (2011) estabelece os procedimentos para definir a capacidade da bateria e a temperatura de referência da mesma, sendo assim, este requisito determina que esses procedimentos sejam realizados com a bateria imersa em um banho térmico, preenchido por água, e que permaneça naquele tanque por no mínimo 16 horas, respeitando os limites temperatura de 25 °C e 40 °C, com variação de ± 3 °C, tal como a distância do topo em relação ao nível do espelho da água do banho térmico, que é de 2,5 cm.

3.1.3 Datalogger

Equipamento que realiza a medição de grandezas ou sinais contínuos no tempo podendo ser: temperatura, umidade, tensão, corrente elétrica, frequência.

Com a finalidade de auxiliar essa coleta de dados, é empregado conversores analógico-digital, responsável por converter em formato digital os sinais analógicos

coletados. Havendo um circuito integrado que realiza os cálculos referentes ao processamento dos dados digitais. Além disso, esse mesmo componente é responsável por coordenar as tarefas, ou seja, selecionar qual sensor e em que momento deve ser medido esse sinal.

Além das memórias RAM utilizadas para armazenar os dados não voláteis do equipamento, e as memórias ROM que tem como finalidade o armazenamento dos dados medidos e processados.

Para a realização da medição dos parâmetros referentes a célula de bateria, como: temperatura na superfície e tensão dos terminais, foi utilizado um datalogger fabricado pela empresa Keysight Technologies, que é ilustrado na Figura 10.

FIGURA 10 - EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO⁶



Este dispositivo apresenta interfaces de visualização como o display e os periféricos de entrada e saída que realizam a comunicação com os outros equipamentos, tal como: computador. Sendo essa comunicação realizada através da Ethernet.

De acordo com o manual do fabricante do equipamento de medição, foi coletada as informações relevantes para esse trabalho sobre o equipamento, os quais são:

- Comandos de controle: SCPI
- Comunicações Entrada e Saída: USB, LAN, RS-232

⁶ Site do Fabricante do Equipamento

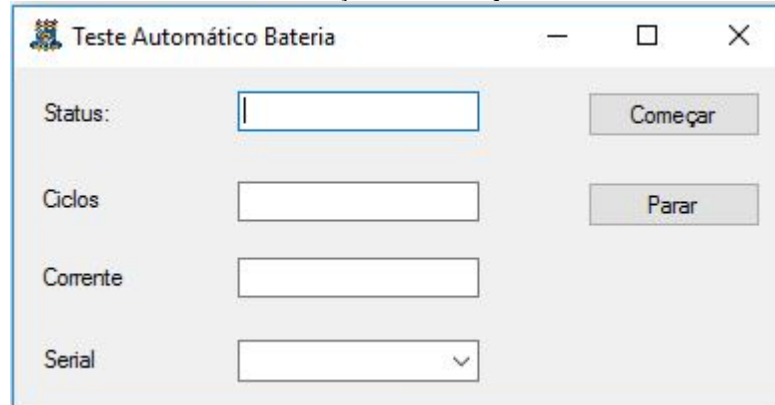
- Resolução:
 - Temperatura: 0,1 °C
 - Tensão: 22 bits
- Precisão:
 - Tensão: 0,0035+0,0005 (% de leitura + % da faixa)
 - Temperatura do termopar tipo K: 1,0 °C

3.1.4 Interface de Comunicação

A interface de comunicação é um programa de computador que está sendo executado com a função de controlar o procedimento de ensaio dos experimentos da célula de bateria, realizar a apresentação dos dados medidos, servindo assim, um sistema supervisor.

A interface de computador foi desenvolvida usando a linguagem de programação C# (C Sharp), que é ilustrada na Figura 11.

FIGURA 11 - INTERFACE DE COMUNICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS COM O COMPUTADOR



Os dados são coletados pelo datalogger e transmitido para o programa de computador através da Ethernet, e são mostrados ao usuário nos campos assinalados com os nomes: tensão da bateria (nos terminais da célula) e as temperaturas (na superfície da célula de bateria e a temperatura ambiente).

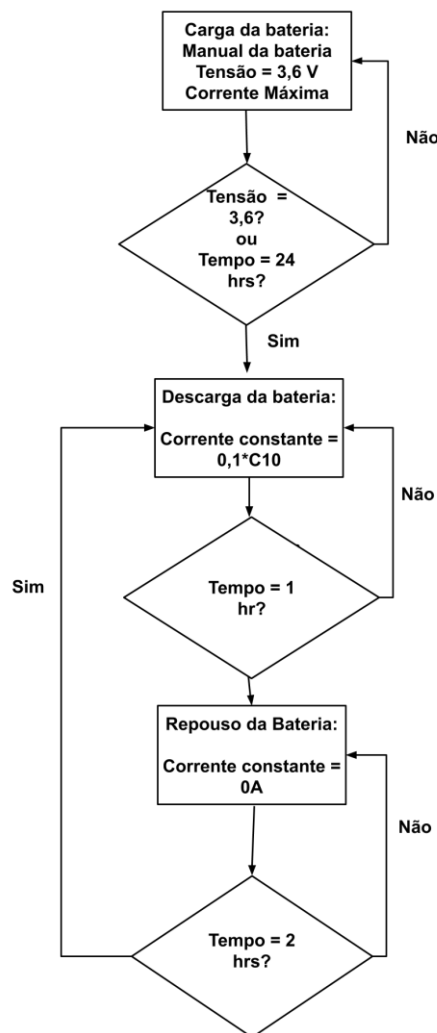
Complementarmente, o programa do computador realiza o armazenamento dos dados em arquivos no formato de texto, possibilitando a utilização dos dados por outro software de simulação para fazer análises das condições de operação e das características eletroquímica da célula de bateria.

O controle e a configuração dos parâmetros para o experimento da fonte de energia foram realizados na parte não visível para o usuário, o back-end da interface de programação, através de envio de comandos com as condições do experimento utilizando a comunicação serial do computador com a fonte de energia.

3.2 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Para este presente trabalho, foi proposto um procedimento de ensaio de baterias tendo como objetivo principal realizar a determinação dos componentes do modelo em circuito elétrico da célula de bateria para diferentes valores de SoC, de acordo com as normas técnicas e tendo como base os artigos mais relevantes. O fluxograma do procedimento de ensaio é ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO DE ENSAIO PROPOSTO



Neste procedimento proposto, a célula é totalmente carregada usando a corrente máxima permitida pelo fabricante da célula de bateria e pelos equipamentos utilizados no experimento. A célula de bateria será considerada completamente carregada quando a tensão dos terminais atinja o valor máximo definido pelo fabricante e pela química da célula da bateria, e também a corrente de carga tenha um decréscimo no seu valor atingindo um valor em torno de 0,09 A, ao final do processo. Essas condições determinam que a célula esteja no final do seu processo de carga, com seu valor de SOC de 100%.

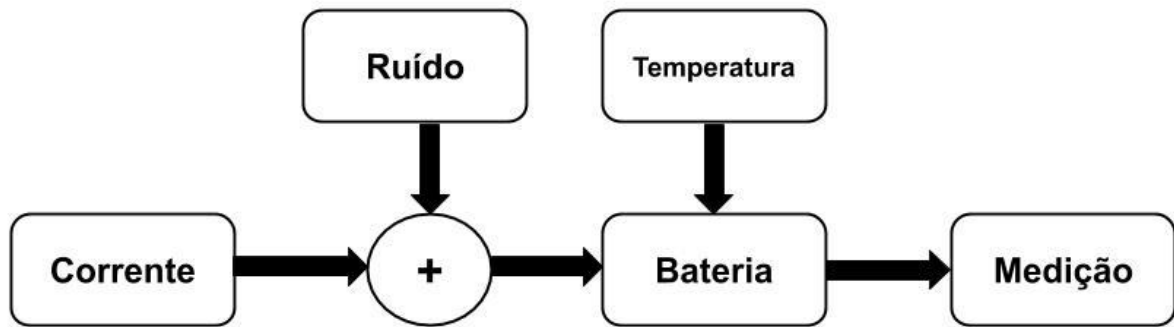
Tendo a célula de bateria com o seu valor máximo de capacidade, é então iniciado o procedimento de ensaio ao qual será feita uma descarga pulsada. Então, a célula é submetida a uma descarga com a corrente limitada em $0,1C$, ou seja, 10% da capacidade nominal da célula, em um intervalo de tempo de 1 hora. Esse processo de descarga é necessário pois permite o SOC ter uma variação a cada 10% do seu valor anterior, para também realizar o cálculo da resistência interna do modelo em circuito elétrico para cada instante do valor de SOC.

Ao final de cada 1 hora de descarga um procedimento de repouso é realizado tendo um intervalo de tempo de 2 horas, sendo esse tempo necessário para que as propriedades químicas da célula se estabilizem, possibilitando a determinação dos valores da resposta transiente da célula de bateria, a constante de tempo do ramo R-C do modelo em circuito elétrico da célula.

3.3 MODELO COMPUTACIONAL

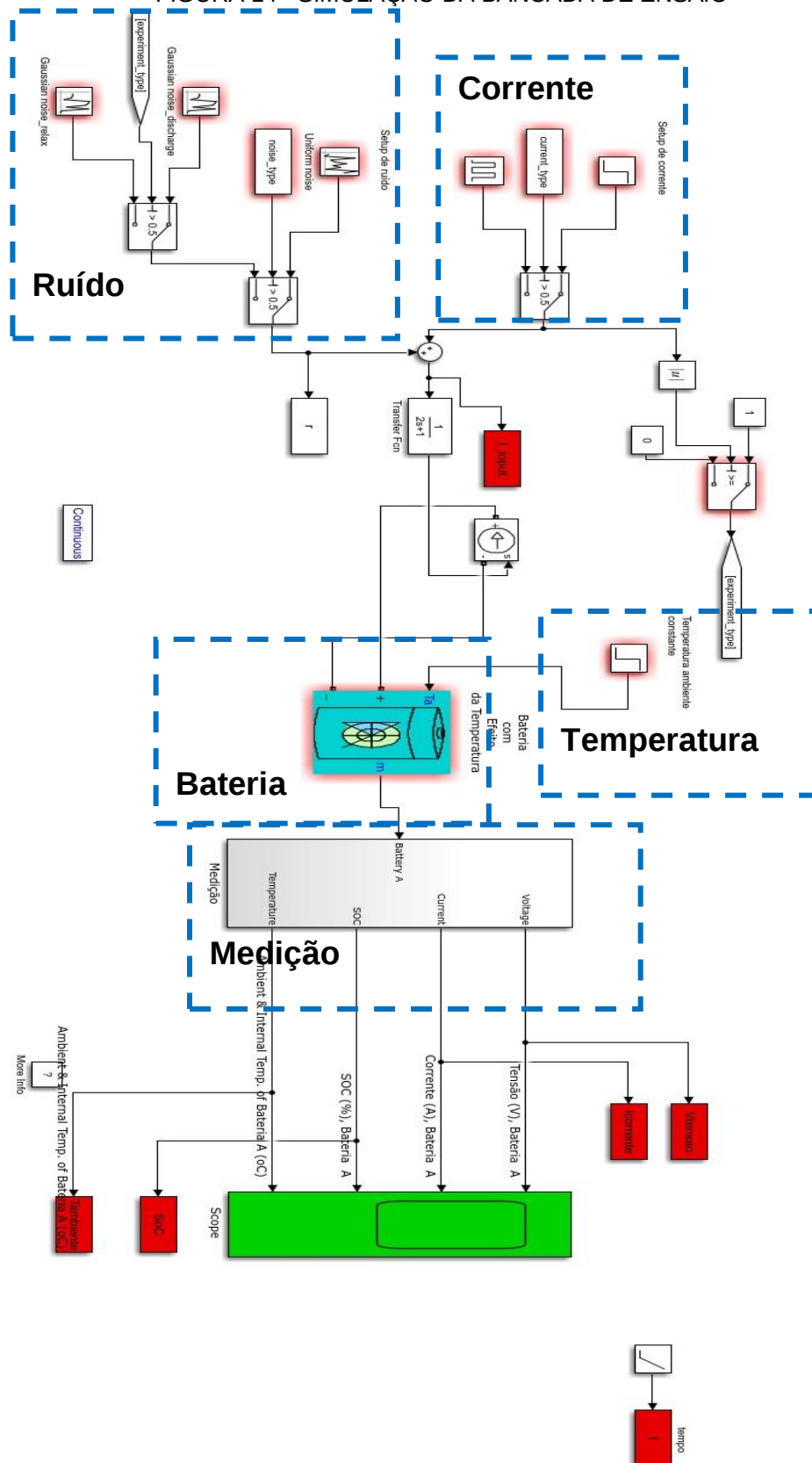
Para o desenvolvimento do modelo computacional utilizado na simulação foi utilizado as condições do experimento descrito nesse capítulo, sendo dividido em cinco principais subsistemas: ruído aditivo, corrente, bateria, temperatura e medição. O diagrama de bloco dos principais subsistemas é ilustrado na Figura 13.

