

Estudo dos modelos elétricos para as baterias de li-ion

Study of electric models for li-ion batteries

RESUMO

Fernando Paes Lorena
fernandol@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Pato Branco, Paraná,
Brasil

Rafael Cardoso
rcardoso@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Pato Branco, Paraná,
Brasil

As baterias de li-ion estão presentes na maioria dos dispositivos eletrônicos portáteis e também seu uso está em alta em aplicações como: veículos elétricos e fontes renováveis, por fornecer características de alta densidade de energia, bom tempo de resposta e longa vida útil. No entanto, necessitam de um modelo que represente bem suas funcionalidades e características dinâmicas para aumentar a eficiência e segurança em sistemas nos quais estão inseridas. Neste trabalho, é apresentado metodologia de estimação dos parâmetros e também para estimação do estado de carga para as baterias de Li-ion.

PALAVRAS-CHAVE: Metodologias. Modelagem. Estimação.

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



ABSTRACT

Li-ion batteries are present in most portable electronic devices and their use is also increasing in applications such as electric vehicles and renewable sources, as they provide high energy density characteristics, good response time and long service life. However, they need a model that adequately represents their functionalities and dynamic characteristics to increase efficiency and safety in systems in which they are inserted. In this work, it is present the parameter estimation methodology and also the charge state estimation for Li-ion batteries.

KEYWORDS: Methodologies. Modeling. Estimation.

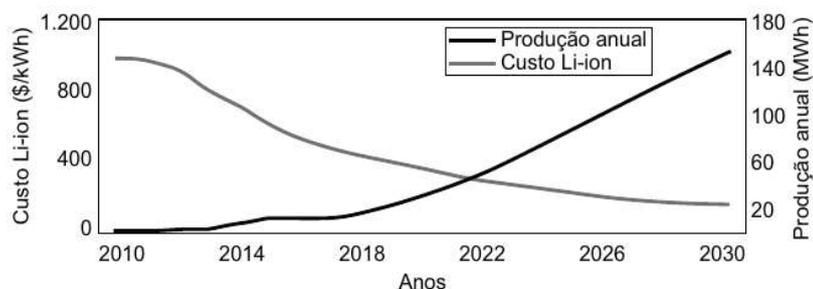
INTRODUÇÃO

As baterias, em especial as de li-ion, estão cada vez mais presentes no cotidiano das pessoas e alguns dos motivos são: o avanço tecnológico em dispositivos eletrônicos, aumento do uso de veículos elétricos e a utilização de fontes renováveis de energia.

O uso das baterias de li-ion no mercado se concentra mais em eletrônicos portáteis, cerca de 50% dos dispositivos eletrônicos portáteis utilizam a tecnologia (Farhadi; Mohammed, 2016). Em veículos elétricos as baterias de li-ion são mais recomendadas por possuir bom tempo de resposta, alta densidade de energia e longa vida útil. Além de aplicações em eletrônicos portáteis, as baterias de li-ion vêm sendo utilizadas em aplicações estacionárias ajudando a demanda de pico e diminuindo as flutuações de tensão e frequência na rede elétrica. No entanto, a utilização da tecnologia se encontra a um preço elevado comparado com outras tecnologias de baterias por necessitar de circuitos eletrônicos de proteção contra sobrecarga e sobrecorrente. Então, para o emprego da mesma é necessário um estudo para determinar se a utilização pode oferecer um bom retorno (RASZMANN et al., 2017).

Em HANNAN et al., 2018 foi realizado um estudo em que haverá um aumento do uso de baterias de li-ion e uma redução de custo até o 2030 como ilustra a Figura 1.

Figura 1 – Perspectivas do aumento do uso e redução do custo das baterias de li-ion



Fonte: Adaptado de HANNAN et al., 2018.

