

Validação do Modelo KiBaM para Predição do Tempo de Vida de Baterias Utilizadas em Dispositivos Móveis

Douglas Joziel Bitencourt Freitas¹

Paulo Sérgio Sausen²

Airam Tereza Zago Romcy Sausen³

Manuel Martin Pérez Reibold⁴

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

Resumo. Neste artigo é apresentada a validação do Modelo KiBaM para predição do tempo de vida de baterias utilizadas em dispositivos móveis. O modelo foi validado através da comparação entre os resultados das simulações computacionais e dados experimentais de baterias de Li-Po, sendo que para descargas variáveis, o erro médio foi de 1,84%.

Palavras-chave. Modelagem Matemática, Modelo KiBaM, Simulação Computacional

1 Introdução

As baterias eletroquímicas consagraram-se como a tecnologia de armazenamento portátil de energia mais antiga e ainda são largamente utilizadas em diversas aplicações. O desenvolvimento de novos tipos de baterias e, principalmente, a miniaturização para atender demandas específicas de energia, fomentou o avanço da indústria para produção em larga escala de dispositivos móveis – *smartphones*, celulares, *tablets*, etc. – cada vez mais compactos. Os dispositivos móveis agregam mobilidade, comodidade e facilidade de acesso às redes de voz e dados, tornando-se acessório popular e indispensável para comunicação, trabalho, estudo e, até mesmo, lazer.

As baterias recarregáveis, utilizadas em dispositivos móveis, têm capacidade finita para armazenamento de energia, necessitando de uma recarga a cada período de uso. Pode-se concluir, então, que o tempo operacional de um determinado dispositivo, está limitado à duração da fonte de energia (i.e., tempo de vida da bateria). Diante disto, julga-se importante dispor de métodos para prever o tempo de vida de baterias e, conseqüentemente, o tempo de funcionamento dos dispositivos. Na literatura técnica, um dos métodos empregados é a modelagem matemática, através de modelos que descrevem a dinâmica da descarga de baterias, a partir das características físicas ou de um conjunto de dados experimentais.

¹douglasjoziel@outlook.com

²sausen@unijui.edu.br

³airam@unijui.edu.br

⁴manolo@unijui.edu.br

Vários modelos matemáticos que descrevem a descarga de baterias vêm sendo desenvolvidos, dos quais pode-se destacar os modelos eletroquímicos [1], elétricos [2], estocásticos [3], analíticos [4], via Identificação de Sistemas [5] e, mais recentemente, híbridos [6]. Da classe dos modelos analíticos, o Modelo Cinético de Bateria (KiBaM) utiliza como base de seu fundamento matemático a cinética, modelando a velocidade das reações químicas do processo e a influência de fatores acessórios [7]. Um estudo comparativo entre as simulações do Modelo KiBaM e os resultados do programa DUALFOIL⁵ [8], aponta erro inferior a 5% para correntes contínuas e variáveis [9]. Outro estudo, comparando as simulações do Modelo KiBaM com dados experimentais de baterias de Lítio-Íon Polímero (Li-Po), indica um erro médio de 1,07% para correntes contínuas [10].

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, no intuito de verificar qual o modelo matemático mais adequado para prever o tempo de vida de baterias utilizadas em dispositivos móveis, sob diferentes especificações [11]. Sendo assim, o principal objetivo deste trabalho é apresentar os resultados de validação do Modelo KiBaM, utilizado para modelar a descarga de baterias de Li-Po, sob perfis de correntes variáveis, visando consolidá-lo como substituto simples de fácil usabilidade e implementação, de boa acurácia e à altura de modelos mais complexos (e.g. eletroquímicos e estocásticos).

O artigo está organizado conforme segue. Na Seção 2 são apresentadas generalidades sobre o Modelo KiBaM, bem como, a resolução das equações. Na Seção 3 é apresentada de modo breve a metodologia empregada para coleta de dados e estimação dos parâmetros do modelo – neste caso, utilizando o método dos Mínimos Quadrados (MQ). Na Seção 4 são discutidos os resultados das simulações, através de análises comparativas. E, por fim, na Seção 5, considerações finais e perspectivas para os trabalhos futuros.

