



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

ARTHUR VIDAL DE NEGREIROS SILVA

**VALIDAÇÃO DO MODELO RAKHMATOV VRUDHULA PARA
BATERIAS**

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2016

ARTHUR VIDAL DE NEGREIROS SILVA

VALIDAÇÃO DO MODELO RAKHMATOV VRUDHULA PARA BATERIAS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Controle e Automação

Orientador:

Professor Saulo Oliveira Dornellas Luiz, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2016

ARTHUR VIDAL DE NEGREIROS SILVA

VALIDAÇÃO DO MODELO RAKHMATOV VRUDHULA PARA BATERIAS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Controle e Automação

Aprovado em / /

Professor Jaidilson Jó da Silva, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Saulo Oliveira Dornellas Luiz, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à todas as pessoas que influenciaram no ser humano que sou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus por me proporcionar esta oportunidade e de me preencher com curiosidade e disciplina para organizar meus estudos.

Agradeço aos meus pais, por terem me criado com uma boa educação, por terem me alimentado com saúde, força e coragem, as quais foram essenciais para a superação de todos os obstáculos ao longo desta caminhada. Sem dúvida, não fosse pela forma que eles me ensinaram a viver, não estaria aqui.

Agradeço à minha namorada, que me entendeu, auxiliou, criticou e contribuiu de maneira ímpar no meu crescimento pessoal e profissional, uma vez que posso responsabilizá-la por grande parte das minhas conquistas e desafios vencidos.

Agradeço também a toda minha família, que com todo carinho e apoio, não mediu esforços para eu chegar a esta etapa da minha vida.

Agradeço aos meus amigos, que sempre me apoiaram e me instigaram a crescer profissionalmente e vencer os desafios que a vida nos proporciona. Foi nas amizades mais sinceras que encontrei força e aprendizados que me levaram a concluir este curso.

Agradeço ao meu orientador, Saulo Luiz, pela paciência e tempo dedicado, pelas sugestões, conselhos e correções, assim como ter acreditado em meu potencial durante todos os anos em que me orientou. Agradeço principalmente pelos ensinamentos e empenho em me ensinar.

Agradeço a Bruna Maria, Breno Henriques e Andrei Patriota, pelo companheirismo, auxílios, risadas e dúvidas esclarecidas. Nos últimos meses, passei muitas horas dos meus dias dentro do laboratório e em sua companhia.

Agradeço aos membros do Ramo Estudantil IEEE UFCG e do Capítulo Estudantil IEEE PES UFCG, pelas parcerias, estudos, projetos e todos os períodos que estiveram ao meu lado.

Agradeço à Universidade Federal de Campina Grande, à Coordenação de Engenharia Elétrica e ao Departamento de Engenharia Elétrica, por todas as ajudas e dúvidas esclarecidas durante o curso. Posso afirmar com certeza, que parte da excelência do curso de Engenharia Elétrica, se deve à eficiência e disposição dos funcionários que o compõem.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

“O único lugar em que o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.”

Albert Einstein.

RESUMO

O modelo de estimação de estado de carga de baterias proposto por Rakhmatov e Vrudhula (RV) em 2001, permite descrever com maior precisão do que modelos lineares a difusão das espécies eletroativas de uma bateria eletroquímica. No modelo RV, existem apenas dois parâmetros a serem estimados, α e β , onde α descreve a capacidade máxima numa descarga da bateria, e β é um coeficiente associado à taxa de difusão das espécies eletroativas ao longo do eletrólito. Neste trabalho, tem-se como objetivo a validação do modelo RV. Para tal, foi utilizada uma plataforma experimental composta por baterias de lítio-íon, uma carga eletrônica DC, sensores para medição de tensão e corrente da bateria, e um microcontrolador para aquisição de dados. A validação será dada pela comparação dos tempos de descarga obtidos através das simulações do modelo RV, para parâmetros α e β previamente estimados para as baterias utilizadas, e os tempos de descarga obtidos nos testes experimentais nas baterias de lítio-íon. Os experimentos foram realizados descarregando-se uma bateria de lítio-íon de 3,7V até o instante de tempo em que a tensão entre os terminais da bateria atingisse 3,0V.

Palavras-chave: Validação do modelo Rakhmatov Vrudhula. Estado de carga. Bateria de Lítio-íon. Modelos de estimação de estado de carga.

ABSTRACT

The state of charge estimation model proposed by Rakhmatov and Vrudhula (RV) at 2001, describes more accurately than linear models the diffusion of the electroactive species of an electrochemical battery. In the RV model, there are only two parameters to be estimated, α and β , where α describes the maximum capacity in one battery discharge, and β is the coefficient related to the diffusion rate of the electroactive species over the electrolyte. The main objective of this work is to validate the RV model. In order to achieve this goal, an experimental platform was used. This platform contains a battery, a DC electronic load, sensors to measure the voltage and current of the battery, and a microcontroller for the data acquisition. The validation was performed by comparing the discharge durations obtained from the RV model simulations, for the α and β parameters previously estimated, and the discharge durations of real ion lithium batteries. The experiments were performed by discharging a 3.7V ion lithium battery until the time instant when the voltage between the battery terminals achieved 3.0V.

Keywords: Validation of the Rakhmatov Vrudhula model. State of charge. Lithium ion battery. State of charge estimation models.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Diagrama do Circuito medidor de tensão. | 21 |
| Figura 2: Diagrama da montagem da plataforma experimental. | 22 |
| Figura 3: Representação da descarga da bateria #1 com corrente de 1A. | 25 |
| Figura 4: Representação da descarga da bateria #2 com corrente de 3A. | 25 |
| Figura 5: Representação da descarga da bateria #2 com corrente de 2,5A. | 26 |
| Figura 6: Representação da descarga da bateria #1 com corrente de 2A. | 27 |
| Figura 7: Representação da descarga da bateria #1 com corrente de 1,5A. | 27 |
| Figura 8: Análise da variação dos parâmetros em função de m do somatório em (15). | 29 |
| Figura 9: Média dos erros percentuais em função do índice m | 30 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Resultados das descargas realizadas na bateria #1. | 28 |
| Tabela 2: Resultados das descargas realizadas na bateria #2. | 28 |
| Tabela 3: Valores dos parâmetros alfa e beta. | 29 |
| Tabela 4: Erros encontrados para validar o modelo RV gerado. | 31 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------|---|
| L | Tempo de descarga, autonomia |
| w | Distância entre os eletrodos |
| C | Concentração de espécies eletroativas |
| ρ | Proporção de espécies eletroativas retiradas da bateria |
| J | Fluxo de espécies |
| D | Coefficiente de difusão de espécies eletroativas |
| A | Área de seção transversal do eletrodo |
| F | Constante de Faraday |
| α | Constante de capacidade modelo RV |
| β | Constante da taxa de difusão do modelo RV |
| v | Quantidade de espécies eletroativas no eletrólito |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-----|--|
| SOC | Estado de carga (<i>State of charge</i>) |
| DOD | Profundidade de descarga (<i>Depth of discharge</i>) |
| RV | Rakhmatov e Vrudhula |

SUMÁRIO

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Introdução | 15 |
| 1.1 | Revisão Bibliográfica | 15 |
| 1.2 | Objetivos | 17 |
| 1.3 | Organização do texto | 17 |
| 2 | Fundamentação Teórica | 18 |
| 3 | Plataforma Experimental | 21 |
| 4 | Metodologia experimental | 24 |
| 5 | Resultados Experimentais | 28 |
| 6 | Conclusão..... | 32 |
| 7 | Bibliografia | 33 |
| 8 | Anexo..... | 34 |
| 8.1 | Código do matlab para validação do modelo RV | 34 |
| 8.2 | Código da função fitfunSODL..... | 35 |

1 INTRODUÇÃO

Estimar a duração da descarga de baterias é algo extremamente importante e utilizado na indústria. Há a necessidade de se conhecer o estado de carga de baterias, com a maior precisão possível, em aplicações que vão desde pequenos dispositivos portáteis, até grandes bancos de baterias utilizados na indústria.

