

Análise e simulação de um conversor estático para carregadores de bateria de veículos elétricos

Analysis and simulation of static converter for electric vehicles battery chargers

RESUMO

Cinthia Akemi Horimi
cinthiahorimi@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Delvanei Gomes Bandeira Junior
delvaneijunior@professores.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Os veículos elétricos têm inúmeras vantagens sobre os veículos convencionais movidos a combustível fóssil que são: sustentabilidade, eficiência, conveniência e economia. Dessa forma, este trabalho tem o intuito de contribuir com as pesquisas que buscam encontrar soluções na área de Eletrônica de Potência, cujas finalidades são voltadas para aplicações em veículos elétricos. Assim sendo, descreve-se a metodologia para o desenvolvimento de um modelo matemático de bateria elétrica baseada no modelo de Thevenin associado a um conversor Buck. Assim como apresenta-se uma nova topologia de conversor estático, o qual tem a finalidade de ser implementado em laboratório para posterior aplicação em carregadores de bateria de veículos elétricos.

PALAVRAS-CHAVE: Veículos elétricos. Conversores. Bateria.

ABSTRACT

Electric vehicles have numerous advantages over conventional fossil fuel vehicles which are sustainability, efficiency, convenience and economy. Thus, this work is intended to contribute to research solutions in Power Electronics area, whose purposes are focused on electric vehicles applications. Therefore, the methodology was described covering the development of a mathematical model of an electric battery based on the Thevenin model associated with a Buck converter. A new static converter topology was also presented, which will be implemented in the laboratory for further application in battery chargers for electric vehicles.

KEYWORDS: Electric Vehicles. Converters. Battery.

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

Os veículos elétricos (VEs) estão se tornando a próxima tecnologia automotiva a ser amplamente difundida na sociedade (RUBENS *et al.*, 2020, p. 1). Muitos países estão apoiando tecnologias de veículos elétricos para reduzir os impactos ambientais do transporte, como as emissões de gases de efeito estufa e a poluição do ar nas cidades (ONAT *et al.*, 2019, p. 461).

Os carregadores de bateria desempenham um papel crítico no desenvolvimento de VEs. O tempo de carregamento e a vida útil da bateria estão relacionados às características do carregador (YILMAZ; KREIN, 2013, p. 2152). A tendência de aumento de potência em carregadores *on-board* é evidente e predominantemente influenciada pelo aumento na capacidade da bateria (KHALIGH; D'ANTONIO, 2019, p.3308).

Carregadores *on-board* são projetados como unidades autônomas que se comunicam com um equipamento de abastecimento de VEs e o sistema de gerenciamento de bateria (*Battery Management System* - BMS), para fornecer a tensão e corrente de carga solicitadas para a bateria de propulsão de alta tensão do veículo (KHALIGH; D'ANTONIO, 2019, p.2). Portanto, uma parte importante do processo de carregamento é o BMS interpretar o correto estado de carga (*State of Charge* - SOC) da bateria e o carregador fornecer o perfil de carga correto.

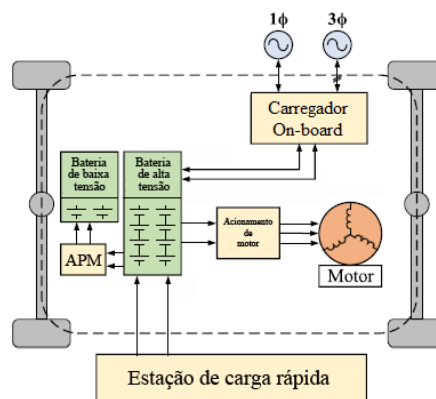
Projetar o modelo de bateria adequado é o ponto de partida de um BMS. O processo é útil para criar um modelo de alta fidelidade capaz de prever o desempenho da corrente e da tensão elétrica e estimar o estado de carga em tempo de execução (HURIA *et al.*, 2012, p. 1).

Portanto, este trabalho tem como objetivo realizar a modelagem de uma bateria que verifique as condições de carga resultantes dos vários componentes eletrônicos de potência a fim de obter dados realistas sobre o comportamento da bateria. Além disso, inserir um novo esquemático de conversor estático para aplicações em veículos elétricos.

METODOLOGIA

O esquemático típico de um veículo elétrico é ilustrado na Figura 1. Conforme mostrado, um VE inclui o carregador *on-board*, módulo de alimentação auxiliar (*Auxiliary Power Module* - APM), bateria de alta tensão, bateria auxiliar de baixa tensão, um motor elétrico e um sistema de transmissão que são usados para propulsão, assim como vários conversores eletrônicos de potência (KHALIGH; D'ANTONIO, 2019, p.3307).

