

SIMULAÇÃO HARDWARE-IN-THE-LOOP DE BATERIAS PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS: IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Márcio do Carmo Barbosa Poncilio Rodrigues¹, João Fernando Baraky de Araújo²

Resumo: Neste trabalho são apresentados os passos para a simulação em *hardware-in-the-loop* de um dos elementos do sistema de propulsão de um veículo elétrico: a bateria. São abordados o desenvolvimento do modelo matemático discretizado de baterias para aplicações veiculares e detalhes da implementação da simulação em tempo real. A validação do modelo para simulação em tempo real *hardware-in-the-loop* desenvolvido é realizada experimentalmente por meio da comparação de resultados com teste (resposta ao degrau de carga) realizado em elemento real.

Palavras-chave: Bateria, Simulação, *Hardware-in-the-loop*, Tempo Real.

INTRODUÇÃO

Com as evoluções tecnológicas das últimas décadas, observou-se uma mudança dos aparelhos eletrônicos, de modo a tornarem-se cada vez menores e portáteis, demandando uma forma eficiente embarcada de armazenamento de energia para sua alimentação.

Utilizada em vários portes, a bateria eletroquímica (ou simplesmente, bateria) ainda é a principal forma de armazenamento de energia elétrica (BOCCHI; FERRACIN; BIAGGIO, 2000), utilizada não só em eletrônicos portáteis de pequeno tamanho, como também veículos elétricos, *no-breaks*, dentre outros, criando a necessidade de estudos e projetos voltados ao seu estudo.

Para atingir menores custos no nível do projeto, a simulação apresenta-se como alternativa viável, substituindo a necessidade da compra da bateria e permitindo testes que comprometeriam a vida útil do elemento real, devido às condições extremas ou alta taxa de repetição.

Dentre os métodos de simulação, o *hardware-in-the-loop* (HIL) mostra-

se eficiente, especialmente nas etapas de protótipos, embarcando o modelo do sistema em um *hardware* e comunicando-se em tempo real com elementos físicos do sistema de maneira direta, permitindo maior agilidade na execução do projeto (OLIVEIRA et al., 2010).

Já com várias plataformas comerciais de HIL no mercado, busca-se neste trabalho a construção de uma alternativa de baixo custo que evitará a necessidade, inicialmente, da aquisição das baterias em futuros protótipos e estudos no Campus Juiz de Fora do IF Sudeste MG.

MATERIAIS E MÉTODOS:

Para a simulação em tempo real HIL, há a necessidade de identificar os modelos matemáticos do sistema, a bateria neste caso, levando-se em conta as características do sistema cujo o acompanhamento durante a simulação em tempo real é de interesse, para então embarcar os modelos no hardware.

1 IF Sudeste MG – Campus Juiz de Fora - marcio.carmo@ifsudestemg.edu.br

2 Bolsista FAPEMIG IF Sudeste MG - Campus Juiz de Fora - jfbaraky@gmail.com

MODELAGEM MATEMÁTICA

A primeira equação a ser considerada na modelagem da bateria é o seu estado de carga (SoC, do inglês *state of charge*), cujo o objetivo é mensurar a porcentagem de energia armazenada, em determinado instante de tempo (HU et al., 2012). Visto que esta definição é extremamente complexa, é possível estimar o estado de carga através da curva de descarga da bateria, observando a queda na tensão de saída, sendo simplificada pela equação (1), onde $n = kT$ denota a n -ésima amostra considerada (amostra atual), T é o período de amostragem e $k \in N$

$$SoC(n) = SoC(n-1) - \frac{V_{Bt}(n) \cdot I_{Bt}(n) \cdot \Delta t}{3600 \cdot Q_{Bt} \cdot V_n} \quad (1)$$

Conhecendo o valor de SoC em um instante, torna-se possível estimar o próximo estado de carga, por meio de V_{Bt} e I_{Bt} , que são a tensão terminal e a corrente drenada da bateria, respectivamente, ambas referentes ao instante de tempo (amostra) atual, além da capacidade (Q_{Bt} , dada em Ah) e tensão (V_n) nominais da bateria. Na equação (1) (FERREIRA, 2007), Δt representa o passo de simulação.

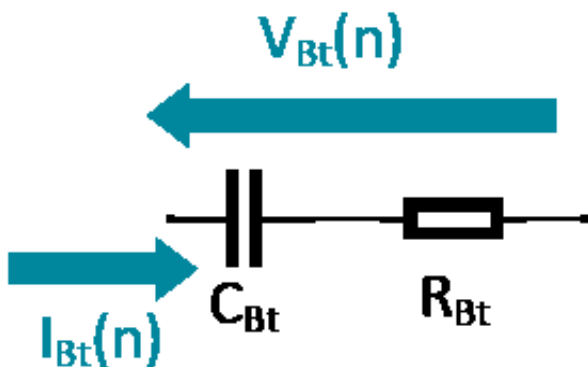


Figura 1 – Modelo de bateria considerado.