Atualmente, a indústria automobilística é uma das maiores interessadas no estudo de estimação de estado de carga. Este interesse parte do desenvolvimento de carros híbridos e carros elétricos, uma vez que o estado de carga de uma bateria é o principal indicador da quilometragem que o carro ainda consegue percorrer com a carga restante. Desta forma, uma análise precisa do estado de carga é fundamental para a confiabilidade de um carro elétrico (VAIRAMOHAN, 2002).

Uma outra aplicação da estimação do estado de carga de baterias são os dispositivos móveis. É comum que o restante da carga de um smartphone ou de um notebook seja indicado, em porcentagem, ou até em unidades de tempo. Entretanto, tais previsões e estimativas são possíveis apenas se utilizarem um modelo confiável de estimação do estado de carga. Caso contrário, usuários de aparelhos celulares e computadores portáteis se surpreenderiam ao presenciar seus aparelhos se desligando quando instantes antes ainda indicavam horas restantes de autonomia.

Verifica-se então, a importância do estudo destes modelos de estimação de carga, assim como sua validação, isto é, verificar que os modelos desenvolvidos e propostos na literatura, são funcionais e válidos para as condições estabelecidas.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para representar uma bateria, vários modelos podem ser utilizados. Vairamohan (VAIRAMOHAN, 2002) classifica os modelos elétricos existentes para estimação do estado de carga nos seguintes tipos: modelo de bateria simples, modelo de bateria por Thévenin resistivo e modelo de bateria equivalente por Thévenin resistivo, onde os três modelos representam o funcionamento de uma bateria eletroquímica por meio de um circuito elétrico equivalente, partindo de uma complexidade baixa, com apenas um resistor, até uma complexidade mais alta, utilizando diodos retificadores, resistores e capacitores.

Em 2013, Samolyk e Sobczak (SAMOLYK e SOBCZAK, 2013) descreveu alguns métodos para estimar o estado de carga em uma bateria de chumbo-ácido. Tais métodos têm como objetivo

determinar o estado de carga com um erro, em média, não maior que 5%, uma vez que precisão é um fator necessário em um modelo de estimação de estado de carga. Os métodos citados pelo autor foram: método da tensão de circuito aberto, método da gravidade específica, método de contagem de Coulomb e o método da medição de impedância.

Em 2009, Jongerden (JONGERDEN e HAVERKORT, 2009) revisou quatro diferentes modelos analíticos de baterias: modelo de bateria KiBaM, transformação de coordenadas, modelo de difusão Rakhmatov e Vrudhula e o modelo KiBaM contínuo.

O modelo KiBaM, proposto por Manwell e McGowan (MANWELL, 1993), é um modelo bastante intuitivo e sua base vem de um modelo da cinética química. Neste modelo, a carga da bateria é dividida em duas categorias: carga disponível e o limite de carga. O modelo foi proposto a partir do conceito de um fluxo de carga, que sai do limite de carga, vai para a carga disponível e em seguida para a carga acoplada ao sistema. Para reproduzir o efeito de recuperação, a partir do momento em que a descarga é interrompida, o fluxo de carga do limite de carga para a carga disponível continua até que as cargas nos dois blocos de equilíbrio, criando assim uma recuperação na carga disponível.

O modelo de coordenadas é uma alternativa ao modelo cinético KiBaM, uma vez que trata as equações do modelo proposto por Manwell e McGowan de forma diferente. A partir de um sistema de equações diferenciais, uma transformação de coordenadas é aplicada, deixando o modelo mais intuitivo no escopo do seu funcionamento.

Assim como o modelo de coordenadas, o modelo KiBaM contínuo é um aprimoramento do modelo cinético KiBaM. Por meio do método da diferença finita, o modelo é levado do escopo discreto ao contínuo, aumentando sua eficácia e suas aplicações.

Por último, Jongerden citou o modelo desenvolvido por Rakhmatov e Vrudhula (RAKHMATOV e VRUDHULA, 2001). No modelo RV, que é tema deste trabalho, existem apenas dois parâmetros. Estes descrevem a capacidade máxima da carga da bateria e a velocidade de difusão das espécies eletroativas ao longo do eletrólito. O modelo RV se utiliza de um conceito similar ao proposto por Manwell e McGowan, separando a carga da bateria em duas partes: carga disponível e carga indisponível. A carga disponível representa as espécies eletroativas que estão prontas e próximas o suficiente do eletrodo para serem drenadas pelo circuito externo. Já a carga indisponível representa as espécies eletroativas que não poderão ser utilizadas na descarga, devido à sua distância à superfície do eletrodo, e sua baixa velocidade de difusão. Assim, no modelo RV, são incorporados vários aspectos do funcionamento de uma bateria eletroquímica em apenas algumas expressões matemáticas.

1.2 OBJETIVOS

Apesar do modelo proposto por Rakhmatov e Vrudhula ser extremamente aceito pela comunidade científica, existe uma dificuldade para se encontrar trabalhos que comprovem sua eficácia através de experimentos empíricos. Assim, este trabalho se propõe a verificar os conceitos propostos por Rakhmatov e Vrudhula, de forma a contribuir com a literatura por meio da validação do modelo de estimação de estado de carga de baterias eletroquímicas proposto por Rakhmatov e Vrudhula.

Para cumprir seu objetivo principal de validar o modelo de estimação de estado de carga proposto por Rakhmatov e Vrudhula (RAKHMATOV e VRUDHULA, 2001), foram utilizados perfis de corrente constantes no tempo. Assim, testes de descarga profunda foram executados, no intuito de medir a autonomia da bateria. A validação foi realizada comparando-se os resultados de autonomia obtidos na plataforma experimental com os resultados obtidos em simulação. O critério estabelecido para aceitação do modelo é que a média dos erros entre os valores experimentais e estimados para os dados de validação seja menor que 5%.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O restante deste texto está disposto em 6 capítulos. No capítulo 2 é apresentado a fundamentação teórica do modelo de estimação de estado de carga: Rakhmatov e Vrudhula. No capítulo 3, a plataforma de testes é detalhada, desde os *softwares* utilizados, até as especificações do *hardware*. No capítulo 4 é apresentada a metodologia dos testes realizados, baseada nas especificações da bateria de lítio-íon utilizada, e as os testes de descargas realizados. No capítulo 5, é realizada a construção do modelo RV e a sua validação. No capítulo 7 são apresentadas as conclusões e os trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Uma bateria é composta por um cátodo e um ânodo separados por um eletrólito. Numa bateria de lítio-íon, o lítio percorre tanto o caminho cátodo-ânodo, quanto ânodo-cátodo. Durante o processo de descarga, por exemplo, o lítio é extraído do ânodo e inserido no cátodo, e simultaneamente, o ânodo libera elétrons livres para o circuito elétrico a ser alimentado, gerando assim uma corrente elétrica (LUIZ, 2008). Tais elétrons livres são chamados de espécies eletroativas.

Uma célula de lítio-íon de 3,7V é composta por um ânodo de carbono e um cátodo de metal. A reação química no processo de descarga se resume, no cátodo, à absorção de elétrons v^- pelo elemento O para formar o elemento R. Já no ânodo, a reação química se dá pela liberação de elétrons v^- pelo elemento R, para formar elementos O.