O maior desafio para utilização da tecnologia de bateria de li-ion é a segurança. Para qualquer utilização, é necessário circuito de proteção contra sobrecarga, subcarga, sobrecorrente e curto-circuito. Quando a bateria opera em condições indesejáveis de tensão, corrente ou temperatura podem ocorrer fugas térmicas, perda de capacidade ou até mesmo explosões. Para aplicações que exigem alto nível de eficiência e maximização de desempenho é necessário um Sistema de Gerenciamento de Bateria (do inglês, *Battery Management System - BMS*) (MANJITHA et al., 2017).

MODELOS DE BATERIAS DE LI-ION

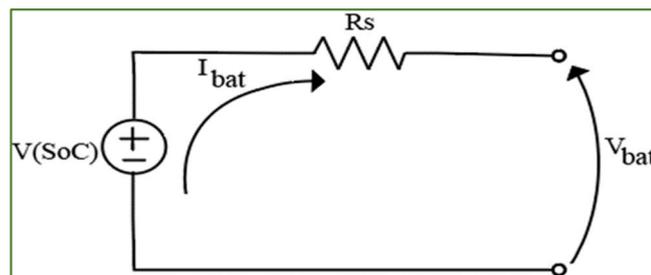
Para garantir maior segurança e eficiência em sistemas nos quais as baterias de li-ion estão inseridas, é necessário um modelo que represente bem o funcionamento interno da bateria e suas dinâmicas. A eficiência do BMS também

depende do modelo da bateria então, dependendo da aplicação pode ser utilizada uma abordagem simples ou complexa. Existem três modelos básicos que podem representar as baterias de li-ion: modelos eletroquímicos, modelos matemáticos e modelos elétricos (HAASE et al., 2017).

O modelo eletroquímico é o que representa a bateria mais fielmente, no entanto, a modelagem é a mais complexa. Por possuir equações diferenciais parciais, o custo computacional para o cálculo é muito grande. Já o modelo matemático é representado na maioria das vezes por equações empíricas, onde o caso de estudo fica muito restrito e de difícil abstração. A modelagem por circuito equivalente elétrico é a mais utilizada no setor de Engenharia Elétrica, pois, faz uma boa troca entre complexidade e eficiência e também por ser possível de ser simulado em *softwares* de computacionais sendo assim, de fácil entendimento (Farhadi; Mohammed, 2016) (Usman et al., 2018).

A topologia utilizada na modelagem elétrica da bateria, em geral, possui elementos como: fonte de tensão, resistência série e pares RCs (resistores e capacitores). Uma das topologias mais simples da bateria de li-ion é exibida na Figura 2.

Figura 2 - Equivalente elétrico simples de uma célula de li-ion.



Fonte: Adaptado de RASZMANN et al., 2017.

Tal modelo não considera as características dinâmicas da bateria, e o resistor série R_s é inserido para representar a queda de tensão interna da bateria. Em RASZMANN et al., 2017 foi utilizada uma abordagem considerando a resistência como função do SoC e características dinâmicas da bateria aumentando a precisão do modelo. Além disso, para utilização do modelo simplificado é necessário considerar que a bateria pode fornecer energia infinita e o modelo não é recomendado para aplicações com perfis de carga e descarga (BARCELLONA; PIEGARI, 2017).

Por conta da complexidade de circuitos de ordem maiores, alguns trabalhos utilizam em geral circuitos de 1° ou 2° ordem e isso varia de acordo com cada aplicação. Quanto maior a ordem do circuito maior é a precisão, no entanto, exigem maior esforço computacional (XIONG et al., 2018).

Após a escolha da topologia do circuito faz-se necessário utilizar técnicas para se obter os parâmetros do modelo. Na literatura existem diversas maneiras de se obter os parâmetros de um circuito de bateria desde forma direta consultando tabelas até estimação de parâmetros utilizando algoritmos computacionais (REMES, 2016).

O modelo de circuito equivalente apresentado na figura 2 é denominado na literatura como modelo Rint e ele é simples pois não considera o efeito do Estado

de Carga (do inglês, *State of Charge* - SOC). Mesmo não representando o SOC da bateria de forma direta a tensão de circuito aberto pode ser descrito como uma função do SoC por aproximação polinomial de ordem n que pode ser adquirida de curvas típicas de tensão em função do SoC no período de carga e descarga (RASZMANN et al., 2017).

