

Estudo de técnicas de estimação de estado de carga e tempo de vida de baterias

Study of battery state of charge and battery state of health estimation techniques

RESUMO

Arthur Freitas Bastos
arthurbastos@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Carlos Henrique Illa Font
illafont@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Este projeto de pesquisa teve como objetivo estudar as técnicas de estimação do estado de carga e do estado de vida de baterias, em especial, a de bateria de íons de lítio. Com o estudo realizado, foi utilizado os métodos da tensão de circuito aberto e *Coulomb Counting* e, usando suas equações, foi possível produzir um *software* que estima o estado de carga de baterias ao longo do tempo. Como resultado parcial da simulação numérica, destaca-se que o conhecimento sobre a bateria e sua carga inicial são essenciais para um método de estimação de cargas preciso, este que tem limitações relativas ao tempo de realização do projeto, orçamento e tecnológica.

PALAVRAS-CHAVE: Estado de carga. *Coulomb Counting*. Simulação numérica.

ABSTRACT

This research project aimed to study the techniques for estimating the state of charge and state of health of batteries, especially the lithium ion battery. With the study produced, voltage and Coulomb Counting methods were used, and using their equations, it was possible to produce software that estimated the state of charge of batteries over time. As a partial result of the numerical simulation, it is highlighted that the knowledge about battery and its initial charge are essential for an accurate charge estimation method, which has limitations related to the time of the project, budget and technology.

KEYWORDS: SOC. Coulomb Counting. Numerical simulation.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

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



INTRODUÇÃO

As tecnologias que envolvem o nosso cotidiano estão cada vez mais dependentes de sistemas que armazenam energia. Neste cenário, as baterias ganham seu destaque em suas mais diversas aplicações, e por essa razão, surge a necessidade de melhorar os aspectos relacionados a sua longevidade. Uma maneira de evitar o comprometimento de sua saúde é monitorando constantemente suas células (SABIHUDDIN ET. AL, 2015; EICHI ET. AL, 2013).

Assim, a determinação do estado de carga (SOC) e do estado de vida (SOH) da bateria é algo essencial para o bom funcionamento de aparelhos elétricos e eletrônicos. Há várias maneiras de estimar o SOC de uma bateria, entretanto, não é uma tarefa trivial visto que envolve tanto processos químicos quanto físicos, internos e externos a bateria, que são complexos para modelar todas as condições de operação (BACCOUCHE, 2015; MURNANE, 2017).

Este artigo tem a intenção de apresentar o estudo de duas técnicas para estimar o SOC e SOH de uma bateria de íons de lítio, a saber: método de tensão de circuito aberto e o método *Coulomb Counting*. Estudou-se a equação utilizada no método *Coulomb Counting* para descrever a carga da bateria ao longo do tempo e utilizou-se de um modelo de simulação numérica para validar os resultados.

MATERIAL E MÉTODOS

Ao estudar as técnicas para estimar o SOC, é necessário conhecer o modelo baseado em um circuito elétrico equivalente, assim como ter as informações disponibilizadas pelo fabricante sobre as especificações técnicas da bateria.

A bateria utilizada no projeto foi a PL-383562 (BATTERY SPACE, 2020), com suas principais características apresentadas na Tabela 1.

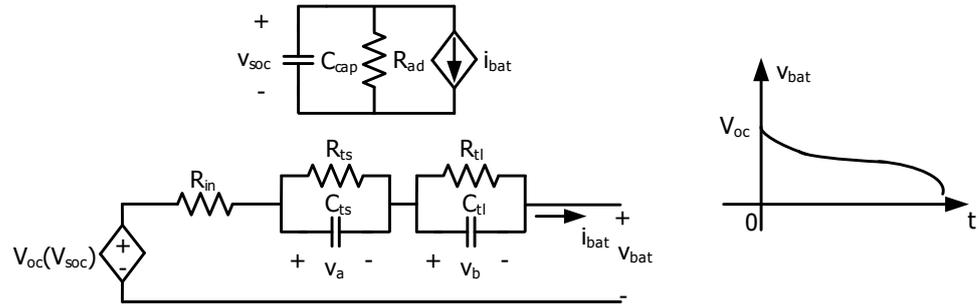
Tabela 1 – Características da bateria PL-383562

Parâmetro	Especificação
Tensão nominal	3,7 V
Tensão máxima	4,2 V
Tensão de corte	3,0 V
Capacidade nominal	850 mAh
Temperatura de operação	0° – 45° C (carga) -20° – 60 ° C (descarga)
Dimensão	35,5 mm x 62,5 mm x 3,95 mm (L x C x E)

Fonte: Battery Space (2020).