Para a modelagem do comportamento dinâmico da bateria, utilizou-se um circuito equivalente simplificado, de modo a manter as características de armazenamento de energia e descarga (conforme (FERREIRA, 2007)). Este circuito equivalente, exibido na Figura 1, é formado por um capacitor (C_{Bt}) associado em série com um resistor, que representam a

carga armazenada na bateria e sua resistência interna (R_{Bt}), respectivamente. A operação do circuito é definida de modo que o capacitor só opere no intervalo de tensão estabelecido pelo fabricante da bateria, limitado por V_i (tensão para $SoC = 100\%$) e V_f (tensão para $SoC = 0\%$).

O valor de C_{Bt} pode ser encontrado pela equação (2) (FERREIRA, 2007).

$$C_{Bt} = \frac{7200 \cdot Q_{Bt} \cdot V_n}{|V_i^2 - V_f^2|} \quad (2)$$

Observando que a corrente da bateria (Figura 1) é a mesma que flui através do capacitor C_{Bt} , esta pode ser definida pela equação (3). Para a realização da simulação em tempo real, (3) foi discretizada utilizando o método de Euler regressivo. Com isso, tornou-se possível a representação do capacitor C_{Bt} por seu modelo de acompanhamento, composto por uma fonte de tensão controlada em série com uma resistência (HERBST; LEVITT, 2008), como ilustrado na Figura 2.

$$I_{Bt} = I_{C_{Bt}} = C_{Bt} \frac{dV_{C_{Bt}}}{dt} \quad (3)$$

A partir do circuito equivalente da Figura 2, pode-se descrever a corrente fornecida pela bateria, $I_{Bt} = I_{C_{Bt}}$, pela equação (4), onde $V_{C_{Bt}}$ é o valor da tensão sobre C_{Bt} .

$$I_{Bt} = I_{C_{Bt}}(n) = \frac{V_{C_{Bt}}(n) - V_{C_{Bt}}(n-1)}{R_{C_{Bt}}}, \text{ sendo } R_{C_{Bt}} = \frac{\Delta t}{C_{Bt}} \quad (4)$$

A tensão no capacitor no instante atual é obtida a partir do seu valor referente à amostra anterior, dada por (5), que representa o modelo de acompanhamento do capacitor:

$$V_{C_{Bt}}(n) = V_{C_{Bt}}(n-1) + I_{Bt}(n) \cdot R_{C_{Bt}} \quad (5)$$

Conhecendo o valor da tensão no capacitor C_{Bt} e a corrente fornecida pela bateria, torna-se possível obter o valor

da tensão terminal da bateria em cada instante, conforme descrito pela equação (6). Assim, descreve-se o comportamento da bateria para a simulação em tempo real.

$$V_{Bt}(n) = V_{C_{Bt}}(n) + I_{Bt}(n) \cdot R_{Bt} \quad (6)$$

SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL

Para a validação do modelo desenvolvido, foi utilizada a bateria de íons de lítio NCR18650A, cujos parâmetros são exibidos na Tabela 1, disponível em laboratório, de modo a comparar o comportamento de uma bateria real com o observado na simulação em tempo real.

Uma vez conhecidos o modelo e os parâmetros a serem considerados, a simulação em tempo real foi implementada utilizando o controlador digital de sinais (DSC, do inglês *digital signal controller*) TMS320F28069 (fabricado pela Texas Instruments), cujo módulo do tipo *control stick* é exibido na Figura 3. O passo de simulação foi definido neste dispositivo através da implementação de uma interrupção periódica. As variáveis de interesse foram externadas por

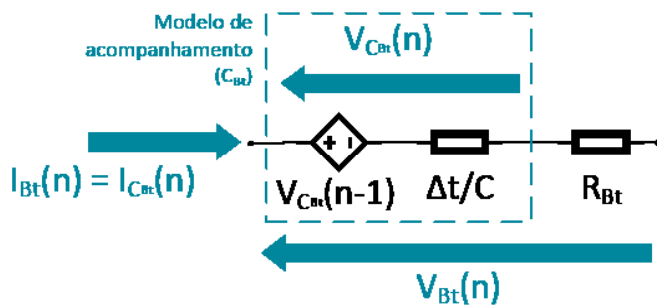


Figura 2 – Circuito equivalente utilizado na simulação em tempo real do banco de baterias.