Figura 1 – Principais partes de um veículo elétrico



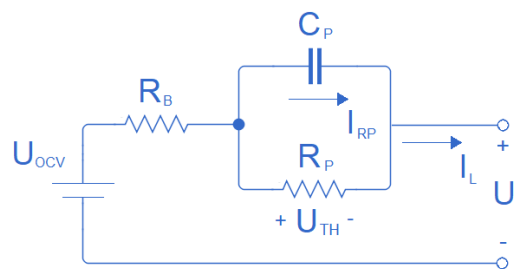
Fonte: Adaptado de KHALIGH e D'ANTONIO (2019).

Um VE é um sistema físico complexo, cujo projeto precisa de modelagem e simulação coordenadas em várias disciplinas (QIN *et al.*, 2019, p. 169). O foco deste trabalho é o modelo da bateria, o qual é usado para descrever a dinâmica de operação da bateria e posteriormente ser utilizado para projetar adequadamente os controladores do conversor proposto.

Uma abordagem é utilizar o modelo de circuito equivalente, o qual descreve as características dinâmicas e princípios de funcionamento da bateria. A escolha da estrutura do modelo responde a uma compensação entre a capacidade de ajustar os dados experimentais e a complexidade do circuito equivalente (e recursos computacionais) (HURIA *et al.*, 2012, p. 2).

O modelo de Thevenin, mostrado na Figura 2, é o circuito mais típico e o mais adequado para muitos problemas de relevância industrial (HURIA *et al.*, 2012, p. 2).

Figura 2 – Circuito do modelo de Thevenin



Fonte: Autoria própria (2020).

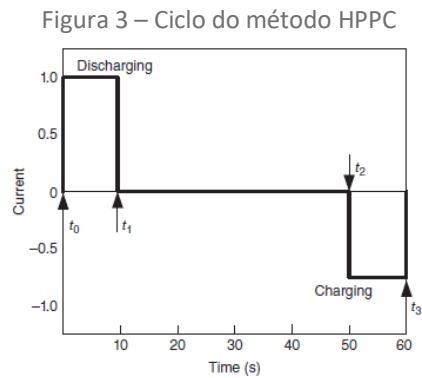
As resistências internas incluem a resistência ôhmica R_B e a resistência de polarização R_P . A capacitância equivalente C_P é usada para descrever a resposta transitória durante o carregamento e o descarregamento. U_{TH} é a tensão em C_P . I_{RP} é a corrente de saída de C_P (HE *et al.*, 2011, p. 586).

O comportamento elétrico do modelo de Thevenin pode ser expresso pela Eq. (1) (JIANG; ZHANG, 2015, 28).

$$U_{L,i} = -R_B I_{L,i} - R_P I_{P,i} + U_{OCV} \quad (1)$$

Em que i mostra o comportamento da bateria e sua interação em uma escala de tempo, dado em segundos.

Para fins de simulação e verificação do modelo da bateria e posterior uso da metodologia deste trabalho, os dados resultantes dos testes realizados por Jiang e Zhang (2015, p. 25), os quais foram realizados de acordo com o método HPPC (*Hybrid Pulse Power Characterization*), utilizando-se 16 baterias de lítio de manganês com capacidade nominal de 100 Ah conectadas em série. O ciclo do HPPC é ilustrado na Figura 3.



Fonte: Jiang e Zhang (2015).

Os testes foram implementados em intervalos de 10% de SOC, em temperatura ambiente. A partir disso, obteve-se os seguintes parâmetros contidos na Tabela 1.

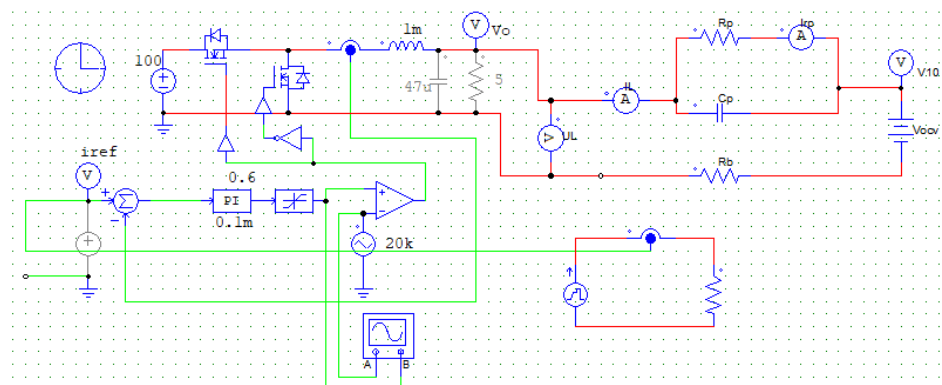
Tabela 1 – Parâmetros do modelo de Thevenin para diferentes SOC