2 Modelagem Matemática

Nesta seção é apresentado os aspectos gerais do Modelo KiBaM e a resolução de suas equações. Na prática, o processo de descarga de uma bateria tem características e efeitos não lineares – nível de *cutoff*, efeito de recuperação, taxa de capacidade, etc. – que interferem diretamente no tempo de vida [9]. O Modelo KiBaM captura dois desses principais efeitos: taxa de capacidade e recuperação.

O Modelo KiBaM considera a carga da bateria distribuída em duas fontes: a fonte de carga disponível e a fonte de carga limitada (Figura 1). Observa-se que uma fração c da capacidade total é distribuída na fonte de carga disponível, e uma fração $1 - c$ na fonte de carga limitada. A fonte de carga disponível fornece elétrons diretamente a corrente $i(t)$, enquanto a fonte de carga limitada fornece elétrons à de carga disponível – o parâmetro k é a razão de fluxo entre as fontes [7].

Considerando $i(t) = I$ uma corrente constante, as equações que descrevem o modelo

⁵Programa que simula descarga de baterias, baseado em um modelo eletroquímico.

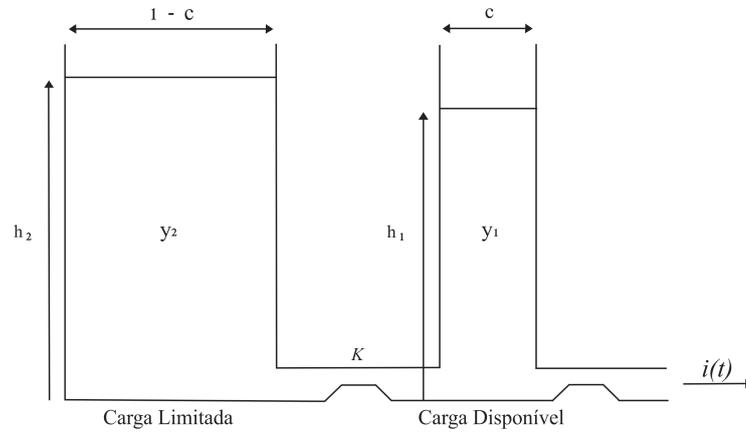


Figura 1: Esquema de representação do Modelo KiBaM [7].

são as seguintes:

$$\frac{dy_1(t)}{dt} = -I - k(h_1(t) - h_2(t)) \tag{1}$$

$$\frac{dy_2(t)}{dt} = k(h_1(t) - h_2(t)), \tag{2}$$

onde: $y_1(t)$ é a carga disponível e $y_2(t)$ a carga limitada. A altura em cada um dos tanques é dada por

$$h_1(t) = \frac{y_1(t)}{c} \tag{3}$$

$$h_2(t) = \frac{y_2(t)}{1-c}. \tag{4}$$

Por simplificação matemática, uma nova razão constante k' é definida como

$$k' = \frac{k}{c(1-c)}. \tag{5}$$

Substituindo as equações (3), (4) e (5) nas equações (1) e (2) tem-se

$$\frac{dy_1(t)}{dt} = -I - k'(1-c)y_1(t) + k'cy_2(t) \tag{6}$$

$$\frac{dy_2(t)}{dt} = k'(1-c)y_1(t) - k'cy_2(t). \tag{7}$$

As equações (6) e (7) podem ser resolvidas aplicando-se as definições da Transformada de

Laplace, obtendo-se como resultado final

$$y_1(t) = y_1(0)e^{-k't} + \frac{(y_0k'c - I)(1 - e^{-k't})}{k'} - \frac{Ic(k't - 1 + e^{-k't})}{k'} \quad (8)$$

$$y_2(t) = y_2(0)e^{-k't} + y_0(1 - c)(1 - e^{-k't}) - \frac{I(1 - c)(k't - 1 + e^{-k't})}{k'}, \quad (9)$$

onde: $y_1(0)$ e $y_2(0)$ são a quantidade de carga disponível e limitada, respectivamente, e $y_0 = y_1(0) + y_2(0)$ a quantidade de carga total, no início do processo de descarga [7]. Os parâmetros k' , c e y_0 são estimados a partir de dados experimentais.

