

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Modelagem Matemática do Tempo de Vida de Baterias de Lítio Íon Polímero

Marcia de Fatima Brondani¹

Airam Sausen²

Paulo Sérgio Sausen³

Manuel Osório Binelo⁴

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Modelagem Matemática, Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Unijuí, Ijuí, RS

Resumo. O presente trabalho apresenta a modelagem matemática da predição do tempo de vida de baterias de Lítio Íon Polímero a partir do modelo elétrico *Battery*. Os resultados mostram que o referido modelo possui uma baixa taxa de erro médio para os casos estudados.

Palavras-chave. Modelagem Matemática, Tempo de Vida de Baterias, Modelo Elétrico *Battery*, Baterias de Lítio Íon Polímero, Parametrização do Modelo Matemático.

1 Introdução

Nos últimos anos, é notável um grande aumento no uso de dispositivos móveis, especialmente dos chamados *smartphones*. A propagação destes aparelhos está vinculada, principalmente, à diversificação dos serviços disponibilizados, os quais proporcionam praticidade aos usuários. Comumente, estes dispositivos são abastecidos energeticamente por algum tipo de bateria recarregável.

Entre as tecnologias de baterias recarregáveis disponíveis no mercado, ressalta-se que as baterias de Lítio Íon Polímero (Li-Po) são muito utilizadas em equipamentos eletrônicos portáteis, sendo similares às baterias de Lítio Íon (Li-Íon) em termos de densidade energética. Além desta característica, nas baterias de Li-Po, o uso de polímero seco oferece simplificações no que diz respeito à fabricação, segurança e permite geometrias de perfil fino [12].

A capacidade de um dispositivo móvel funcionar adequadamente está condicionada ao tempo de vida de sua bateria. Por definição, o tempo de vida de uma bateria é o tempo decorrido, durante o processo de descarga, até que seja atingido um determinado nível de

¹marciabrondani@yahoo.com.br

²airam@unijui.edu.br

³sausen@unijui.edu.br

⁴manuel.binelo@unijui.edu.br

capacidade de carga (nível de *Cutoff*), no qual a bateria fica incapaz de fornecer energia elétrica para o sistema [8]. Neste contexto, tanto para o avanço na pesquisa de baterias, quanto para a otimização da utilização dos dispositivos móveis, torna-se imprescindível a predição do tempo de vida de baterias. Dentre os diferentes modelos matemáticos capazes de descrever o comportamento dinâmico de uma bateria, encontram-se os modelos eletroquímicos [4], os modelos estocásticos [3], os modelos analíticos [7], os modelos via Identificação de Sistemas [1], os modelos de circuitos elétricos [2] e os modelos híbridos [5].

Um aspecto relevante a ser considerado na modelagem matemática do tempo de vida de baterias é a presença de efeitos não lineares durante o processo real de descarga, os quais podem afetar significativamente a capacidade das baterias. Entre os modelos matemáticos capazes de capturar tais efeitos, destaca-se o modelo elétrico *Battery*, que considera um dos efeitos não lineares, i.e., o efeito de recuperação [9].

Assim, neste trabalho é realizada a modelagem matemática da predição do tempo de vida de baterias de Li-Po a partir do modelo elétrico *Battery*. As simulações computacionais são realizadas na ferramenta *Matlab/Simulink*, e a validação do modelo é realizada através da comparação entre os tempos de vida simulados e os tempos de vida experimentais médios obtidos em uma plataforma de testes.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2 é apresentado o modelo elétrico *Battery*. Na Seção 3 é apresentado o método utilizado para a estimação dos parâmetros do modelo *Battery*, bem como para a coleta de dados experimentais. Na Seção 4 são apresentados os resultados das simulações e as discussões. Na Seção 5 é apresentada a conclusão.

2 Modelo Elétrico *Battery*

O modelo elétrico *Battery*, semelhante ao modelo desenvolvido por Shepherd [10], é capaz de modelar o comportamento de carga e descarga de diferentes tecnologias de baterias recarregáveis por meio da estimação de seus parâmetros empíricos [6]. Logo, para cada tipo de bateria há uma equação matemática específica para descrever o decaimento de tensão. Para as baterias de Li-Po, a tensão é obtida pela equação

$$f(it, i^*, i) = E_0 - \underbrace{K \left(\frac{Q}{Q - it} \right)}_{\text{Resistência de Polarização}} i^* - \underbrace{K \left(\frac{Q}{Q - it} \right) it}_{\text{Tensão de Polarização}} + A \exp(-Bit), \quad (1)$$

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. O modelo *Battery* é integrado à biblioteca *SimPowerSystems*, no programa *Matlab/Simulink*.

