

Avaliação do Modelo Elétrico *Battery* considerando Baterias de Lítio Íon e Lítio Íon Polímero

Marcia de F. Brondani¹, Airam Sausen¹, Paulo S. Sausen¹

¹Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Modelagem Matemática, Departamento de Ciências Exatas e Engenharia, Rua Lulu Ilgenfritz, 480, Bairro São Geraldo, 98700-000 – Ijuí, RS, Brasil.

marciabrondani@yahoo.com.br, {airam, sausen}@unijui.edu.br

Abstract. *This work presents the application of the Battery electrical model in the prediction of the life time of Lithium Ion and Lithium Ion Polymer batteries. The study used energy discharge simulations, adopting a vast array of discharge currents. The model validation was carried comparing the results obtained from the simulations to the data acquired from the experiments in the test bed. For the Lithium Ion batteries the model presented an average error of 2.54%, while for the Lithium Ion Polymer batteries the average error was 3.42%. The results have shown that the Battery model has an average error rate, for the studied cases, inferior to the expected value for electrical models, i.e., 5%.*

Resumo. *Este artigo apresenta uma aplicação do modelo elétrico Battery na predição do tempo de vida de baterias de Lítio Íon e Lítio Íon Polímero, a partir de simulações de descargas de energia, adotando um amplo conjunto de descargas. A avaliação do modelo consiste na comparação entre os resultados das simulações computacionais e os resultados dos ensaios obtidos de forma experimental. Assim, para as baterias de Lítio Íon o modelo apresenta um erro médio de 2,54%, enquanto que para as baterias de Lítio Íon Polímero obteve um erro médio de 3,42%. Os resultados mostram que o referido modelo possui uma taxa de erro médio, para os casos estudados, inferior ao erro esperado para modelos elétricos, isto é, 5%.*

1. Introdução

Nos últimos anos, a busca por computação ubíqua tem crescido, e uma grande gama de dispositivos móveis tem ganhado espaço nos sistemas de informação. Para que estes dispositivos possam proporcionar uma experiência satisfatória para o usuário, é essencial que possam trabalhar desconectados da rede elétrica pelo maior tempo possível, através do uso de baterias. A bateria é considerada o principal elemento dos dispositivos móveis, os quais estão vinculados operacionalmente à vida útil da mesma. O tempo de vida de uma bateria é definido como o tempo que ela demora para atingir o nível de estado mínimo de carga (*i.e.*, nível de *cutoff*), no qual a bateria fica incapaz de fornecer energia elétrica para o sistema (Porciuncula et.al., 2012).

Ao considerar a evolução dos sistemas alimentados por baterias, é essencial que as baterias sejam capazes de atender às especificações dos aparelhos portáteis, possuindo maior desempenho e durabilidade. Neste sentido, destaca-se que é possível prever o tempo de vida de baterias através de modelos matemáticos que descrevem o comportamento das mesmas em condições de cargas/descargas estáticas ou dinâmicas, em diversas aplicações. Existem diferentes modelos matemáticos com características distintas que modelam as diferentes propriedades relacionadas a cada tipo de bateria,

tais como os analíticos (Rakhmatov e Vrudhula, 2001), os modelos elétricos (Chen e Rincón-Mora, 2006), os modelos estocásticos (Chiasserini e Rao, 1999), os modelos eletroquímicos (Fuller e Newman, 1994), os modelos via teoria de Identificação de Sistemas (Ljung, 1999) e os modelos híbridos (Kim, 2012). Neste estudo é dada ênfase ao modelo elétrico *Battery*, disponibilizado pelo programa *Matlab/Simulink*, desenvolvido pela companhia *The Mathworks*. O modelo elétrico *Battery* é escolhido por ser prático no que se refere à extração de seus parâmetros empíricos e considerar um efeito não linear importante que ocorre em um processo real de descarga, i.e., o efeito de recuperação (Jongerden e Haverkort, 2008), que influencia diretamente no tempo de vida da bateria.

