

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Proposição de um Modelo Híbrido a partir do Modelo Elétrico para Predizer Runtime e Características V-I

Luana F. Meireles¹Airam T. Z. R. Sausen²Paulo S. Sausen³

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Modelagem Matemática, UNIJUÍ, Ijuí, RS

Resumo. Neste artigo é apresentado um modelo híbrido formado pela substituição dos componentes responsáveis pelo estado de carga e tempo de vida da bateria, do modelo elétrico para Predizer Runtime e Características V-I, por equações baseadas no modelo analítico de difusão de Rakhmatov e Vrudhula (i.e, modelo RV). Estas substituições possuem o intuito de melhorar o desempenho do modelo elétrico original para a predição do tempo de vida de baterias utilizadas em dispositivos móveis. A validação do modelo híbrido é realizada através da análise comparativa entre os resultados simulados pelo modelo e os dados experimentais de baterias de Lítio Íon Polímero (LiPo), obtidos de uma plataforma de testes considerando perfis de descarga variáveis. A partir da análise dos resultados verifica-se que o modelo híbrido proposto obteve melhor desempenho em relação ao modelo elétrico original, apresentando um erro médio de 2,87%.

Palavras-chave. Dispositivos Móveis, Modelo Híbrido, Baterias, Modelo RV, Modelo para Predizer *Runtime* e Características V-I

1 Introdução

Os dispositivos móveis tornaram-se populares devido à mobilidade e à praticidade apresentadas na execução de tarefas diárias. Esta mobilidade é possível com o auxílio de uma fonte de energia finita, conhecida como bateria. As baterias de Lítio-Íon Polímero (LiPo), por exemplo, são utilizadas em diversos sistemas e dispositivos eletrônicos, tais como, sistemas de comunicação, dispositivos móveis, sistemas de energia renováveis e veículos elétricos [7]. A fim de assegurar o melhor desempenho, confiabilidade, prolongar a vida útil e evitar danos torna-se fundamental estimar com precisão o estado de carga (SOC) e a tensão da bateria [1].

Diferentes modelos de circuitos elétricos foram desenvolvidos buscando descrever o comportamento dinâmico da descarga de baterias. Estes descrevem a mesma na forma de circuito, utilizando para isso a combinação de componentes elétricos como fontes, resistores, capacitores e indutores [12]. No entanto, estes modelos não levam em consideração as

¹luh.fransozi@hotmail.com²airam@unijui.edu.br³sausen@unijui.edu.br

propriedades não lineares, i.e., efeito de recuperação e taxa de capacidade [5], presentes no processo de descarga [10]. Há também os modelos analíticos que geralmente são simplificações de modelos eletroquímicos [6] e, em sua maioria, capturam os efeitos não lineares realizando a predição do SOC e o tempo de vida das baterias com acurácia. Entretanto, estes modelos ignoram as características do circuito, como tensão e resistência interna [12].

Nesse contexto, o principal objetivo desse artigo é realizar modificações no modelo elétrico para Predizer *Runtime* e Características V-I [2], buscando o aperfeiçoamento deste modelo em relação a predição do tempo de vida de baterias. O novo modelo híbrido baseia-se no modelo proposto em [12], na qual é substituído no modelo elétrico, as equações responsáveis pela estimação do SOC, por equações provenientes do modelo analítico RV [9]. Nesta pesquisa, os modelos híbrido e elétrico são simulados e os resultados encontrados são comparados com dados obtidos de descargas variáveis reais. Por fim, a análise dos resultados permite verificar que as modificações realizadas possibilitam melhores resultados em relação ao modelo original.

O restante deste artigo está organizado como segue. Na Seção 2 são descritas as equações do modelo elétrico para Predizer *Runtime* e Características V-I original, e com as modificações propostas, que compõem o novo modelo híbrido para a simulação de descargas de baterias. Por fim, na Seção 4 são apresentadas as conclusões.

2 Modelagem Matemática

Nesta seção são descritas as equações do modelo elétrico para Predizer *Runtime* e Características V-I que, combina as três categorias dos modelos elétricos e, desta forma, prevê o tempo de vida da bateria, o estado estacionário e a resposta transiente, além de capturar as características elétricas dinâmicas da bateria. Em um segundo momento, são apresentadas as modificações realizadas no modelo elétrico para obtenção do modelo híbrido.

2.1 Modelo elétrico para Predizer *Runtime* e Características V-I

O modelo elétrico para Predizer *Runtime* e Características V-I consiste de dois circuitos separados, relacionados entre si por uma fonte de tensão e uma fonte de corrente, conforme Figura 1. O circuito (a) modela a capacidade de armazenamento de energia da bateria, e a carga armazenada durante os processos de carga ou descarga. O circuito (b) descreve a resistência interna da bateria, e o comportamento transiente para distintas correntes aplicadas [4].