FIGURA 13 - DIAGRAMA DE BLOCO DA SIMULAÇÃO



É ilustrado na Figura 14 o modelo computacional para simular os ensaios de bateria de lítio-íon utilizando o *software* Matlab/Simulink®, sendo necessário a configuração desses blocos com os valores referente ao tipo de célula de bateria, temperatura ambiente, valores de corrente e os ruídos presentes na fonte de energia. Nas seções seguintes serão descritos sucintamente as funcionalidades de cada bloco utilizado na simulação.

FIGURA 14 - SIMULAÇÃO DA BANCADA DE ENSAIO



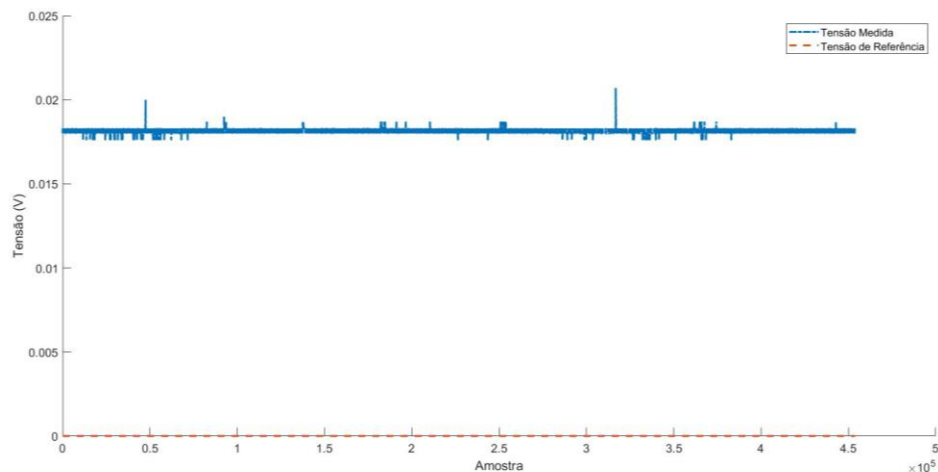
3.3.1 Ruído Aditivo

Através de resultados experimentais, foi verificado que a corrente fornecida pela fonte de alimentação apresenta valores diferentes do definido como referência para o período de repouso, que é 0 A. Na Figura 15, é possível observar o histograma dos valores da corrente diferentes em relação ao valor de referência, com isso, podemos identificar a quantidade de vezes que houve uma ocorrência desses valores.



O valor adicional da fonte de alimentação é ilustrado na Figura 16, apresentando um valor médio de 0,018 A.

FIGURA 16 - GRÁFICO DA CORRENTE DE EXPERIMENTO REAL DURANTE REPOUSO



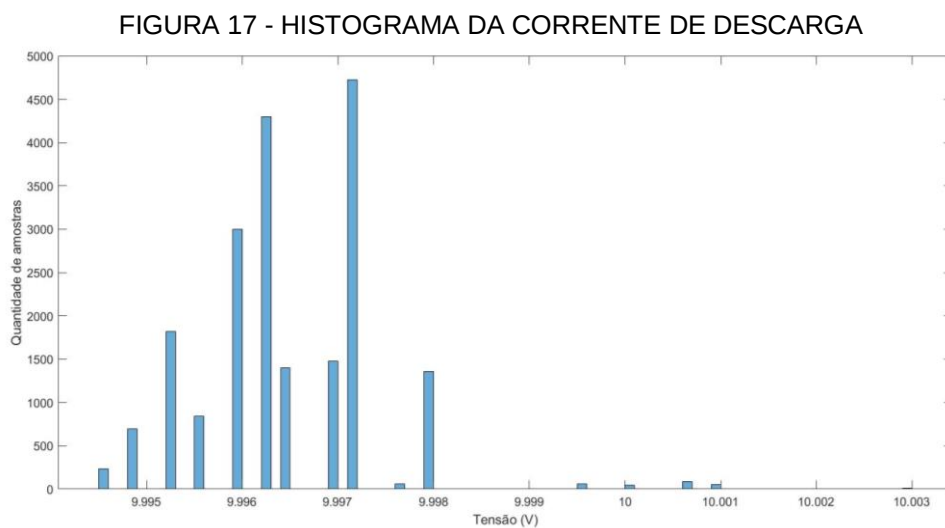
Então, foi realizado um tratamento dos valores de corrente medidos, tendo como finalidade a determinação dos valores característicos do ruído do sistema, como valor médio da variação e desvio padrão.

Para o valor médio, foi realizada a diferença entre o valor considerado como referência e o valor medido, feito uma soma desses valores e então, a divisão dessa soma pela quantidade de valores utilizados nessa soma.

Após o cálculo do valor médio, então é calculado o desvio padrão, que é a dispersão em relação a diferença entre o valor de referência e o valor da corrente medido.

O valor médio e o desvio padrão são utilizados como valores de configuração no bloco de ruído uniforme, pois foi verificado que o efeito acontece em todos os instantes do fornecimento da corrente para a bateria.

Também foi observado a corrente durante o procedimento de descarga ao qual a bateria está sendo submetido. Para isso, a Figura 17 ilustra o histograma desse procedimento.



3.3.2 Corrente e Temperatura

A configuração da corrente pode ser usada para definir o tipo de ensaio de baterias a ser realizado, tal como: a) corrente pulsada, para determinar os parâmetros elétricos da bateria, e b) corrente contínua, para determinar as características de carga e descarga da bateria.

Considerando o experimento de corrente pulsada, pode ser utilizado o bloco de gerador de sinais existente no Matlab/Simulink®, na qual foi configurado um sinal pulsado periódico. A amplitude está associada ao valor de corrente com a qual se deseja realizar os experimentos, tal como: 2 A, 10 A, 20 A. Com o valor da amplitude, foi possível determinar os outros parâmetros do gerador do sinal pulsado, tendo em vista que o período e a largura de pulso são informações que necessitam de sincronismo quando está sendo submetido a um repouso ou a uma descarga.

O período é definido como o tempo total, em segundo, de um ciclo de experimento, sendo esse ciclo o tempo de descarga e de repouso. De acordo com os procedimentos de ensaio proposto, o tempo de repouso terá um valor constante de duas horas, sendo necessário calcular a proporção com o tempo de descarga para cada valor de corrente utilizado na simulação, levando em consideração a quantidade de descargas pulsadas que se deseja realizar.

O tempo de duração de pulso do sinal foi considerada o tempo proporcional ao qual a corrente estará no valor de amplitude, que é a corrente de descarga. Caso exista um atraso de tempo, este será equivalente ao tempo que a corrente permanecerá no seu instante inicial, antes de mudar o valor da corrente para a condição de descarga.

Para o experimento de corrente contínua, foi utilizado um degrau já existente no Matlab/Simulink®, tendo como parâmetros de configuração o tempo de duração e a amplitude. Este último parâmetro estará associado à amplitude da corrente do ensaio da bateria.

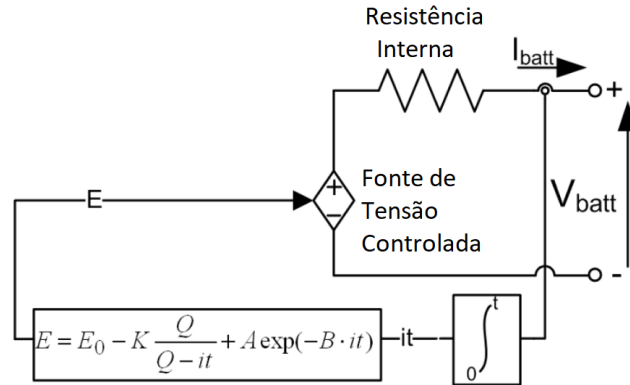
A simulação reproduzirá a influência da temperatura durante o procedimento de ensaio. Para isso, foi necessário modelar o efeito térmico por meio de um sinal de degrau com amplitude equivalente a temperatura na qual será configurado o ensaio da bateria.

3.3.3 Modelo de Bateria

O modelo da célula de bateria utilizado foi o modelo genérico disponibilizado pelo Software Matlab/Simulink®, desenvolvido segundo as teorias de Oliver, Loius-A (2007). O modelo elétrico não linear da bateria que é representado por uma fonte de

tensão controlada e uma resistência interna em série tendo valores constantes. Sendo esse modelo ilustrado na Figura 18.

FIGURA 18 - CIRCUITO NÃO LINEAR DA CÉLULA DE BATERIA PROPOSTO POR OLIVER, LOIUS-A (2007)⁷



Como saída do circuito acima temos a tensão da bateria (V_{batt}) e corrente da bateria (I_{batt}). Essa última grandeza física é utilizada como realimentação do sistema, sendo somada com os valores anteriores da corrente ao longo do tempo (*i versus t*). Esta somatória da corrente é utilizada para o cálculo da tensão de entrada (E) para a fonte de tensão controlada.

Ainda do circuito ilustrado na Figura 18, esse modelo é uma modificação do modelo proposto por Shepherd (1965), já que o modelo original é composto por um termo não linear com a multiplicação da corrente e da tensão de polarização pela divisão entre a capacidade da bateria e a diferença entre a capacidade atual e o somatório da corrente ao longo do tempo.

Esse termo representa a tensão não linear da bateria, que sofre alterações de acordo com a amplitude da corrente (i) e a capacidade atual (Q) da bateria.

Esse modelo representando a tensão dinâmica da bateria, possuindo a equação que pode dividida em duas: processo de carga (Equação 1) e de descarga (Equação 2), considerando que a resistência interna é constante durante esses processos.

