

SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL “*HARDWARE-IN-THE-LOOP*” DE ELEMENTOS DO SISTEMA DE PROPULSÃO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO

J. F. B. ARAÚJO*, H. M. PEDROSA*, P. G. BARBOSA†, M. C. B. P. RODRIGUES*

**Grupo de Sistemas Eletrônicos, Automação e Robótica
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais
Juiz de Fora, MG, Brasil*

†*Núcleo de Automação e Eletrônica de Potência
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora, MG, Brasil*

Emails: jfbaraky@gmail.com, hobertyeng@hotmail.com, pedro.gomes@ufjf.edu.br,
marcio.carmo@ifsudestemg.edu.br

Abstract— This paper presents the development of a hardware-in-the-loop real-time simulation system, dedicated to evaluate the operation of an electric vehicle (EV) powertrain elements. Mathematical models of on-board battery pack and dc-to-dc converter, responsible for the EV power management, are described and validated. Additionally, a simplified electric motor drive system model is also presented. The proposed system is tested by means of the real-time simulation of the operation of an EV under a standard drive cycle.

Keywords— electric vehicles, hardware-in-the-loop, real-time simulation.

Resumo— O desenvolvimento de um sistema de simulação em tempo real “*hardware-in-the-loop*” dos elementos do sistema de propulsão de um veículo elétrico (VE) é apresentado neste trabalho. São descritos e validados os modelos matemáticos do banco de baterias embarcado e do conversor CC-CC, responsável pela gestão de energia do VE, bem como apresentado um modelo simplificado do sistema de acionamento eletrônico do veículo. Como teste do sistema desenvolvido, é apresentada a simulação em tempo real da operação de um VE operando em ciclo de condução padronizado.

Palavras-chave— veículos elétricos, *hardware-in-the-loop*, simulação em tempo real.

1 Introdução

Um veículo elétrico (VE) pode ser definido como aquele cuja propulsão é realizada, total ou parcialmente, por meio de um motor elétrico (Ferdowsi, 2007). Por utilizar energia elétrica, armazenada a bordo em baterias eletroquímicas (ou simplesmente “baterias”), um veículo de propulsão puramente elétrica não apresenta emissão de gases de efeito estufa (GEE). Já um VE híbrido (VEH), cujo sistema de propulsão combina o uso de motor elétrico e motor a combustão interna, pode chegar a apresentar uma redução de 50 a 90% nas emissões de GEE (Zorpette, 2004).

Em função dos benefícios relacionados às questões ambientais e do emergente mercado, encontra-se na pesquisa relacionada a veículos elétricos um promissor campo para desenvolvimento e inovação tecnológica. Os sistemas de propulsão elétrica e de armazenamento de energia em tais veículos vem sendo objeto de pesquisa de empresas e centros acadêmicos no mundo todo. Entretanto, o alto custo de desenvolvimento de modelos em escala real (ou mesmo em escala reduzida) restringe a atuação de grupos de pesquisa de universidades e institutos de tecnologia.

Uma alternativa, de custo reduzido (Oliveira et al., 2010), para estudo e desenvolvimento de tecnologia na área de VEs é o uso de simulação em tempo real “*hardware-in-the-loop*” (HIL) dos

elementos contidos no sistema de propulsão do veículo. Nesta, parte do sistema é simulada em tempo real e o *hardware* específico a ser avaliado é conectado a este sistema de simulação através de várias interfaces de entrada/saída como conversores analógicos/digitais (ADC), digitais/analógicos (DAC) e outros equipamentos de condicionamento de sinais (Maclay, 1997; Oliveira et al., 2010).

A simulação em tempo real é mais conveniente que a simulação computacional tradicional (*off-line*) para análise da operação do sistema de propulsão de um VE em função das diferentes dinâmicas associadas aos seus elementos, o que implica em longo tempo de duração para execução uma simulação tradicional. Encontra-se na literatura técnica diversos trabalhos que utilizam tal abordagem (Kokenyesi and Varjasi, 2013; Hu et al., 2009). Entretanto, tais trabalhos utilizam plataformas comerciais de simulação em tempo real (cujo custo de aquisição é relativamente alto) ou não trazem detalhamento dos sistemas implementados pelos autores e utilizados nas simulações em tempo real.

Já neste trabalho, é apresentado, de forma detalhada, o desenvolvimento de um sistema de simulação em tempo real “*hardware-in-the-loop*” dos elementos do sistema de propulsão de um VE. Assim, busca-se fornecer base para reprodução deste sistema de simulação por demais membros da comunidade científica, contribuindo para a dissemi-

nação de conhecimento e desenvolvimento de tecnologia na área de veículos elétricos. Na Seção 2 é apresentado a visão geral do sistema proposto. O desenvolvimento dos modelos matemáticos utilizados é abordado na Seção 3, enquanto testes baseados em ciclo de condução padronizado são apresentados como resultados na Seção 4. Esta, é seguida das conclusões e referências bibliográficas deste trabalho.

