



SEI-SICITE 2021

Pesquisa e Extensão para um mundo em transformação

XI Seminário de Extensão e Inovação  
XXVI Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica  
08 a 12 de Novembro - Guarapuava/PR



# Estudo, desenvolvimento e simulação de um sistema híbrido de armazenamento de energia em veículos elétricos

*Study, development and simulation of a hybrid energy storage system in electric vehicles*

Adriele Ortiz Gomes\*, Fernanda Cristina Correa†

## RESUMO

Os veículos elétricos tem ganhado um espaço considerável no setor automotivo, isto porque são uma forma eficiente de diminuir os efeitos que este setor causa no meio ambiente e na sociedade como um todo. O sistema de um veículo elétrico é composto por uma fonte de energia portátil química ou eletromagnética e um esforço de tração que, neste caso, é o motor elétrico. Este trabalho propõe um modelo matemático de uma bateria de íon lítio para aplicação sistema de armazenamento de energia híbrido. A hibridização do sistema é feita através de uma associação de baterias e supercapacitores com o objetivo de aumentar a autonomia do veículo e diminuir o desgaste dos elementos que compõem o sistema. Além de reproduzir e simular a modelagem dessa bateria através de um modelo eletroquímico. Os dados obtidos representam de forma satisfatória o comportamento de carga e descarga de uma bateria em uma situação real e com isso, é possível concluir que o modelo de bateria pode ser utilizado para simulação de um sistema de armazenamento de energia híbrido.

**Palavras-chave:** veículos elétricos. sistemas de armazenamento de energia. modelo de baterias. simulação.

## ABSTRACT

Electric vehicles have gained considerable space in the automotive sector, because they are an efficient way to reduce the effects that this sector causes on the environment and on society as a whole. The system of an electric vehicle is composed of a portable chemical or electromagnetic energy source and a tractive effort, which, in this case, is the electric motor. This paper proposes a mathematical model of a lithium ion battery for application in a hybrid energy storage system. The hybridization of the system is done through an association of batteries and supercapacitors with the objective of increasing the vehicle's autonomy and reducing the wear of the elements that make up the system. In addition to reproducing and simulating the modeling of this battery through an electrochemical model. The data obtained satisfactorily represent the charging and discharging behavior of a battery in a real situation and with this, it is possible to conclude that the battery model can be used to simulate a hybrid energy storage system.

**Keywords:** electric vehicles. energy storage systems. battery model. simulation.

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria automobilística é uma das maiores do mundo, além de ter grande importância na economia mundial. Nesse sentido, os veículos elétricos vem recebendo um grande investimento, isto porque são uma forma

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

†  Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil;  
 [fernandacorrea@utfpr.edu.br](mailto:fernandacorrea@utfpr.edu.br);  <https://orcid.org/0000-0003-4907-0395>.



bastante eficiente de diminuir os efeitos que o aumento da quantidade de automóveis vem causando ao meio ambiente e à sociedade como um todo (CORREA, 2013). O sistema veicular elétrico apresenta os seguintes recursos: uma fonte de energia portátil de natureza química ou eletromecânica e um esforço de tração que é fornecido unicamente por um motor elétrico. Segundo Husain (2011) entre as vantagens deste modelo está o fato de a eficiência geral de um veículo elétrico ser comparável à eficiência geral de um veículo com motor a combustão interna, além de gerar menos poluição ambiental.

O sistema de armazenamento de energia em veículos elétricos afeta significativamente o desempenho na direção e a relação de custo-benefício (ZHANG et al., 2018), por isso é importante a escolha da fonte de energia correta e que o sistema seja bem dimensionado. Para fazer esse dimensionamento é necessário considerar que veículos elétricos frequentemente encontram condições como aceleração, subida e parada de emergência, que requerem carregamento e descarregamento de alta potência (WANG, Y.; WANG, L.; CHEN, 2020). Uma forma de resolver esse problema é utilizando um sistema de armazenamento de energia híbrido.

