

Estudo, modelagem e simulação de uma bateria para aplicação em veículos elétricos

Study, modelling and simulation of a battery for application in electric vehicles

RESUMO

Adrielle Ortiz Gomes
adrieleq@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná,
Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Fernanda Cristina Correa
fernandacorrea@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná,
Ponta Grossa, Paraná, Brasil

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 de um sistema de armazenamento de energia híbrido 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 de uma bateria de íon-lítio. A modelagem foi feita através de um modelo eletroquímico para aplicação em sistemas de gerenciamento de energia de veículos elétricos. 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 na simulação do sistema de armazenamento de energia híbrido proposto.

PALAVRAS-CHAVE: Baterias elétricas. Modelagem. Veículos elétricos.

ABSTRACT

Electric vehicles have gained considerable space in the automotive sector, because they are an efficient way to reduce the effects that this sector has on the environment and on society as a whole. The system of an electric vehicle consists of a portable chemical or electromagnetic energy source and a traction effort, which in this case is the electric motor. This work proposes a model of a hybrid energy storage system through an association of batteries and supercapacitors in order to increase the vehicle's autonomy and reduce the wear and tear of the elements that make up the system. In addition to reproducing and simulating the modeling of a lithium-ion battery using an electrochemical model for application in energy management systems for electric vehicles. The obtained data represent satisfactorily the charging and discharging behavior of a battery in a real situation and with that, it is possible to conclude that the battery model can be used in the simulation of the proposed hybrid energy storage system.

KEYWORDS: Electric batteries. Modelling. Electric vehicles.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

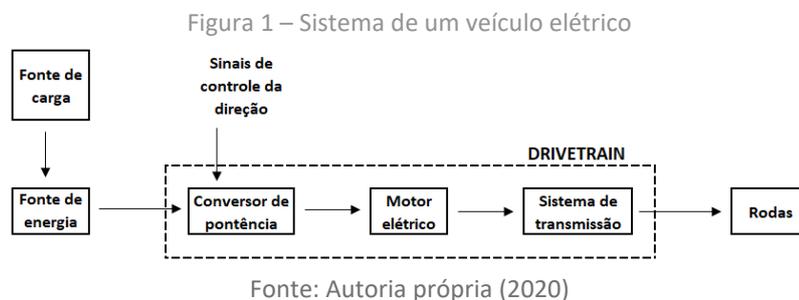
Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

A indústria automobilística é uma das maiores do mundo, além de ter grande importância na economia mundial. Nesse sentido, os veículos elétricos vêm recebendo um grande investimento, isto porque são uma forma 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 do veículo elétrico representado na Figura 1 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. 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 (HUSAIN, 2011).



Neste artigo, apresenta-se um estudo do sistema de armazenamento de energia híbridos, além da modelagem e simulação de um modelo eletroquímico de uma bateria. O objetivo é reproduzir da forma mais aproximada possível o comportamento de carga e descarga de uma bateria de íon-lítio, com a intenção de aplicá-lo em simulações de sistemas de armazenamento híbrido de energia de veículos elétricos.

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 e WILLIAMSON, 2010). O sistema de armazenamento de energia proposto por esse projeto é formado por uma associação de baterias e supercapacitores. O modelo proposto visa, através de uma forma de controle do fluxo e demanda de energia, uma maior autonomia do veículo e uma diminuição considerável no desgaste dos elementos do sistema proporcionando assim uma vida útil maior à bateria e ao supercapacitor. Se os benefícios da bateria e do supercapacitor puderem ser aproveitados juntos, os requisitos de armazenamento e fluxo de energia poderão ser atendidos (BAISDEN e EMADI, 2004).