O circuito elétrico utilizado para modelar a bateria com o modelo de dupla polarização preciso é apresentado na Figura 1. O modelo aplicado apresenta o comportamento da bateria como sendo uma fonte de tensão dependente do SOC, $V_{oc}(V_{soc})$, uma resistência interna R_{in} , e dois circuitos RC, que descrevem com maior precisão o comportamento dinâmico inicial (transitório de curta duração), R_{ts} e C_{ts} , e final (transitório de longa duração), R_{tl} e C_{tl} , da bateria (CHEN, 2006; ILLA FONT, 2019).

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



Fonte: Illa Font (2019).

Este modelo reproduz com boa aproximação os valores da tensão máxima e da tensão de corte e observa-se que, durante a maior parte do tempo, a tensão apresenta um comportamento linear. Entretanto, quando o SOC está no intervalo 0% a 20%, a tensão apresenta características não-lineares.

Há vários métodos que se pode utilizar para a estimação do SOC e do SOH. Estes métodos podem ser aplicados em todos os sistemas de bateria, com diferenças gerais em complexidade computacional, valor de investimento para o projeto, se os resultados são disponíveis enquanto a bateria é utilizada, material sensível a temperatura, necessidade de um modelo computacional similar a bateria, frequência na atualização de valores, e se o teste pode ser feito enquanto o sistema opera (*online*) ou não (*offline*) (FRAGA, 2018).

a) Método da tensão de circuito aberto: o método consiste em fazer a leitura da tensão da bateria no valor do SOC equivalente da curva da descarga já conhecida, ele é útil para estimar o SOC inicial. Entretanto, para uma boa precisão neste método, é necessário que a bateria esteja em repouso por um longo período, para que a tensão terminal esteja mais próxima da tensão de circuito aberto.

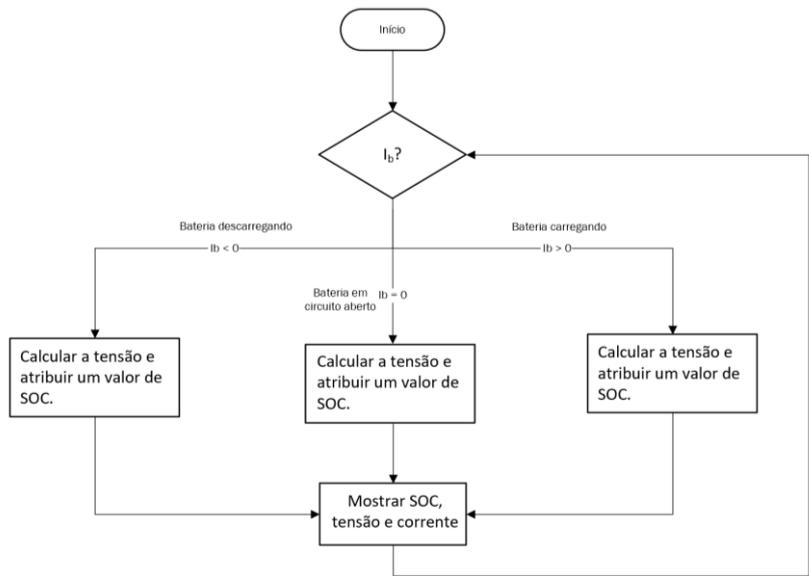
Sua estimação também pode ser com a carga conectada na bateria, entretanto, acaba tendo mais erros que outros métodos, pois a tensão da bateria não é mais igual a tensão de circuito aberto. Métodos de correção podem ser empregados, mas estes dependem dos parâmetros da bateria, que são suscetíveis a mudanças de valor com o envelhecimento da bateria.