Para modelar o processo de descarga de energia é essencial considerar as hipóteses de modelagem do modelo *Battery*, as quais estão baseadas nos seguintes pressupostos [11]: 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; a temperatura é negligenciada, não afetando o comportamento do modelo; a auto-descarga da bateria não está representada; o modelo não tem efeito memória.

Os parâmetros do modelo elétrico *Battery*, na sua maioria, são obtidos diretamente dos dados presentes nos *datasheets* das baterias, mas três parâmetros são extraídos por meio de curvas características de descargas (Figura 1), sendo eles: capacidade na tensão nominal (Q_{Nom}), tensão exponencial (V_{Exp}) e capacidade exponencial (Q_{Exp}). Em alguns casos, a curva característica de descarga já está presente no *datasheet*, em outros é necessário obtê-la de forma experimental.

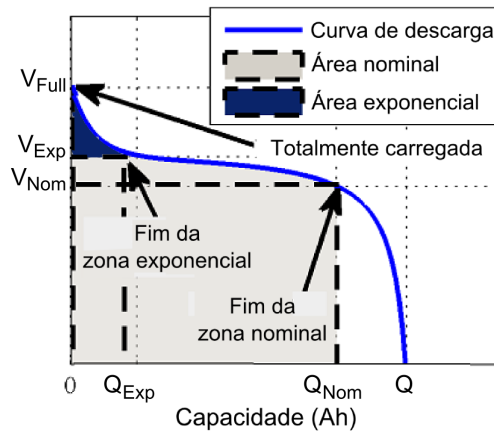


Figura 1: Curva característica de descarga [11].

3 Métodos

Para a estimação dos parâmetros do modelo elétrico *Battery* é adotado o seguinte procedimento. Em um primeiro momento, são obtidos os parâmetros a partir das informações contidas nas baterias, conforme proposto em [13]. Em um segundo momento, é feita a estimação dos parâmetros Q_{Nom} , V_{Exp} e Q_{Exp} através da análise de curvas reais de descargas em pontos específicos, conforme destacados na Figura 1.

As curvas reais de descarga utilizadas neste trabalho são geradas com base em dados fornecidos a partir de uma plataforma de testes, desenvolvida pelo Grupo de Automação Industrial e Controle (GAIC), da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (Unijuí). Esta plataforma captura as curvas reais de descarga de uma bateria, obtendo informações instantâneas referentes ao processo de descarga que podem ser salvas como imagens de gráficos em *bitmap* e relatórios em formato texto.

Para este estudo, é utilizado um amplo conjunto de dados experimentais que compreende correntes baixas, médias e altas, de acordo com os limites mínimo e máximo aceitáveis para baterias do tipo Li-Po, modelo *PL383562 – 2C*. Desta forma, os testes são realizados considerando 31 perfis de descargas constantes, variando de 50 *mA* a 800 *mA*, em

intervalos de 25 mA. Para cada perfil de descarga são realizados 8 ensaios experimentais.

Inicialmente são geradas 8 curvas reais de descarga referentes aos 8 ensaios experimentais de cada perfil. Com os dados disponíveis da plataforma, é calculado o tempo de vida experimental de cada curva de descarga, e o tempo de vida experimental médio do perfil. Então, dentre as 8 curvas de cada perfil é escolhida a curva que se encontra mais próxima do tempo de vida experimental médio, conforme mostrado na Figura 2. Após a escolha da curva, obtém-se os 3 parâmetros do modelo elétrico *Battery* através da análise visual desta curva em pontos específicos. Estes parâmetros são informados ao modelo para a realização da simulação.

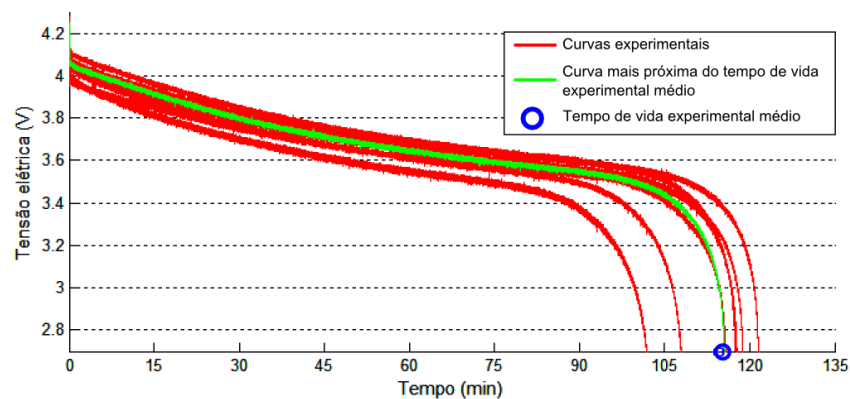


Figura 2: Curvas experimentais e o tempo de vida experimental médio.

