



# Estudo de uma técnica de estimação do estado de carga de uma bateria de íons de lítio utilizando filtro de Kalman

## *Study of a technique for estimating the state of charge of a lithium-ion battery using a Kalman filter*

Arthur Freitas Bastos\*, Carlos Henrique Illa Font†

### RESUMO

Esse projeto de pesquisa teve como estudar técnicas de estimação do estado de carga para baterias de íons de lítio e aprofundar-se no método de Filtro de Kalman para estimação do estado de carga de uma bateria. Inicialmente, é apresentado um modelo baseado em circuitos elétricos para o estudo de baterias, o qual permite realizar a simulação numérica de qualquer bateria. Então, é introduzido o tema de Filtro de Kalman e métodos de como utilizá-lo para a estimação do estado de carga da bateria. Com o estudo realizado, foi adaptado o método de Filtro de Kalman Estendido para produzir um software que estima o estado de carga e a tensão da bateria ao longo do tempo. Como resultado parcial da simulação numérica, destaca-se que o conhecimento sobre o comportamento da bateria e sua carga inicial são essenciais para um método de estimação de cargas preciso.

**Palavras-chave:** Bateria de íons de lítio, Estado de carga, Filtro de Kalman, Simulação numérica.

### ABSTRACT

This research project aimed to study the state of charge estimation techniques for lithium-ion batteries and delve into the Kalman Filter method for estimating the state of charge of a battery. Initially, a model based on electrical circuits for the study of batteries is presented, which allows for the numerical simulation of any battery. Then, the topic of Kalman Filter and methods of using it to estimate the battery charge state are introduced. With the study performed, the Extended Kalman Filter method was adapted to produce a software that estimates the battery's state of charge and battery voltage. As a partial result of the numerical simulation, it is highlighted that knowledge about the behavior of the battery and its initial charge are essential for an accurate state of charge estimation method.

**Keywords:** Kalman filter, Lithium-ion battery, Numerical simulation, SOC

## 1 INTRODUÇÃO

As baterias de íons de lítio se tornam atualmente motivo de grandes estudos na área acadêmica, sua grande relevância vem da capacidade de armazenar grandes quantidades de energia em pouco espaço, algo que também pode ser chamado de densidade de energia, um alto número de ciclos de carga entre outras. Determinar o quanto de energia há em todo o período de utilização de um equipamento por meio de sua bateria torna-se essencial para nunca deixar o sistema operar em níveis críticos e assim, preservar as suas características físicas e químicas (BENETTI, 2018; ILLA FONT, 2019).

\* Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil; [arthurbastos@alunos.utfpr.edu.br](mailto:arthurbastos@alunos.utfpr.edu.br)

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa; [illafont@utfpr.edu.br](mailto:illafont@utfpr.edu.br)

O filtro de Kalman (FK) é um método de estimação frequentemente usado em várias áreas da engenharia, entre as vantagens em relação aos outros tipos de filtros estão: a sua implementação onde os dados da entrada variam dinamicamente, e por isso há a necessidade de se estimar com precisão a tendência desses dados e quando a informação desejada não pode ser medida diretamente e sim por alguma outra variável que tenha correlação com o dado requerido (BUSARELLO, SIMOES, 2019).

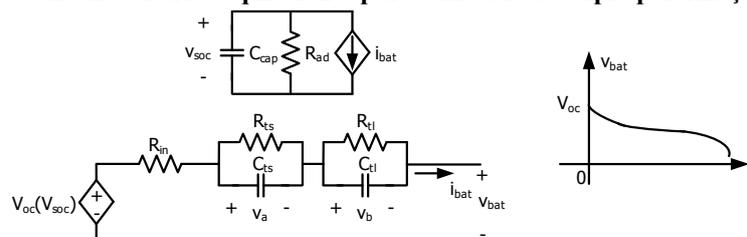
Quais são as informações necessárias para o estudo de estimação de estado de Carga de uma bateria? Como implementar um filtro de Kalman para estimar o SOC? Esse artigo tem a intenção de analisar quais são as informações essenciais ao realizar a modelagem de um software que estime o SOC de uma bateria e apresentar o estudo da técnica de Filtro de Kalman, utilizada para estimar a tensão e o SOC presentes na bateria no decorrer de seu uso.

## 2 MÉTODO

Ao estudar técnicas necessárias para estimação de carga de baterias e realizar a modelagem do sistema por meio de simulação numérica, é necessário conhecer as características da bateria utilizadas como a curva de carga e descarga, tensão nominal, tensão máxima, tensão de corte e capacidade nominal da bateria. Para simulações mais precisas pode-se obter dados como a temperatura de operação usual para carga e descarga da bateria. Todas essas informações podem ser encontradas na lista de dados (*datasheet*) do produto.