3 Metodologia para Estimação dos Parâmetros

Nesta seção é apresentada a estimação dos parâmetros k' , c e y_0 , do Modelo KiBaM. Esses parâmetros são específicos para cada tipo de bateria, sendo que para os ensaios laboratoriais foram utilizadas 8 baterias novas de Li-Po, modelo PL-383562-2C. Os dados experimentais foram adquiridos a partir da plataforma de testes (i.e., *testbed*), desenvolvida por integrantes do GAIC [12].

Todas as coletas de dados seguiram a mesma metodologia, tanto para o carregamento das baterias, quanto para sua descarga. Para estimação dos parâmetros, foram utilizados 15 perfis de descarga constante, variando de 75 mA a 775 mA, com intervalo entre perfis de 25 mA. Cada perfil gerou, de modo individual, um tempo de descarga para cada bateria. A partir destes ensaios, foi possível calcular o tempo de vida médio para cada perfil.

Os MQ é um método de otimização que busca encontrar o valor ótimo dos parâmetros para um determinado conjunto de dados, através da minimização da soma dos quadrados dos resíduos. Este método é descrito pela seguinte equação

$$V_N(\vec{\zeta}, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y(t) - \hat{y}(t|\zeta))^2, \quad (10)$$

onde: $\vec{\zeta}$ é um vetor que contém os parâmetros a serem estimados, Z^N é um vetor que contém as entradas e saídas experimentais, $y(t)$ são as saídas experimentais medidas, $\hat{y}(t|\zeta)$ são as saídas calculadas a partir do modelo que contém os parâmetros que se deseja estimar, e N é o número de dados experimentais [5].

As simulações foram implementadas com auxílio do *software* de computação algébrica e numérica *MatLab*, em uma rotina para a função de otimização *lsqnonlin*, que possui internamente a rotina dos MQ para problemas de otimização não linear. Os parâmetros encontrados para o Modelo KiBaM foram $k' = 37,46$, $c = 0,01$ e $y_0 = 47356$.

4 Análise dos Resultados

Seguindo a mesma metodologia descrita na Seção 3, a partir de uma série de medições experimentais utilizando um *smartphone*, foram mensuradas as correntes em função de tarefas executadas pelo dispositivo. Deste modo, em seguida, definiu-se 8 perfis de descarga

realísticos, com variações da corrente ao longo do tempo, conforme a Tabela 1. Ao contrário das descargas constantes, esses perfis possuem variações ao longo do tempo, assim, os efeitos não lineares têm maior presença e, por consequência, o processo de descarga torna-se mais fiel ao perfil de utilização de um usuário.

Tabela 1: Ciclo dos perfis de descarga variável.

Perfil	Correntes (mA)	Tempo (min)
P1	100-10-150-10-100-10-200	5-5-5-5-5-5-10
P2	250-400-50-200-550	10-10-5-15-10
P3	750-450-200-150-250-100	5-10-10-5-5-10
P4	100-200-300-400-500-600-700	10-10-10-10-10-10-10
P5	700-600-500-400-300-200-100	10-10-10-10-10-10-10
P6	170-270-10-140-230-10-270	5-20-30-10-20-10-30
P7	270-10-120-170-10-270-170	5-10-10-15-10-15-5
P8	200-10-300-10-200-10-400	2,5-5-2,5-5-2,5-5-5

Os experimentos produziram um conjunto de valores médios de tempo de vida, para cada um dos perfis, conforme a Tabela 2. O Modelo KiBaM alcançou um erro médio de 1,84%, sendo validado para prever o tempo de vida de baterias de Li-Po. O Modelo RV⁶ aqui é utilizado para balizar os resultados em relação a outros modelos. Sabe-se que o Modelo RV possui acurácia reconhecida [9], assim, a partir dos resultados, é possível concluir que o Modelo KiBaM possui boa acurácia, sendo uma excelente alternativa para prever o tempo de vida de baterias.

Tabela 2: Resultados das simulações.