Desta forma, neste artigo é apresentada a aplicação do modelo elétrico *Battery* a partir de simulações de descargas de energia, considerando baterias de Lítio Íon e Lítio Íon Polímero. Para a realização das simulações admite-se um amplo conjunto de descargas, composto de correntes baixas, médias e altas, obtido de uma plataforma de testes. Destaca-se que os resultados das simulações computacionais do modelo são comparados com os resultados dos ensaios obtidos de forma experimental. Ainda, é apresentada a análise comparativa dos resultados das simulações com as baterias de Lítio Íon e Lítio Íon Polímero. Assim, o artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2 tem-se o estudo teórico sobre o modelo elétrico *Battery*, descrevendo as hipóteses de modelagem e a extração de parâmetros do modelo. Na Seção 3 encontram-se os dados obtidos experimentalmente e as simulações realizadas. Na Seção 4, a conclusão.

2. O Modelo Elétrico *Battery*

O modelo elétrico *Battery*, semelhante ao modelo proposto por Tremblay e Dessaint (2009), possibilita simular os seguintes tipos de baterias: Chumbo-Ácido, Níquel Cádmio, Níquel Metal Hidreto e Lítio Íon. Assim, o cálculo da tensão difere, dependendo do tipo de bateria a ser simulada. Neste sentido, no site da *MathWorks* encontra-se a equação matemática (1) que descreve o decaimento da tensão para as baterias de Lítio Íon e Lítio Íon Polímero utilizadas neste estudo,

$$f(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + A \exp(-B it) \quad 1)$$

onde: E_0 é a tensão constante, K é a constante de polarização ou resistência de polarização, i^* é a corrente dinâmica em baixa frequência, it é a capacidade extraída, Q é a capacidade máxima da bateria, A é a tensão exponencial e B é a capacidade exponencial.

Para modelar o processo de descarga de energia nas referidas baterias é essencial considerar as hipóteses de modelagem do modelo *Battery*, as quais estão baseadas nos seguintes pressupostos, conforme Tremblay e Dessaint (2009): a resistência interna é considerada constante durante a carga e descarga da bateria, não variando com a amplitude da corrente; a capacidade efetiva da bateria não se altera com as variações de amplitude da corrente (efeito PEUKERT); a temperatura é negligenciada, não afetando o comportamento do modelo; a auto-descarga da bateria não está representada; o modelo não tem efeito memória.

2.1 Extração de Parâmetros do Modelo

Os parâmetros do modelo elétrico *Battery* são informados para representar um tipo específico de bateria, Porciuncula et. al. (2012). Destaca-se que, na sua maioria, estes parâmetros são obtidos diretamente dos dados presentes nos *datasheets* das baterias, sendo somente três parâmetros extraídos por meio de curvas características de descargas, são eles: capacidade na tensão nominal, tensão exponencial e capacidade exponencial. Como as baterias simuladas neste trabalho não possuem em seus *datasheets* curvas típicas de descarga, é preciso gerá-las de maneira experimental utilizando dados obtidos a partir de uma plataforma de testes (Figura 1) desenvolvida pelo Grupo de Automação Industrial e Controle (GAIC), localizada no Laboratório de Sensores Inteligentes, na Unijuí.



Figura 1. Foto da plataforma de teste.

Uma curva característica de descarga é composta por três seções: a primeira representa a queda de tensão exponencial quando a bateria está totalmente carregada; a segunda representa a carga que pode ser extraída da bateria até a tensão decair abaixo da tensão de *cutoff*; e a terceira representa a descarga total da bateria, quando a tensão diminui rapidamente, conforme mostrado na Figura 2.

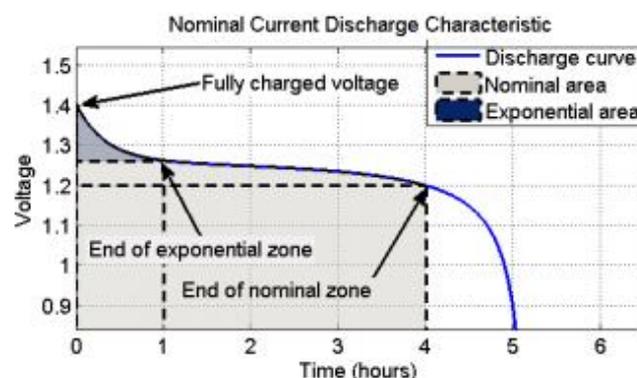


Figura 2. Curva característica de descarga (Tremblay e Dessaint, 2007).