Tabela 1 – Parâmetros da bateria NCR18650A (PANASONIC, 2012)

Parâmetros	Valores
Capacidade Nominal (Q_{Bt})	3,1Ah
Tensão Nominal de descarga (V_n)	3,8V
Tensão com carga em 100% (V_f)	4,2V
Tensão com carga em 0% (V_i)	3,3V
Resistência Interna (R_{Bt})	40mΩ

meio de uma saída analógica (sinal PWM associado a um filtro passa-baixas) de modo a serem observadas em osciloscópio.

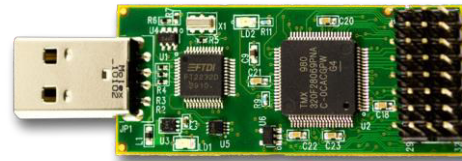


Figura 3 – TMS320F28069 control stick.

RESULTADOS

Antes de submeter o modelo implementado a testes com simulação em tempo real, foi realizada a verificação do modelo implementado com auxílio do software MatLab. Ao submeter o modelo da bateria considerada a um ciclo de descarga com corrente constante de 3,1 A, ou seja, "1 C" (descarga completa em uma hora), foi possível avaliar a variação da tensão terminal simulada em relação ao estado de carga da bateria. Como pode ser visto na Figura 4, a tensão terminal da bateria reduz a medida que seu estado de carga diminui, obedecendo o intervalo V_i a V_f , estipulado pelo fabricante. Além disso, conforme exibido na Figura 5, o tempo de descarga obtido na simulação *off-line* foi muito próximo ao previsto pela capacidade nominal fornecida pelo fabricante, demorando 3651 segundos (1,0142 hora) para a descarga completa, validando assim o modelo de armazenamento.

Em outro teste, agora utilizando simulação em tempo real do modelo desenvolvido, embarcado no DSC, foi realizada uma variação em degrau da carga (corrente) na bateria. Partindo da operação a vazio, foi realizada a entrada de uma carga resistiva de 150 Ω após certo período de funcionamento, conforme exibido na Figura 6. Para simular o degrau de carga na simulação, foi definido a cada instante o valor de I_{Bt} de acordo com o valor de V_{Bt} e a resistência da malha, pela lei de Ohm. A Figura 6 apresenta também o comportamento da bateria considerada (NCR18650A) em teste realizado em laboratório nas mesmas condições descritas, possibilitando comparar as respostas obtidas e validar experimentalmente o modelo desenvolvido.

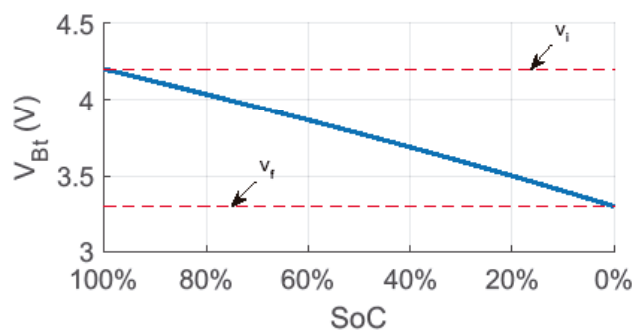


Figura 4 – Tensão terminal (com seus limites) em função do estado de carga.

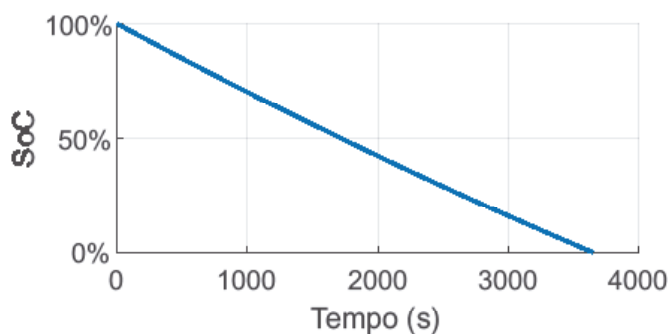


Figura 5 – Descarga completa da bateria.

A diferença dos valores de regime permanente é atribuída ao filtro passa-baixas utilizado para possibilitar a leitura de maneira analógica dos dados relevantes na simulação, vistos em osciloscópio através de uma conversão digital/analógica da razão cíclica de um PWM de alta frequência.