Em aplicações *online* ou aplicações que requerem maior precisão é recomendado utilizar circuitos equivalente de ordem superiores. São comumente utilizados circuitos de 1° e 2° ordem.

Para estimar os parâmetros da bateria, são comumente utilizados algoritmos de otimização e filtragem ótima como: Otimização por Enxames de Partículas (do inglês, *Particle Swarm Optimization* - PSO), Algoritmo Genético (do inglês, *Genetic Algorithm* - GA) e Filtros de Kalman e suas variações (Estendido, Adaptativo e *Unscented*) (REMES, 2016).

Modelar uma bateria de li-ion não é simples, pois os parâmetros da bateria como tensão, resistência e capacitâncias são funções dos SoC, e por isso para uma boa precisão é necessário metodologias eficientes.

A seguir, são apresentados o funcionamento de forma sucinta do algoritmo Filtros de Kalman.

FILTROS DE KALMAN

Para se utilizar o filtro de Kalman é necessário representar o modelo em espaço de estados, descrito já na forma discreta conforme as equações (1) e (2):

$$x(k) = Ax(k-1) + Bu(k-1) + w(k) \quad (1)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) + v(k) \quad (2)$$

Onde: $x(k)$ é o vetor de estados, y é o vetor de saída, A é a matriz de estado, B é a matriz de entradas, C matriz de saída e D matriz de transição direta. Comumente se utiliza w como um ruído de média zero e covariância $Q(k)$ e $v(k)$ como um ruído com média zero e covariância $R(k)$, ou seja, $w(k) \sim N(0, Q(k))$ e $v(k) \sim N(0, R(k))$. Agora seja $\hat{x}(k|k)$ a estimação dos estados do sistema dadas as medidas realizadas até o instante k e $P(k|k)$ a matriz de covariância do vetor de erros de estimação dadas as observações também até o instante k , a qual representa o quanto os estados e consequentemente seu erro estão variando, de forma semelhante a variância σ^2 de uma variável escalar. Na sequência, são descritas as duas etapas que constituem o algoritmo predição e atualização como mostram as equações a seguir.

Predição:

$$\hat{x}(k|k-1) = A\hat{x}(k-1|k-1) + Bu(k-1) \quad (3)$$

$$P(k|k-1) = AP(k-1|k-1)A^T + Q(k) \quad (4)$$

$$\hat{y}(k|k-1) = C\hat{x}(k|k-1) \quad (5)$$

Atualização:

$$e(k) = y(k) - \hat{y}(k|k-1) \quad (6)$$

$$S(k) = CP(k|k-1)C^T + R(k) \quad (7)$$

$$L(k) = P(k|k-1)C^T S^{-1}(k) \quad (8)$$

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + L(k)e(k) \quad (9)$$

$$P(k|k) = (1 - L(k)C)P(k|k-1) \quad (10)$$

Conforme pode ser visto no algoritmo, a etapa de predição se utiliza apenas dos dados do modelo para estimar a priori o vetor de estados $\hat{x}(k|k-1)$, sua saída $\hat{y}(k|k-1)$ e a matriz de covariância $P(k|k-1)$. Após isso, é calculado o erro $e(k)$, o resíduo de estimação da matriz de covariância $S(k)$ e o ganho $L(k)$.

O algoritmo descrito anteriormente do filtro de Kalman pode ser aplicado somente a sistemas lineares. Quando se considera as não linearidades da bateria, é necessário utilizar outras vertentes do filtro de Kalman como o filtro de Kalman estendido ou o filtro de Kalman *unscented*. O filtro de Kalman estendido é recomendado quando o sistema apresenta características não lineares não muito intensas. Já quando as não linearidades do sistema são muito elevadas se faz adequado o uso do filtro de Kalman *unscented* (REMES, 2016).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A primeira coisa que o projetista deve considerar é a análise do seu sistema e se o mesmo necessita ou não de um grau elevado de representatividade do modelo. Após ter feito tal análise, pode-se escolher qual dos modelos atende de melhor forma o projeto requisitado.