Antes de se iniciar um processo de descarga, deve-se deixar a bateria em repouso, com o intuito de que as espécies eletroativas fiquem uniformemente distribuídas ao longo do eletrólito. Assim, ao iniciar uma descarga, as espécies eletroativas iniciam seu processo de difusão pela bateria. Quando as espécies eletroativas “saem” da bateria para o circuito elétrico externo, há uma diminuição da concentração de espécies eletroativas próximo ao eletrodo. A carga indisponível corresponde então à uma parte da carga que não fica disponível para descarga por não conseguir se difundir pelo eletrólito em tempo suficiente para ser utilizada na descarga. Portanto, pode-se afirmar que a carga indisponível depende da velocidade de difusão das espécies eletroativas ao longo do eletrólito, o que também depende da corrente de descarga da bateria. Logo, a carga disponível depende da magnitude da corrente de descarga. Quando a descarga é interrompida, as espécies eletroativas se difundem, voltando a ficarem uniformemente distribuídas, e conseqüentemente, liberando uma parte da carga que anteriormente se encontrava indisponível. Tal fenômeno é denominado recuperação. Quando a concentração de espécies eletroativas na superfície do eletrodo é inferior a um determinado limite, considera-se a bateria descarregada, pois as reações químicas não podem mais ser sustentadas (LUIZ, 2008).

A autonomia da bateria é definida como o tempo que a bateria leva para que a concentração de espécies eletroativas na superfície do eletrodo caia para o nível de corte, indicando que a bateria está descarregada. O tempo no qual a bateria atinge o nível de corte, é o tempo L . Logo, para $t = L$,

a bateria não consegue mais sustentar as reações eletroquímicas. Portanto, L será considerado como o tempo de descarga.

Para efeitos de análise, será considerado que o eletrólito é uniforme em cada lamina de sua área de secção. Desta forma, a distância entre os eletrodos será apenas considerada como w . Assim, a concentração de espécies eletroativas em um determinado ponto do eletrólito num instante de tempo é dada por $C(x, t)$, onde $0 \leq t \leq L$ e $0 < x < w$. A concentração na superfície do eletrodo é dada por $C(0, t)$. Logo, considerando C^* como a concentração inicial no eletrólito, a profundidade de descarga, isto é, a proporção da quantidade de espécies eletroativas que foi retirada desde o início da descarga, é representada em (3).

$$\rho(t) = 1 - \frac{C(0, t)}{C^*} \quad (3)$$

O valor de $\rho(L)$ é o limite que a bateria atinge durante sua descarga, chegando assim à condição de corte.

A primeira lei de Fick (BARD e FAULKNER, 1980) diz que o fluxo de espécies é proporcional ao gradiente da concentração $\frac{\partial C}{\partial x}$, como apresentado na equação (4), onde $J(x, t)$ representa o fluxo de espécies em uma posição x num determinado instante de tempo t , e D é uma constante associada ao coeficiente de difusão das espécies eletroativas.

$$-J(x, t) = D \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \quad (4)$$

Já a segunda lei de Fick descreve a variação na concentração de espécies de acordo com o tempo, conforme mostra a equação (5).

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} \quad (5)$$

De acordo com a lei de Faraday, o fluxo na superfície do eletrodo, isto é para $x = 0$, é proporcional à corrente $i(t)$, suprida ao circuito externo. Assim, o fluxo na borda da região de difusão, $x = w$, é zero, de acordo com as condições de contorno. Logo, aplicando as duas condições anteriores à primeira lei de Fick, pode-se deduzir a expressão em (6).

$$0 = D \left. \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \right|_{x=w} \quad (6)$$

E segundo a dedução feita por Bard e Faulkner (BARD e FAULKNER, 1980), para a situação de contorno, $x = 0$, verifica-se pela lei de Fick que o fluxo é proporcional à corrente $i(t)$, como visto na equação (7), onde F é a constante de Faraday, e A é a área do eletrodo, e ν é a quantidade de espécies eletroativas no eletrólito.

$$\frac{i(t)}{\nu FA} = D \left. \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (7)$$

Resolvendo o sistema de equações diferenciais composto pelas equações (6) e (7), a solução encontrada por Rakhmatov e Vrudhula (RV) (RAKHMATOV e VRUDHULA, 2001), está em (8).

$$\rho(t) = \frac{1}{vFAwC^*} \left[\int_0^t i(\tau) d\tau + \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} 2 \sum_{m=1}^{\infty} \int_0^{t-\varepsilon} i(\tau) e^{-\frac{\pi^2 D(t-\tau)m^2}{w^2}} d\tau \right] \quad (8)$$

No intuito de simplificar a leitura de (8), introduz-se os parâmetros α e β , que são os parâmetros do modelo RV.

$$\alpha = vFAwC^* \rho(L) \quad (9)$$

$$\beta = \frac{\pi\sqrt{D}}{w} \quad (10)$$

Assim, substituindo os termos correspondentes em (8), por α e β , para $t = L$ encontra-se (11), que relaciona a carga, o tempo para atingir o nível de corte, e os dois parâmetros da bateria, i.e. α e β .

$$\alpha = \int_0^L i(\tau) d\tau + \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} 2 \sum_{m=1}^{\infty} \int_0^{L-\varepsilon} i(\tau) e^{-\beta^2 m^2 (L-\tau)} d\tau \quad (11)$$

A expressão (11) é válida “por construção” para qualquer perfil de corrente, constante ou variante no tempo. Entretanto, o modelo RV ainda pode ser restrito a um perfil de corrente constante, em que $i(t) = I$. Desta forma, (11) pode ser simplificada (12).

$$\alpha = I \left[L + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1 - e^{-\beta^2 m^2 L}}{\beta^2 m^2} \right] \quad (12)$$

Para estimar os parâmetros α e β , (12) pode ser reestruturada, e sabendo que para cada valor de corrente I existe uma autonomia de tempo L , pode-se chegar a (13).

$$I = \frac{\alpha}{L + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{1 - e^{-\beta^2 m^2 L}}{\beta^2 m^2} \right)} \quad (13)$$

Assim, para que se alcance valores coerentes e suficientes para validar a expressão (12) do modelo RV é necessário que se trabalhe em uma plataforma experimental robusta, como será apresentado no Capítulo 3.

3 PLATAFORMA EXPERIMENTAL

A plataforma experimental utilizada é composta por:

- Carga eletrônica DC;
- Circuito de medição de tensão;
- Microcontrolador Arduino Mega 2560;
- Computador;
- Cabos e fios;
- Baterias de lítio-íon de 3,7V.

A carga eletrônica DC utilizada é fabricada pela empresa norte-americana Keysight Technologies, e é do modelo N3300A. Pretendeu-se realizar descargas de até 3A. A potência máxima que a carga DC suporta é 300W, que é suficiente para realizar os experimentos propostos, pois como a tensão da bateria varia de 3,7V a 3,0V durante a descarga, a potência da carga DC permitiria corrente de até 100A para 3,0V.

O circuito para medição de tensão é formado basicamente por um divisor de tensão. Duas resistências, uma de $R_1 = 16k\Omega$ e outra de $R_2 = 10k\Omega$, compõem um divisor de tensão, onde a tensão lida em cima do resistor R_2 vai para a entrada do conversor A/D do Arduino, como visto na Figura 1. Para que as referências do Arduino e do circuito divisor de tensão sejam as mesmas, isto é, para que se garanta leituras corretas no conversor A/D, é necessário que os terras do Arduino e do circuito estejam conectados. Portanto, como mostra a expressão em (14), basta multiplicar o valor lido V_{out} na saída do conversor A/D por 2,6 para determinar o valor da tensão da bateria V_{bat} .