A capacidade utilizável é a energia extraída durante o processo de descarga, a partir de um estado carregado até a tensão de *cutoff* e, sofre influência dos efeitos não lineares. Esta capacidade é descrita através de um capacitor, um resistor de auto-descarga $R_{self-discharge}$ e um resistor equivalente, dado pela soma da resistência em série (R_{series}), resistência transiente de curta duração ($R_{transienteS}$) e resistência transiente de longa duração ($R_{transienteL}$).

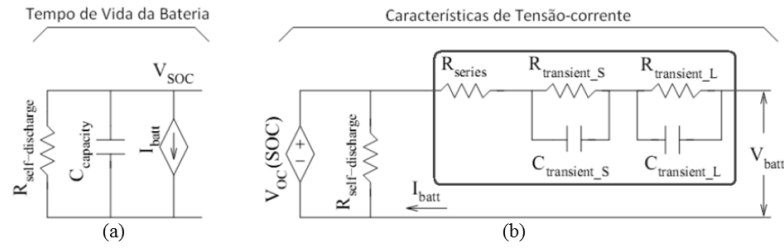


Figura 1: Modelo elétrico para Prever *Runtime* e Características V-I de uma bateria [2].

O capacitor $C_{capacity}$ representa a carga total armazenada na bateria, sendo dado por

$$C_{capacity} = 3600 \cdot Capacity \cdot f_1(ciclo) \cdot f_2(temp) \quad (1)$$

onde: $Capacity$ é a capacidade nominal em Ah , $f_1(ciclo)$ e $f_2(temp)$ são fatores de correção dependentes do número de ciclos e da temperatura da bateria. Ao definir a tensão inicial V_{SOC} em $C_{capacity}$ igual a $1V$ ou $0V$, a bateria é inicializada em seu estado totalmente carregada (SOC de 100%) ou totalmente descarregada (SOC de 0%). Assim, a fonte de tensão $V_{OC}(V_{SOC})$ representa a dependência entre o estado de carga SOC e a tensão de circuito aberto V_{OC} . O resistor de auto-descarga $R_{self-discharge}$ é utilizado para caracterizar a perda de energia de auto-descarga quando as baterias são armazenadas por um longo tempo e pode ser simplificado como um resistor de alto valor ou ignorado [2].

A rede resistiva capacitiva (RC) consiste de um resistor R_{series} e duas redes paralelas compostas pelo resistor $R_{transientS}$ e o capacitor $C_{transientS}$, e pelo resistor $R_{transientL}$ e o capacitor $C_{transientL}$. O resistor R_{series} é responsável pela queda de tensão instantânea. As resistências $R_{transientS}$ e $R_{transientL}$ e capacitâncias $C_{transientS}$ e $C_{transientL}$ são utilizadas para descrever a resposta transiente de curta duração e longa duração, respectivamente. Assim,

$$V_{oc}[SOC(t)] = a_0 e^{a_1[SOC(t)]} + a_2 + a_3[SOC(t)] - a_4[SOC(t)]^2 + a_5[SOC(t)]^3 \quad (2)$$

$$R_{series}[SOC(t)] = b_0 e^{-b_1[SOC(t)]} + b_2 \quad (3)$$

$$R_{transientS}[SOC(t)] = c_0 e^{-c_1[SOC(t)]} + c_2 \quad (4)$$

$$C_{transientS}[SOC(t)] = d_0 e^{d_1[SOC(t)]} + d_2 \quad (5)$$

$$R_{transientL}[SOC(t)] = f_0 e^{f_1[SOC(t)]} + f_2 \quad (6)$$

$$C_{transientL}[SOC(t)] = g_0 e^{g_1[SOC(t)]} + g_2. \quad (7)$$

A tensão do modelo é representada por

$$V_{cell}(t) = V_{oc}[SOC(t)] - i_{cell}(t)R_{series}[SOC(t)] - V_{transient}(t) \quad (8)$$

2.2 Modelo híbrido

O modelo híbrido é obtido a partir da substituição de um capacitor constante, representado por componentes responsáveis pelo estado de carga e o tempo de vida da bateria e, descritos na equação (1), por equações baseadas no modelo RV, conforme Figura 2. Essa alteração possibilita incorporar ao modelo elétrico o efeito de recuperação e o efeito da taxa de capacidade, presentes no modelo analítico [3, 12].

