

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Modelagem Matemática do Tempo de Vida de Baterias de Lítio Íon Polímero a partir do Modelo Elétrico para Predizer *Runtime* e Características V-I

Suelen Cibeli Wottrich¹Marcia de Fatima Brondani²Airam Teresa Zago Romcy Sausen³Paulo Sérgio Sausen⁴

Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Modelagem Matemática, Unijuí, Ijuí-RS

Resumo. Neste trabalho é realizada a modelagem matemática do tempo de vida de baterias do tipo Lítio Íon Polímero (LiPo), utilizando o modelo elétrico para Predizer *Runtime* e Características V-I (i.e., de tensão e corrente). A estimação dos parâmetros deste modelo é feita a partir de uma metodologia baseada em ajuste de curvas. As simulações computacionais são realizadas com o auxílio do *software Matlab*, e os dados experimentais utilizados na parametrização e na validação do modelo são coletados de uma plataforma de testes. O resultados obtidos pelo modelo são satisfatórios, apresentando erros inferiores ao limite considerado aceitável para a classe de modelos elétricos.

Palavras-chave. Modelagem Matemática, Modelo Elétrico para Predizer *Runtime* e Características V-I, Tempo de Vida de Baterias

1 Introdução

Os dispositivos móveis, devido à sua ampla mobilidade e facilidade de uso, tiveram nos últimos anos um crescente avanço em sua comercialização. Associado a este crescimento, modificaram-se algumas de suas funcionalidades, provocando aumento do consumo de energia, bem como, da expectativa do tempo de vida da bateria que abastece o seu sistema operacional [1]. A necessidade de promover o desenvolvimento de baterias mais eficientes, seguras e com maior durabilidade, se torna evidente diante deste contexto. Assim, a realização de pesquisas, que visam o estudo a respeito do comportamento dinâmico das baterias, são de fundamental importância para o desenvolvimento de métodos capazes de prever o seu tempo de vida. Este, por sua vez é definido como o intervalo de tempo transcorrido, durante o processo de descarga, até que seja alcançado um determinado nível inferior de carga (i.e., nível de *Cutoff*) [10].

¹suwottrich@hotmail.com²brondani.marcia@gmail.com³airam@unijui.edu.br⁴sausen@unijui.edu.br

Uma maneira de prever o tempo de vida de baterias é através da aplicação de modelos matemáticos que simulam o processo de descarga de energia nas baterias [1–6,8,9]. Neste contexto, o Grupo de Automação Industrial e Controle - GAIC, da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ, tem realizado diversas pesquisas e aplicações de modelos matemáticos capazes de prever o tempo de vida de baterias de dispositivos móveis. Nas pesquisas realizadas pelo GAIC, pretende-se verificar qual modelo matemático é o melhor para descrever o comportamento dinâmico do processo de descarga de uma bateria [5].

O modelo elétrico para Prever *Runtime* e Características V-I se destaca por possuir alta acurácia na previsão do tempo de vida de baterias, conseguindo capturar as características elétricas e dinâmicas, tais como, a tensão em circuito aberto, a capacidade utilizável e a resposta transiente [2]. Algumas técnicas para a estimação dos parâmetros deste modelo são encontradas na literatura, dentre elas destaca-se a técnica de estimação de parâmetros por meio de ajustes de curvas, utilizada por Chen e Rincón-Mora [2].

O presente trabalho propõe a realização da modelagem matemática do tempo de vida de baterias de LiPo, modelo PL383562-2C, a partir do modelo elétrico para Prever *Runtime* e Características V-I, sendo aplicada uma técnica baseada em ajuste de curvas para a estimação de seus parâmetros. As simulações computacionais são realizadas com o auxílio do *software Matlab*, e a validação do modelo é realizada a partir da comparação entre os resultados simulados e os dados experimentais, obtidos de uma plataforma de testes.

O restante deste artigo está estruturado da seguinte forma. Na Seção 2 é apresentado o modelo para Prever *Runtime* e Características V-I. Na Seção 3 é apresentada a estimação de parâmetros realizada a partir de uma metodologia baseada em ajustes de curvas. Na Seção 4 são apresentados os resultados das simulações e análise. E, na Seção 5 é apresentada a conclusão.