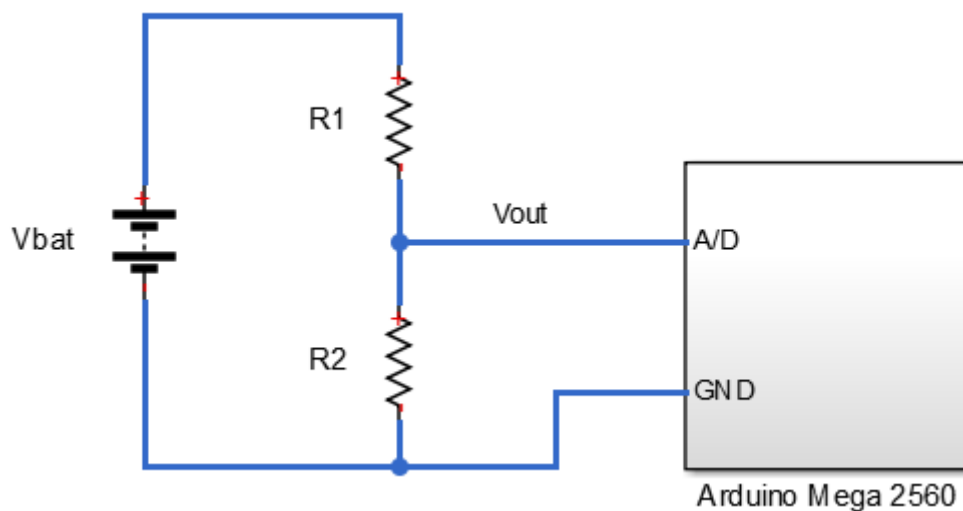


FIGURA 1: DIAGRAMA DO CIRCUITO MEDIDOR DE TENSÃO.

$$V_{bat} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{out} \quad (14)$$

Para realizar a aquisição de dados para o computador, foi utilizado um microcontrolador Arduino Mega 2560. O conversor Analógico-Digital utilizado possui 10 bits. A escolha do Arduino se deu pela facilidade de integrar o microcontrolador com o MATLAB/Simulink, uma vez que existem bibliotecas prontas para o desenvolvimento de software para o Arduino. Já a escolha pelo Arduino Mega 2560, foi pela possibilidade de acompanhar os valores medidos em tempo real, simultaneamente à medição do sinal no pino conectado ao divisor de tensão.

Uma vez que os dados de tensão foram lidos, o próximo passo é extrair as informações necessárias e úteis ao trabalho, como duração da descarga e corrente de descarga. Assim, utilizando o MATLAB, foi gerado um gráfico para cada descarga realizada e marcou-se manualmente os pontos do início e final da descarga.

As baterias utilizadas são da fabricante FLEX, sob o código FX-L 18650. O datasheet da bateria foi solicitado à empresa, entretanto, não foi obtida resposta. Assim, as informações disponíveis da bateria são a tensão nominal e a capacidade nominal, respectivamente de 3,7V e 3800mAh.

Na Figura 2 é apresentado o diagrama de montagem da plataforma experimental, composta por cinco elementos, interligados por cabos e fios.

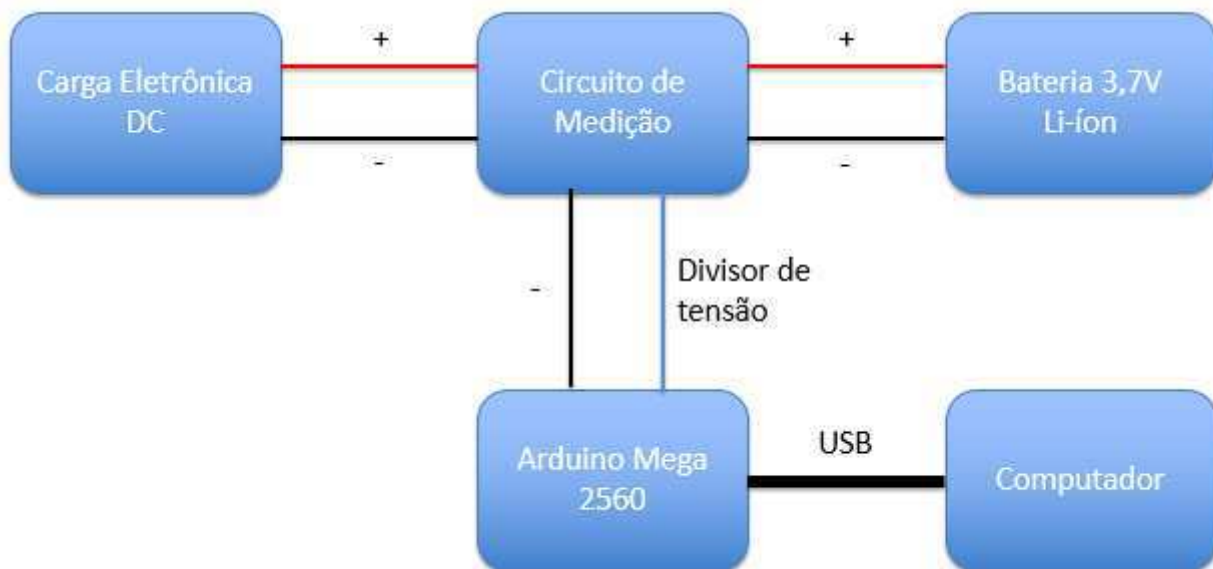


FIGURA 2: DIAGRAMA DA MONTAGEM DA PLATAFORMA EXPERIMENTAL.

A carga eletrônica DC é conectada ao circuito de medição por meio de dois cabos, positivo e negativo. O circuito, por sua vez, está conectado a outros dois elementos: o Arduino e a bateria. A bateria é conectada à carga eletrônica DC, de forma que a presença do divisor de tensão provoca uma pequena queda de tensão nos terminais da bateria. Esta queda de tensão, entretanto, pode ser desconsiderada, frente a tensão nominal da bateria. Assim, a saída do divisor de tensão é conectada

ao conversor A/D do Arduino, que processa as informações recebidas do circuito de medição e as envia para o computador. No computador, o Simulink cria um registro de todos os valores adquiridos e ao mesmo tempo mostra em tempo real as medições realizadas. O valor da amostra é multiplicado por 2,6 no código do Simulink.

Portanto, uma vez que a plataforma experimental foi finalizada, deve ser analisada a metodologia dos testes a serem executados, uma vez que as especificações das descargas monitoradas das baterias dependem das características da plataforma experimental.

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Foram adquiridas 2 baterias de lítio-íon, da mesma marca e modelo. Entretanto, como não existiam informações do *datasheet* do modelo de bateria, inicialmente foi necessária uma pesquisa para determinar algumas especificações para os experimentos posteriores.

Assim, a partir do *datasheet* de algumas outras baterias de lítio-íon 3,7V, foi determinado que a tensão de corte, isto é, a tensão final da bateria no momento em que ela pode ser considerada descarregada, é de 3V. Portanto, ambas as baterias receberam uma carga, de igual duração, e em seguida foram descarregadas com 1A, no intuito de se obter uma noção dos valores de corrente que as baterias suportam. Em seguida, após verificar que com uma corrente de 1A a duração da descarga é de cerca de 1 hora e 30 minutos, foi-se aumentando o valor da corrente em 0,5A a cada descarga. Desta forma, determinou-se que o intervalo de corrente, de 1A a 3A, possui tempos de descarga compatíveis com os testes a serem realizados.