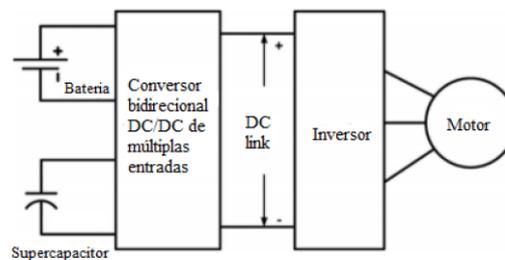
METODOLOGIA

O sistema de um veículo elétrico é composto por fonte de carga, fonte de energia, drivetrain e as rodas conforme representado na Figura 1. A escolha da fonte de energia deve levar em conta fatores como a densidade de potência e a densidade de energia, taxa de autodescarga, tempo de vida útil, entre outros (BOCKLISCH, 2015).

As baterias em geral possuem alta densidade de energia e baixa densidade de potência, isso significa que armazenam uma grande quantidade de energia e não são capazes de suprir picos de energia. Já os supercapacitores apresentam o comportamento inverso, pois possuem baixa densidade de energia e alta densidade de potência (LUKIC, 2006). Para este projeto escolheu-se o sistema de armazenamento híbrido bateria-supercapacitor. Nesse modelo, devido às características das fontes, a bateria fornece energia de forma constante e o supercapacitor supre os picos de energia (CAO e EMADI, 2012). Isso faz com que a vida útil da bateria seja prolongada e a energia seja consumida de forma mais eficiente.

Após definir as fontes de energia e o sistema de armazenamento de energia, é necessário estudar as configurações possíveis para atingir de forma mais precisa os objetivos do projeto. Dentre as topologias possíveis, as mais comuns são: conexão passivo paralela, conexão ativo paralela, conexão com múltiplos conversores e conexão com múltiplas entradas. A vantagem da topologia representada na Figura 2 é a utilização de apenas um conversor reduzindo assim o tamanho e o custo além de melhorar a forma de controle de energia (KALIGH, 2010), por isso essa topologia foi escolhida para o desenvolvimento do projeto.

Figura 2 - Conexão com múltiplas entradas



Fonte: Cao e Emadi (2012)

É muito importante que a modelagem considere o comportamento real de cada elemento. No caso da bateria, a característica do comportamento de carga e descarga e seu tempo de vida útil devem ser analisados para a obtenção de um modelo matemático mais preciso. Existem modelos clássicos capazes de representar o comportamento dinâmico de um sistema real de acordo com as leis físicas que regem esse sistema. São eles: modelo eletroquímico, modelo baseado em circuitos equivalentes e modelo comportamental e de caixa preta. 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, 2020).

Nesse projeto, o modelo base simula o comportamento da bateria de íon-lítio sob diversas taxas de descarga e temperaturas de operação e representa com uma boa exatidão as características estáticas e dinâmicas da bateria sem exigir grandes

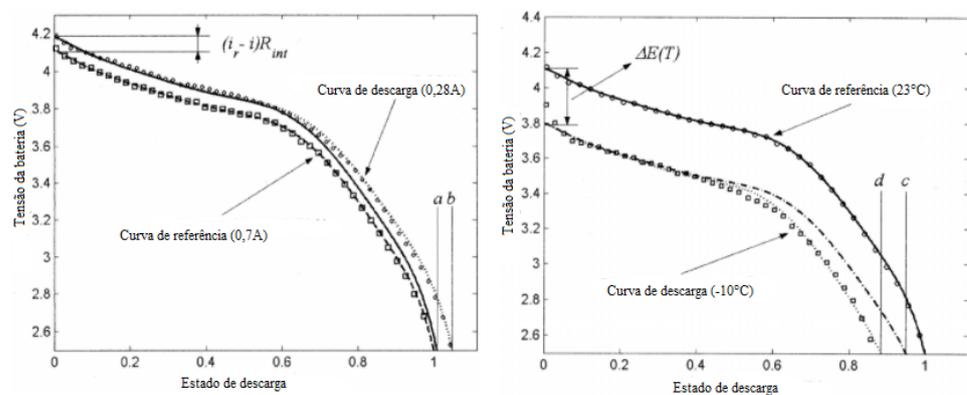
cálculos matemáticos e explorar muitos comportamentos químicos da bateria. Além de ser de fácil aplicação em vários tipos de baterias íon-lítio (GAO et al, 2002). O objetivo do modelo é representar os efeitos que as reações químicas produzem sob várias condições de operação em termos elétricos e térmicos 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 (FERREIRA, 2013).