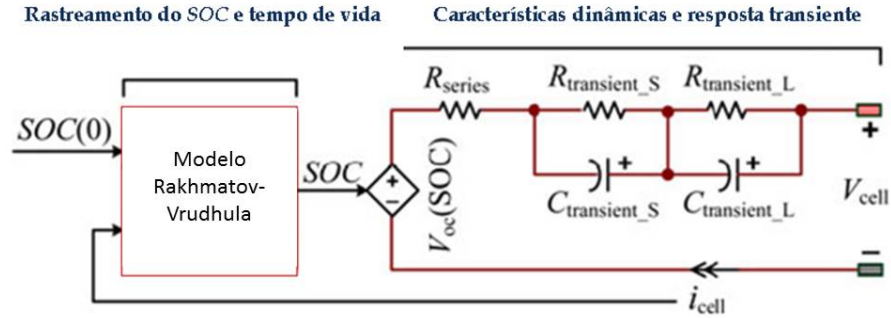


Figura 2: Modelo híbrido [3].

Com isso, o SOC é descrito pela equação

$$SOC(t) = \frac{C_a(t)}{C_n} \quad (9)$$

onde: $C_a(t)$ é a capacidade disponível da bateria e C_n é a capacidade nominal da bateria.

A capacidade disponível da bateria, C_a , é dada por

$$C_a(t) = C_i - l(t) - C_u(t), \quad (10)$$

onde: C_i é a capacidade inicial da bateria, $l(t)$ é a carga total consumida pelo sistema dada por

$$l(t) = \int i(t)dt \quad (11)$$

e a $C_u(t)$ representa a capacidade indisponível no tempo t e é descrita pela carga indisponível proveniente do modelo RV

$$C_u(t) = 2I \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - e^{-\beta^2 n^2 L}}{\beta^2 n^2 L}. \quad (12)$$

3 Resultados e Discussões

Nesta seção são apresentados os resultados e discussões. Para isso, inicialmente, são obtidos dados experimentais de 8 baterias de LiPo, modelo PL383562-2C, cuja capacidade

nominal, tensão inicial e nível de *cutoff* são 800 mAh, 4,2 V e 2,7 V, respectivamente. Os dados experimentais são coletados em um ambiente com temperatura controlada e constante (temperatura ambiente) e com o auxílio de uma plataforma de testes, desenvolvida pelo Grupo de Automação Industrial e Controle (GAIC) da Unijuí, que permite capturar as curvas e características reais de um processo de descarga, a partir da operação conjunta de suas três partes: sistema de controle (*software*), *hardware* e baterias. São obtidos dois conjuntos de perfis de descarga, o primeiro conjunto, com 15 perfis constantes [3], é utilizado na estimação do parâmetro β da parte analítica do modelo e, o segundo conjunto, composto por perfis de descargas variáveis, conforme Tabela 1, é utilizado para validação do modelo. Destaca-se que os perfis variáveis baseiam-se nas principais funcionalidades executadas em um smartphone, tais como, chamada, envio de sms, acesso a Internet, jogos, música, câmera, visualização de imagens e outras.

Tabela 1: Perfis de correntes variáveis utilizados para a validação dos modelos [8].

Perfis	Correntes Pulsadas (mA)	Tempo (min)
P1	[100; 10; 150; 10; 100; 10; 200]	[5; 5; 5; 5; 5; 5; 10]
P2	[170; 270; 10; 140; 230; 10; 270]	[5; 20; 30; 10; 20; 10; 30]
P3	[270; 10; 120; 170; 10; 270; 170]	[5; 10; 10; 15; 10; 15;5]
P4	[250; 400; 50; 200; 550]	[10; 10; 5; 15; 10]
P5	[750; 450; 200; 150; 250; 100]	[5; 10; 10; 5; 5; 10]
P6	[100; 200; 300; 400; 500; 600; 700]	[10; 10; 10; 10; 10; 10; 10]
P7	[700; 600; 500; 400; 300; 200; 100]	[10; 10; 10; 10; 10; 10; 10]
P8	[200; 10; 300; 10; 200; 10; 200]	[2.5; 5; 2.5; 5; 2.5; 5; 5]

Para a estimação do parâmetro β substitui-se os dados experimentais na equação (12). Esta substituição resulta, para cada um dos dados, em uma equação transcendental que é solucionada através do Método de Newton-Raphson [11]. Com isso, determina-se que $\beta = 0,1$ [3]. Os parâmetros referentes à parte elétrica dos modelos são obtidos de [6].