No intuito de garantir confiança ao modelo, e eliminar possíveis erros ocorridos durante as descargas, ou ainda minimizar a influência de tempos de descarga distintos, para os mesmos valores de corrente, foram realizadas duas descargas para cada valor de corrente para cada uma das duas baterias utilizadas. Assim, ao total foram realizadas quatro descargas para cada valor de corrente, duas em cada bateria, e foram escolhidos cinco valores de corrente (1A, 1,5A, 2A, 2,5A e 3A). Portanto, foram realizadas vinte descargas, onde dez foram utilizadas para estimar os parâmetros α e β do modelo Rakhmatov e Vrudhula, e outras dez serão utilizadas para validar a estimativa. Para garantir maior confiabilidade ao modelo, serão utilizados os testes da bateria #1 para gerar o modelo e os testes da bateria #2 para validar os resultados dos experimentos.

Na Figura 3, é apresentada a tensão da bateria #1 durante uma descarga com corrente de 1A. A análise do gráfico começa pela tensão inicial da bateria. Normalmente, em baterias de lítio íon de 3,7V, a tensão da bateria, quando 100% carregada, é próxima de 4,2V, isso se deve pelo efeito de difusão das espécies eletroativas da bateria. Quando por um longo período de tempo em repouso, as espécies eletroativas da bateria se dispersam de forma a ficarem mais uniformes ao longo do eletrólito, e conseqüentemente mais “organizadas” próximo ao eletrodo. Entretanto, quando o processo de descarga se inicia, as espécies eletroativas deixam de estar organizadas, uma vez que elas tendem a ir em direção ao eletrodo. Assim, a não uniformidade causada pela corrente solicitada pelo circuito acoplado à bateria, faz com que a tensão em seus terminais caia para aproximadamente 3,7V. Por esse motivo, este tipo de bateria é classificado como 3,7V, porque no início do processo de descarga, esta é, em média, a tensão que a bateria pode fornecer. É importante destacar também que a queda de

tensão na resistência interna da bateria aumenta, uma vez que a corrente é maior que zero, o que também influencia na queda de tensão vista no início da descarga.

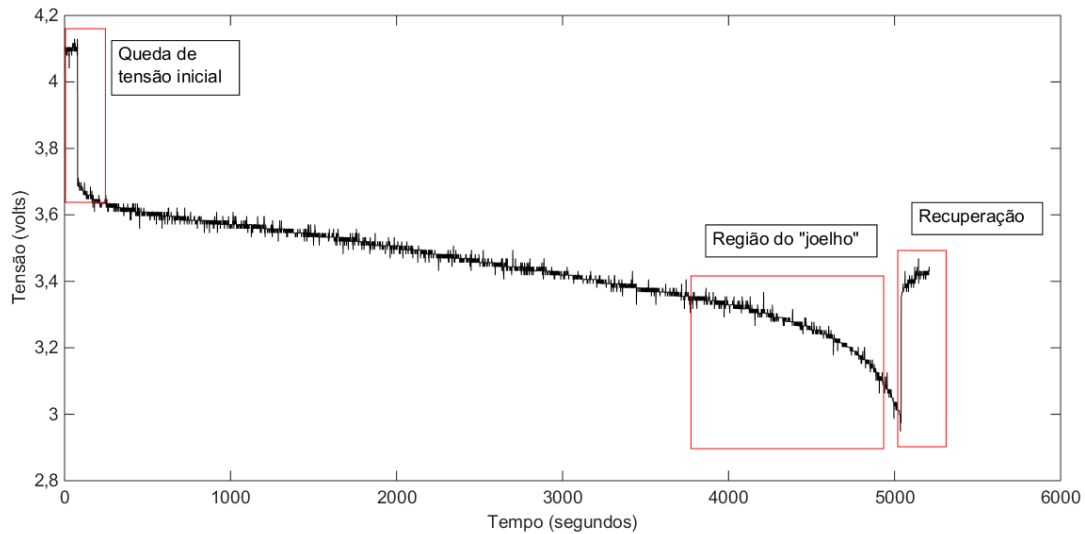


FIGURA 3: REPRESENTAÇÃO DA DESCARGA DA BATERIA #1 COM CORRENTE DE 1A.

Próximo ao fim do processo de descarga, é possível perceber o efeito chamado de “joelho”, que faz com que a queda de tensão ocorra cada vez mais rápido. Isto acontece devido à quantidade de espécies eletroativas na bateria, que é cada vez menor.

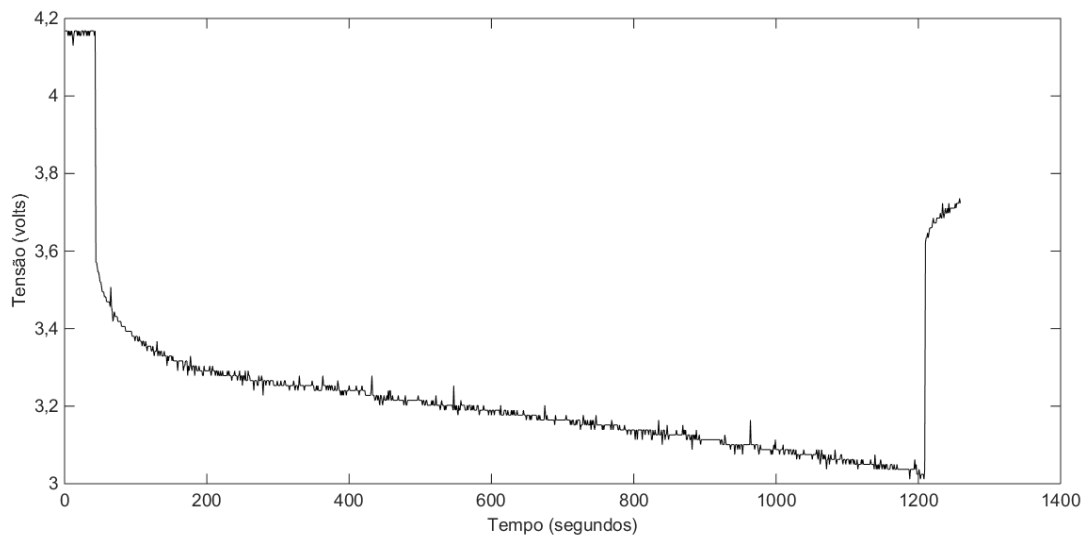


FIGURA 4: REPRESENTAÇÃO DA DESCARGA DA BATERIA #2 COM CORRENTE DE 3A.

Assim, no intuito de “segurar” a corrente solicitada pela carga, a bateria começa a fornecer suas últimas espécies eletroativas disponíveis, cuja quantidade diminui devido à corrente. A variável beta é denominada de constante de taxa de difusão das espécies eletroativas, uma vez que a velocidade com a qual as espécies eletroativas são “empurradas” para o eletrodo é proporcional a β .

É possível notar que a tensão nos terminais da bateria aumenta logo em seguida ao final da descarga. Ao se comparar as descargas da Figura 3 e da Figura 4, nota-se que quanto maior a corrente solicitada pela carga, maior será a queda de tensão no início da descarga, e maior será a recuperação imediata da tensão após o final da descarga. A corrente é reduzida a zero, e conseqüentemente a queda de tensão devido à resistência interna da bateria também é reduzida a zero. Após o aumento instantâneo da tensão entre os terminais da bateria, ocorre também um aumento gradativo, devido ao efeito da recuperação.