⁷ Oliver, Loius-A (2007)

$$V_t = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{it - 0.1Q} \cdot i^* - K \left(\frac{Q}{Q - it} \right) it + Ae^{-Bit} \quad \text{EQUAÇÃO 1}$$

$$V_t = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \left(\frac{Q}{Q - it} \right) it + Ae^{-Bit} \quad \text{EQUAÇÃO 2}$$

Em que:

V_t é a tensão na saída do circuito, em V;

E_0 é a tensão constante da bateria, em V;

K é a tensão de polarização, em V;

Q é a capacidade da bateria, em Ah;

A é a amplitude da zona exponencial, em V;

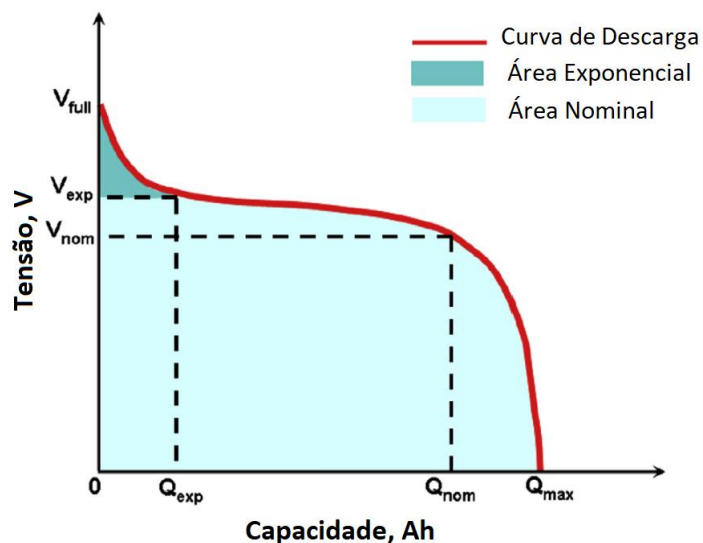
B é o inverso da constante de tempo da zona exponencial, em $(Ah)^{-1}$;

i é a corrente que flui na bateria, em A;

R é a resistência interna da bateria, em Ohm

Para extrair os resultados referentes ao modelo, é usado a curva característica de descarga, ilustrada na Figura 19. Essa curva é obtida a partir de um procedimento experimental na qual a bateria é submetida a uma descarga completa, iniciando-se em uma tensão máxima suportada pela bateria, até o valor mínimo de tensão, quando atinge a capacidade máxima disponibilizada.

FIGURA 19 - CURVA DE DESCARGA CARACTERÍSTICA PROPOSTO PELO MATLAB/SIMULINK



Nesta figura, esta curva de descarga é dividida em em três principais regiões: a primeira região referente à queda do potencial exponencial durante o início da descarga. A segunda região representa o acumulado de carga que é extraída até o momento antes da atingir a tensão nominal da bateria. A terceira região é o instante final da descarga, quando a tensão da bateria cai rapidamente até atingir o valor mínimo de tensão da bateria.

Neste trabalho, foi utilizada uma configuração do modelo com ensaio de carga completa, com corrente contínua de 2A (0,1C), cujos parâmetros do ensaio são especificados na Tabela 1.

Tabela 1 - VALORES DE CONFIGURAÇÃO DA MODELAGEM DA BATERIA

Valores	
Tensão Nominal	3,3 V
Capacidade	20 Ah
Tensão Mínima	2 V
Tensão Máxima	3,6 V
Corrente de Descarga	2 A (0,1C)

Com a configuração do modelo de bateria, foi possível observar a curva característica da bateria, ilustrada na Figura 20. Ainda com relação a essa figura, é possível notar que a tensão nominal da bateria ocorre durante o valor de 10Ah, ou seja, 50% do SOC. A área da curva que a característica da tensão da bateria é exponencial, é visualizada na Figura 21, sendo o valor de tensão de 3,35V para um instante de SOC 3% em relação ao valor inicial. Sendo esses valores e essa curva característica correlacionada com as mencionadas no manual da bateria.

FIGURA 20 - CURVA DE CONFIGURAÇÃO DA CÉLULA DE BATERIA

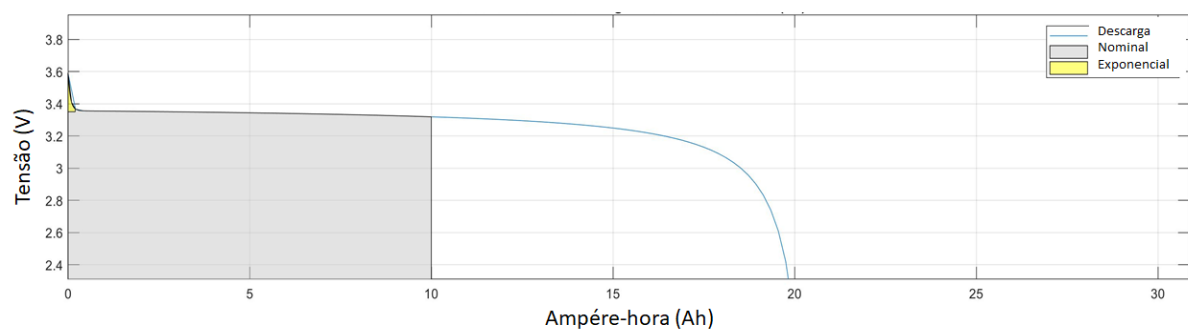
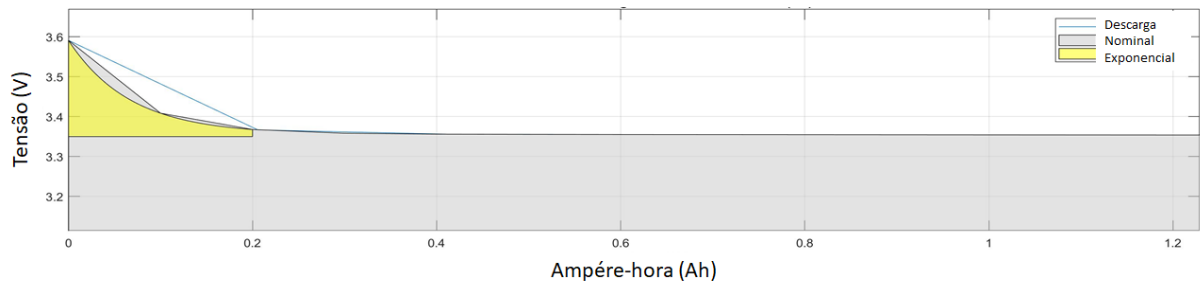
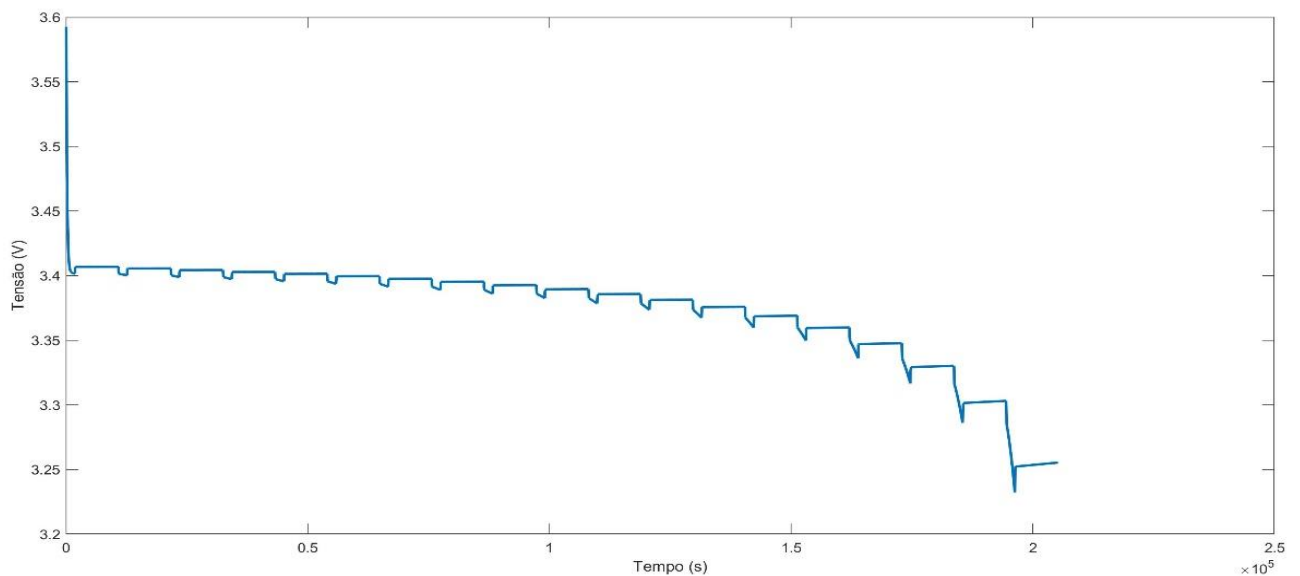


FIGURA 21 - REGIÃO EXPONENCIAL DA CONFIGURAÇÃO DA CÉLULA DE BATERIA



Ao final de todas as configurações realizadas no software Matlab/Simulink®, foi verificado o sinal de tensão nos terminais da célula de bateria após a realização do procedimento de ensaio proposto no fluxograma da Figura 12. A Figura 22 ilustra a tensão nos terminais da célula de bateria.

FIGURA 22 - CURVA DE TENSÃO ENSAIO PROPOSTO PARA UMA DESCARGA PULSADA



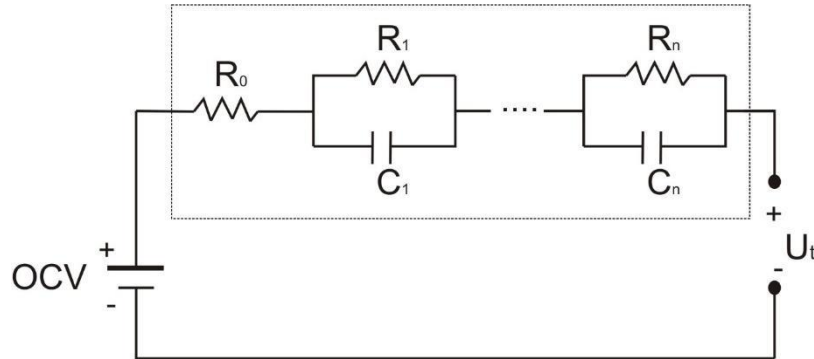
3.4 ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO EM CIRCUITO ELÉTRICO

O modelo em circuito elétrico das células de bateria é um circuito elétrico com a conexão de uma resistência interna em série com uma quantidade “n” finitas de resistores e capacitores em paralelos, que os ramos determinam o tempo da resposta dinâmica da célula de bateria.

A Figura 23 ilustra uma representação genérica do modelo elétrico da bateria, na qual a tensão U_t é indicada como a tensão nos terminais da bateria, o

OCV é a tensão em circuito aberto da bateria, o R_0 a resistência interna da célula de bateria.

FIGURA 23 - MODELO GERAL EM CIRCUITO ELÉTRICO DE CÉLULA DE BATERIA



Ainda da Figura 23, como o circuito apresenta uma quantidade finita de ramos resistor e capacitor em paralelos (R-C), os resistores ($R_1, \dots, R_n$) do ramo indicam a resistência de polarização, já a constante de tempo ($T_1, \dots, T_n$) calculada usando os valores dos resistores e capacitores dos ramos representam a resposta da tensão dinâmica transitória durante as operações de carga, descarga ou repouso.