Como mostra no fluxograma do método da tensão de circuito aberto apresentado na Figura 2, se a corrente da bateria I_b for negativa, a bateria está sendo descarregada. Caso contrário, se I_b for positiva, a bateria está sendo carregada; no caso de $I_b=0$, a bateria está em circuito aberto. Após analisar a corrente da bateria, deve-se conhecer a variação da tensão da bateria de acordo com a sua porcentagem de carga, e então, utilizar a leitura da tensão da bateria para determinar o seu estado de carga.

A relação entre a tensão de circuito aberto e o SOC pode ser obtida pela análise das curvas de carga e descarga da bateria, fornecidas pelo fabricante.

b) Método da contagem de carga (Coulomb Counting): é uma das técnicas mais comuns para estimar o SOC, ela consiste em ler a corrente da bateria e integrá-la durante o período de uso para calcular os valores de SOC, de acordo com a Eq. (1).

Figura 2 – Fluxograma do método da tensão de circuito aberto



Fonte: Autoria própria (2020).

$$SOC = SOC_{inicial} + \frac{1}{C_{nominal}} * \int_{t0}^{t0+\tau} I_b dt \quad (1)$$

Onde SOC representa o SOC atual da bateria, $SOC_{inicial}$ é o estado de carga inicial, $C_{nominal}$ é a capacidade nominal da bateria disponibilizada pelo fabricante e I_b é a corrente da bateria (de carga ou de descarga) (MURNANE; GAZEL, 2017).

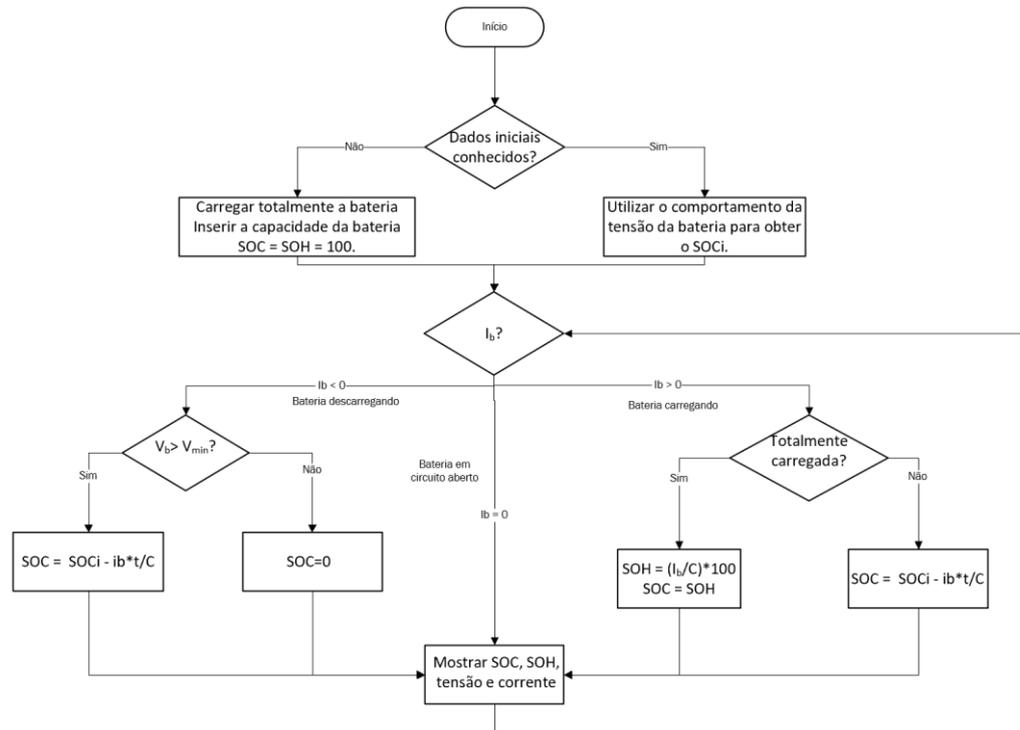
Com o SOC inicial bem definido, este método consegue ser preciso, pois calcula a capacidade restante acumulando a carga transferida para dentro e para fora da bateria. Entretanto, estimar o SOC inicial é um ponto crítico. Além disso, deve-se levar em conta as perdas que ocorrem no processo de carga e descarga das baterias, de forma que essas perdas não causem erro acumulativo.