No site da *MathWorks* encontram-se os valores do parâmetro de resistência interna, correspondente a 1% do produto entre a tensão nominal (*cutoff*) e a capacidade típica da bateria; do parâmetro capacidade máxima, considerado 105% da capacidade típica da bateria; e, o tempo de resposta, definido como 30 s, representando de maneira satisfatória a dinâmica da tensão da bateria. Após a obtenção dos parâmetros é

necessário realizar a calibração do modelo, a qual consiste em informar todos os parâmetros em uma interface gráfica presente no modelo elétrico *Battery*. Em seguida, para realizar as simulações, basta submeter o modelo já calibrado a diferentes tipos de perfis de descarga.

3. Validação do Modelo Elétrico *Battery*

O modelo elétrico *Battery* é avaliado a partir de uma análise comparativa entre os resultados simulados e os resultados experimentais obtidos através da plataforma de testes, considerando dois tipos de baterias: Lítio Íon e Lítio Íon Polímero. A seguir são apresentados os resultados das simulações do tempo de vida para tais baterias.

3.1 Baterias de Lítio Íon

Para a realização das simulações do tempo de vida das baterias de Lítio Íon são adotados diferentes perfis de descargas contínuas, com correntes baixas, médias e altas. O modelo é calibrado considerando as seguintes correntes nominais de descarga: 0,1 A, 0,4 A e 0,8 A. Na Tabela 1 são apresentados os tempos de vida experimentais médios (Tve), os tempos de vida simulados (Tvs) obtidos a partir das simulações com o modelo elétrico *Battery* e o erro encontrado, dado pela diferença entre o tempo de vida médio experimental e o tempo de vida simulado pelo modelo. Ainda, observa-se que a corrente constante utilizada para calibrar o modelo *Battery* não é utilizada na comparação dos resultados com as simulações computacionais.

Tabela 1. Tempos de vida experimentais médios (Tve) e tempos de vida simulados (Tvs) com o modelo elétrico *Battery* com descargas contínuas, considerando as baterias de Lítio Íon.

Cal. (A)	Perfis (A)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	Erro Médio
	Tve (s)	35722	17858	11629	8743	7115	5717	4740	4122	
0,1	Tvs (s)	-	17020	11292	8428	6709	5563	4744	4130	
	Erro (%)	-	4,92	2,98	3,74	6,05	2,77	0,08	0,19	2,98%
0,4	Tvs (s)	34596	17235	11448	-	6818	5660	4832	4212	
	Erro (%)	3,25	3,61	1,58	-	4,36	1,01	1,90	2,14	2,14%
0,8	Tvs (s)	34970	17440	11596	8673	6920	5751	4915	-	
	Erro (%)	2,15	2,40	0,28	0,81	2,82	0,59	3,56	-	2,15%

Apresenta-se na Figura 3, o gráfico que mostra o decaimento da tensão da bateria até atingir o nível de *Cutoff*, para uma taxa de descarga constante de 0,5 A, com calibração do modelo para 0,3 A. O tempo de vida simulado pelo modelo *Battery* é de 7121 segundos e o tempo experimental é de 7115 segundos, obtendo-se um erro entre os tempos de vida igual a 0,08%.

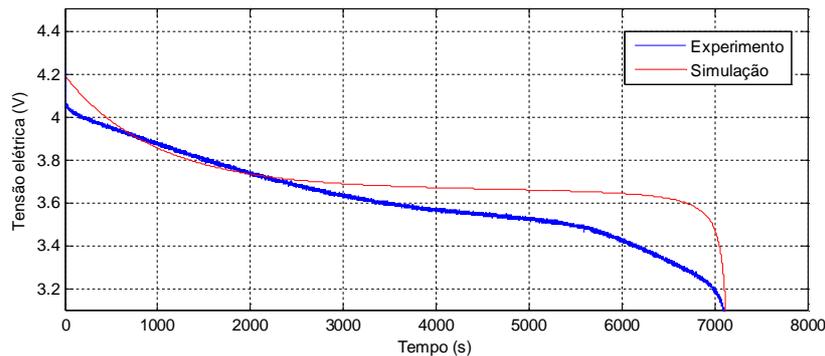


Figura 3. Comparação entre dados experimentais e resultados simulados para a descarga contínua de 0,5 A, considerando a corrente nominal de 0,3 A.