Neste trabalho o modelo é calibrado 31 vezes, para que sejam considerados os parâmetros obtidos em cada regime de descarga. Após a calibração do modelo considerando um determinado perfil de descarga, o modelo é executado para os demais 30 perfis, para que possa ser analisada a eficiência da calibração nos demais regimes de descarga.

4 Resultados e Discussões

Os resultados das simulações do modelo elétrico *Battery* são apresentados de forma resumida na Tabela 1, a qual contém os tempos de vida experimentais médios (t_{ve} em minutos), os tempos de vida simulados pelo modelo (t_{vs} em minutos) e o erro obtido em cada simulação em relação a cada calibração (Cal.), considerando 8 perfis de descargas constantes.

A análise dos resultados baseia-se na diferença entre o tempo de vida simulado pelo modelo e o tempo de vida experimental médio, obtido na plataforma de testes. Considerando os 31 perfis de descarga, o modelo apresenta os melhores resultados nas calibrações com correntes nominais de 250 mA e 525 mA, obtendo o erro médio igual a 0,85% em ambas calibrações. O resultado menos satisfatório obtido pelo modelo é na calibração com corrente nominal de 125 mA, apresentando um erro médio, de 5,43%. Na Figura 3 é apresentada uma comparação entre o tempo de vida experimental médio e o tempo de

Tabela 1: Resultados das simulações.

Cal. (mA)	Perfis (mA)	100	200	300	400	500	600	700	800
100	t_{ve}	465,98	227,99	149,47	114,59	90,58	74,69	63,51	54,64
	t_{vs}	-	231,10	152,72	113,52	90,00	74,32	63,10	54,70
	Erro	-	1,35%	2,13%	0,94%	0,64%	0,51%	0,65%	0,11%
200	t_{vs}	460,88	-	150,52	111,72	88,43	72,92	61,82	53,50
	Erro	1,11%	-	0,69%	2,57%	2,43%	2,44%	2,74%	2,13%
300	t_{vs}	455,23	224,98	-	109,85	86,82	71,45	60,48	52,25
	Erro	2,36%	1,33%	-	4,31%	4,33%	4,54%	5,01%	4,57%
400	t_{vs}	472,45	234,53	155,22	-	91,77	75,90	64,57	56,05
	Erro	1,37%	2,79%	3,70%	-	1,29%	1,59%	1,63%	2,52%
500	t_{vs}	467,98	232,05	153,40	114,07	-	74,73	63,50	55,07
	Erro	0,43%	1,75%	2,56%	0,46%	-	0,05%	0,02%	0,77%
600	t_{vs}	473,53	235,13	155,65	115,92	92,07	-	64,82	56,28
	Erro	1,60%	3,04%	3,97%	1,15%	1,62%	-	2,01%	2,92%
700	t_{vs}	473,33	235,02	155,57	115,83	92,00	76,10	-	56,22
	Erro	1,55%	2,99%	3,92%	1,08%	1,54%	1,85%	-	2,80%
800	t_{vs}	472,97	234,80	155,40	115,70	91,88	75,98	64,63	-
	Erro	1,48%	2,90%	3,82%	0,96%	1,42%	1,70%	1,73%	-

vida simulado pelo modelo parametrizado com a corrente nominal 250 mA, para os 31 perfis analisados.

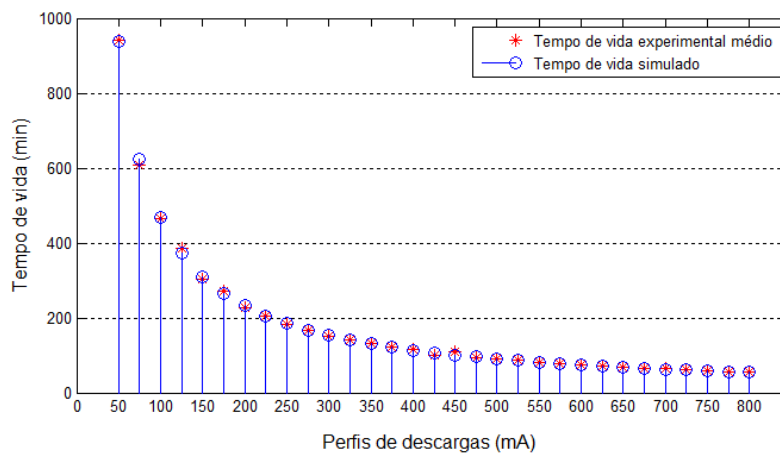


Figura 3: Comparação entre dados experimentais e resultados simulados com o modelo parametrizado com a corrente nominal de 250 mA.