Um sistema de armazenamento de energia híbrido é um sistema que combina duas fontes de energia com o objetivo de melhorar sua eficiência. A vantagem desse sistema é que sua massa geral pode ser potencialmente menor que a de uma configuração simples para uma mesma carga (AMJADI; WILLIAMSON, 2010). As fontes de energia mais comuns utilizadas em veículos elétricos são bateria, supercapacitores, célula combustível e roda livre (JYOTHEESWARA REDDY; NATARAJAN, 2018). As baterias de lítio se tornaram o principal sistema de armazenamento de energia de veículos elétricos devido à sua excelente densidade de energia (LI et al., 2021). Nesse projeto será apresentado a modelagem de uma bateria de íon lítio. O modelo eletroquímico da bateria se baseia nas características físicas e químicas das baterias e é, na maioria das vezes, representado por um sistema de equações diferenciais parciais (CARVALHO, 2019). É possível validar esse modelo simulando o comportamento da bateria para utilizá-lo em um sistema de armazenamento de energia híbrido?

## 2 METODOLOGIA

O projeto aqui relatado se caracteriza como pesquisa aplicada, pois utilizou-se conhecimentos e estudos prévios para um propósito específico. Dessa forma, fez-se uma coleta de dados para definir os parâmetros que baseariam o projeto. Portanto, iniciou-se fazendo uma pesquisa das características da bateria e buscou-se um modelo para melhor representá-las. Com isso foi possível reproduzir o modelo e validá-lo através de simulação.

### 2.1 Modelagem da bateria

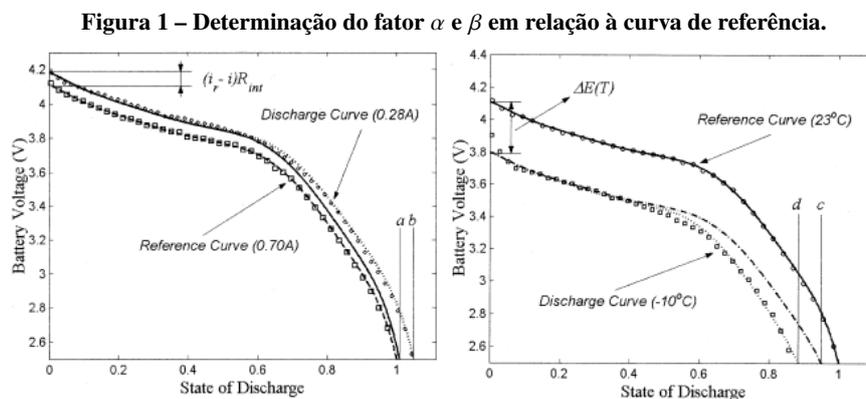
Para realizar a simulação da bateria a característica do comportamento de carga e descarga e seu tempo de vida útil devem ser analisados obtendo assim um modelo matemático mais preciso. O modelo eletroquímico se baseia nas características físicas e químicas das baterias e é, na maioria das vezes, representado por um sistema de equações diferenciais parciais (CARVALHO, 2019).

O objetivo de se obter o modelo matemático da bateria é representar os efeitos que as reações químicas produzem sob várias condições de operação em termos elétricos e térmicos e sua interação com o ambiente externo. Para isso, é utilizada a curva de tensão do terminal durante uma descarga de corrente constante a temperatura constante e a tensão após uma mudança gradual de corrente (GAO; LIU; DOUGAL, 2002). Nesse modelo utiliza-se como entradas: a Corrente de descarga  $I(t)$  e Temperatura ambiente  $T(t)$ , e como saídas: a Tensão nos terminais da bateria  $V(t)$  e Estado de descarga  $SOD(t)$ . A representação é feita através

de três componentes: um potencial de equilíbrio  $E$ , uma resistência interna  $R_{int}$  (formada por  $R_1$  e  $R_2$ ) e uma capacitância efetiva que caracteriza a resposta transitória de camadas duplas de carga nos eletrodos porosos.