Para determinar os valores de cada componente do circuito elétrico, foram utilizados os dados de tensão dos terminais coletados através do procedimento de ensaio proposto nesse trabalho. Inicialmente, sabendo que o modelo da bateria é formado por uma quantidade “n” de ramos R-C, podemos considerar que ele é regido pelas equações dos componentes acumuladores de energia, nesse caso, o capacitor. A Equação 3 representa a tensão do componente na operação de descarga.

$$V(t) = V_c (1 - e^{-t/T_1})$$

EQUAÇÃO 3

Em que:

$V(t)$ é a tensão na saída do circuito;

V_c é a tensão do capacitor de um ramo específico;

T_1 é o tempo da resposta dinâmica referente ao ramo 1;

A equação geral do modelo elétrico da bateria é dada pela Equação 4, obtida por meio da segunda Lei de Kirchhoff (lei das malhas). Nesta equação tem-se que a tensão da fonte $V(t)$ é igual a somatória algébrica das quedas de potencial contidos na malha.

$$V(t) = V_f + V_1(1 - e^{-t/T_1}) + \dots + V_n(1 - e^{-t/T_n}) \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

$V(t)$ é a tensão na saída do circuito;

V_f é a tensão em cima do resistor R_0 ;

V_1 é a tensão do ramo 1;

T_1 é o tempo da resposta dinâmica referente ao ramo 1;

V_n é a tensão no n-ésimo ramo;

T_n é o tempo da resposta dinâmica referente ao n-ésimo ramo;

Pela Equação 4 é possível notar que o esforço computacional associado ao modelo elétrico é elevado, principalmente quando considera um grande número de ramos R-C usados no modelo elétrico da bateria. Visando minimizar o custo computacional associado às simulações usando os modelos elétricos, é realizado um ajuste de curva da tensão dos terminais da bateria. Encontrado uma quantidade mínima de ramos R-C que o modelo elétrico se torna mais fidedigno com as condições reais da bateria.

Através do experimento realizado, corrente pulsada, para cada conjunto de valores de tensão, considerando intervalos de repouso após um procedimento de descarga, e para cada determinado valor de SOC, é feito um ajuste da curva desse conjunto de valores de tensão. Para cada conjunto de valores de tensão, é gerado um gráfico com o resultado do primeiro valor de tensão exponencial do primeiro ramo R-C. Então, é feito um ajuste de curvas utilizando a Equação 4, com a finalidade de que a curva gerada pela equação tenha um menor erro residual em relação a curva da tensão dos terminais.

A quantidade de exponenciais na Equação 4 define a quantidade de ramos R-C que serão satisfeitos para o melhor ajuste da curva de tensão de circuito aberto. Utilizando a Equação 4, é feito um ajuste com a primeira exponencial e comparado com o erro residual. O mesmo procedimento é realizado com a adição de mais

exponenciais a Equação 4, com a finalidade de encontrar o menor erro residual para as combinações.

De acordo com Lin (2014), a quantidade de ramos R-C usados aumenta o custo de processamento computacional e nem sendo tão necessário possuir uma quantidade elevada de ramos, onde dois ramos apresentam uma boa aproximação para o modelo.

$$V(t) = V_f + V_1(1 - e^{-t/T_1}) + V_2(1 - e^{-t/T_2}) \quad \text{EQUAÇÃO 5}$$

Onde:

$V(t)$ é a tensão na saída do circuito;

V_f é a tensão em cima do resistor R_0 ;

V_1 é a tensão do ramo 1;

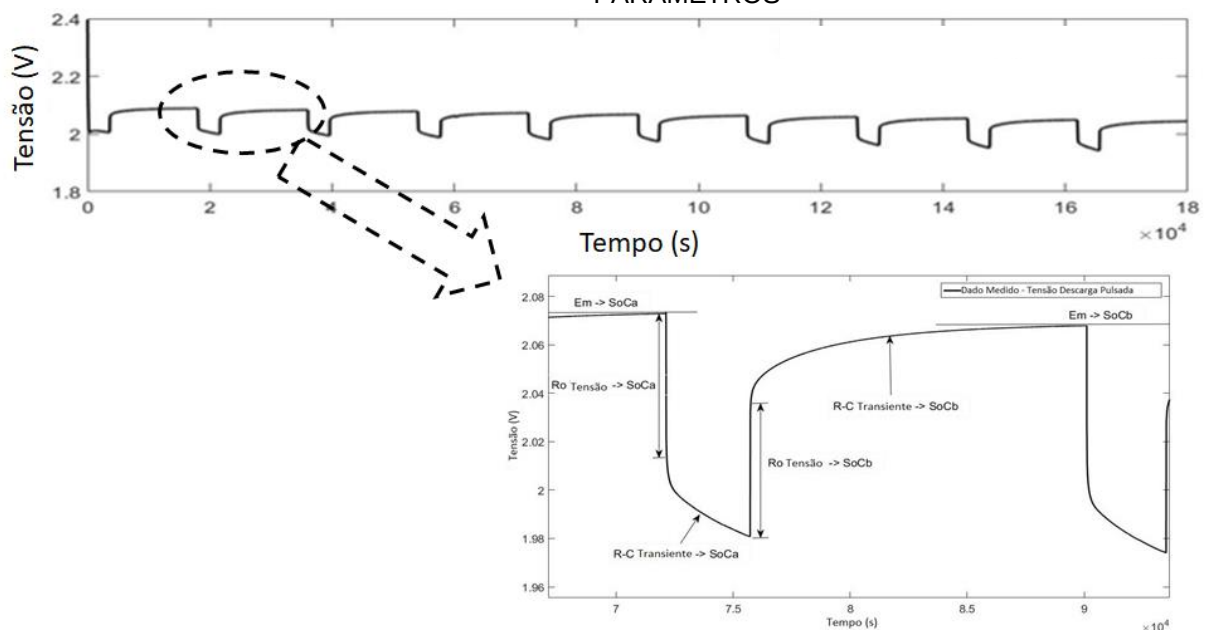
T_1 é o tempo da resposta dinâmica referente ao ramo 1;

V_2 é a tensão no ramo 2;

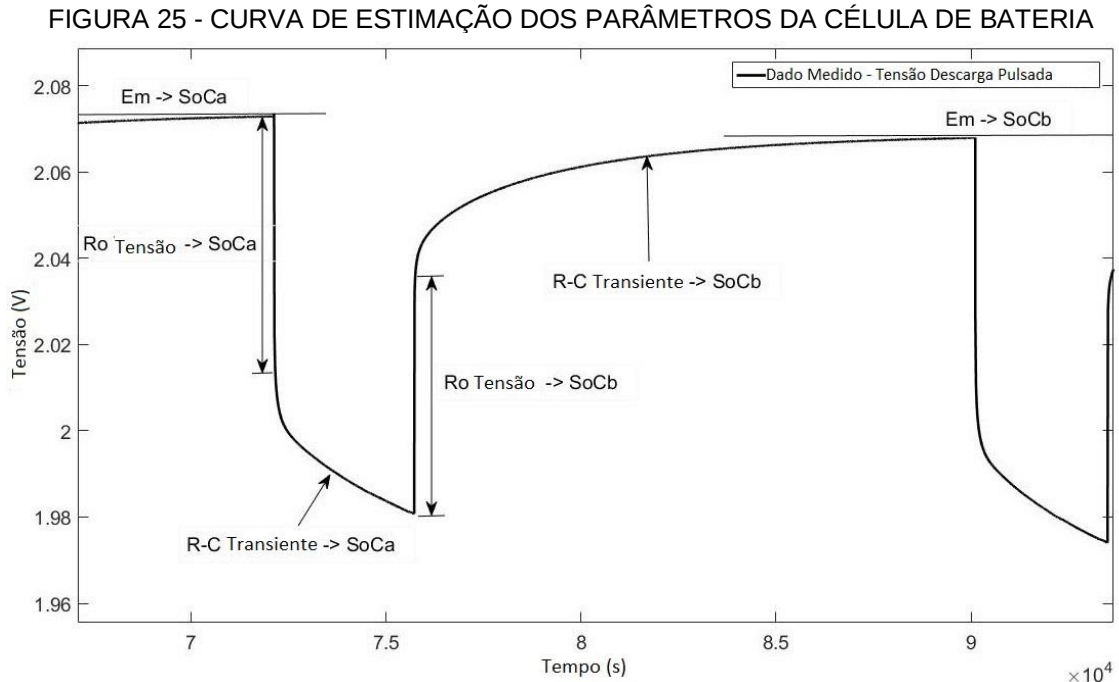
T_2 é o tempo da resposta dinâmica referente ao ramo 2;

Os valores dos componentes elétricos também são determinados pelos dados de tensão entre os terminais definidos a partir dos ensaios. Na Figura 24 é ilustrado como são calculados os valores dos componentes.

FIGURA 24 - CURVA DE DESCARGA PULSADA COM DESTAQUE PARA ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS



Após cada descarga, o valor de SOC é alterado, sendo necessário recalcular os parâmetros da bateria. Para isso, o novo valor de SOC considerado e então, refeito o cálculo dos parâmetros para esse novo estado da bateria. Na Figura 25 é ilustrado as principais variáveis utilizadas na estimação dos parâmetros do modelo em circuito elétrico da célula de bateria.



A sigla Em é o valor da tensão dos terminais da célula de bateria medidos durante o experimento, sendo que esse valor será considerado para um determinado valor de SOC da célula de bateria representado por $SoCa$.

Segundo Jackey, Saginaw, Sanghvi, Gazzarri, & Huria (2013), o valor do resistor interno R_0 é calculado de acordo com a lei de Ohm, que determina que a resistência seja constante e o cálculo do seu valor é definido pela razão entre a diferença de potencial elétrico e a corrente que circula o componente. Para o resistor interno, a diferença de potencial é dada pelo primeiro valor da tensão no momento que a célula é colocada em repouso e o instante exatamente posterior.

Ainda de acordo com Jackey, Saginaw, Sanghvi, Gazzarri, & Huria (2013), para os valores de $R-C$ de cada um dos ramos, então são definidos as constantes de tempo (T_1 e T_2) que estabelecem a resposta dinâmica da tensão de cada momento de repouso da célula de bateria, isso é conhecido como tempo de acomodação. A Equação 6 define a forma de cálculo da constante. Ainda nos possibilitando realizar

o cálculo da resistência atrelada ao ramo, com isso, a constante de tempo ajudará agora a encontrar a capacitância do outro componente que faz parte do ramo.

$$T_1 = R_1 C_1$$

Equação 6

Devido às limitações do modelo elétrico, tendo em vista que as reações químicas que acontecem, foi observado que estas influenciam diretamente no comportamento do elemento de bateria, fazendo aumentar ou diminuir a temperatura na superfície do elemento. Então, para estimar detalhadamente o comportamento da distribuição da temperatura ao longo dos processos de carga e descarga, é realizado um modelo térmico dos elementos. Visando assim, realizar a prevenção de superaquecimento dos elementos para alguma dessas condições de operação, sabendo também que, com o aumento da temperatura, os elementos de bateria sofrem alterações em seus componentes químicos, degradando seu material e diminuindo seu ciclo de vida.

4 RESULTADOS

4 RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados referentes aos experimentos realizados em laboratório e simulação com o modelo genérico, sendo dividido em dois subtítulos, como: características elétricas e parâmetros do modelo em circuito elétrico.

Os ensaios experimentais seguiram os procedimentos propostos no Capítulo 3, de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 12. E o modelo computacional levou em consideração as variações da temperatura, correntes de carga e descarga e ruído aditivo. Tendo como objetivo a reprodução do procedimento de ensaio em laboratório com todas as condições encontradas no ambiente real.