Além dos resultados apresentados acima, são realizadas simulações para oito calibrações diferentes no modelo, referentes às curvas de descargas contínuas de 0,1 A, 0,2 A, 0,3 A, 0,4 A, 0,5 A, 0,6 A, 0,7 A e 0,8 A. Cada calibração é submetida aos seguintes perfis de descargas 0,1 A, 0,2 A, 0,3 A, 0,4 A, 0,5 A, 0,6 A, 0,7 A e 0,8 A. Na Figura 4 é apresentado o erro médio (%) obtido pela diferença entre os tempos de vida simulados em cada calibração do modelo considerando os nove perfis de descargas contínuas e os tempos de vida experimentais.

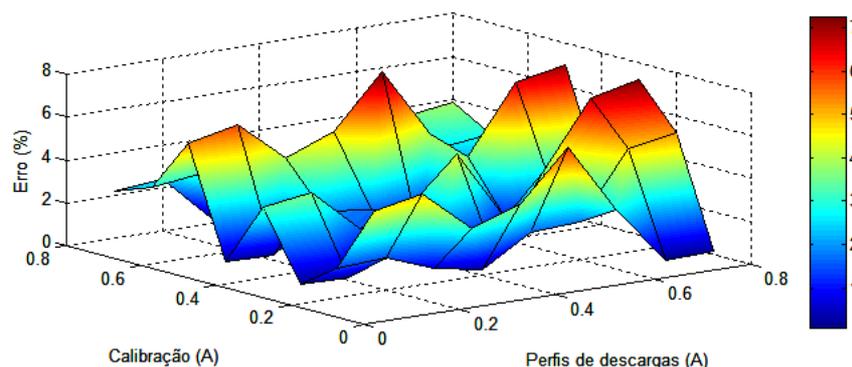


Figura 4. Erro médio (%) em cada calibração do modelo.

3.2 Baterias de Lítio Íon Polímero

Para a realização das simulações do tempo de vida das baterias de Lítio Íon Polímero são adotadas as seguintes correntes nominais de descargas para calibrar o modelo: 0,1 A, 0,4 e 0,8 A. Na Tabela 2 são apresentados os tempos de vida experimentais médios (T_{ve}), os tempos de vida simulados (T_{vs}) obtidos a partir das simulações com o modelo elétrico *Battery* e o erro encontrado, dado pela diferença entre o tempo de vida médio experimental e o tempo de vida simulado pelo modelo.

Tabela 2. Tempos de vida experimentais médios (Tve) e tempos de vida simulados (Tvs) com o modelo elétrico Battery com descargas contínuas, considerando as baterias de Lítio Íon Polímero.

Cal. (A)	Perfis (A)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	Erro Médio
	Tve (s)	24355	11757	7681	5573	4411	3340	2993	2483	
0,1	Tvs (s)	-	12194	7937	5808	4531	3678	3069	2612	
	Erro (%)	-	3,58	3,22	4,03	2,63	9,18	2,46	4,91	4,29%
0,4	Tvs (s)	24836	12121	7881	-	4487	3638	3030	2574	
	Erro (%)	1,94	3,00	2,53	-	1,67	8,18	1,20	3,51	3,15%
0,8	Tvs (s)	24029	11674	7554	5493	4256	3430	2839	-	
	Erro (%)	1,36	0,71	1,68	1,47	3,66	2,62	5,45	-	2,42%

Apresenta-se na Figura 5, o gráfico que mostra o decaimento da tensão da bateria até atingir o nível de *Cutoff*, possibilitando a comparação entre os dados experimentais e os resultados simulados para um perfil de descarga constante de 0,55 A, com calibração do modelo para 0,675 A. Neste caso, o tempo de vida simulado pelo modelo *Battery* é de 4039 segundos e o tempo de vida experimental é de 4038 segundos, obtendo-se 0,01% de erro.