Na Figura 5, Figura 6 e Figura 7, são apresentadas, respectivamente, a tensão nas descargas de 2,5A, 2A e 1,5A. Comparando as descargas para cada um dos valores de corrente, é possível confirmar que a queda de tensão e a recuperação da tensão nos terminais da bateria ao início e ao final do processo de descarga, respectivamente, são tão maiores quanto maior for a corrente.

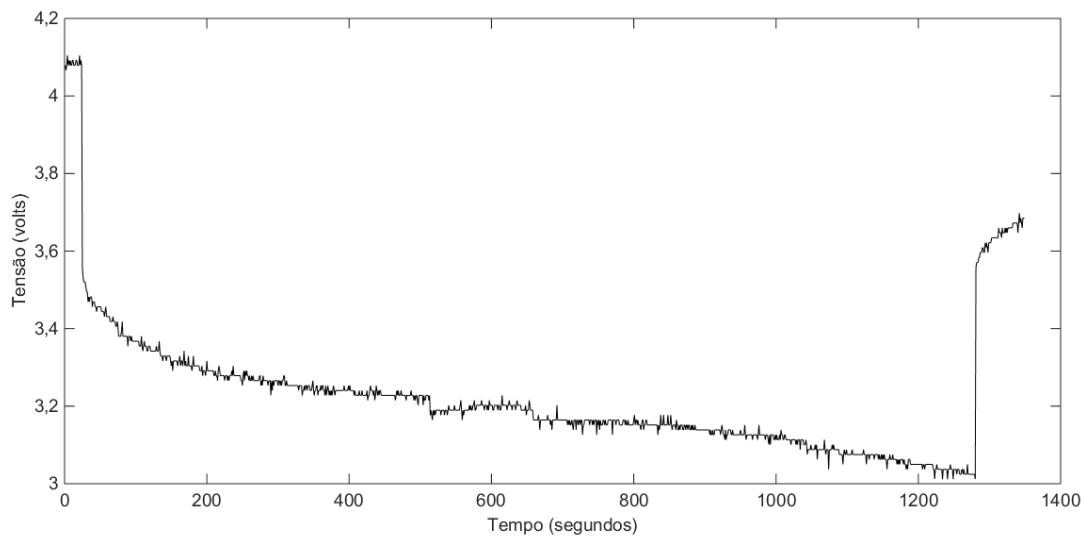


FIGURA 5: REPRESENTAÇÃO DA DESCARGA DA BATERIA #2 COM CORRENTE DE 2,5A

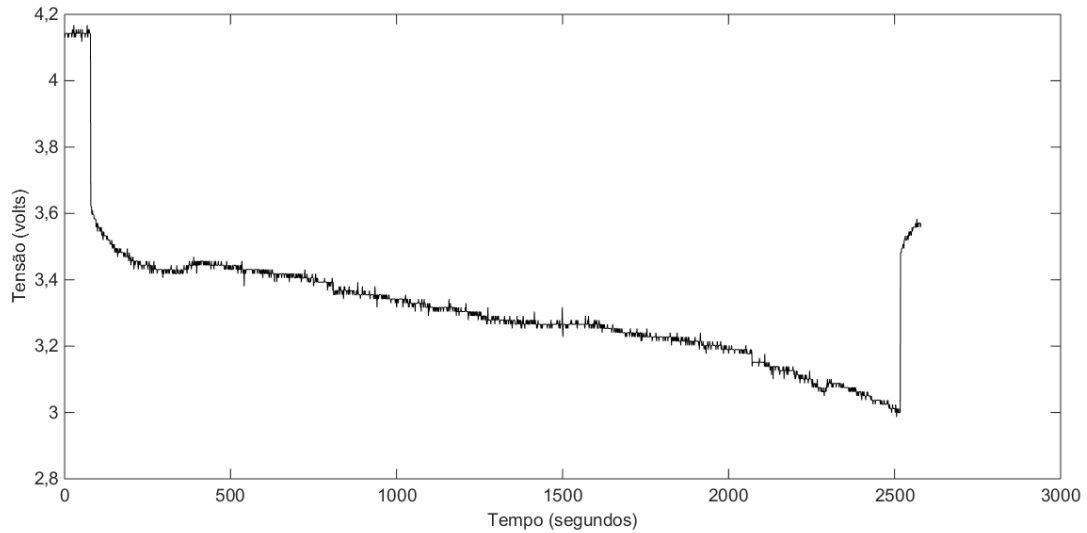


FIGURA 6: REPRESENTAÇÃO DA DESCARGA DA BATERIA #1 COM CORRENTE DE 2A.

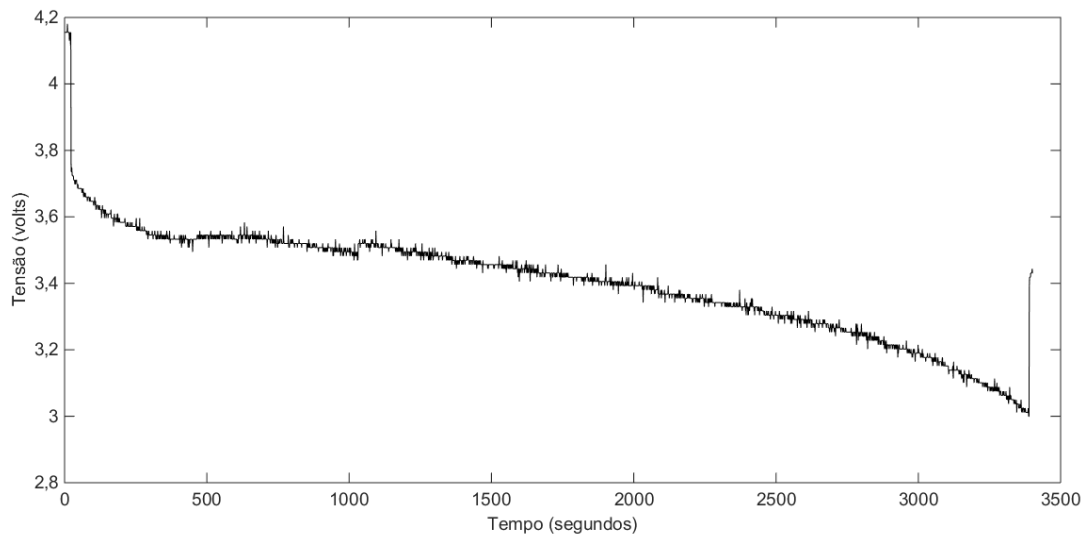


FIGURA 7: REPRESENTAÇÃO DA DESCARGA DA BATERIA #1 COM CORRENTE DE 1,5A.

A partir dos resultados dos testes realizados, serão apresentadas no próximo capítulo a estimação dos parâmetros do modelo de Rakhmatov e Vrudhula e a análise do modelo obtido.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Uma vez que as vinte descargas planejadas foram realizadas, pôde-se obter os dez conjuntos de dados, isto é, a duração da descarga e a corrente de descarga, necessários para estimar os parâmetros α e β do modelo Rakhmatov e Vrudhula. Na Tabela 1 é apresentada a duração das descargas para cada valor de corrente dos testes realizados na bateria #1. Já na Tabela 2, apresentam-se os resultados obtidos com as descargas realizadas na bateria #2.