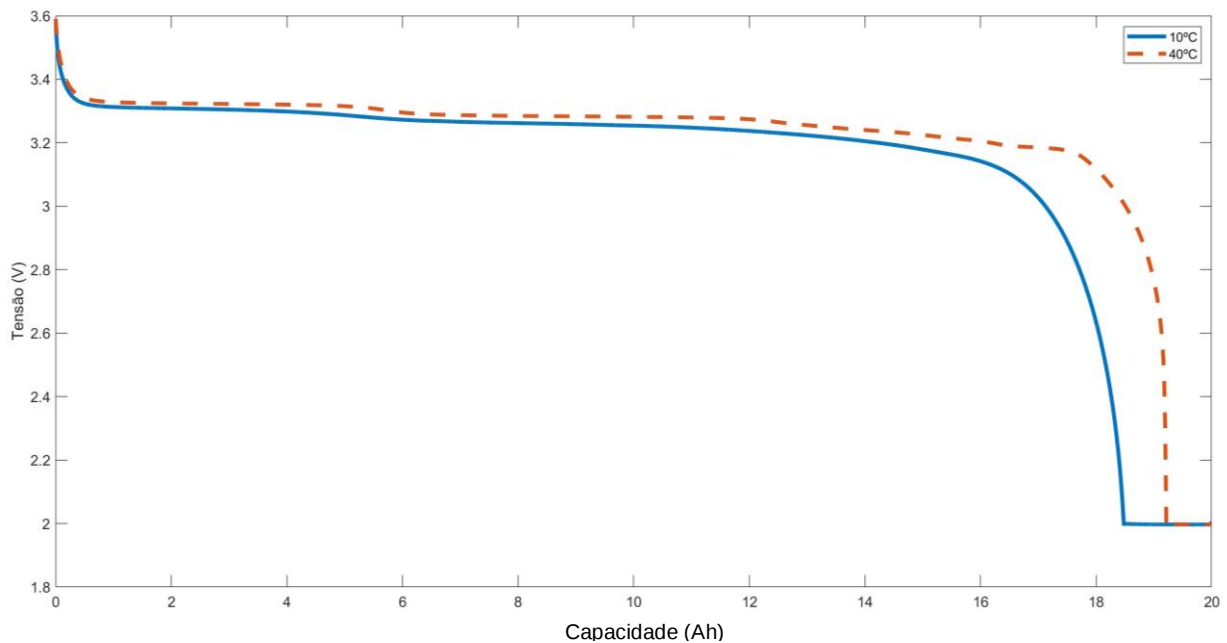
4.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA CURVA CARACTERÍSTICA DE DESCARGA DA BATERIA

Para caracterizar o comportamento da bateria durante uma operação de uso contínuo, com o intuito de também ter os parâmetros para o modelo genérico da bateria no ambiente de simulação, foi realizado um ensaio de descarga contínua completa na célula de bateria. Como a capacidade nominal desta célula é de 20 Ah, a célula de bateria fornece uma corrente contínua máxima de 20 A durante 1 hora de ensaio.

Foi proposto a utilização do fator de capacidade C10, que estabelece que a corrente fornecida pelo elemento de bateria tem que ter duração de 10 h, ou seja, a corrente contínua utilizada foi de 2 A, com isso, o SoC apresentará uma variação de 10% a cada 1 hora de descarga.

Inicialmente, o ensaio teve como faixa de variação da temperatura o intervalo de 10°C até 40°C. Na Figura 26 se apresentam as curvas de descarga da bateria (tensão nos terminais da bateria) para estes dois limites de temperatura. Nesta figura se observa o efeito da temperatura sobre a curva de descarga, isto é, a maior temperatura tem-se uma capacidade prolongada, para uma mesma corrente de descarga.

FIGURA 26 - TENSÃO VS CAPACIDADE COM EFEITO DA TEMPERATURA

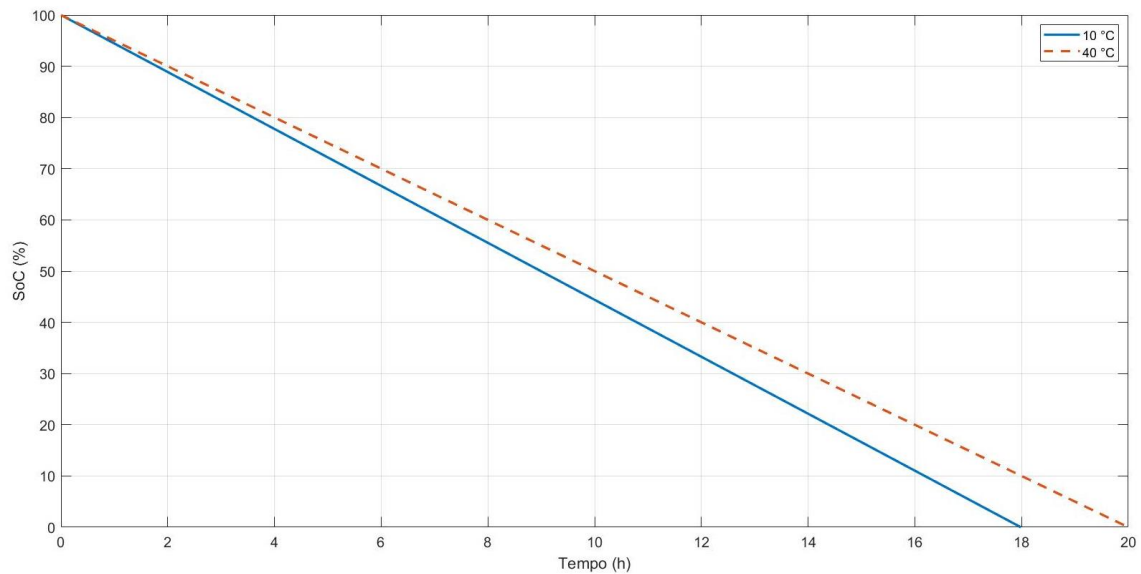


Para temperatura de 40 °C, a queda de tensão inicial apresentou o mesmo comportamento da curva referente a temperatura de 10 °C, porém quando se passou 2 hrs do processo de descarga, a sua tensão nos terminais teve uma queda acentuada, atingindo o valor mínimo de tensão, em torno de 2 V. É possível comprovar que a temperatura influencia nos processos internos e reações químicas retardando a condição final da célula, como foi visto na Figura 1, presente como dados do fabricante da bateria.

Esse fenômeno acontece devido a resistência interna da bateria que tem um aumento do seu valor quando submetido a temperaturas mais baixas, no caso 10 °C. Sendo possível afirmar que as células de bateria têm um melhor rendimento quando submetidas a temperaturas mais elevadas de operação determinada pela liga de lítio ao qual a célula de bateria é composta.

Para estimar o valor do SoC da célula de bateria, foi utilizado o princípio de que a cada uma (01) hora de descarga da célula de bateria com uma corrente 0,1C da capacidade nominal, o SoC da célula de bateria teria uma variação de 10% em relação ao seu valor anterior. Essa proposição foi explicitada no ensaio proposto presente no Capítulo 3. Sendo possível ser ilustrado na Figura 27 o tempo total de descarga.

FIGURA 27 - SOC VS TEMPO DE DESCARGA



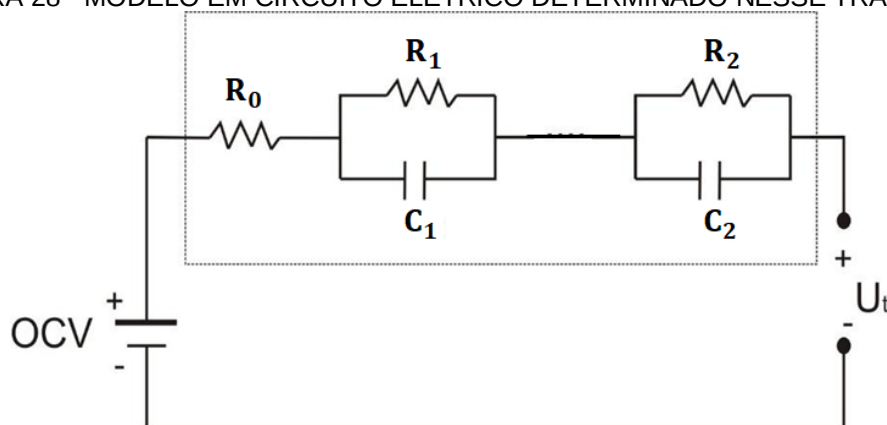
4.2 PARÂMETROS DO MODELO EM CIRCUITO ELÉTRICO

Com o auxílio do padrão de ensaio descritos na seção 3.2, foi possível encontrar os valores dos componentes elétricos que fazem parte do modelo em circuito elétrico que representa a célula de bateria, para o experimento e para a simulação.

O modelo em circuito elétrico pode ser constituído de uma quantidade infinita de ramos R-C, entretanto por meio dos dados de ensaio de descarga pulsada é possível determinar a quantidade de ramos que apresenta um menor erro quando feito o ajuste de curva.

Então, por meio dos ensaios realizados neste trabalho, foi determinado que o modelo em circuito elétrico que melhor se aproxima com os dados da célula de bateria apresenta uma quantidade de 2 ramos de resistência em paralelo com o capacitor. O modelo em circuito elétrico escolhido é ilustrado na Figura 28.