O fluxograma do método *Coulomb Counting* da Figura 3 mostra como foi elaborado o algoritmo do método de contagem de cargas. Inicialmente deve-se obter os dados da bateria. Se o algoritmo trabalhar com a bateria apresentada, e houver a informação do estado anterior da bateria, este será utilizado na medição da bateria, caso contrário, o ideal é carregar totalmente a bateria e, então, será considerado um SOC e SOH inicial de 100.

Após as informações iniciais, o processo de estimação da bateria leva em conta a tensão e corrente na bateria, V_b e I_b , que são mostradas no monitor. É feita uma correção de eficiência e então uma estimativa pode ser feita para calcular o SOC inicial. A partir disso, o processo pode ser dividido em três caminhos, se $I_b > 0$, a bateria está sendo carregada; se $I_b < 0$, a bateria está sendo descarregada e, se $I_b = 0$, a bateria é um circuito aberto.

Ao final, o SOH e o SOC são mostrados no monitor, assim como V_b e I_b .

Figura 3 – Fluxograma do método *Coulomb Counting*



Fonte: Autoria própria (2020).

Neste artigo, será empregado o princípio do método de tensão de circuito aberto e o método *Coulomb Counting* para estimar o SOC e SOH com a maior precisão possível.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os métodos da tensão de circuito aberto e *Coulomb Counting* foram programados em linguagem C, de acordo com os fluxogramas apresentados nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

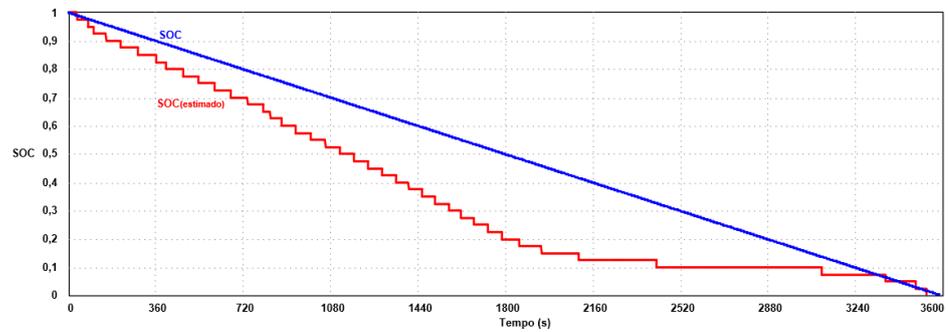
O *software* utilizado para realizar a simulação numérica foi o PSIM, por permitir simular em conjunto o circuito elétrico equivalente (modelo) da bateria e o código programado em C, através do bloco *C-Block*. Com este *software* foi possível gerar as Figuras 4 e 5 referentes ao SOC estimado pelo método de tensão de circuito aberto e as Figuras 6, 7 e 8, referentes ao SOC estimado pelo método *Coulomb Counting*.

O método da tensão de circuito aberto, torna-se um meio impreciso para estimar o SOC de uma bateria em tempo real com certo grau de exigência. Mesmo com valores iniciais precisos, o método apresenta erros que vão se agravando ao longo do tempo. Este erro é causado porque a mínima variação na tensão é o suficiente para alterar o valor do estado de carga, como pode ser observado nas Figuras 4 e 5.

Pode-se observar nas Figuras 6, 7 e 8 que o método *Coulomb Counting* responde bem, mesmo os erros obtidos nas simulações são toleráveis, desta