Em sua pesquisa Ferreira (2011) dividiu o processo de modelagem apresentado por Gao, Liu e Dougal (2002) em 6 etapas: obtenção do potencial de equilíbrio, obtenção do fator  $\alpha(i)$ , obtenção da corrente da bateria em função dos componente elétricos, obtenção do fator  $\beta(i)$ , obtenção do termo de correção de potencial e por fim obtenção do resistor  $R_2$  e do capacitor  $C$ . Para a obtenção do potencial de equilíbrio é necessário definir uma curva de referência a partir da curva típica de tensão e descarga da bateria. A curva de referência definida deve se aproximar ao máximo condição de operação mediana e a partir dela é obtida a taxa de descarga de referência ( $i_r$ ) e a temperatura de referência ( $T_r$ ). Um polinômio de enésima ordem é ajustado à curva.

O fator  $\alpha(i)$  é definido como a dependência do estado de descarga da taxa de descarga, ou seja, é o estado de descarga em função da corrente. Ele pode ser obtido fazendo uma relação das capacidades de descargas de curvas com diferentes taxas de descarga a uma mesma temperatura. Sendo  $a$  a capacidade de descarga da curva de referência e  $b$  a capacidade de descarga da curva com taxa de descarga diferente, como representado na Fig. 1.



Fonte: Gao et al (2002)

A linha tracejada possui tensão inicial igual a da curva de referência, porém tensão final (de corte) diferente. Essa curva é obtida removendo o excesso de perdas da curva de referência. Como  $a$  e  $b$  variam de curva para curva, o fator  $\alpha$  pode ser definido na Eq. (1).

$$\alpha = \frac{a}{b} \quad (1)$$

A corrente da bateria em função dos componentes elétricos combina características eletroquímicas com as equações dos elementos do circuito e equações de restrição do circuito. O que produz a Eq. (2):

$$i(t) = \frac{1}{R_2} [v(t) - E[i(t), T(t), t] - R_1 i(t)] + C \frac{d}{dt} [v(t) - E[i(t), T(t), t] - R_1 i(t)] \quad (2)$$

A diferença de potencial da bateria é obtida a partir da diferença das curvas, o que gera a Eq. (3). A partir desta equação é possível encontrar o valor da resistência interna total ( $R_{int}$ ) da bateria. O fator  $\beta(i)$  é definido como a dependência do estado de descarga da temperatura, ou seja, o é o estado de descarga em função da temperatura. Ele pode ser obtido fazendo uma relação das capacidades de descargas de curvas com diferentes temperaturas a uma mesma taxa de descarga. Sendo que  $c$  é obtido fazendo um ajuste na curva de referência  $d$  a capacidade de descarga da curva com taxa de descarga diferente, como representado na Fig. 1.

$$\Delta(V) = (i_r - i)R_{int} \quad (3)$$

A linha tracejada é obtida movendo a linha sólida para baixo para obter o melhor ajuste na parte plana da curva de descarga a uma distância de  $\Delta[E(t)]$  e a capacidade de descarga  $c$ . Sendo assim o fator  $\beta$  é apresentado na Eq. (4). O potencial de correção  $\Delta[E(t)]$  é usado para compensar a variação do potencial de equilíbrio causado por mudanças de temperatura do valor de referência. Para a temperatura de referência o potencial de correção é zero. A partir dessas descrições obtêm-se as relações para fonte de tensão descrita na Eq. (5), tensão terminal descrita na Eq. (6) e estado de descarga descrito na Eq. (7).

$$\beta = \frac{c}{d} \quad (4)$$

$$E[i(t), T(t), t] = v[i(t), T(t), t] - R_{int}i(t) \quad (5)$$

$$v[i(t), T(t), t] = \sum_{k=0}^n c_k SOD^k [i(t), T(t), t] + \Delta[E(T)] \quad (6)$$