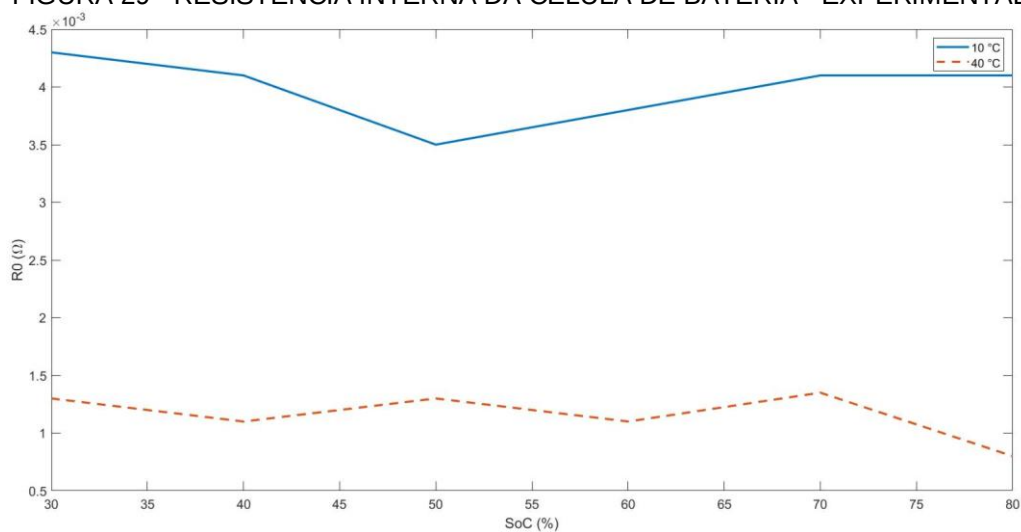
FIGURA 28 - MODELO EM CIRCUITO ELÉTRICO DETERMINADO NESSE TRABALHO



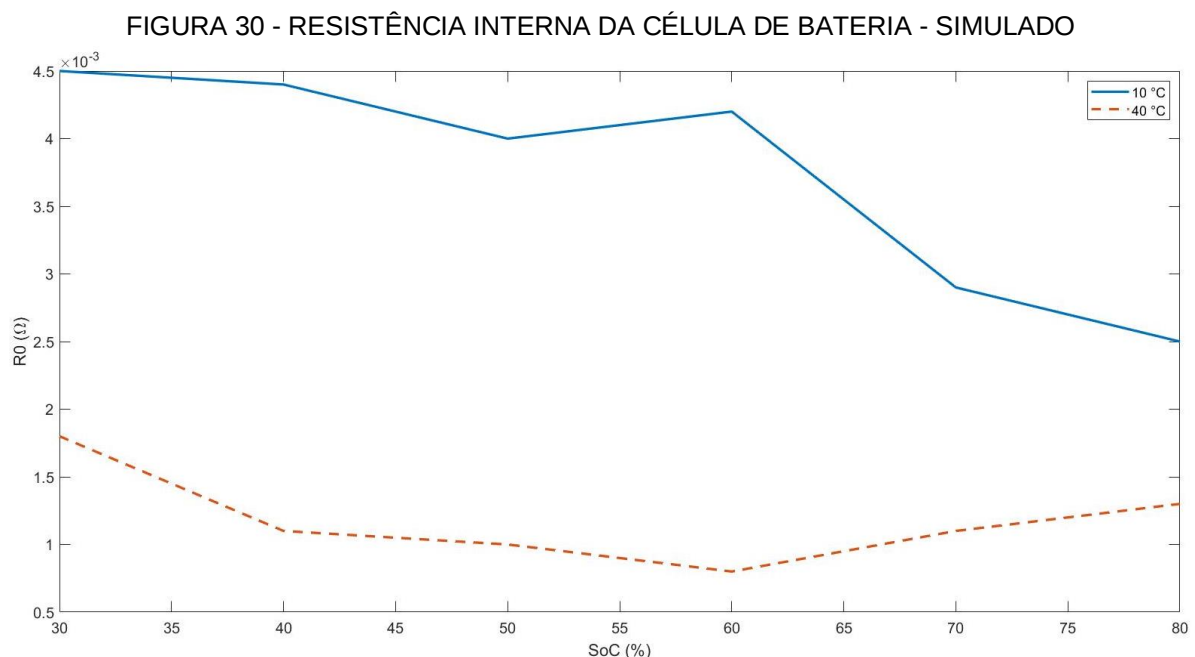
Para os resultados apresentados nesse trabalho foi considerado a faixa de SOC entre 30% e 80%, por ser o intervalo em que a curva de tensão em circuito aberto de descarga da célula de bateria apresenta um comportamento linear, como verificado também por Xing, et al., (2014).

Através da Figura 29, é possível notar a variação da resistência interna provenientes de dados experimentais que ocorre ao longo do SOC para as duas temperaturas, 10 °C e 40 °C. A partir desta figura, foi observado que para a temperatura de 10°C o valor da resistência interna é maior quando comparado com a resistência interna para uma maior temperatura, isto é 40°C. Também foi observado, que a medida que o SoC diminui a resistência interna aumenta, para ambas das temperaturas, sendo um comportamento típico das baterias e constatado experimentalmente neste trabalho.

FIGURA 29 - RESISTÊNCIA INTERNA DA CÉLULA DE BATERIA - EXPERIMENTAL

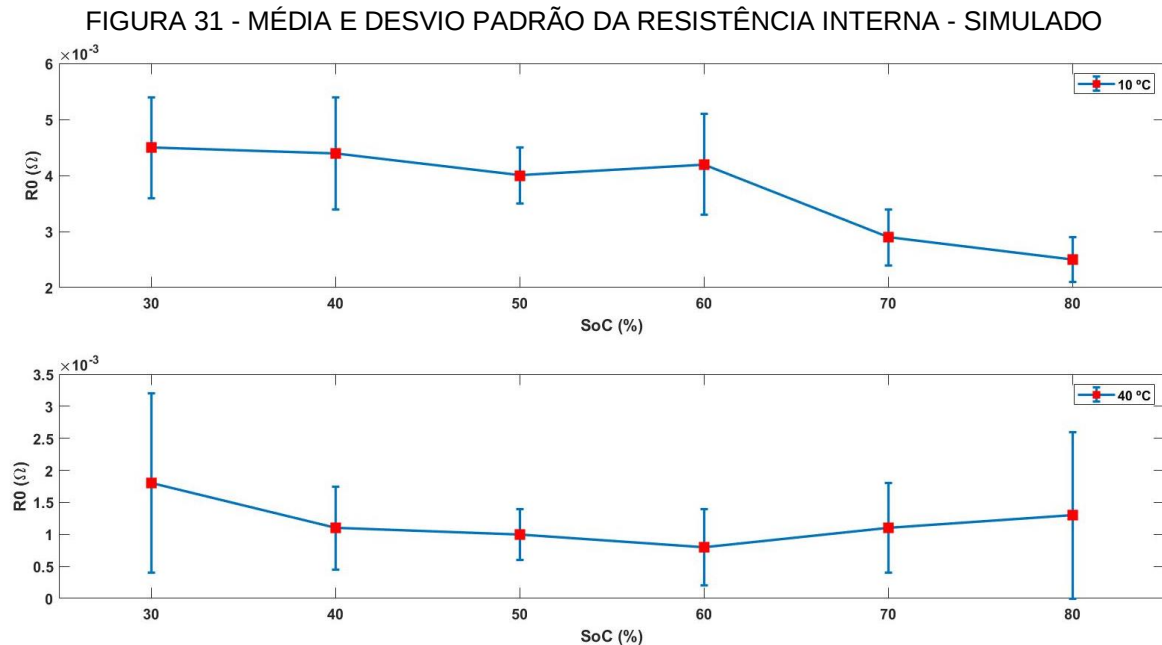


Com auxílio do modelo desenvolvido neste trabalho e apresentado na Seção 3.3, foram realizadas simulações computacionais para as temperaturas de 10°C e 40°C e estimados os parâmetros da bateria, entre eles a resistência interna na bateria R_0 . A resistência interna da célula de bateria, obtida do modelo computacional, é ilustrada na Figura 30, sendo possível análise de forma simular o comportamento da resistência interna da bateria. Nesta figura, foi possível observar que para temperaturas mais baixas, o valor da resistência interna há um decréscimo do seu valor quando atinge os valores de SOC maior, a partir de 70% e 80%. Ainda, é possível notar que a curva apresenta uma maior diferença de valores em relação aos valores anteriores de SOC. De outro lado, para temperatura mais alta, é possível notar que a dinâmica da curva apresenta valores da resistência interna da bateria com pequenas diferenças em relação aos valores anteriores de SOC, e também, que para valores maiores de SOC, em torno de 80%, essa resistência interna tende a aumentar de valor.



Por meio do uso do modelo computacional, foi possível repetir os experimentos por 12 vezes. De posse dos dados, foi realizado o cálculo da média dos valores da resistência interna da bateria para cada um dos valores de SOC e para cada temperatura, também sendo feito o cálculo do desvio padrão para cada instante do valor de SOC. O desvio padrão informa a variação das estimações de R_0

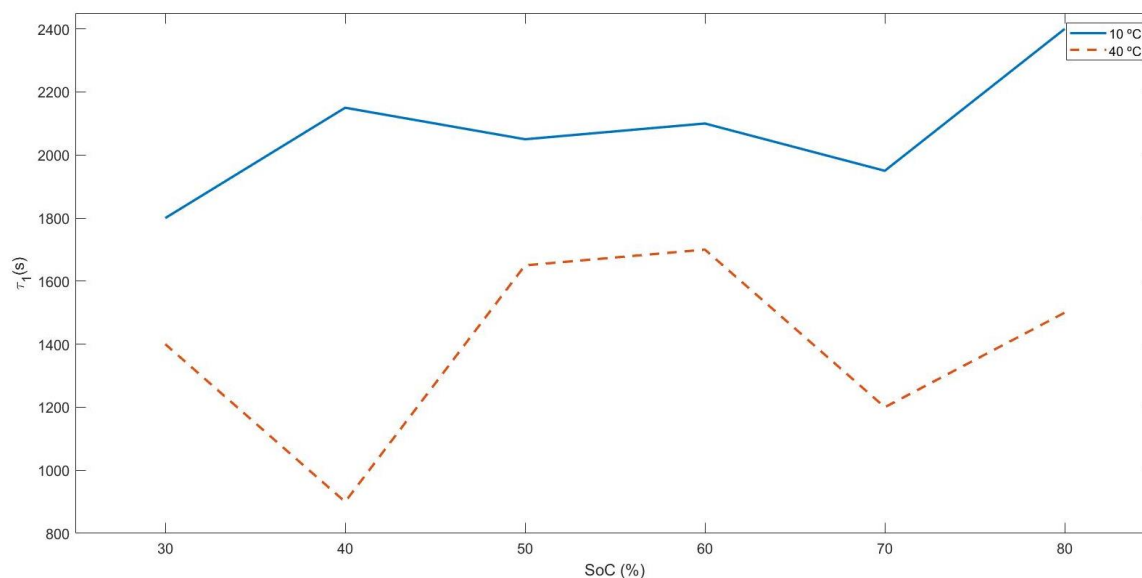
com relação ao valor médio da resistência interna da bateria. Essas informações são ilustradas através da Figura 31.



Dando sequência a análise do modelo elétrico da bateria, em seguida serão apresentados os resultados associados a estimação das constantes de tempo dos ramos R-C considerando-se os efeitos da temperatura. Considerando o modelo em circuito elétrico ilustrado na Figura 23, esse modelo é constituído de 2 ramos R-C, denominados τ_1 (primeiro ramo) e τ_2 (segundo ramo), então as próximas figuras irão ilustrar as variações dos valores da constante de tempo desses 2 ramos R-C, sendo que essas constantes de tempo possuem uma diferença na funcionalidade do modelo equivalente do circuito elétrico, tais como: um apresenta um comportamento dependente da corrente e outro é representativo a histerese.

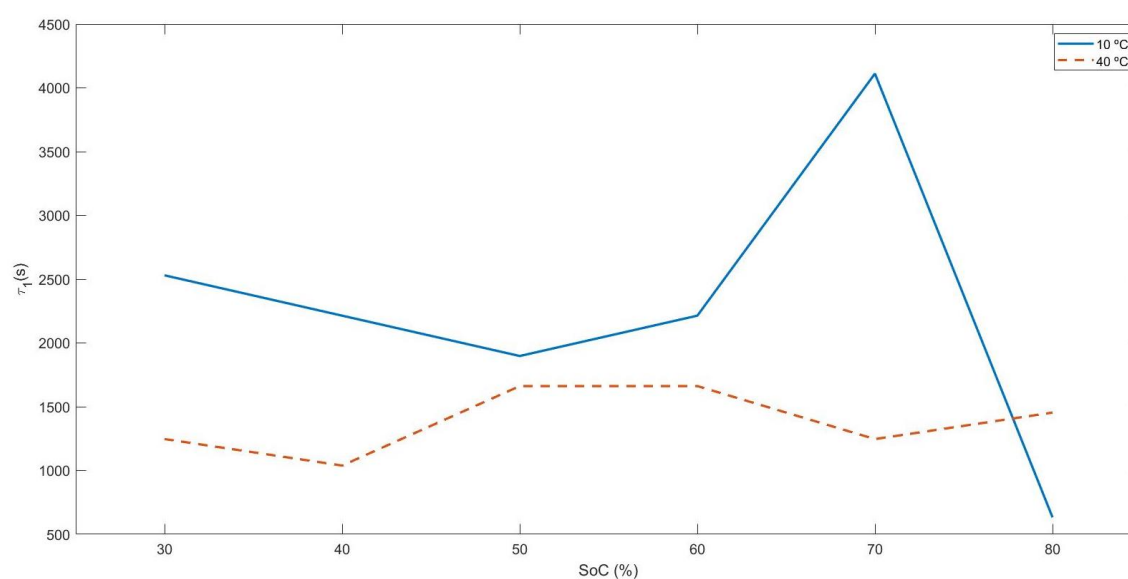
Na Figura 32 apresentam-se as variações das constantes de tempo do primeiro ramo R-C para as temperaturas de 10°C e 40°C, proveniente de ensaios experimentais realizados em ambiente de laboratório. De acordo com este resultado experimental, é possível notar que os valores de τ_1 apresentam uma dependência maior da temperatura. Foi observado que para a temperatura de 40 °C a constante de tempo do primeiro ramo R-C apresenta um valor menor quando comparado com uma menor temperatura de 10 °C. Isto é, a maior temperatura a dinâmica do sistema é mais rápida.