É importante também entender qual será o modelo elétrico da bateria, é o circuito equivalente que irá determinar na simulação numérica o comportamento da tensão da bateria e estado de carga ao longo do tempo. O modelo de dupla polarização preciso se torna um dos melhores modelos do comportamento não linear da tensão da bateria e seu circuito elétrico equivalente é apresentado na Fig. 1. Ele é representado por uma fonte de tensão dependente do SOC da bateria,  $V_{oc}(V_{soc})$ , uma resistência interna  $R_{in}$  característica da bateria e dois circuitos RC (resistor-capacitor),  $R_{ts}$  e  $C_{ts}$  e  $R_{tl}$  e  $C_{tl}$ .

Figura 1 – Circuito elétrico equivalente para o modelo de dupla polarização preciso



Fonte: Illa Font (2019).

Segundo Illa Font (2019), a bateria tem um comportamento semelhante a uma reta quando está no intervalo de 80% da capacidade até os 20%, e nos pontos fora desse intervalo ocorre uma variação não linear sendo  $R_{ts}$  e  $C_{ts}$  responsáveis pela variação de curta duração, presentes no comportamento inicial da bateria e  $R_{tl}$  e  $C_{tl}$  responsáveis pelo transitório de longa duração, no comportamento final da bateria.

Atualmente, há vários métodos diferentes de se estimar o estado de carga de uma bateria, entretanto, ao projetar um software que estime o SOC de uma bateria, deve-se levar em consideração aspectos como complexidade computacional, valor de investimento, modelos computacionais que sejam sensíveis a temperatura, tempo de degradação e frequência na atualização dos dados. Entre os principais métodos estão: método de tensão de circuito aberto, método de coulomb Counting, filtro de Kalman, lógica Fuzzy e métodos que incorporam redes neurais artificiais (Bastos, Illa Font, 2020).

## 2.1 Filtro de Kalman

O FK é um processo matemático para estimação de resultados, pode-se defini-lo como uma ferramenta que utiliza dados na entrada e equações bem definidas do processo a ser estimado, como no caso deste artigo, a função do comportamento da bateria, e então ocorre uma atualização dos valores internos do filtro. Quando bem definido os valores iniciais e o comportamento do sistema obtém-se uma ferramenta que irá minimizar os erros causados pelos diversos tipos de ruídos e realizar uma análise mais limpa do processo estudado.

Esse método de estimação é constituído por 5 passos que podem ser replicados em qualquer tipo de uso que seja dado ao filtro, são estes: definição dos valores iniciais, cálculo de estados de predição e erro de covariância, cálculo do ganho de Kalman, cálculo da saída e da estimativa e cálculo do erro de covariância. Após definir os valores iniciais o filtro funciona como um ciclo intermitente que se inicia no segundo passo ao quinto (BUSARELLO, SIMOES,2019).

A discretização de um sistema de equações gerado por um FK pode ser dada como:

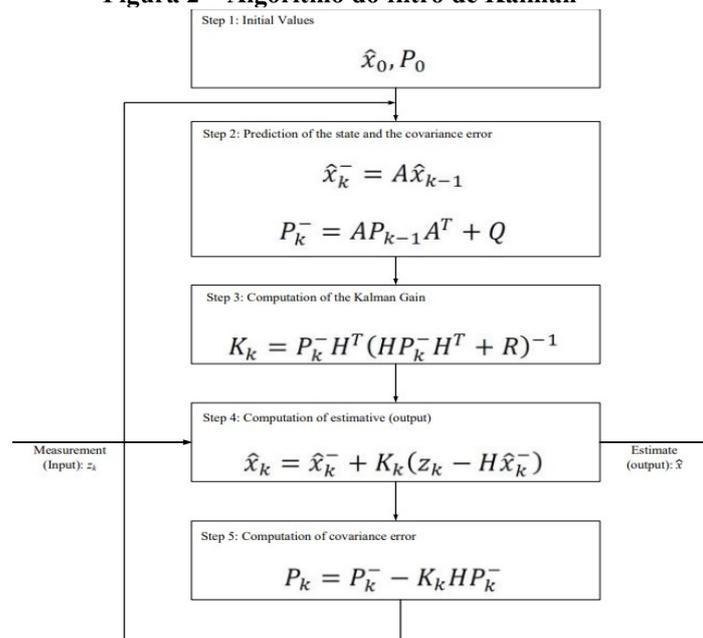
$$\dot{x}_k = Ax_k + w_k \quad (1)$$

$$\dot{z}_k = Ax_k + v_k \quad (2)$$

Onde  $x$  representa os estados estimados,  $z$  a medida de entrada do sistema e as matrizes  $A$ ,  $H$ ,  $Q$  e  $R$  são matrizes que modelam o sinal de entrada, sendo  $A$  a matriz de estado de transição ( $n \times n$ ),  $H$  é a matriz de estado de medição ( $m \times n$ ),  $Q$  é a matriz de covariância de  $w_k$  ( $n \times n$ ) e  $R$  é a matriz de covariância de  $v_k$  ( $m \times n$ ).