O modelo híbrido é implementado na ferramenta computacional *Matlab*, no diagrama de blocos do *Simulink* e, sua validação é obtida a partir da comparação dos resultados simulados pelo modelo com os dados experimentais. Buscando-se verificar se as modificações realizadas refletiram em uma melhora em relação ao modelo elétrico original, este último também foi simulado a fim de realizar a comparação entre os tempos de vida obtidos por ambos modelos. O erro médio é dado pela média aritmética dos erros encontrados para cada perfil de descarga, neste caso, encontrou-se um erro médio de 2,09% para o modelo híbrido e 4,83% para o modelo elétrico.

Na Tabela 2 é apresentada a comparação entre os resultados obtidos nos modelos híbrido e elétrico com os dados experimentais. Os modelos são considerados satisfatórios para a predição do tempo de vida de baterias de LiPo, pois possuem um erro menor que 5%. Além disso, os resultados permitem verificar que a substituição de equações, que simulam um capacitor constante, no modelo elétrico original pelas equações do modelo RV possibilitaram uma melhora considerável em relação a predição do tempo de vida de baterias.

Tabela 2: Comparação entre os dados experimentais e os modelos híbrido e elétrico.

Perfil	(TV_{em})	Modelo híbrido	Erro (%)	Modelo elétrico	Erro (%)
P1	479,67	490,00	2,15	494,33	3,06
P2	284,94	270,65	5,02	305,00	7,04
P3	322,01	331,76	3,02	336,75	4,57
P4	149,38	148,81	0,38	158,82	6,31
P5	141,75	144,72	2,09	149,73	5,62
P6	126,62	123,05	2,82	127,98	1,07
P7	98,51	98,72	0,20	104,67	6,25
P8	324,17	327,72	1,10	339,48	4,72
			Erro médio 2,87	Erro médio 4,83	

4 Conclusões

Nesta pesquisa são realizadas modificações em um modelo elétrico buscando melhorar o desempenho para a predição do tempo de vida de baterias. O modelo híbrido formado é composto pelo modelo para Predizer *Runtime* e Características V-I e o modelo RV. Essas alterações permitem unir as vantagens presentes nos dois modelos utilizados, tais como, descrição do circuito elétrico e do comportamento não linear.

Os modelos híbrido e elétrico são implementados na ferramenta computacional *MatLab/Simulink* e os resultados das simulações são comparados com dados reais. Com isso, o modelo híbrido obteve um erro médio de 2,87%, enquanto o erro médio do modelo elétrico original é de 4,83%. Estes resultados mostram que a substituição de um capacitor constante, no modelo elétrico, por equações que descrevem os efeitos não lineares, do modelo RV, possibilita uma melhor estimativa do SOC e produz melhores resultados ao modelo.

Referências

- [1] B. S. Bhangu, P. Bentley, D. A. Stone, and C. M. Bingham. Nonlinear observers for predicting state-of-charge and state-of-health of lead-acid batteries for hybrid-electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005.
- [2] M. Chen and G. Rincón-Mora. Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and i-v performance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(2):504–511, June 2006.
- [3] L. Fransozi. Modelagem matemática do tempo de vida de baterias de lítio Íon polímero através de modelos híbridos. Dissertação de mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2015.
- [4] R. Iglesias, A. Lago, A. Nogueiras, C. Martínez-Peñalver, J. Marcos, C. Quintans, M.J. Moure, and M.D. Valdés. Modelado y simulación de una batería de ion-litio comercial multicelda. *Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación*, 2012.

- [5] M. R. Jongerden and B.R. Haverkort. Battery modeling. *Technical Report in Faculty Electrical Engineering*, Janeiro 2008.
- [6] T. Kim. A hybrid battery model capable of capturing dynamic circuit characteristics and nonlinear capacity effects. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26(4), December 2011.
- [7] T. Kim, W. Qiao, and L. Qu. Real-time state of charge and electrical impedance estimation for lithium-ion batteries based on a hybrid battery model. *Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pages 563 – 568, 2013.
- [8] R. S. Kusiak. Modelagem matemática do tempo de vida de baterias de lítio Íon polímero a partir de modelos híbridos considerando correntes de descarga variáveis. Dissertação de mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2016.
- [9] D. Rakhmatov and S. Vrudhula. An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems. In *Proceedings of the 2001 IEEE/ACM International Conference on Computer-aided Design, ICCAD '01*, pages 488–493, Piscataway, USA, 2001. IEEE Press.
- [10] P. Rong and M. Pedram. An analytical model for predicting the remaining battery capacity of lithium-ion batteries. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems*, 2006.
- [11] W. L. Roque. *Introdução ao Cálculo Numérico - Um Texto Integrado com DERIVE*. Atlas: Porto Alegre, 2000.
- [12] J. Zhang, S. Ci, H. Sharif, and M. Alahmad. An enhanced circuit-based model for single-cell battery. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2010.