SOC	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Uocv (V)	60,088	61,06	61,822	62,682	63,312	63,819	64,235	64,79	65,2317
Cp (F)	4563,89	4741,38	4594,92	4617,1	4472,05	4979,25	4567,9	4145,73	3076,92
Rp (mΩ)	9,86	9,28	8,27	8,88	8,05	7,23	8,1	7,96	7,15
Rb (mΩ)	24,8	24,66	24,54	24,53	24,26	24,21	24,05	24,03	23,95

Fonte: Adaptado de Jiang e Zhang (2015).

Foram realizadas 9 simulações utilizando o *software* PSIM, uma para cada valor de SOC da Tabela 1. Em cada simulação, foi associado ao circuito do modelo de Thevenin um conversor *Buck*, conforme ilustrado na Figura 4. Em cada simulação, os valores da Tabela 1 foram inseridos nos seus respectivos componentes do circuito do modelo da bateria a fim de se obter a tensão de saída do circuito.

Figura 4 – Conversor Buck associado ao circuito do modelo de Thevenin



Fonte: Autoria própria (2020).

Com o auxílio do *software* Matlab, calculou-se a tensão de saída do modelo matemático representado pela Eq. 1 e comparou-se com os resultados obtidos através da simulação do circuito equivalente. A fim de se avaliar estatisticamente a resposta do modelo sugerido com a resposta obtida a partir da Eq. 1, calcula-se o valor RMSE (Root Mean Square Error), cuja medida de erro é a mais comumente usada para aferir a qualidade do ajuste de um modelo. É dado pela Eq. 2 (ZUMEL; MOUNT, 2014).

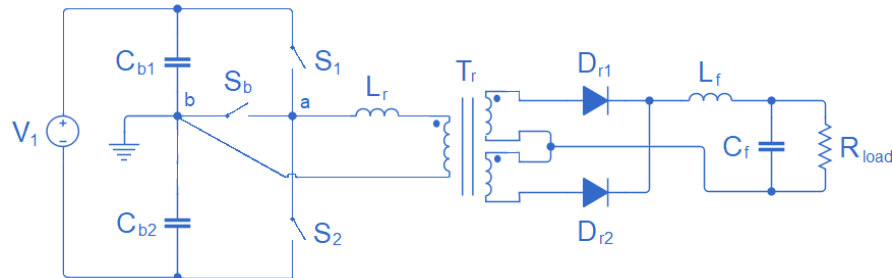
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (2)$$

em que Y_i é o valor medido, \hat{Y}_i é o valor estimado e n é o número de amostras.

A partir da modelagem da bateria, analisa-se a topologia de um conversor proposto por Bandeira Junior (2014, p. 39), levando em consideração critérios como elevada potência e alto rendimento. Por conseguinte, sugere-se associar uma bateria a esse conversor para verificar a aplicação em veículos elétricos.

O conversor, definido a partir da topologia tipo T, possui um transformador conectado aos terminais ab , modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation*), um retificador de ponto médio. Este conversor foi nomeado pela sigla TT-ZVS-PWM e está ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Conversor TT-ZVS-PWM

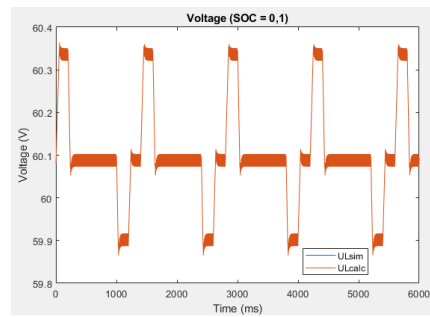


Fonte: Autoria própria (2020).

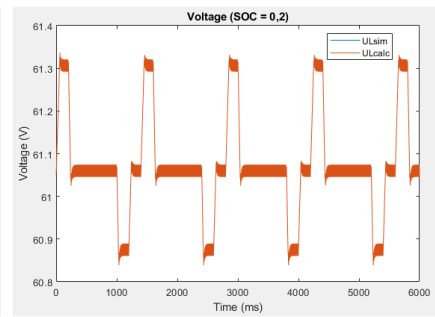
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada SOC, realizou-se uma simulação no PSIM com os seus respectivos valores para os componentes do circuito do modelo de Thevenin. Os valores do modelo obtidos através da Eq. 1 e os dados resultantes da simulação foram repassados para o *Matlab* para se comparar os resultados e analisar a confiabilidade do modelo. Dessa forma, obteve-se os gráficos da Figuras 7 de (a) a (i), com seus respectivos valores de SOC.