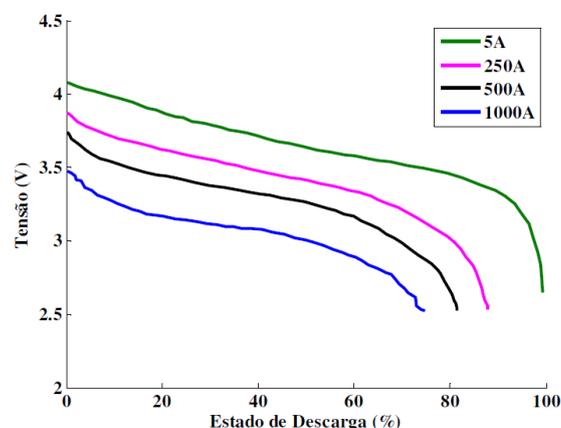
$$SOD[i(t), T(t), t] = \frac{1}{Q_r} \int_0^t \alpha[i(t)] \beta[i(t)] i(t) dt \quad (7)$$

A etapa final é feita através de tentativa e erro. Os valores do capacitor  $C$  e da resistência  $R_2$  são obtidos na simulação da bateria ajustando seus valores para que, nas mesmas condições de carga pulsante, os resultados da corrente e da tensão estejam próximos à curva adotada como referência. O objetivo de acrescentar um capacitor em paralelo com o resistor no modelo da bateria é representar a resposta transitória de primeira ao ser exposta a picos de tensão. Para a simulação da bateria foi utilizado o software MatLab e, para validar o modelo, utilizou-se os dados e parâmetros obtidos em (FERREIRA, 2011).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de taxas de descargas diferentes de uma célula lítio-íon de 5Ah a uma temperatura de 20°C foram extraídas dos dados fornecidos pelo fabricante e são representadas na Fig. 2, a partir disso foi escolhido como referência a curva de 500A.

Figura 2 – Curvas de taxas de descargas diferentes de uma célula lítio-íon de 5Ah a uma temperatura de 20°C.

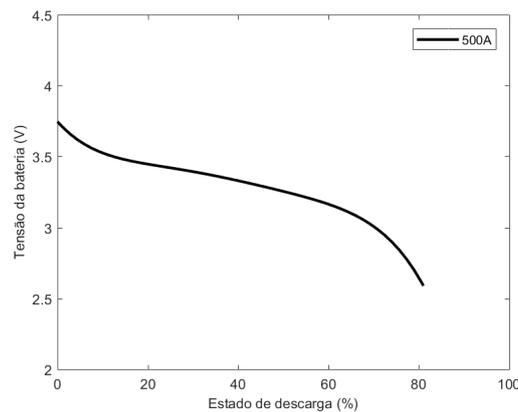


Fonte: Ferreira (2011).

Ao simular a bateria sob uma corrente constante de 500A e uma temperatura constante de 20°C, obteve-se o

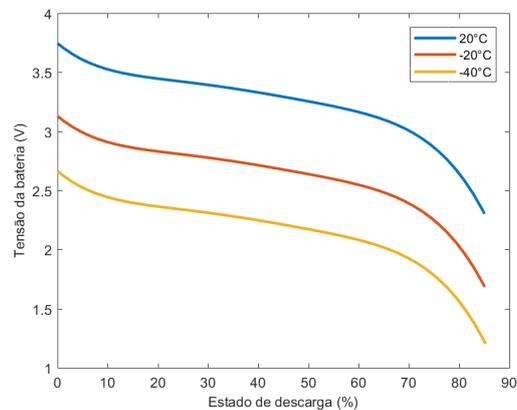
gráfico da Fig. 3. Por meio da curva simulada é possível observar o comportamento de descarga típico da bateria, nesse sentido, vê-se que no início da descarga a queda de tensão ocorre de forma mais abrupta. Entre 20% e 60% do estado de descarga a queda de tensão ocorre de uma forma mais gradativa. Ao se aproximar da tensão de corte, a queda de tensão volta a ser abrupta. O que representa de um modo bem aproximado o perfil de descarga da bateria de íon-lítio. Além disso, percebe-se que a curva simulada referente à temperatura de 20°C é a que apresenta todos os pontos da curva real dentro de uma margem de erro aceitável.