A representação é feita através de três componentes: um potencial de equilíbrio ΔE , 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.

Para o desenvolvimento do modelo define-se uma curva referência a partir das curvas típicas de tensão e descarga da bateria. A curva de referência definida deve se aproximar ao máximo da condição de operação mediana. 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.

Através da curva de referência representada na Figura 3 encontra-se o fator $\alpha(i)$ que é definido como a dependência do estado de descarga da taxa de descarga, ou seja, é o estado de descarga em função da corrente. Também se encontra o fator $\beta(i)$ que é definido como a dependência do estado de descarga da temperatura, ou seja, é o estado de descarga em função da temperatura (GAO et al, 2002).

Figura 3 - Determinação do fator $\alpha(i)$ e $\beta(i)$ em relação à curva de referência



Fonte: Gao et al (2002)

A partir da curva de referência, dos fatores $\alpha(i)$ e $\beta(i)$ e das Eq. (1), Eq. (2), Eq. (3), Eq. (4), Eq. (5) e Eq. (6) é possível realizar a modelagem e da bateria.

$$\alpha = \frac{a}{b} \tag{1}$$

$$\beta = \frac{c}{d} \tag{2}$$

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

$$E[i(t), T(t), t] = v[i(t), T(t), t] - R_{int}i(t) \tag{4}$$

$$v[i(t), T(t), t] = \sum_{k=0}^n c_k SOD^k[i(t), T(t), t] + \Delta E(t) \quad (5)$$

$$SOD[i(t), T(t), t] = \frac{1}{Q_r} \int_0^t \alpha[i(t)] \beta[i(t)] dt \quad (6)$$

Os valores do capacitor C e da resistência R₂ 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.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com as curvas disponibilizadas pelo fabricante definiu-se a taxa de descarga de referência (*i_r*) igual a 500A e a temperatura de referência (T_r) igual a 20°C. Fazendo o ajuste polinomial à curva de referência obteve-se a Eq. (7). Através de análise de erro quadrático de ajuste ficou definido que um polinômio de quinta ordem se adaptaria melhor ao modelo (FERREIRA, 2013).

$$V(500A, 20^\circ C, x) = -3,49 \cdot 10^{-9}x^5 + 6,79 \cdot 10^{-7}x^4 - 5,14 \cdot 10^{-5}x^3 + 1,83 \cdot 10^{-3}x^2 - 3,59 \cdot 10^{-2}x + 3,74 \quad (7)$$

A partir da Eq. (7) são definidos os coeficientes que serão utilizados na Eq. (5). Na tensão de 2,5V (tensão de corte) a capacidade de descarga da célula (Q_r) é 84,1%.

$$Q_r = 84,1 \quad (8)$$

Para uma curva com taxa de descarga de 5A, o valor de α é igual a 0,84. Através das curvas típicas de descarga de uma célula é possível obter uma curva com os valores do fator α(*i*) em relação à corrente de descarga. Ao fazer um ajuste polinomial à essa curva obtém-se a Eq. (9).

É possível aplicar a Eq. (3) utilizando os dados de variação de tensão da curva de referência e da curva com taxa de descarga de 5A para descobrir o valor da resistência interna R_{int}. Para a curva de 60°C, o valor do fator β é igual a 0,9 e o valor do potencial de correção [ΔE(t)] é igual a 0,2V. O ajuste polinomial também pode ser feito para o fator β, assim obtém-se a Eq. (11). O mesmo ajuste pode ser feito para o potencial de correção [ΔE(t)] gerando a Eq. (12).