2 Modelo Elétrico para Prever *Runtime* e Características V-I

O modelo elétrico para Prever *Runtime* e Características V-I prevê simultaneamente o tempo de vida da bateria, a resposta transiente e o estado estacionário de maneira acurada, intuitiva e abrangente, capturando as características elétricas e dinâmicas das baterias, tais como, a capacidade utilizável, a tensão em circuito aberto e a resposta transiente [2,9]. Os circuitos *RC* que compõem este modelo estão dispostos na Figura 1.

O circuito *RC* do lado esquerdo é responsável por modelar a capacidade, o *SOC* e o tempo de vida da bateria [2]. Desta forma, a resistência de autodescarga $R_{self-discharge}$ é utilizada para caracterizar a perda de energia da célula e a tensão V_{SOC} representa o *SOC* da bateria variando de 0 V (*SOC* de 0%) a 1 V (*SOC* de 100%). Por sua vez, o circuito *RC* do lado direito simula a resposta transiente e as características de tensão e corrente (V-I) da bateria, em que a tensão da fonte controlada é utilizada para relacionar o *SOC* com a tensão em circuito aberto V_{OC} [7].

A carga total armazenada na bateria é representada pelo capacitor carregado $C_{capacity}$,

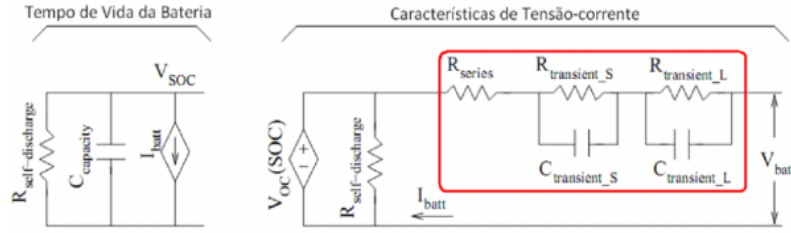


Figura 1: Modelo elétrico para Prever *Runtime* e Características V-I [9].

cujo valor é dado a partir da conversão da capacidade nominal da bateria de *Ah* para *Columb*, conforme a equação (1),

$$C_{capacity} = 3600Capacityf_1(ciclo)f_2(temp), \quad (1)$$

onde: *Capacity* é a capacidade nominal em *Ah*, e $f_1(ciclo)$ e $f_2(temp)$ são fatores de correção que dependem do número de ciclos e da temperatura [2, 9].

O *SOC* é obtido pela equação,

$$SOC(t) = SOC_{inicial} - \frac{\int I_{batt}(t)}{C_{capacity}}, \quad (2)$$

onde: $SOC_{inicial}$ representa o estado de carga inicial da bateria e I_{batt} é a corrente de descarga aplicada a ela.

O tempo de vida da bateria é obtido quando a tensão da bateria atinge a tensão final de descarga. Assim, a tensão do modelo pode ser representada por

$$V_{batt}(t) = V_{OC}(SOC) - I_{batt}R_{series} - V_{transient}(t), \quad (3)$$

onde: V_{batt} representa a tensão final da bateria, $V_{OC}(SOC)$ é a tensão em circuito aberto, R_{series} é a resistência em série e $V_{transient}$ é a tensão transiente [4]. Os elementos $V_{OC}(SOC)$ e R_{series} são funções de *SOC*, determinadas pelas equações

$$V_{OC}(SOC) = a_0e^{-a_1SOC} + a_2 + a_3SOC - a_4SOC^2 + a_5SOC^3, \quad (4)$$

$$R_{series}(SOC) = b_0e^{-b_1SOC} + b_2, \quad (5)$$

A tensão transiente $V_{transient}$ é dada por

$$V_{transient}(t) = V_{transient_S}(t) + V_{transient_L}(t), \quad (6)$$

onde: $V_{transient_S}(t)$ é a tensão transiente de curta duração descrita pela equação (7) e $V_{transient_L}(t)$ é a tensão de longa duração descrita pela equação (8) [4].

$$V_{transient_S}(t) = \begin{cases} R_{transient_S}I_{batt}[1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau S}}], & t_0 < t < t_d \\ V_{transient_S} \cdot e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau S}}, & t_d < t < t_r \end{cases} \quad (7)$$

onde: $R_{transient_S}$ é a resistência transiente de curta duração, $V_{transient_S}$ é a tensão transiente de curta duração no tempo final de descarga, $\tau S = R_{transient_S}C_{transient_S}$ e $C_{transient_S}$ é a capacitância transiente de curta duração [4].

$$V_{transient_L}(t) = \begin{cases} R_{transient_L}I_{batt}[1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau L}}], & t_0 < t < t_d \\ V_{transient_L} \cdot e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau L}}, & t_d < t < t_r \end{cases} \quad (8)$$

onde: $R_{transient_L}$ é a resistência transiente de longa duração, $V_{transient_L}$ é a tensão transiente de longa duração no tempo final de descarga, $\tau L = R_{transient_L}C_{transient_L}$ e $C_{transient_L}$ é a capacitância transiente de longa duração [4].