**Figura 3 – Curva simulada da variação de tensão na célula em função do estado de descarga em um processo de descarga constante.**



Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 4 – Curvas simuladas em um processo de descarga constante para diferentes valores de temperatura.**



Fonte: Autoria própria (2021).

## 4 CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos na simulação é possível concluir que a modelagem da bateria representou de forma satisfatória o comportamento eletroquímico e o perfil de descarga de uma bateria de íon-lítio. Portanto, o modelo pode ser aplicado na simulação de um sistema de armazenamento de energia híbrido.



## 5 AGRADECIMENTOS

Agradeço à *UTFPR*, pela bolsa de Iniciação Científica (Edital PROPPG 02/2020 — PIBIC) da acadêmica Adrielle Ortiz Gomes.

## REFERÊNCIAS

- AMJADI, Zahra; WILLIAMSON, Sheldon S. Power-electronics-based solutions for plug-in hybrid electric vehicle energy storage and management systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 57, n. 2, p. 608–616, fev. 2010. DOI: [10.1109/tie.2009.2032195](https://doi.org/10.1109/tie.2009.2032195).
- CARVALHO, Diego Solak. **Previsão do estado de carga da bateria usando modelos lineares auto-ajustados através de algoritmos de otimização**. 2019. 83 f. Diss. (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR, 2019. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/4758>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- CORREA, Fernanda Cristina. **Desenvolvimento e análise de estratégias de gerenciamento de potência em veículo elétrico híbrido de configuração paralela**. 2013. 138 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, jul. 2013. Acesso em: 15 fev. 2020.
- FERREIRA, Gabriela Torllone Carvalho. **Modelagem e simulação de bateria de lítio-íon de aplicação aeronáutica**. 2011. 104 f. Diss. (Mestrado) – Divisão de Engenharia Aeronáutica e Aeroespacial, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, set. 2011. Acesso em: 20 jan. 2020.
- GAO, Lijun; LIU, Shengyi; DOUGAL, R.A. Dynamic lithium-ion battery model for system simulation. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, v. 25, n. 3, p. 495–505, set. 2002. DOI: [10.1109/tcapt.2002.803653](https://doi.org/10.1109/tcapt.2002.803653).
- HUSAIN, Iqbal. **Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals**. 2. ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2011. 523 p. ISBN 9781439811788.
- JYOTHEESWARA REDDY, K.; NATARAJAN, Sudhakar. Energy sources and multi-input DC-DC converters used in hybrid electric vehicle applications – A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 36, p. 17387–17408, 2018. ISSN 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.076>.
- LI, Mince et al. Sizing Optimization and Energy Management Strategy for Hybrid Energy Storage System Using Multiobjective Optimization and Random Forests. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 36, n. 10, p. 11421–11430, 2021. DOI: [10.1109/TPEL.2021.3070393](https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3070393).
- WANG, Yujie; WANG, Li; CHEN, Zonghai. A review of key issues for control and management in battery and ultra-capacitor hybrid energy storage systems. **eTransportation**, Elsevier, v. 4, p. 100064, mai. 2020. ISSN 2590-1168. DOI: [10.1016/j.etrans.2020.100064](https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100064).
- ZHANG, Lei et al. Multiobjective Optimal Sizing of Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, IEEE, v. 67, n. 2, p. 1027–1035, fev. 2018. DOI: [10.1109/TVT.2017.2762368](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2762368).