$$\alpha(i) = -2,27 \cdot 10^{-7}i^2 + 4,33 \cdot 10^{-4}i + 8,45 \cdot 10^{-1} \quad (9)$$

$$R_{int} = 6,78 \cdot 10^{-4}\Omega \quad (10)$$

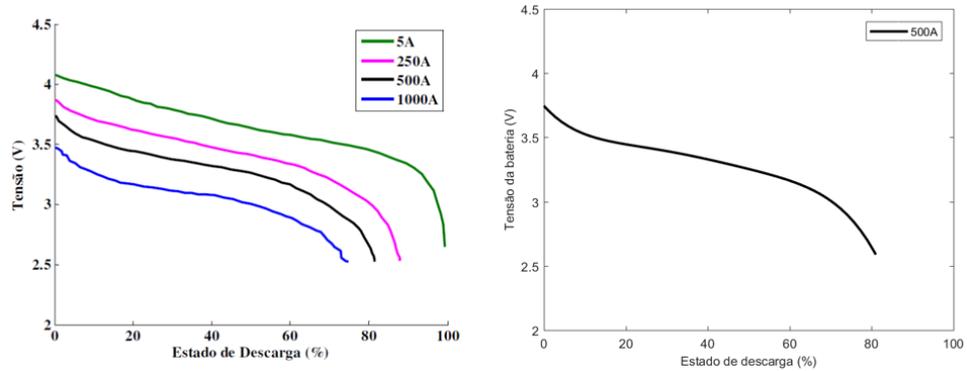
$$\beta(i) = 2,24 \cdot 10^{-6}T^3 - 1,5 \cdot 10^{-4}T^2 - 2,17 \cdot 10^{-3}T + 1,09 \quad (11)$$

$$\Delta E(t) = -1,32 \cdot 10^{-4}T^2 + 1,54 \cdot 10^{-2}T - 2,49 \cdot 10^{-1} \quad (12)$$

Para obter os valores de R₁, R₂ e C, fez-se uma simulação da descarga de duas baterias em série a um pulso de descarga em um capacitor de 1F. 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 Figura 5. Ao simular a bateria sob uma corrente constante de 500A e uma temperatura constante de 20°C, obteve-se o gráfico da Figura 4.

Figura 4 - Curvas de taxas de descargas diferentes de uma célula lítio-íon de 5Ah a uma temperatura de 20°C e curva simulada a uma descarga constante

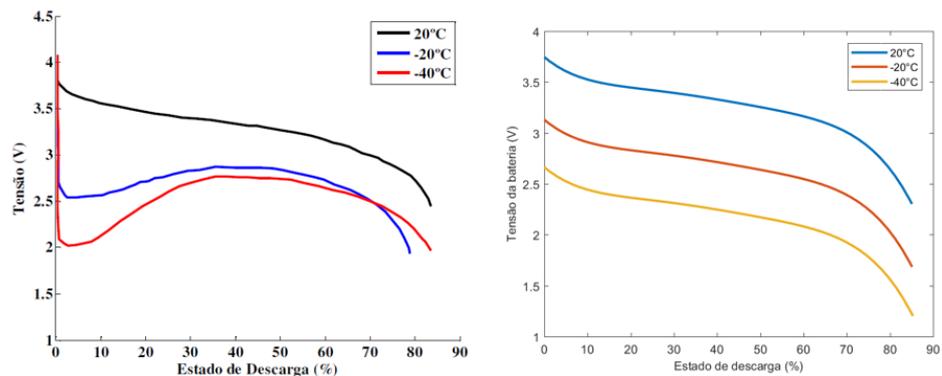


Fonte: Autoria própria (2020)

Através 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 (PEREIRA, 2016).

Comparando as curvas geradas na Figura 5, é possível perceber que o perfil de descarga para os diferentes valores de temperatura é bastante parecido com a curvas fornecidas pelo fabricante representadas na Figura 6. Também é possível verificar 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.