FIGURA 32 - CONSTANTE DE TEMPO PRIMEIRO RAMO R-C - EXPERIMENTAL



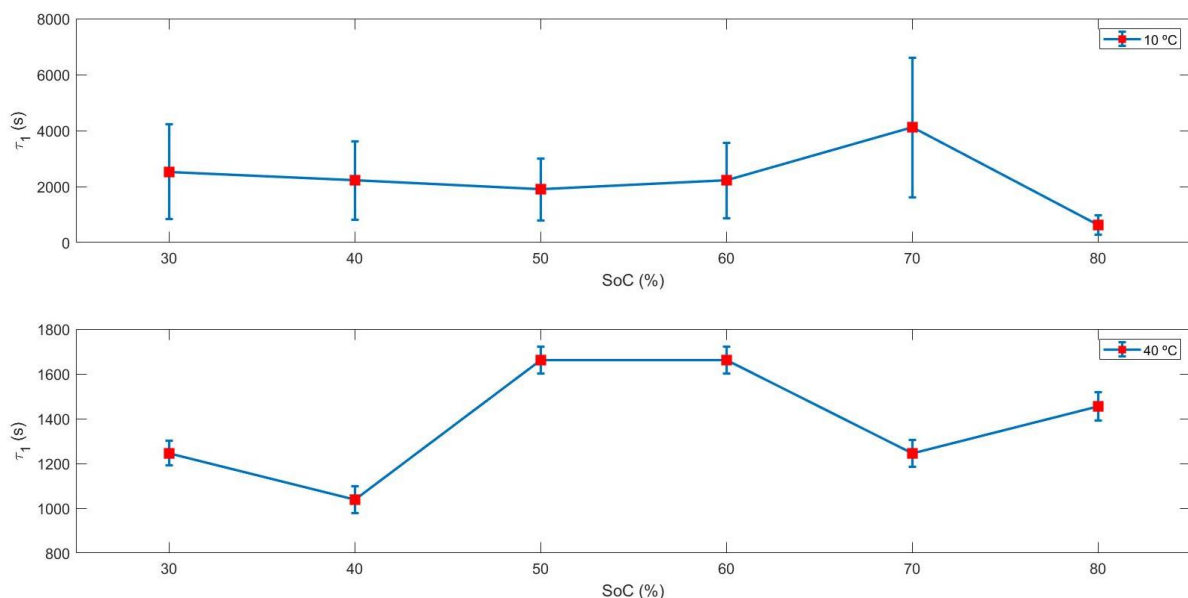
Com a finalidade de verificar o resultado experimental apresentado na Figura 32, foi utilizado o modelo computacional para fazer a repetibilidade dos experimentos e comprovar os fenômenos observados no ambiente real. Então, através da Figura 33 é possível analisar que para temperatura mais baixa, a constante de tempo tem valores maiores do que para temperatura mais alta. Ainda para temperatura mais baixa, no instante de SOC de 80%, a constante de tempo é considerada lento em relação aos outros instantes de SOC, havendo um aumento de tempo no instante de SOC de 70%.

FIGURA 33 - CONSTANTE DE TEMPO DO PRIMEIRO RAMO R-C - SIMULADO



Com a repetibilidade gerada pelo ambiente de simulação, foi possível realizar o cálculo do valor médio dos dados de constante de tempo do primeiro ramo R-C e, o desvio padrão dos dados coletados pelo ambiente de simulação com a finalidade de entender o comportamento dos dados ao longo das repetições. Na Figura 34 se ilustram os resultados de simulação na qual estão representados o valor médio e o desvio padrão para cada ponto de referência. O desvio padrão indica como os valores médios da constante de tempo variam com relação ao valor médio. Foi observado que estas variações são maiores quando diminui a temperatura.

FIGURA 34 - MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA CONSTANTE DE TEMPO DO PRIMEIRO RAMO R-C - SIMULADO

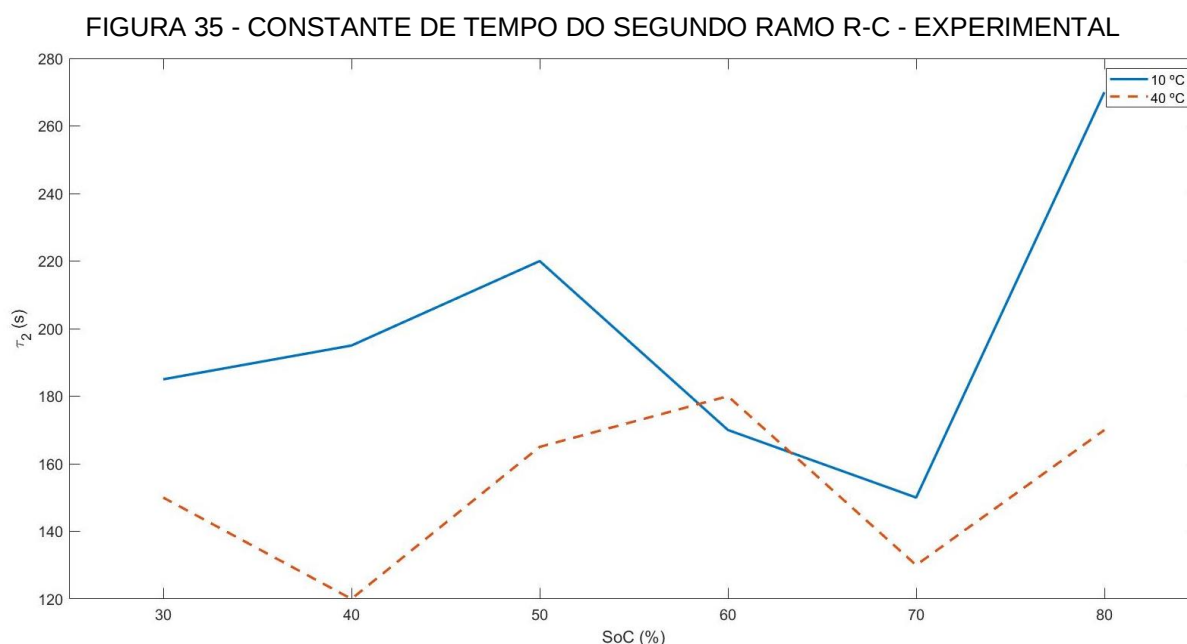


De acordo com Jackey (2013), esse comportamento acontece devido a dependência da constante de tempo com a temperatura, fazendo com que para temperaturas mais elevadas a resposta dinâmica seja mais rápida, pois essa resposta dinâmica ilustra o comportamento da histerese na célula de bateria. Esse comportamento ocorre devido a acomodação das reações químicas dentro da célula.

Através da Figura 28, o modelo em circuito elétrico da célula de bateria é composto por 2 ramos R-C. Nas Figura 35, Figura 36, Figura 37 serão mostrados os resultados referentes ao segundo ramo R-C do modelo em circuito elétrico, representando o comportamento da histerese que ocorre nas reações químicas da célula.

Através da Figura 35, as curvas de constante de tempo há um cruzamento para instante de SOC de 60%. Para a temperatura mais baixa, o valor da constante de tempo apresenta um valor maior no primeiro instante de 80% do SOC, mas que logo no instante de 70% há uma queda mais acentuada no valor, permanecendo nesse perfil de aumento e diminuição do valor para instantes diferentes do SOC.

Para a temperatura mais alta, é possível notar que as variações nos valores da constante de tempo em relação aos outros valores de SOC são menores, fazendo com que a resposta dinâmica do apresente menor diferença em relação a temperatura mais baixa.

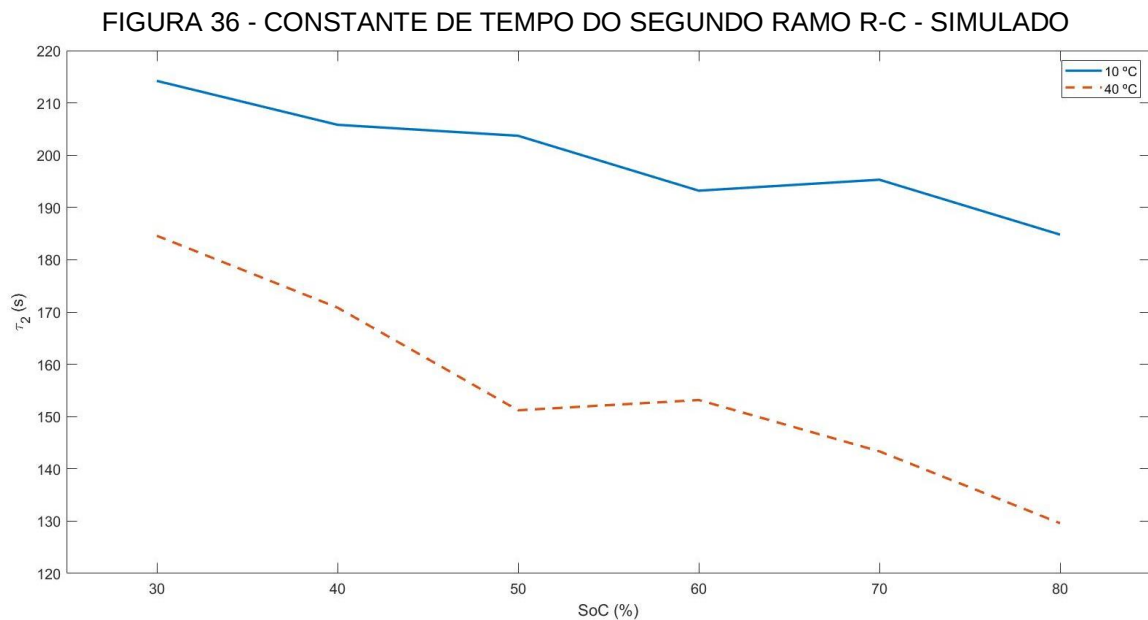


Através da Figura 36, é possível notar a relação das curvas para as duas temperaturas no modelo computacional, havendo uma diferença inicial de 70s e quando o SOC está em 30%, essa diferença diminui apresentando o valor de 30s.