Perfil	L_e (min)	Modelo RV		Modelo KiBaM	
		L_s (min)	Erro (%)	L_s (min)	Erro (%)
P1	479,68	479,38	0,06	478,38	0,27
P2	149,38	148,53	0,57	148,53	0,57
P3	141,76	144,17	1,70	144,18	1,71
P4	126,62	122,9	2,94	122,87	2,96
P5	98,51	98,35	0,16	98,32	0,19
P6	284,94	269,48	5,43	269,15	5,54
P7	322,01	331,55	2,96	330,27	2,57
P8	324,17	327,58	1,05	327,00	0,87
-		$E_m = 1,86$		$E_m = 1,84$	

⁶Este modelo foi utilizado como referência, contudo suas equações por fugirem do escopo do trabalho foram suprimidas. Entretanto, detalhamentos podem ser facilmente encontrados em [4], [9] e [10].

5 Conclusões

Neste trabalho foi validado o Modelo KiBaM para predição do tempo de vida de baterias utilizadas em dispositivos móveis. Via de regra, trabalhos como este, empregam simuladores de baterias e perfis de descarga contínua. Contudo, nos experimentos conduzidos pelo GAIC, foram utilizadas 8 baterias novas de Li-Po e perfis de descarga variáveis. O uso de perfis variáveis busca emular o comportamento da bateria de um *smartphone*, de modo mais realístico, possibilitando que os efeitos não lineares fiquem mais evidentes.

A partir de um conjunto experimental de 8 perfis de descarga variável, foi realizada a simulação computacional do modelo obtendo um erro médio de 1,84%, resultado inclusive ligeiramente melhor que do Modelo RV (1,86%). Em perfis com menor possibilidade de ocorrer o efeito de recuperação (e.g., P4 e P6) os erros são maiores – o movimento é o contrário em perfis com maior capacidade de recuperação (e.g., P1 e P5). Isso aponta para o fato de que o modelo captura muito bem o efeito de taxa de capacidade, no entanto, há perdas significativas na modelagem do efeito de recuperação.

Em trabalhos futuros pretende-se aplicar os resultados obtidos no melhoramento do próprio modelo e de modelos híbridos, bem como, implementar computacionalmente o modelo estudado para gestão energética de dispositivos móveis.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo subsídio recebido, e à UNIJUÍ, pela infraestrutura disponibilizada.

Referências

- [1] M. Doyle, T. Fuller, and J. Newmann. Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium polymer insertion cell. *Journal of Electrochemical Society*, 140:1526–1533, jan. 1993.
- [2] S. C. Hagemann. Simple PSpice models let you simulate common battery types. *Electronic Design News*, 38:117–129, 1993.
- [3] C. F. Chiasserini and R. R. Rao. A model for battery pulsed discharge with recovery effect. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '99)*, New Orleans, set. 1999.
- [4] D. Rakhmatov and S. Vrudhula. An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems. In *Proceedings of the International Conference on Computer Aided Design (ICCAD '01)*, pages 488–493, Piscataway, 2001. IEEE Press.
- [5] L. C. Romio. Modelagem matemática do tempo de vida de baterias utilizando a teoria de Identificação de Sistemas. Dissertação de mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí-RS, mar. 2013.

- [6] T. Kim. A hybrid battery model capable of capturing dynamic circuit characteristics an nonlinear capacity effects. Master's thesis, University of Nebraska, Lincoln-NE, jul. 2012.
- [7] J. Manwell and J. McGowan. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems. *Solar Energy*, 50:399–405, mai. 1993.
- [8] DUALFOIL. Fortran programs for the simulation of electrochemical systems. Disponível em: <http://www.cchem.berkeley.edu/jsngrp/fortran.html>. Acesso em: 10 ago. 2015.
- [9] M. R. Jorgerden and B. Haverkort. Which battery model to use? Technical report, Imperial College London, 2008.
- [10] D. J. B. 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. Dissertação de mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí-RS, set. 2015.
- [11] GAIC. Aplicação de modelos matemáticos na predição do tempo de vida das baterias que alimentam dispositivos móveis. Disponível em: <http://gaic.unijui.edu.br/projdetalhes.php?id=3>. Acesso em: 8 jan. 2015.
- [12] H. B. Nonemacher, L. Minelli, P. S. Sausen, and A. Sausen. Desenvolvimento de um testbed para avaliação de modelos matemáticos utilizados na predição do tempo de vida de baterias. In *Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia*, 2010.