Os elementos que modelam a tensão transiente também são funções de *SOC*, descritas por

$$\begin{cases} R_{transient_S}(SOC) = c_0e^{-c_1SOC} + c_2, \\ C_{transient_S}(SOC) = d_0e^{-d_1SOC} + d_2, \\ R_{transient_L}(SOC) = e_0e^{-e_1SOC} + e_2, \\ C_{transient_L}(SOC) = f_0e^{-f_1SOC} + f_2. \end{cases} \quad (9)$$

Destaca-se que os 21 parâmetros das equações (4), (5) e (9) precisam ser estimados e variam de acordo com o tipo de bateria utilizado, considerando as suas propriedades e características. A seguir é apresentada a metodologia adotada para a estimação destes parâmetros.

3 Estimação dos Parâmetros do Modelo

Os parâmetros do modelo elétrico para Predizer *Runtime* e Características V-I são estimados a partir da metodologia de ajuste de curvas, utilizada por Chen e Rincón-Mora [2]. Para a realização desta estimação são utilizados quatro perfis de correntes pulsadas de 80 mA, 160 mA, 320 mA e 640 mA, apresentados na Figura 2. Estes perfis são provenientes de dados coletados em uma plataforma de testes, desenvolvida pelo GAIC e localizada no Laboratório de Sensores Inteligentes da UNIJUÍ.

A metodologia baseada em ajuste de curvas evidenciada no trabalho desenvolvido por [2] consiste em determinar os parâmetros das funções apresentadas nas equações (4), (5), (9). Assim, para cada função é necessário determinar um conjunto de pontos considerando os quatro perfis de descargas pulsadas. Neste contexto, o ajuste de curvas consiste em determinar a curva que passa por estes conjuntos de dados. O método utilizado para o ajuste das curvas é o de Mínimos Quadrados Não Lineares, implementado no *software Matlab*, obtendo deste modo a equação que representa cada função do modelo com os respectivos parâmetros, os quais estão organizados na Tabela 1.

4 Resultados das Simulações e Análise

Nesta seção são apresentados resumidamente os resultados simulados pelo modelo elétrico para Predizer *Runtime* e Características V-I parametrizado por meio do ajuste de curvas. Os resultados são analisados considerando a diferença entre os tempos de vida experimentais, obtidos na plataforma de testes e, o tempos de vida simulados pelo modelo.

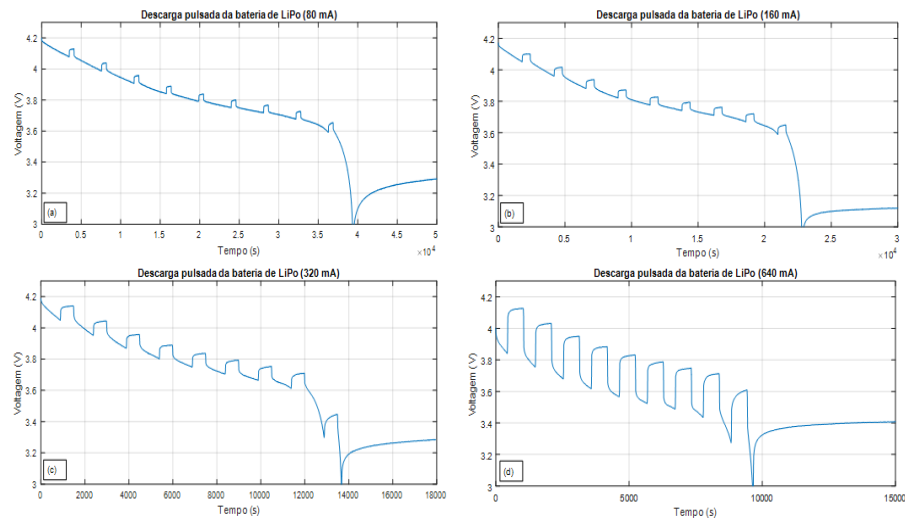


Figura 2: Perfis de descargas pulsadas utilizados para estimação dos parâmetros do modelo.