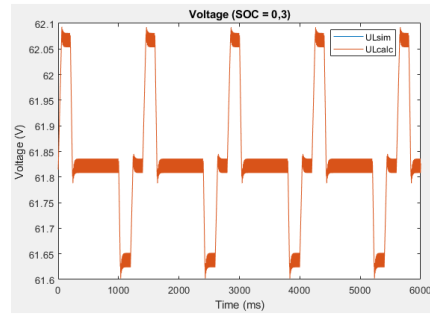
Figura 7– Tensões de saída para diferentes SOC



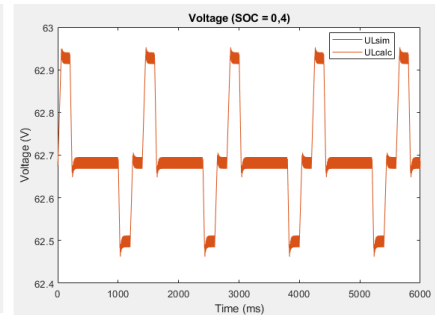
(a)



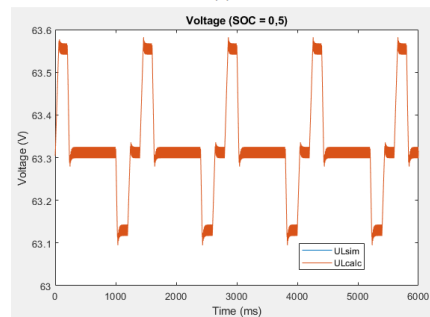
(b)



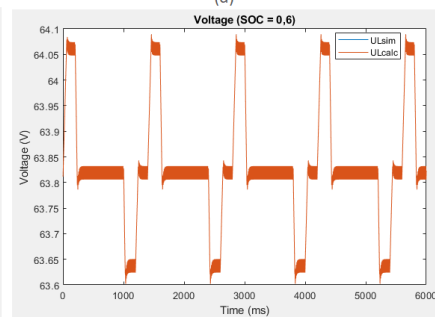
(c)



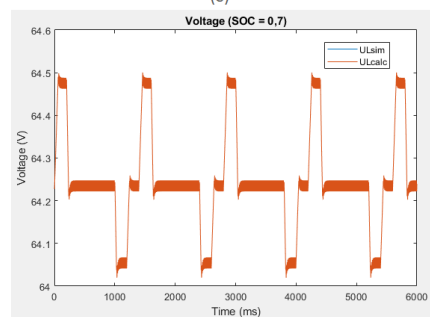
(d)



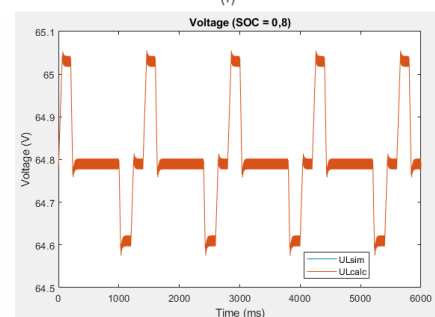
(e)



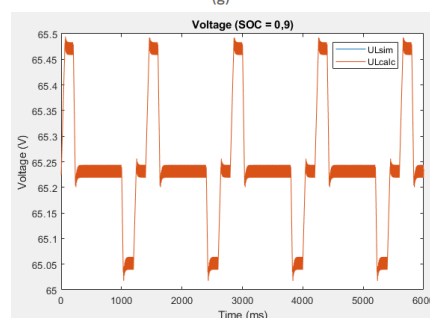
(f)



(g)



(h)



(i)

Fonte: Autoria própria (2020).

Para cada simulação, calculou-se os valores de RMSE, que geraram a Tabela 2.

Tabela 2 – Valores RMSE

SOC	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
RMSE	7,2836 μ	6,6077 μ	7,2041 μ	7,0876 μ	6,7476 μ	6,6117 μ	6,7299 μ	7,0501 μ	8,5687 μ

Fonte: A autoria própria (2020).