Na Figura 4 são apresentadas uma curva simulada pelo modelo *Battery* e a curva experimental correspondente, gerada com dados fornecidos pela plataforma. Ambas as curvas (simuladas e experimentais) descrevem o decaimento da tensão de uma bateria de Li-Po em função do tempo, durante o processo de descarga. As curvas mostradas correspondem à calibração com corrente nominal de 400 mA, considerando o perfil de descarga de 50 mA. A referência para o gráfico é o tempo de vida experimental médio, sinalizado com um círculo preto.

Os resultados mostram que o modelo elétrico *Battery* possui uma taxa de erro médio,

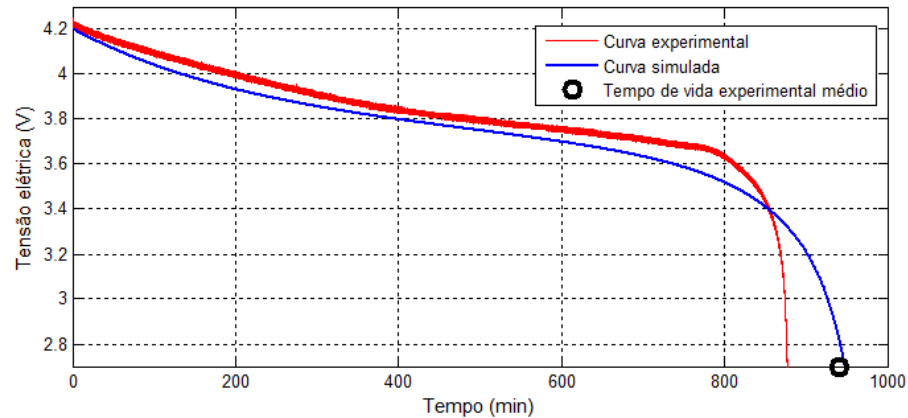


Figura 4: Curva simulada pelo modelo *Battery* e curva experimental, considerando o perfil de descarga de 50 mA.

para os casos estudados, de 2,057%. O modelo apresenta uma maior precisão quando são consideradas correntes de descarga mais altas, onde é menor o impacto dos efeitos de não linearidade.

5 Conclusão

Neste trabalho foi apresentada a modelagem matemática da previsão do tempo de vida de baterias de Li-Po a partir modelo elétrico *Battery*. 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. Através dos resultados obtidos, conclui-se que o modelo *Battery* consegue prever com bastante acurácia o tempo de vida das baterias de Li-Po, especialmente para correntes de descarga mais altas.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem o CNPq e à Capes, pelo apoio financeiro e à Unijuí e o GAIC, pela infra-estrutura.

Referências

- [1] L. A. Aguirre, *Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*, 3rd ed. Belo Horizonte: UFMG, (2007).
- [2] M. Chen and G. Rincón-Mora, “Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and i-v performance,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, pp. 504–511, Junho (2006).

- [3] C. Chiasserini and R. Rao, “Pulsed battery discharge in communication devices,” *Proceedings of the 5th International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 88–95, (1999).
- [4] M. Doyle, T. F. Fuller, and J. S. Newman, “Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 140, pp. 1526–1533, (1993).
- [5] T. Kim and W. Qiao, “A hybrid battery model capable of capturing dynamic circuit characteristics and nonlinear capacity effects,” *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, (2011).
- [6] C. Porciuncula, “Aplicação de modelos Elétricos de bateria na previsão do tempo de vida de dispositivos móveis,” Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí-RS, Abril (2012).
- [7] D. Rakhmatov and S. Vrudhula, “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).
- [8] D. Rakhmatov, S. Vrudhula, and D. Wallach, “Battery lifetime prediction for energy-aware computing,” in *Low Power Electronics and Design, 2002. ISLPED ’02. Proceedings of the 2002 International Symposium on*, (2002), pp. 154–159.
- [9] P. Sausen, A. Sausen, K. Schneider, and A. Oliveira, “Avaliação de modelos analíticos na previsão do tempo de vida de baterias de dispositivos móveis,” in *Pesquisas Aplicadas em Modelagem Matemática*, P. Sausen and A. Sausen, Eds. Ijuí: Unijuí, 2012.
- [10] C. M. Shepherd, “Design of primary and secondary cells,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 112, pp. 657–664, (1965).
- [11] O. Tremblay and L.-A. Dessaint, “Experimental validation of a battery dynamic model for ev applications,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 3, (2009).
- [12] R. H. L. d. Trindade, “Estudo das características de baterias recarregáveis possíveis de serem utilizadas no projeto satélite universitário, itasat,” in *12º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA - XII ENCITA*, (2006).
- [13] WathWorks. (2014) Implement generic battery model. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>