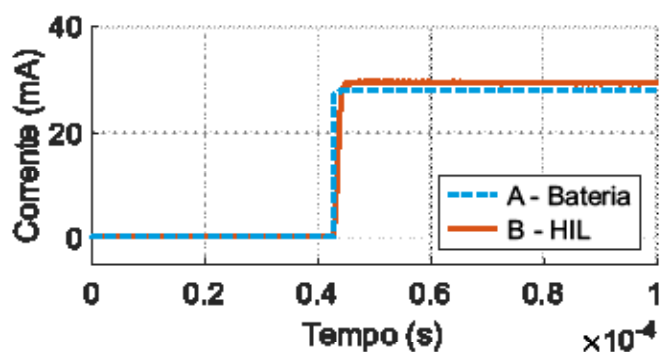


Figura 6 – Resposta ao degrau de carga obtida em teste realizado com bateria (tracejado azul) e em simulação em tempo real (linha vermelha).

DISCUSSÃO

Observando os resultados apresentados, tornou-se possível a validação do modelo matemático desen-

volvido, obtendo respostas dentro do esperado para as tensões V_i e V_f (durante a simulação da descarga da bateria considerada), bem como tempo de descarga muito próximo do fornecido pelo fabricante.

O modelo matemático desenvolvido também apresentou comportamento adequado quando embarcado no DSC, durante a simulação em tempo real de degrau de carga (corrente), fornecendo resposta transitória semelhante à da bateria considerada, bem como apresentando, em regime permanente, valores simulados próximos aos reais.

Além disso, o DSC utilizado mostrou-se viável para a simulação em tempo real realizada, possibilitando sua realização com desempenho satisfatório, validando sua utilização em futuros projetos. Cabe ressaltar que, com a abordagem adotada e DSC empregado na implementação experimental, é necessário o uso de um filtro passa-baixas externo (associado ao módulo PWM do dispositivo) para possibilitar a conversão D/A e a visualização dos resultados com auxílio de osciloscópio. Tal característica, como discutido na seção anterior, mesmo que de forma pouco significativa, influencia na resposta dinâmica do sistema simulado em tempo real. Em simulações com dinâmicas mais lentas, como o caso aqui abordado, os erros gerados pelo atraso do filtro passa-baixas não serão observáveis. Caso exista a necessidade do acompanhamento de dinâmicas mais rápidas, recomenda-se externar os dados de outra maneira, o uso de outra configuração de conversor A/D que, inclusive, poderia ser apresentado como módulo embarcado na plataforma de processamento digital utilizada.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresen-

tadas todas etapas da simulação em tempo real “*hardware-in-the-loop*” de baterias, visando aplicações em veículos elétricos. Foram discutidos o desenvolvimento do modelo matemático de baterias, a implementação em DSC e a validação experimental, por meio de comparação com o comportamento com uma bateria real.

Com os resultados apresentados, os procedimentos descritos mostram-se viáveis para futuras utilizações em projetos e pesquisas e o TMS320F28069 apresenta-se como

uma opção de baixo custo para utilização nas demais simulações em HIL. Como continuidade deste trabalho, o modelo da bateria aqui apresentado será utilizado na simulação em tempo real HIL do sistema de gestão de energia de um veículo elétrico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG e ao IF Sudeste MG pelo suporte financeiro ao desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

Abstract: This paper presents the development steps of a Hardware-in-the-Loop simulation of one of the electric vehicle propulsion system’s elements: the battery. The development of a discrete-time mathematical model for electric vehicles batteries and the implementation of a real-time hardware-in-the-loop simulation system are described. Experimental validation of the proposed model is conducted by means of the comparison of real-time simulated results for a load step response to a test conducted regarding a real battery.

Keywords: Battery, Simulation, Hardware-in-the-loop, Real-time

BIBLIOGRAFIA

BOCCHI, N.; FERRACIN, L. C.; BIAGGIO, S. R. **Pilhas e baterias: Funcionamento e impacto ambiental**. Sociedade Brasileira de Química, 2000.

FERREIRA, A. A. **Sistema supervisorio de gestão de múltiplas fontes de suprimento para aplicações em veículos elétricos**. Universidade Federal de Campinas, S. Paulo, 2007. Tese de Doutorado.

HERBST, S.; LEVITT, A. **Companion models for basic non-linear and transient devices**. 2008. Quebec.

HU, G. et al. **Modeling, control and implementation of a lithium-ion battery charger in electric vehicle application**. Electrical Review (Przeglad Elektrotechniczny), v. 88, n. 1b, p. 255–258, 2012.

OLIVEIRA, A. D. et al. **Middleware-in-the-loop como uma técnica de simulação flexível e de baixo custo**. In: 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON 2010). [S.l.: s.n.], 2010.

PANASONIC. **Lithium Ion NCR18650A**. 13.11 R1. [S.l.], 2012.