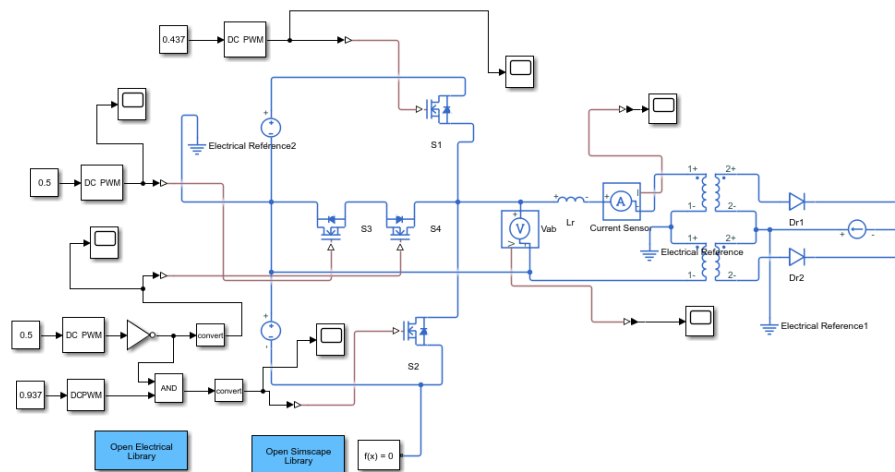
Os valores de RMSE expressam o erro médio do modelo simulado, em relação aos valores resultantes da Eq. 1. E os baixos valores obtidos mostram que o modelo apresenta estimativas adequadas para se determinar a tensão de saída da bateria.

CONCLUSÃO

A precisão do modelo de desempenho da bateria afeta diretamente a disponibilidade dos resultados da simulação do veículo elétrico e a precisão da estimativa do estado de carga da bateria. Este trabalho apresentou uma metodologia para modelagem de uma bateria através de um circuito equivalente, a qual foi verificada pelo cálculo do valor RMSE.

Uma vez modelada a bateria, visava-se associar o modelo ao conversor CC-ZVS-PWM para possível aplicações em carros elétricos, seja pelo incentivo ao uso de energia limpa, seja pelo baixo custo. Na Figura 8 observa-se o circuito implementado no *Simulink Simscape* com suas devidas substituições de componentes.

Figura 8 – Conversor CC-ZVS-PWM simulado no Simulink Simscape



Fonte: A autoria própria (2020).

No entanto, não foi possível realizar testes laboratoriais em um outro modelo de bateria para posteriormente associá-la ao conversor proposto, bem como realizar uma implementação prática de ambos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, CNPq e ao Professor Delvanei G. Bandeira Junior pela oportunidade de desenvolver um trabalho com sua orientação no Programa Institucional de Iniciação Científica (Edital PROPPG 02/2019 — PIBIC) da acadêmica Cinthia Akemi Horimi.

REFERÊNCIAS

- BANDEIRA JUNIOR, Delvanei G. **Conversor CC-CC Tipo T ZVS PWM: Análise, Projeto e Implementação**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- HE, H.; XIONG, R.; FAN, J. Evaluation of Lithium-ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach. **Energies** 2011, Beijing, n. 4, p. 582-598, 2011.
- HURIA, T. ; CERAOLO, M. ; GAZZARI, J. ; JACKEY, J. High fidelity electrical model with thermal dependence for characterization and simulation of high power lithium battery cells. *In: IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC VEHICLE CONFERENCE*, Greenville, 2012. **Anais...** Greenville: IEEE, 2012. p. 1-8.
- JIANG, J.; ZHANG, C. **Fundamentals and Applications of Lithium-ion Batteries in Electric Drive Vehicles**. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2015. 299 p. ISBN 978-1-118-41478-1.
- KHALIGH, A.; D'ANTONIO, M. Global Trends in High-Power On-Board Chargers for Electric Vehicles. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, College Park, v. 68, n. 4, p. 3306-3324, 2019.
- ONAT, N. C.; KUCUKVAR, M.; ABOUSHAQRAH, N.; JABBAR, R. How sustainable is electric mobility? A comprehensive sustainability assessment approach for the case of Qatar. **Applied Energy**, v. 250, p. 461-477, 2019.
- QIN, D.; LI, J.; WANG, T.; ZHANG, D. Modeling and Simulating a Battery for an Electric Vehicle Based on Modelica. **Automotive Innovation**, v. 2, p. 169-177, 2019.
- RUBENS, G. Z.; NOEL, L.; KESTER, J.; SOVACOOOL, B. K. The Market case for electric mobility: Investigating electric vehicles business models for mass adoption. **Energy**, v. 194, 2020.
- YILMAZ, M.; KREIN, P. T. Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure Plug-in Electric and Hybrid Vehicles. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 28, n.5, p. 2151-2169, 2013.
- ZUMEL, N.; MOUNT, J. **Practical Data Science with R**. Manning. 1. ed. Nova York: **Manning Publications Co.**, 2014. Disponível em <https://livebook.manning.com/book/practical-data-science-with-r/chapter-5/116>. Acesso em: 21 ago. 2020.