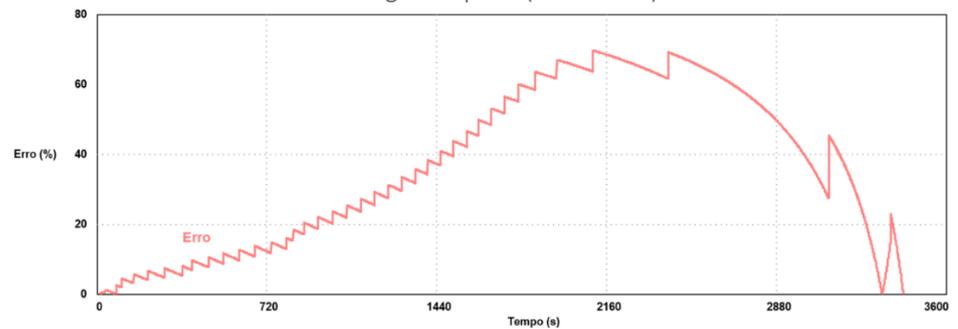
forma, é possível afirmar que o programa produzido é útil para a estimação de SOC de uma bateria, desde que se conheça um modelo matemático que simule de maneira precisa sua tensão.

Figura 4 – SOC estimado pelo método da tensão de circuito aberto e SOC do modelo da bateria durante o processo de descarga completa (100% a 0%)



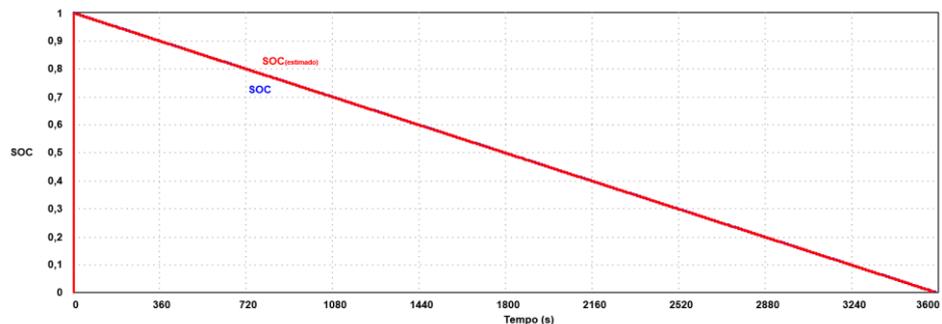
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 5 – Curva de erro pelo método da tensão de circuito aberto durante o processo de descarga completa (100% a 0%)



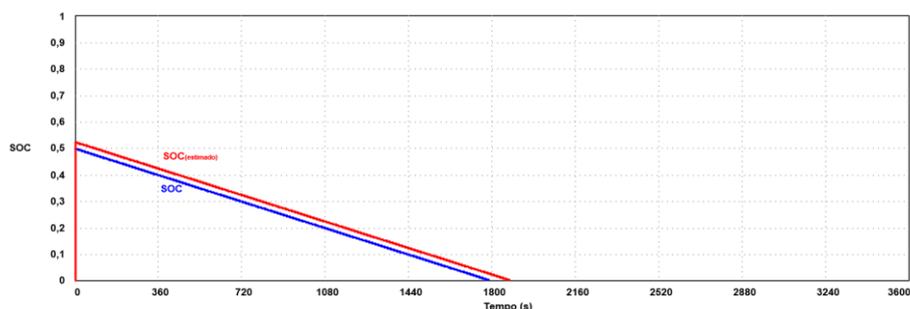
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 6 – SOC estimado por *Coulomb Counting* e SOC do modelo da bateria durante o processo de descarga completa (100% a 0%)



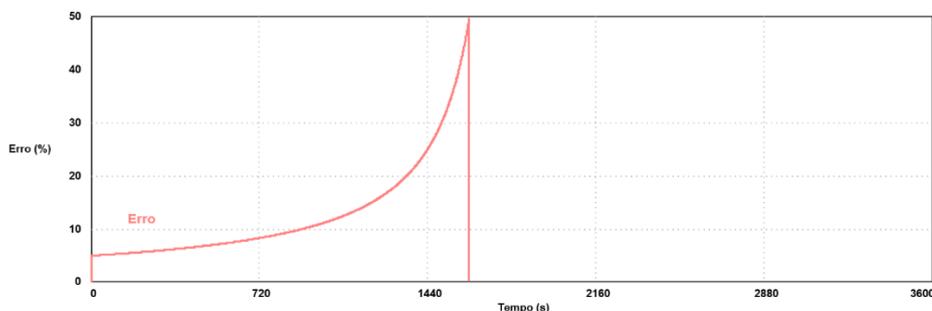
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 7 – SOC estimado por *Coulomb Counting* e SOC do modelo da bateria durante o processo de descarga (50% a 0%)



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 8 – Curva de erro pelo método *Coulomb Counting* durante o processo de descarga (50% a 0%)



Fonte: Autoria própria (2020).