Nota-se que independente da escolha dos modelos e metodologias, as baterias sempre requerem cuidados com sua segurança. Então, quando forem utilizadas, serão necessários circuitos de proteção, evitando assim algum possível acidente que possa comprometer as baterias, os equipamentos envolvidos e até mesmo a segurança das pessoas que possam estar por perto (HAASE et al., 2017).

Com questões de segurança resolvidas, é necessário definir qual a metodologia para estimação dos parâmetros do modelo, lembrando que os parâmetros da bateria são função do SOC, da temperatura e também da perda de capacidade. Em alguns trabalhos, por exemplo, (RASZMANN et al., 2017; HANNAN et al., 2018; USMAN et al., 2018) são desprezados alguns desses efeitos, pois a bateria não foi exposta a grandes variações de carga nos trabalhos citados, que faz com que sua temperatura de operação fique próxima da temperatura ambiente e também o efeito de perda de capacidade só começa a ser sentido após cerca de 300 ciclos (HANNAN et al., 2018). Então de forma geral, para se obter os parâmetros do modelo da bateria também é necessário realizar a estimação SoC, pois, os parâmetros como resistência e capacitância são função do SoC como mencionado anteriormente.

CONCLUSÃO

O trabalho trouxe algumas opções de modelagem de baterias de li-ion, enfatizando quando é adequado ou não a utilização de algumas metodologias, embora, existem uma gama de metodologias presentes na literatura que o trabalho não abordou.

As ferramentas abordadas no trabalho foram de caráter simples, visando fornecer base a pesquisadores que estiverem começando a trabalhar com as baterias de li-ion, mostrando quais metodologias são mais empregadas, e onde se faz adequado utilizar um ou outro modelo e quais parâmetros são mais relevantes quando se faz a modelagem. Também, abordou os cuidados que devem ser tomados ao trabalhar com tal tecnologia, onde o modelo é um requisito necessário para maximização da eficiência em sistemas que utilizam a bateria.

REFERÊNCIAS

FARHADI, M.; MOHAMMED, O. Energy storage technologies for high-power applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 52, n. 3, p. 1953–1961, May 2016. ISSN 0093-9994.

RASZMANN, Emma; BAKER, Kyri; SHI, Ying; CHRISTENSEN, Dane. Modeling stationary lithium-ion batteries for optimization and predictive control: Preprint.

HANNAN, M. A. et al. State-of-the-art and energy management system of lithium ion batteries in electric vehicle applications: Issues and recommendations. *IEEE Access*, v. 6, p. 19362–19378, 2018. ISSN 2169-3536.

MANJITHA, L.; KUMAR, R. G.; KANNAN, S. Lead acid based low voltage mild hybrid application in india x2014; merits and challenges. In: 2017 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India). [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5.

HAASE, J. et al. Analysis of batteries in the built environment an overview on types and applications. In: IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. [S.l.: s.n.], 2017. p. 8113–8118.

BARCELONA, Simone; PIEGARI, Luigi. Lithium ion battery models and parameter identification techniques. *Energies*, v. 10, n. 12, 2017. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/10/12/2007>>.

XIONG, R.; CAO, J.; YU, Q.; HE, H.; SUN, F. Critical review on the battery state of charge estimation methods for electric vehicles. *IEEE Access*, v. 6, p. 1832–1843, 2018. ISSN 2169-3536.

REMES, Chrystian. Modelagem, Simulação e Estimação de Carga de Baterias de Lítio com Implementação de um Carregador de Baterias. Tese (Doutorado), 2016.

USMAN, H. M.; MUKHOPADHYAY, S.; REHMAN, H. Universal adaptive stabilizer based optimization for li-ion battery model parameters estimation: An experimental study. *IEEE Access*, v. 6, p. 49546–49562, 2018. ISSN 2169-3536.