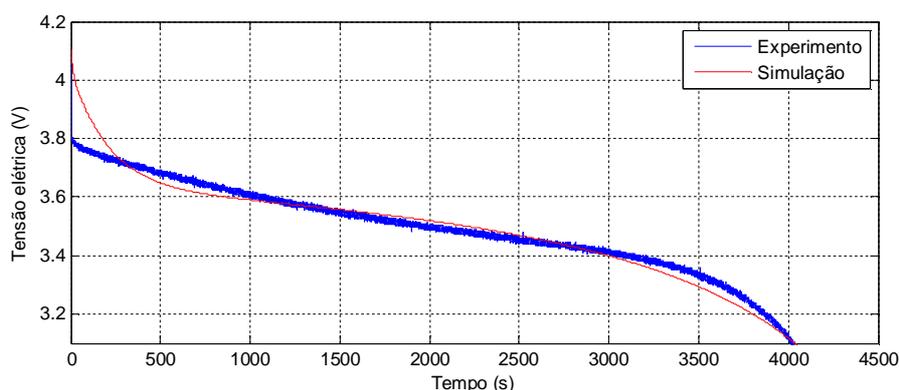


Figura 5. Comparação entre dados experimentais e resultados simulados para a descarga contínua de 0,55 A, considerando a corrente nominal de 0,675 A.

Na Figura 6 é apresentando o erro médio (%) obtido pela diferença entre os tempos de vida simulados e os tempos de vida experimentais, considerando as calibrações do modelo referentes às seguintes correntes nominais: 0,1 A, 0,2 A, 0,3 A, 0,4 A, 0,5 A, 0,6 A, 0,7 A e 0,8 A; e os seguintes perfis de descargas 0,1 A, 0,2 A, 0,3 A, 0,4 A, 0,5 A, 0,6 A, 0,7 A, 0,8 A.

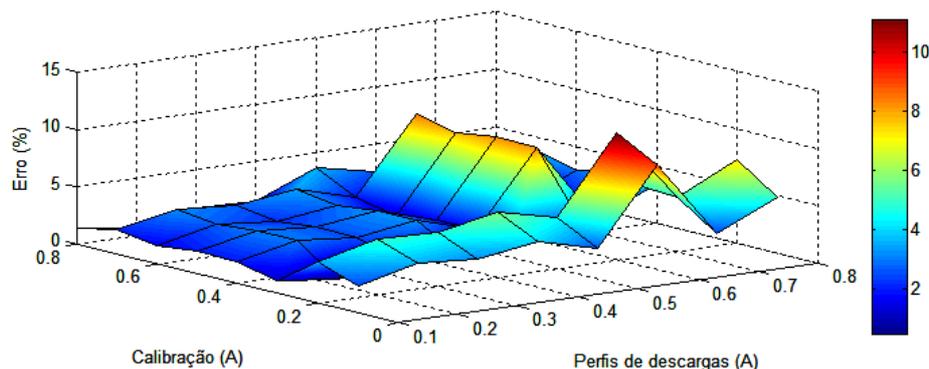


Figura 6. Erro médio (%) em cada calibração do modelo.

3.3 Comparação entre os resultados das simulações dos tempos de vidas das baterias de Lítio Íon e Lítio Íon Polímero

Ao analisar os resultados das simulações realizadas com as baterias, observa-se que com as baterias Lítio Íon o modelo elétrico *Battery* apresenta um erro médio de 2,54% em relação aos dados experimentais, e com os resultados simulados com as baterias de Lítio Íon Polímero obteve um erro médio de 3,42% em relação aos dados experimentais. Na Figura 7 são apresentados os erros médios de cada calibração do modelo *Battery*, para as baterias simuladas.