CONCLUSÕES

A maior eficiência de um método para estimar o SOC está relacionado a quantidade de conhecimento que o projetista tem dos equipamentos utilizados, de uma análise da simulação computacional para estimar um SOC inicial com precisão assim como a complexidade computacional e orçamento disponíveis.

Infere-se que o método de *Coulomb Counting* é um método mais eficiente para a estimação do estado de carga quando comparado ao método da tensão de circuito aberto. Entretanto, sua maior eficiência deve-se ao maior estudo e conhecimento que o projetista tem que ter dos equipamentos utilizados e da análise da simulação computacional para estimar um SOC inicial com precisão.

Como continuidade da pesquisa, os *softwares* implementados serão embarcados em um Arduino para realizar os ensaios experimentais. A placa de circuito impresso com os sensores de tensão e de corrente para medir a grandeza das baterias já está implementada, testada e em condições de operação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela infraestrutura e pelos recursos disponibilizados para realizar esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

BACCOUCHE, I.; MLAYAH, A.; JEMMALI, S.; *et al.* Implementation of a coulomb counting algorithm for SOC estimation of li-ion battery for multimedia applications. In: IEEE 12th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD15). **Proceedings**. 2015, p. 1-6.

BATTERY SPACE. **Polymer lithium íon battery specifications: model: PL-383562**. Disponível em: <<https://www.batteryspace.com/prod-specs/PL383562.pdf>>. Acesso em: 9 de maio de 2020.

CHEN, M.; RINCON-MORA, G. A. Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, vol. 21, no. 2, p. 504 - 511, Jun. 2006.

CODECÀ, F.; SAVARESI, S. M.; RIZZONI, G. On battery state of charge estimation: a new mixed algorithm. In: 17th IEEE International Conference on Control Applications. **Proceedings**. 2008, p. 102-107.

EICHI, H.-R.; OJHA, U.; BARONTI, F.; CHOW, M.-Y. Battery management system: an overview of its application in the smart grid and electric vehicles. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, vol. 7, no. 2, p. 4 -16, Jun 2013.

FRAGA, V. J. M. **Estudo, implementação e teste de algoritmo de cálculo de índice de saúde de baterias**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto. Porto. 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.

LAWDER, M. T.; SUTHAR, B.; NORTHROP, P. W. C.; DE, S.; *et al.* Battery energy storage system (BESS) and battery management system (BMS) for grid-scale applications. **Proceedings of the IEEE**, vol. 102, no. 6, p. 1014 - 1030, Jun 2014.

LINDEN, D.; REDDY, T. B., **Linden's handbook of batteries**. New York: McGraw-Hill Professional, 4 ed., 2010.

MURNANE, M.; GHAZEL, A. **A closer look at state of charge (SOC) and state of health (SOH) estimation techniques for batteries**. Analog Devices, 2017. Disponível em: < <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/A-Closer-Look-at-State-Of-Charge-and-State-Health-Estimation-Techniques-....pdf>>. Acesso em: 21 de abril de 2020.

REMES, C. L. **Modelagem, simulação e estimação de carga de baterias de lítio com implementação de um carregador de baterias.** Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville. 2016.

SABIHUDDIN S.; KIPRAKIS A. E.; MUELLER, M. A numerical and graphical review of energy storage technologies. **Energies**, vol. 8, no. 1, p. 172 -216, 2015.

WILLIAMSON, S. S.; RATHORE, A. K.; MUSAVI, F. Industrial electronics for electric transportation: current state-of-the-art and future challenges. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 62, no. 5, p. 3021 - 3032, May 2015.

YOUNG, K.; WANG, C.; WANG, L. Y.; STRUNZ, K., **Electric vehicle battery technologies, in Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks**, pp. 15–56, New York: Springer, 2013.