TABELA 1: RESULTADOS DAS DESCARGAS REALIZADAS NA BATERIA #1.

| Corrente (Ampères) | Duração teste 1 (segundos) | Duração teste 2 (segundos) | Média da duração para cada valor de corrente (segundos) |
|--------------------|----------------------------|----------------------------|---|
| 1,010 | 5197 | 5066 | 5135 |
| 1,512 | 3366 | 3373 | 3369 |
| 2,012 | 2438 | 2455 | 2446 |
| 2,512 | 1256 | 1786 | 1521 |
| 3,012 | 1000 | 1292 | 1146 |

TABELA 2: RESULTADOS DAS DESCARGAS REALIZADAS NA BATERIA #2.

| Corrente (Ampères) | Duração teste 1 (segundos) | Duração teste 2 (segundos) | Média da duração para cada valor de corrente (segundos) |
|--------------------|----------------------------|----------------------------|---|
| 1,010 | 4960 | 5375 | 5167 |
| 1,512 | 3250 | 3335 | 3292 |
| 2,012 | 2345 | 2330 | 2337 |
| 2,512 | 1250 | 1579 | 1414 |
| 3,012 | 1077 | 1165 | 1121 |

Uma vez que os experimentos de descarga foram devidamente concluídos, o próximo passo é utilizar os dados obtidos nos testes da bateria #1 para estimar os valores das constantes α e β do modelo RV. Como foram feitos dois experimentos para cada valor de corrente, foi utilizada a média dos dados encontrados para cada um dos perfis, de modo a reduzir inconsistências no processo de estimação, isto é, possuir para o mesmo valor de corrente, duas durações distintas. Para a estimação

foi utilizada a função *fminsearch* do MATLAB, com o intuito de se encontrar os parâmetros α e β que minimizam o valor da norma do erro absoluto entre as durações de descarga medidas e as durações de descarga estimadas por meio de (13).

Entretanto, tal expressão matemática possui um somatório em que o índice varia de 1 até infinito. Assim, para viabilizar os cálculos, limitou-se este somatório entre 1 e 10, pois por meio da Figura 8, percebe-se que a partir do décimo termo, as variações de alfa e beta são pequenas o suficiente para serem desprezadas, frente a sua respectiva ordem de grandeza.

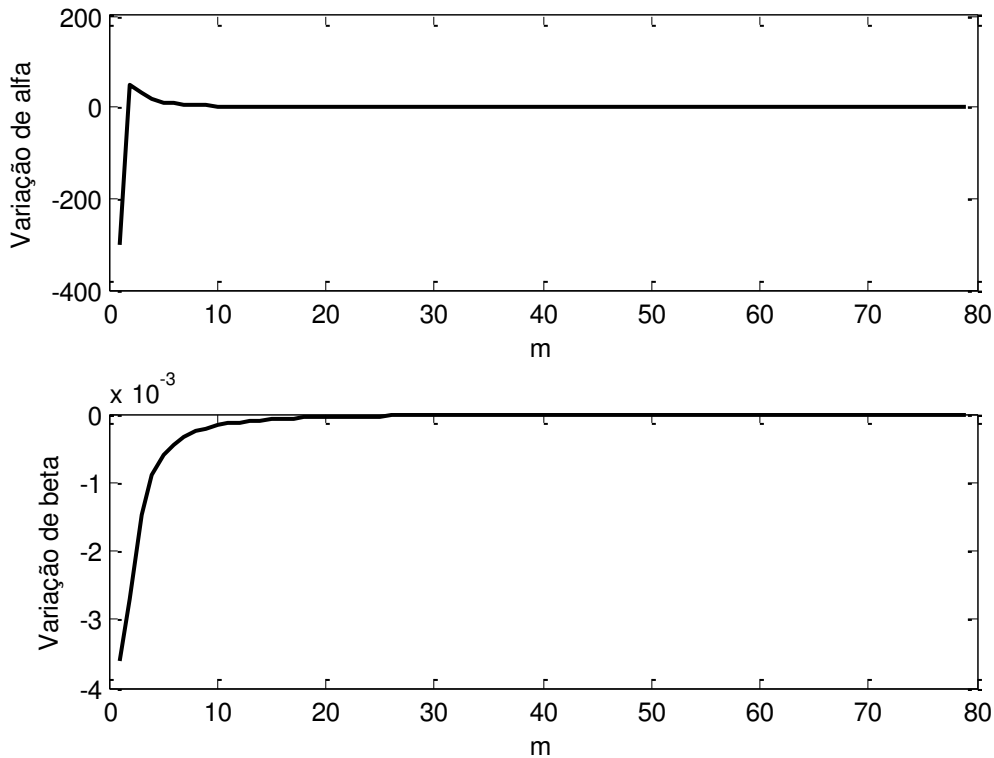


FIGURA 8: ANÁLISE DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS EM FUNÇÃO DO ÍNDICE m DO SOMATÓRIO EM (15).

Portanto, foram utilizados os dez primeiros termos do somatório expresso em (15), isto é $m = 10$.

$$\sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{1 - e^{-\beta^2 m^2 L}}{\beta^2 m^2} \right) \quad (15)$$

Assim, os valores de α e β encontrados, se encontram na Tabela 3.

TABELA 3: VALORES DOS PARÂMETROS ALFA E BETA.

| | |
|----------|------------|
| α | 6857,7878 |
| β | 0,05151557 |

Com os parâmetros do modelo RV determinados, foi elaborada uma rotina no MATLAB para calcular o tempo de descarga necessário para qualquer valor de corrente. Todas as rotinas escritas em

MATLAB que foram utilizadas neste trabalho, se encontram no Capítulo 8. Por meio da expressão (12) e utilizando a função *solve* do MATLAB, pode-se resolver a equação no tempo e se descobrir o tempo de descarga, uma vez que se possuam como valores fixos α , β e I . Desta forma, pode-se estimar os tempos de descarga para a corrente desejada, e em seguida comparar ao tempo de descarga obtido na bateria #2, no intuito de validar o modelo gerado com os testes da bateria #1. É importante comentar que todos os experimentos e cálculos foram realizados para descargas profundas, isto é, com profundidade de descarga de 100%.

Na análise da validação, notou-se que o índice m , influenciou no erro, de forma que somente por volta de $m = 20$, a média dos erros se estabilizou, como apresentado na Figura 9.

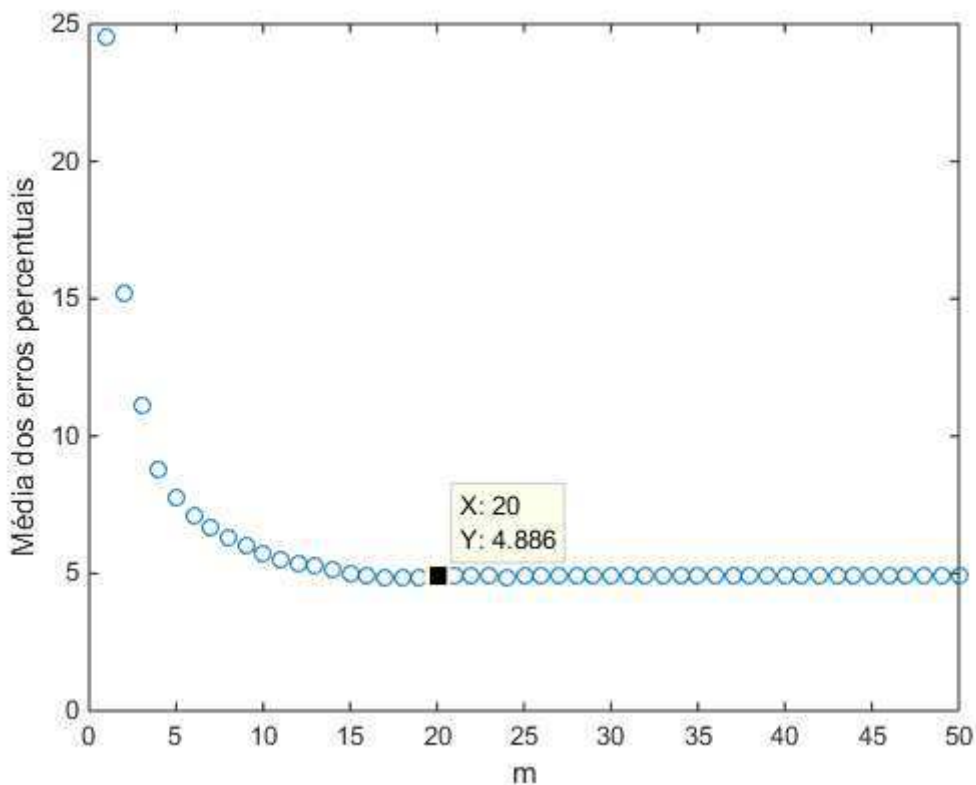


FIGURA 9: MÉDIA DOS ERROS PERCENTUAIS EM FUNÇÃO DO ÍNDICE M.