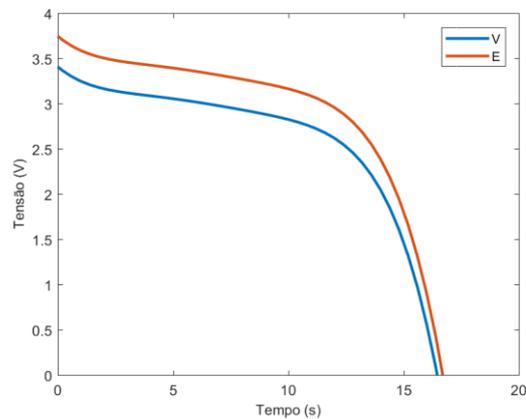
Figura 5 - Curvas de temperaturas diferentes de uma célula lítio-íon de 5Ah a uma taxa de descarga de 500A e curvas simuladas às mesmas temperaturas.



Fonte: Autoria própria (2020)

Na Figura 6 é possível observar que a tensão de saída da célula é menor do que a tensão da fonte variável interna da bateria, o que representa as perdas internas da célula.

Figura 6 - Comparação da variação de tensão de saída da célula e da fonte variável em um processo de descarga constante.



Fonte: Autoria própria (2020)

CONCLUSÃO

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. Esse modelo será utilizado em um trabalho futuro de gerenciamento de energia em um sistema de armazenamento híbrido de energia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela participação no Programa de Voluntariado em Iniciação Científica e Tecnológica (Edital PROPPG 08/2019 --- PIBIC) do acadêmico Adriele Ortiz Gomes. Agradeço grandemente à minha orientadora Prof(a). Dr(a). Fernanda Cristina Correa por sempre ter paciência, me apoiar e aceitar me orientar neste projeto.

REFERÊNCIAS

AMJADI, Z.; WILLIAMSON, S. S. Power-Electronics-Based Solutions for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Energy Storage and Management Systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 57, n. 2, p. 608–616, fev. 2010.

BOCKLISCH, T. Hybrid energy storage system for renewable applications. *Energy Procedia*, Elsevier, v. 73, p. 103–111, jun. 2015. 9th International Renewable Energy Storage Conference.

C. BAISDEN, A.; EMADI, A. ADVISOR-Based Model of a Battery and an Ultra-Capacitor Energy Source for Hybrid Electric Vehicles. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, IEEE, v. 53, n. 1, p. 199–205, jan. 2004.

CAO, J.; EMADI, A. A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 27, n. 1, p. 122–132, jan. 2012.

CARVALHO, D. S. **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. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/4758>. Acesso em: 20 jan. 2020.

CORREA, F. C.; **Desenvolvimento e análise de estratégias de gerenciamento de potência em veículo elétrico híbrido de configuração paralela**. Jul. 2013. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264351>. Acesso em: 15 fev. 2020.

FERREIRA, G. T. C. **Modelagem e Simulação de Bateria de Lítio-Íon de Aplicação Aeronáutica**. Set. 2011. 104 f. Diss. (Mestrado) – Divisão de Engenharia Aeronáutica e Aeroespacial, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP. Disponível em: http://www.bd.bibl.ita.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=3016. Acesso em: 20 jan. 2020.

GAO, L.; LIU, S.; DOUGAL, R. Dynamic lithium-ion battery model for system simulation. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, IEEE, v. 25, n. 3, p. 495–505, set. 2002.

HUSAIN, I. **Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals**. 2. ed. Boca Raton, FL, USA: Taylor e Francis, 2011. 523 p.

KHALIGH, A.; LI, Z. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, IEEE, v. 59, n. 6, p. 2806–2814, jul. 2010.

LUKIC, S. M. et al. Power Management of an Ultracapacitor/Battery Hybrid Energy Storage System in an HEV. 2006 **IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference**, IEEE, set. 2006.

PEREIRA, N. M. C. **Simulação de regimes de carga e descarga em baterias**. 2016. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superiores de Engenharia de Lisboa, Lisboa. Disponível em: <https://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/6744>. Acesso em: 15 fev. 2020.