Tabela 1: Parâmetros do modelo para Prever *Runtime* e Características V-I estimados a partir do ajuste de curvas.

a0	-1,0931	b1	41,0174	d2	548,3854
a1	23,8482	b2	0,3169	e0	0,3325
a2	3,7037	c0	0,5927	e1	4,2892
a3	0,0808	c1	18,7453	e2	0,0146
a4	0,2980	c2	0,0721	f0	-2342,0565
a5	0,1428	d0	-455,1850	f1	6,3571
b0	1,0632	d1	9,4617	f2	3036,0800

Na Tabela 2 é apresentada a validação da estimação dos parâmetros, que contém os quatro perfis de descargas pulsadas utilizados neste processo com os correspondentes tempos de vida simulados pelo modelo TV_{sim} , tempos de vida experimentais TV_{exp} e os erros. Também, é exposto o erro médio do modelo para estas simulações, que é de 1,33%, sendo considerado relativamente baixo.

Tabela 2: Validação da estimação dos parâmetros do modelo.

Perfil de Descarga Pulsada (mA)	TV_{sim} (s)	TV_{exp} (s)	Erro* (%)
80	40390	39330	2,69
160	22790	22770	0,09
320	13990	13670	2,34
640	9610	9630	0,21
Erro médio			1,33

$$*Erro = 100 \cdot [(TV_{sim} - TV_{exp}) / TV_{exp}]$$

A validação do modelo é realizada com base em 31 perfis de descargas constantes, com valores entre 50 mA e 800 mA, com intervalos de 25 mA. Para cada um destes perfis são feitos 8 ensaios na plataforma de testes, e obtido o tempo de vida experimental médio do perfil, utilizado como referência para o cálculo do erro do modelo. Considerando estas simulações, o modelo apresenta o erro médio de 2,22%, sendo considerado um resultado satisfatório, pois está dentro da faixa dos 5% considerada como adequada para validar os modelos elétricos.

5 Conclusões

Neste trabalho, o modelo elétrico para Predizer *Runtime* e Características V-I foi utilizado para a predição do tempo de vida de baterias de LiPo, modelo PL383562-2C. Para a modelagem matemática foram utilizados dados experimentais do processo real de descarga das baterias, adquiridos em uma plataforma de testes, desenvolvida pelo GAIC. As simulações computacionais foram realizadas no *software Matlab* e os resultados simulados foram comparados com os resultados experimentais. Os resultados obtidos, tanto para a estimação dos parâmetros quanto para a validação do modelo, foram satisfatórios. Os erros médios obtidos pelo modelo foram válidos para ambos os casos, pois não ultrapassaram o limite de 5% aceitável para a validação de modelos elétricos.

Referências

- [1] M. Brondani, “Modelagem matemática do tempo de vida de baterias de lítio íon polímero utilizando algoritmos genéticos,” Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí-RS, Fevereiro de 2015.
- [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] 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.
- [4] L. Fransozi, “Modelagem matemática do tempo de vida de baterias de lítio Íon polímero através de modelos híbridos,” Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí-RS, Fevereiro 2015.
- [5] D. Freitas, “Estudo e aplicação de modelos analíticos na predição do tempo de vida de baterias utilizadas em dispositivos móveis: Proposição de extensões aos modelos tradicionais,” Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí-RS, Setembro 2015.
- [6] M. R. Jongerden and B. Haverkort, “Battery modeling,” Technical Report in Faculty Electrical Engineering, Janeiro 2008.

- [7] T. KIM, “A hybrid battery model capable of capturing dynamic circuit characteristics and nonlinear capacity effects,” Dissertation (Master of Science), University of Nebraska, Lincoln - Nebraska, July 2012.
- [8] M. Machado, “Modelagem matemática do tempo de vida de baterias utilizando modelos autorregressivos,” Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí-RS, Abril 2014.
- [9] C. Porciuncula, “Aplicação de modelos elétricos de bateria na predição do tempo de vida de dispositivos móveis,” Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí-RS, Abril 2012.
- [10] D. Rakmatov, S. Vruthhula, and D. Wallach, “Battery lifetime prediction for energyaware computing,” in Low Power Electronics and Design, 2002. ISLPED’02. Proceedings of the 2002 International Symposium on, 2002, pp. 154-159.