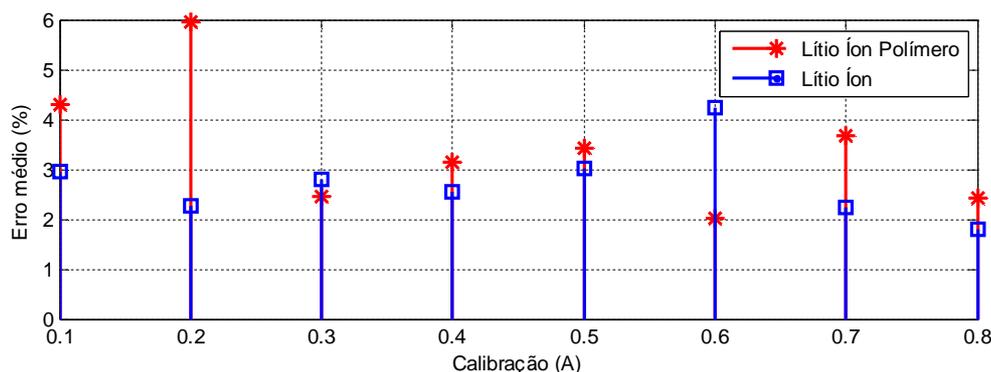


Figura 7. Erro médio (%) de cada calibração do modelo elétrico *Battery*.

4. Conclusão

Neste trabalho foi estudado e aplicado o modelo elétrico *Battery* por meio de simulações de descargas de energia utilizando baterias de Lítio Íon e Lítio Íon Polímero. O modelo foi validado a partir da comparação entre os tempos de vida simulados e os tempos de vida experimentais obtidos pela plataforma de testes, para ambas as baterias. Destaca-se que a precisão do modelo para os casos simulados é melhor em baterias de Lítio Íon, com erro de 2,54%. Logo, conclui-se que o modelo *Battery* obteve resultados satisfatórios para predição do tempo de vida de baterias, considerando que o erro médio encontrado nas simulações é inferior a 5%, limite de erro esperado em simulações computacionais com modelos elétricos.

Assim, importantes características do modelo *Battery*, como o processo relativamente mais simples de extração de parâmetros quando comparado a outros modelos que predizem o tempo de vida de baterias, assim como a boa precisão demonstrada neste trabalho, fazem desse modelo uma excelente ferramenta a ser

aplicada para os diversos dispositivos móveis, melhorando o desempenho para o usuário.

Referências

- Chen, M.; Rincón-Mora, G. "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and i-v performance," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, June 2006.
- Chiasserini, C.; Rao, R. "Pulsed battery discharge in communication devices," *Proceedings of the 5th International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 88–95, 1999.
- Fuller, M. D. T. F.; Newman, J. "Simulation and optimization of the dual lithium ion insertion cell," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 141, no. 1, pp. 1–10, 1994.
- Jongerden, M.; Haverkort, B. "Battery modeling," *Technical Report in Faculty Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science*, 2008.
- Kim, T. "A hybrid battery model capable of capturing dynamic circuit characteristics and nonlinear capacity effects". Muly 2012.
- Ljung, L. *System Identification: Theory for the User*, 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1999.
- MathWorks, "Implement generic battery model", Disponível em: <<http://www.mathworks.nl/access/helpdesk/help/toolbox/physmod/powersys/ref/battery.html>>. Acesso em: 18 jun. 2014.
- Porciuncula, C. M. D. et. al. Avaliação comparativa entre o modelo elétrico Battery e os modelos analíticos Linear e Lei de Peukert Revista Brasileira de Computação Aplicada (ISSN 2176-6649), Passo Fundo, v. 4, n. 1, p. 71-80, mar. 2012.
- Rakhmatov, D.; Vrudhula, S. "An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems," *National Science Foundation's State/Industry/University Cooperative Research Centers' (NSFS/IUCRC) Center for Low Power Electronics (CLPE)*, pp. 1 – 6, 2001.
- Tremblay, O.; Dessaint, L.-A.; Dekkiche, A.-I., A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles, Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE , pp. 284-289, 9-12 Sept. 2007.
- Tremblay, O., Dessaint, L.-A. "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications." *World Electric Vehicle Journal*. Vol. 3 - ISSN 2032-6653 - © 2009 AVERE, EVS24 Stavanger, Norway, May 13 - 16, 2009.