Para temperatura mais baixa, a constante de tempo apresenta um valor maior que para temperatura mais alta, considerando um procedimento de descarga, a constante de tempo para o segundo ramo R-C tem um comportamento de aumento ao longo da diminuição do SOC, fazendo com que o ajuste de curva se torne mais rápido.

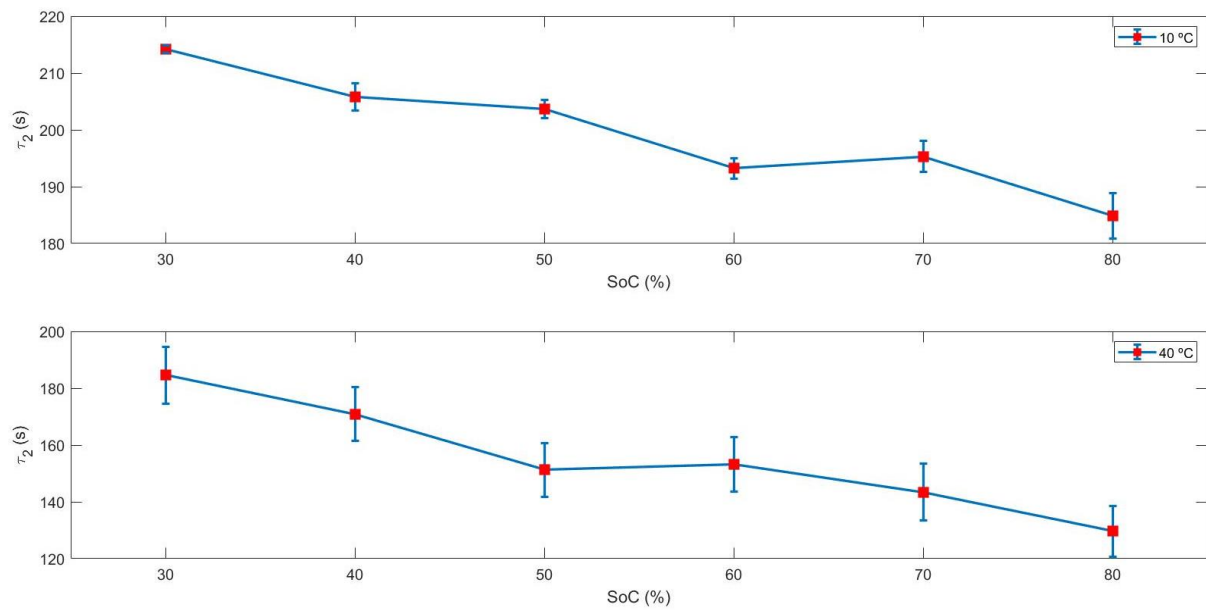
Para temperatura mais alta, a constante de tempo tem um valor menor do que comparado com a temperatura mais baixa, fazendo com que seja mais lento o

seu ajuste. Outro ponto importante, é que para a temperatura mais alta, ela apresenta um comportamento semelhante ao comportamento da temperatura mais baixa.



Usando o modelo computacional foram realizadas simulações de forma repetida, com a finalidade de identificar o comportamento da célula de bateria sem gerar custos para realizar experimentos em laboratório. Na Figura 37 está ilustrado a média dos valores da constante de tempo do segundo ramo R-C, tal como o desvio padrão dos resultados proveniente da simulação para as duas temperaturas. Para a temperatura mais baixa, é possível notar que a diferença de valores de constante de tempo para o instante de SOC de 80%, é mais alto que para os demais instantes de SOC ao longo do procedimento de descarga, enquanto que para o instante de SOC de 30%, a variação dos resultados é menor, apresentando valores mais próximos do valor médio. Para a temperatura mais alta, é possível notar que no instante do SOC de 30%, a variação da constante de tempo é bem maior, apresentando um comportamento contrário no instante do SOC de 80%, sendo o valor bem menor comparado aos outros valores dos instantes de SOC.

FIGURA 37 - MÉDIA E DESVIO PADRÃO DO SEGUNDO RAMO R-C - SIMULADO



Segundo Jackey (2013), considerando que essa resposta dinâmica mais rápida que a resposta dinâmica do primeiro ramo R-C, esse segundo ramo é proveniente da resposta rápida da tensão no instante após o estado de repouso fazendo com que a tensão dos terminais retorne para o valor de acomodação da célula de bateria. Isso é faz com que o capacitor seja menor para que consiga fornecer energia de forma rápida, consequentemente, a resistência desse ramo terá um valor maior para que a corrente não gere influência na resistência. Porém, essa constante de tempo será dependente da corrente que será utilizada para realizar os procedimentos de ensaio.

5 CONCLUSÕES

Para realizar os experimentos com a finalidade de obter os valores dos componentes elétricos do modelo em circuito elétrico de uma célula de bateria, então foram feitos estudos acerca das publicações acadêmicas mais relevantes para o tema.

Por isso, foi desenvolvido um procedimento de ensaio, baseado no perfil de descarga da célula de bateria, submetendo a célula de bateria a uma descarga pulsada com período definido tendo a corrente drenada para que a célula de bateria tenha um decréscimo no seu estado de carga. Após cada descarga, é feito um procedimento de repouso de 2 horas para que a célula de bateria de lítio-íon possa reestabelecer suas condições químicas. Ainda, através desse perfil de descarga proposto neste trabalho, foi possível determinar os parâmetros do modelo em circuito elétrico e realizar as análises desses componentes com base na variação da temperatura e do estado de carga.

Utilizando o software de simulação Matlab/Simulink, foi construído um modelo computacional usando componentes existentes no software, para garantir a repetibilidade do sistema, que é a célula de bateria. Procedendo ao perfil de descarga proposto neste trabalho, foi verificado que a resistência interna para temperaturas mais baixa tem valores maiores do que para temperaturas mais altas, outro ponto importante a ser notado é que as constantes de tempo dos ramos R-C apresentam um comportamento menos aleatório.

O desvio padrão calculado para cada um dos componentes do modelo em circuito elétrico da célula de bateria evidencia as inconsistências na repetibilidade das simulações considerando o mesmo ambiente para todos os momentos da simulação.

Considerando o procedimento de ensaio proposto neste trabalho, foi possível realizar o mesmo experimento em ambiente de laboratório variando a temperatura. Com isso, pudemos identificar que as correlações dos valores simulados e reais apresentam divergências, pelos valores simulados serem provenientes de algoritmos que consideram a célula de bateria um sistema com características químicas intactas e sem a aplicação de nenhum procedimento de descarga ou carga.

Para os componentes do modelo em circuito elétrico da célula de bateria, é possível notar que para a resistência interna há uma influência da temperatura sobre esse componente, sendo gerado um aumento do seu valor quando submetido a temperaturas mais baixas, esse fenômeno pôde ser visualizado também no ambiente de simulação, com a diferença entre os dois valores de temperatura para o instante do SOC em 80%, em torno de $1\ \Omega$ e para o ambiente real de $3\ \Omega$.

Para as constantes de tempo dos ramos R-C, os resultados apresentam valores mais dinâmicos comparados com os valores apresentados no ambiente de simulação, esses resultados podem ser referentes a quantidade de experimentos realizados em ambiente de laboratório.

Ao longo do trabalho foi possível entender o comportamento da célula de bateria relacionado a variação de temperatura ambiente, havendo a variação do comportamento elétrico e químico com a mudança na tensão e na capacidade entregue durante cada variação da temperatura. Com essa variação, os componentes do modelo em circuito elétrico foram possíveis de serem analisados, correlacionando com a aleatoriedade dos valores para cada uma das temperaturas e para cada instante de estado de carga.

Essa análise das variações nos valores dos componentes do modelo em circuito elétrico visa auxiliar na estimação dos estados de carga e saúde da célula de bateria, tornando os resultados com um erro residual menor para serem empregados nas aplicações que as baterias de lítio-íon englobam.

REFERÊNCIAS

- Bester, J. E., A. E. Hajjaji, e A. M. Mabwe. ***Modelling of Lithium-ion Battery and SOC Estimation using Simple and Extended Discrete Kalman Filters for Aircraft Energy Management***, 2015, November, 2433-2438.
- Chaoui, H., A. E. Mejdoubi, e H. Gualous. **“Online Parameter Identification of Lithium-Ion Batteries With Surface Temperature Variations.”** 2017: 2000-2009.
- Chaoui, Hicham, e Hamid Gualous. “Adaptive State of Charge Estimation of Lithium-ion Batteries with Parameter and Thermal Uncertainties.” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017: 752-759.
- Chen, K, e X Li. **“Accurate determination of battery discharge characteristic - A comparison between two battery temperatura control methods.”** 2014: 961-966.
- García-Plaza, M., D. Serrano-Jiménez, J.E. Carrasco, e J. Alonso-Martínez. ***A Ni-Cd battery model considering state of charge and hysteresis effects*** 275 (Fevereiro 2015): 595-604.
- Giordano, G., V. Klass, M. Behm, G. Lindbergh, e J. Sjoberg. **“Model-Based Lithium-Ion Battery Resistance Estimation From Electric Vehicle Operation Data.”** *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 67, nº 5 (Maio 2018): 3720-3728.
- Hadigol, Mohammad, Kurt Maute, e Alireza Doostan. **“On Uncertainty Quantification of Lithium-ion Batteries: Application to an LiC6/LiCoO2 Cell.”** *Elsevier*, 2015: 1-65.
- Hu, Xiaosong, Shengbo Li, e Huei Peng. **“A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries.”** *Journal of Power Sources*, 2012: 359-367.
- Jackey, R., Saginaw, M., Sanghvi, P., Gazzarri, J. **“Battery Model Parameter Estimation Using a Layered Technique: An Example Using a Lithium Iron Phosphate Cell.”** *Congresso SAE*, 2013: 1-14.

- Manual A123 Energy Solutions. **“Battery Pack Design, Validation, and Assembly Guide using A123 Systems AMP20M1HD-A Nanophosphate® Cells.”** 2014.
- Shepherd, C. M. **“Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An equation describing battery discharge.”** *Journal of Electrochemical Society* Vol. 112 (1965): Pag.: 657-664.
- Tong, Wei, Wei Qiang Koh, Erik Birgersson, Arun S. Mujumdar, e Christopher Yap. **“Correlating uncertainties of a lithium-ion battery - A Monte Carlo simulation.”** *International Journal of Energy Research*, 2015: 778-788.
- Truchot, Cyril, Matthieu Dubarry, e Bor Yann Liaw. **“State-of-Charge estimation and uncertainty for lithium-ion battery strings.”** *Applied Energy*, 2014: 218-227.
- Xing, Y., W. He, M. Pecht, e K. L. Tsui. **“State of charge estimation of lithium-ion batteries using the open-circuit voltage at various ambient temperatures.”** *Applied Energy* 113 (Agosto 2014): 106-115.
- Yamin, R., e A. Rachid. **“Embedded state of charge and state of health estimator based on kalman filter for electric scooter battery management system”**, Setembro de 2014: 440-444.
- Yan, Wuzhao, Bin Zhang, Guangquang Zhao, John Weddington, e Guangxing Niu. **“Uncertainty Management in Lebesgue-Sampling-Based Diagnosis and Prognosis for Lithium-ion Battery.”** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017: 8158-8166.
- Yang, Fangfang, Yianjiao Xing, Dong Wang, e Kwok-Leung Tsui. **“A comparative study of three model-based algorithms for estimating state-of-charge of lithium-ion batteries under a new combined dynamic loading profile.”** *Applied Energy*, 2016: 387-299.