Um sistema linear de filtro de Kalman pode ser descrito como na Fig. 2, as variáveis apresentadas nessa figura são:  $z_k$ : medição (entrada),  $\hat{x}$ : estimativa (saída),  $\hat{x}_k^-$ : estado de predição,  $P_k^-$ : predição de erro de covariância,  $P_k$ : erro de covariância e  $K_k$ : ganho de Kalman.

**Figura 2 – Algoritmo do filtro de Kalman**



Fonte: Busarello, Simoes (2019).



Pode-se afirmar que o sistema não expressa as palavras entrada e saída no início e no fim do sistema, mas sim medição e estimação, isso porque os dados da saída é uma estimativa calculada pelo modelo matemático aplicado no FK e é usado para predição do estado e erro de covariância presentes no segundo passo.

É importante ressaltar que existem limitações no método de filtro de Kalman, não é recomendável utilizá-lo em sistemas não lineares, pois esse método utiliza de uma função linear para produzir um modelo Gaussiano que otimiza a resposta do sistema. Para contornar este problema, quando se via necessário utilizá-lo em modelos não lineares, foram feitas algumas modificações no método original para possibilitar a utilização do sistema em outros modelos, como o Extended Kalman Filter (EKF), sendo esse localmente linear e distribuição gaussiana.

## 2.2 Filtro de Kalman Estendido (FKE)

Neste método, não é possível aplicar o método linear de FK justamente por ter algum ponto do modelo que não é linear. Para poder trabalhar com esses modelos, é necessário extrair o Jacobiano de  $x_k$  e de  $z_k$  e posteriormente linearizar suas funções. Dessa forma, obtemos o jacobiano:

$$x_{k+1} = f(k, x_k, u_k) + w_k \quad (3)$$

$$z_k = h(k, x_k, u_k) + v_k \quad (4)$$

Para linearizar as funções precisa então utilizar-se de matrizes para retirar a não linearidade da função em cada iteração, possibilitando criar um modelo linear por iteração do filtro.

## 2.3 Filtro de Kalman para estimação de SOC de baterias

Para estimar o SOC é necessário obter os modelos das matrizes conforme as características da bateria. Segundo (Fujita, 2019), representa-se  $x$  como a matriz contendo a carga extraída da bateria  $Q_{ext}$  em relação ao tempo e da corrente de descarga  $i$ .

$$x_k = \begin{bmatrix} Q_{extk} \\ i_k \end{bmatrix} \quad (5)$$

As medidas são representadas por  $y$ , sendo essas as entradas do sistema,  $y$  então é uma matriz que contém a tensão calculada e a corrente medida nos terminais da bateria. Assim pode-se escrever  $y$  como:

$$y_k = \begin{bmatrix} v_k \\ i_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_0 - R i_k - K \left( \frac{Q}{Q - Q_{extk}} \right) (Q_{extk} + i_k) + A e^{-B Q_{extk}} \\ i_k \end{bmatrix} \quad (6)$$

A matriz H então pode ser escrita como:

$$H_k = \begin{bmatrix} -K \left( \frac{Q}{(Q - Q_{ext})^2} \right) (Q + i) - A B e^{-B Q_{ext}} & -R - K * \frac{Q}{Q - Q_{ext}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

E o SOC é calculado como:

$$SOC_k = 100 \left( 1 - \frac{Q_{extk}}{Q} \right) \quad (8)$$

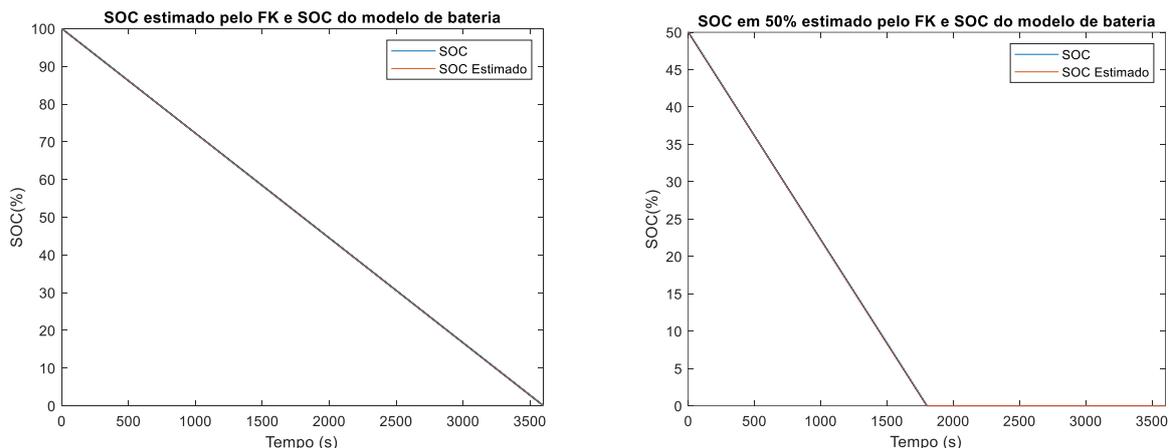
### 3 RESULTADOS

O software utilizado para realizar a simulação numérica foi o *MatLab/Simulink*, utilizando-se o bloco “*Battery*” presente no *Simulink*, configurado com as características da bateria utilizada (a de modelo PL-383562). Então carregou-se os dados do modelo da bateria para o *MatLab* e utilizou-se uma função para importar as informações e poder realizar a estimação do SOC da bateria. Com base nesse programa foi possível gerar os gráficos das Fig. 3 e Fig. 4, referentes ao SOC estimado pelo filtro de Kalman e a tensão de saída estimada, respectivamente.

A Fig. 3 mostra a porcentagem do SOC estimado decaindo de acordo com o tempo e comparando com o SOC do modelo da bateria, pode-se observar que as duas linhas estão sobrepostas, de forma que se pode afirmar que o programa realizado respondeu bem para a estimação do SOC da bateria.

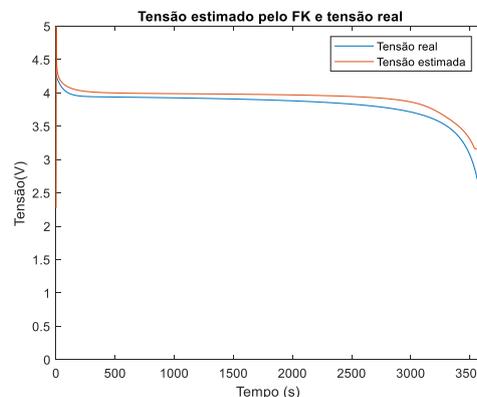
Já através da Fig. 4 pode-se analisar o gráfico referente a tensão estimada pelo programa e a tensão do modelo da bateria. Observa-se que existe um erro nessa estimação, mas que esse erro é pequeno.

**Figura 3 – SOC estimado pelo KF e SOC obtido do modelo da bateria**



Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 4 – Tensão estimada pelo FK e tensão do modelo da bateria**



Fonte: Autoria própria (2021).



## 4 CONCLUSÃO

O estudo de técnicas de estimação de características relacionadas com as baterias estão se tornando cada vez mais importantes e cada vez mais complexas. Pode-se afirmar que a qualidade da estimação do estado de carga de uma bateria está mais atrelada ao conhecimento do projetista sobre o método e das ferramentas a serem utilizadas para realizar a modelagem do sistema.

Infere-se que o método de Filtro de Kalman é eficiente para realizar a estimação do estado de carga da bateria. Sua eficiência está relacionada com a precisão das equações necessárias para realizar a filtragem do sistema. O SOC estimado nesse artigo apresenta resultados satisfatórios em comparação com o SOC real, entretanto, a tensão estimada não convergiu para o valor ideal conforme o esperado, isso está relacionado com algum dos termos utilizados no programa para descrever a curva da tensão.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio neste projeto através da bolsa de Iniciação Científica concedida ao acadêmico Arthur Freitas Bastos como também à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela infraestrutura e pelos recursos disponibilizados para realizar esta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- BATTERY SPACE. **Polymer lithium ion battery specifications: model: PL-383562**. Disponível em: <<https://www.batteryspace.com/prod-specs/PL383562.pdf>>. Acesso em: 9 de maio de 2020.
- BASTOS, Arthur Freitas; ILLA FONT, C. H. **Estudo de técnicas de estimação de estado de carga e tempo de vida de baterias**. SICITE, Brasil, v. 1, n. 25, p. 1-9, out./2020.
- BENETTI, Vincenzo Collodel. **Estimação conjunta de SoC e parâmetros de modelo para bateria de íon-lítio utilizando técnicas não lineares de filtro de Kalman**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.2018.
- BUSARELLO, T. D. C.; SIMOES, Marcelo Godoy. **A Tutorial on implementing Kalman filters with commonly used blocks**. In IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2019, pp. 60-67.
- FUJITA, Ricardo. **Modelagem de baterias Ni-MH e estimação do estado de carga utilizando filtro de Kalman estendido**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2018.
- ILLA FONT, C. H. **Desenvolvimento de sistemas de gerenciamento de energia para baterias de lítio com equalização de tensão**. Relatório de Pós-Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2019.
- SILVA, P. M. M. D. **Aplicação de filtro de Kalman estendido na estimação de estado de carga de um sistema de gestão de baterias**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Portugal. 2016.