Assim, para confirmar a validação, foi considerado o valor dos erros encontrados para $m = 20$.

Como dito no início deste trabalho, o objetivo final para considerar esta validação concluída, é que a média dos erros encontrados seja menor que 5%. Na Tabela 4, são apresentados os erros percentuais encontrados ao final do processo de validação considerando que a média 4,886% dos erros percentuais é menor que 5%, o critério de aceitação do modelo de estimação de carga de Rakhmatov e Vrudhula foi atendido.

TABELA 4: ERROS ENCONTRADOS PARA VALIDAR O MODELO RV GERADO.

| Corrente (Ampères) | Tempo de descarga da Bateria #2 (segundos) | Tempo de descarga previsto pelo modelo RV (segundos) | Erro percentual (%) |
|-----------------------------|--|--|------------------------|
| 1,010 | 5167 | 5566 | 7,7221 |
| 1,512 | 3292 | 3311 | 0,5772 |
| 2,012 | 2337 | 2186 | 6,4613 |
| 2,512 | 1414 | 1519 | 7,4257 |
| 3,011 | 1121 | 1095 | 2,3194 |
| Média dos erros percentuais | | | 4,9011 |

Uma vez que o objetivo de validar o modelo Rakhmatov Vrudhula com erro médio menor que 5% foi alcançado, podemos dizer que este trabalho foi concluído com sucesso.

6 CONCLUSÃO

Apesar dos erros encontrados terem uma média menor que 5%, pode-se notar alguns erros em cerca de 7%. Tais resultados não negativam a validação, entretanto, podem ter como fonte um baixo rigor durante o processo de fabricação das baterias, uma vez que apesar das baterias terem em sua embalagem uma informação que dizia possuir 3800mAh, foram alcançados apenas 1500mAh, no melhor dos casos. Isto demonstra uma má qualidade de fabricação. Outras baterias foram pesquisadas antes dos experimentos serem iniciados, entretanto, nenhuma outra bateria de marca reconhecida e prazo de entrega suficiente para a conclusão deste trabalho foi encontrada.

É possível perceber como o processo de estimativa de tempo de descarga e análise do estado de carga é meticuloso. Mesmo fazendo uso de ferramentas matemáticas avançadas e representações de processos químicos através de expressões complexas, os resultados possuem um erro considerado alto para aplicações que necessitam de alta precisão, como carros elétricos e bancos de baterias em *nobreaks*, por exemplo.

Logo, a área de pesquisa de modelos de estimativa de estado de carga em baterias fica bastante promissora, uma vez que atualmente, o mundo depende dos dispositivos móveis, que por sua vez dependem de baterias, que por sua vez devem ser precisamente monitoradas. Uma alternativa que pode melhorar o modelo Rakhmatov e Vrudhula gerado neste trabalho, é aumentar a precisão dos equipamentos utilizados, de forma a garantir as especificações de manual e *datasheet*.

7 BIBLIOGRAFIA

BARD, A.; FAULKNER, L. **Electrochemicals Methods**. Segunda. ed. Nova Iorque: Wiley, 1980.

JONGERDEN, M. R.; HAVERKORT, B. R. **Which battery model to use?** IET software. 2009. p. 445-457.

LUIZ, S. O. D. **Gerenciamento de Energia em Sistemas Embarcados**. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2008. Dissertação de mestrado.

MANWELL, J. F. . A. J. G. M. **Lead acid battery storage model for hybrid energy systems**. Solar Energy 50.5. 1993. p. 399-405.

RAKHMATOV, D.; VRUDHULA, S. **An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems**. Anais do 2001 IEEE/ACM international conference on Computer-aided design. IEEE: IEEE Press. 2001.

SAMOLYK, M. M.; SOBCZAK, J. **Development of an algorithm for estimating Lead-Acid Battery State of Charge and State of Health**. Blekinge Institute of Technology. Blekinge. 2013. Dissertação de mestrado.

VAIRAMOHAN, B. **State of Charge Estimation for Batteries**. University of Tennessee. Knoxville. 2002. Dissertação de mestrado.

8 ANEXO

8.1 CÓDIGO DO MATLAB PARA VALIDAÇÃO DO MODELO RV

```

% Rotina para validar o modelo Rakhmatov-Vrudhula
close all
clear all
clc

Dados_est = [1.010  5131
             1.511  3369
             2.012  2446
             2.512  1521
             3.011  1146];

Dados_val = [1.010  5167
             1.512  3292
             2.012  2337
             2.512  1414
             3.011  1121];

start = [6000; 0.05]; %%% Valores iniciais para As
options = optimset('TolX', 1e7, 'TolFun', 1e7, 'MaxFunEvals', 1000000,
                  'MaxIter', 1000);

lam = fminsearch('fitfunSODL', start, options, Dados_est(:,1), Dados_est(:,2));
alfa = lam(1);
beta = lam(2);
syms m t
I = Dados_val(:,1);
L = Dados_val(:,2);
for u = 1:50
    clc
    u
    for n = 1:length(I)
        eqn = I(n)*(t+2*symsum((1-exp(-1*beta^2*m^2*t))/(beta^2*m^2), m, 1, u))
    == alfa;
        Trv = solve(eqn, t);
        L_est(n) = double(ceil(Trv));
    end
    erro(u) = mean(abs((L_est'-L)./L)*100);
end
erro = (abs((L_est'-L)./L)*100)';
figure(1)
plot(erro, 'o')

```

8.2 CÓDIGO DA FUNÇÃO FITFUNSODL

```

function err = fitfunSODL(lambda,t,y,handle)
%FITFUN Used by FITDEMO.
% FITFUN(lambda,t,y,handle) returns the error between the data and the values
% computed by the current function of lambda.
%
% FITFUN assumes a function of the form
%
%     y = c(1)*exp(-lambda(1)*t) + ... + c(n)*exp(-lambda(n)*t)
%
% with n linear parameters and n nonlinear parameters.
% Copyright 1984-2002 The MathWorks, Inc.
% $Revision: 5.8 $ $Date: 2002/04/08 20:04:42 $

%Equação 8 de Energy Management for Battery-Powered Embedded Systems (DALER
RAKHMATOV e SARMA VRUDHULA)
%z(k,1) = I(k), y(k) = L(k), lambda = [alfa, beta]
somatorio = 0;
for k=1:length(t)
    somatorio = y(k);
    for n = 1:10
        somatorio = somatorio + (2*(1-exp(-
lambda(2)^2*n^2*y(k)))/(lambda(2)^2*n^2));
    end
    z(k,1) = lambda(1)/somatorio;
end
%
err = norm(z-t);

```