2 Descrição do Sistema Proposto

Apesar da diversidade de modelos de VEs e VEHs existentes, o sistema de propulsão elétrica, responsável pela interface entre a(s) fonte(s) de energia a bordo do veículo e suas rodas (ou, nos casos onde os motores não são diretamente acoplados às rodas, aos acoplamentos mecânicos e transmissão), é basicamente composto por um sistema de gestão de energia dessa(s) fonte(s) e acionamento eletrônico, conforme representado na Figura 1. Os dois elementos principais deste sistema são compostos por conversores estáticos e seus respectivos sistemas de controle, medição e proteção, sendo geralmente interconectados por meio de um barramento CC. O acionamento eletrônico é realizado por meio de um circuito conversor CC-CA e o sistema de gestão de energia é composto por um conversor CC-CC bidirecional em corrente (Ehsani et al., 2010).

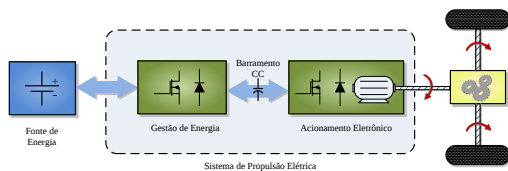


Figura 1: Sistema de propulsão elétrica de um veículo elétrico.

O sistema de simulação HIL apresentado neste trabalho, representado na Figura 2, foi dividido em quatro elementos: “Banco de Baterias”, “Conversor CC-CC”, “AECM”(Acionamento Eletrônico / Carga Mecânica) e “Controle”. Os três primeiros elementos reproduzem, por meio de simulação em tempo real, o comportamento da fonte de energia embarcada e do sistema de propulsão de um VE. Deste modo, é possível implementar estratégias de controle e gestão de energia, submetendo o sistema de controle (bloco “Controle” da Figura 2) a condições semelhantes às encontradas em condições reais. Cada um destes elementos foi implementado em um controlador digital de sinais (DSC, do inglês *digital signal controller*) independente, visando a modularidade do sistema. A comunicação entre os elementos da simulação em tempo real, excetuando-se o bloco “Controle”, é realizada de forma digital, por meio dos módulos de PWM (*pulse-width modulation*) e de captura de

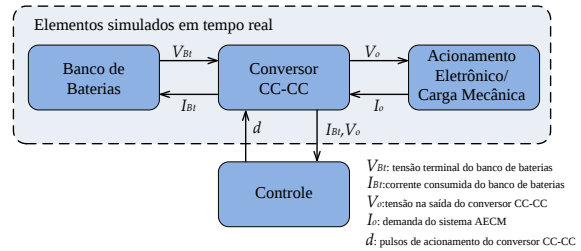


Figura 2: Diagrama funcional do sistema de simulação em tempo real HIL proposto.

cada DSC. A leitura das variáveis necessárias para a estratégia de controle implementada é realizada pelo módulo de controle do sistema de simulação HIL por meio da aquisição de sinais analógicos, externados da planta simulada utilizando DAC. O sistema de controle atua no sistema de gestão de energia acionando o conversor estático simulado em tempo real por meio de sinal PWM. Nas próximas seções, descreve-se a implementação de cada um destes blocos.

3 Modelo Matemático dos Elementos Associados ao Sistema de Propulsão de um VE

3.1 Modelo Matemático do Banco de Baterias

O primeiro parâmetro a ser considerado na modelagem do banco de baterias é o seu estado de carga (SoC, do inglês *state of charge*), que quantifica o nível de energia armazenada em determinado instante de tempo. Uma vez que a definição da quantidade exata de energia armazenada é extremamente complexa, é possível, através do perfil de sua descarga, estimar seu estado de carga em função da sua tensão de saída. Sabendo o estado de carga atual, torna-se possível estimar o próximo estado de carga através da equação (3.1.1), representada no tempo discreto, onde $n = kT$ denota a n -ésima amostra considerada (amostra atual), sendo T o período de amostragem e $k \in \mathbb{N}$.

$$SoC(n) = SoC(n-1) - \frac{V_{Bt}(n) \cdot I_{Bt}(n) \cdot \Delta t}{3600 \cdot Q_{Bt} \cdot V_{nom}}, \quad (3.1.1)$$

sendo V_{Bt} a tensão terminal e a I_{Bt} a corrente drenada da bateria no instante de tempo (amostra) atual, V_{nom} a tensão nominal de descarga da bateria e Q_{Bt} sua capacidade nominal (dada em Ah).

O comportamento dinâmico da bateria foi reproduzido por um circuito equivalente, conforme descrito em (Ferreira, 2007). Este, é composto por um capacitor associado em série a um resistor, como pode ser visto na Figura 3. Este capacitor é modelado de forma a operar com tensões definidas no intervalo de operação estabelecido pelo fabricante da bateria, ou seja, de modo a trabalhar com sua tensão terminal entre V_f e V_i (ten-

sões para $SoC = 100\%$ e $SoC = 0\%$, respectivamente). O valor de R_{Bt} , resistência interna da bateria (ou resistência interna equivalente do banco de baterias), é dado pelo seu fabricante. Já o valor C_{Bt} deve ser calculado pela equação (3.1.2) (Ferreira, 2007).

$$C_{Bt} = \frac{7200 \cdot Q_{Bt} \cdot V_n}{|V_i^2 - V_f^2|} \quad (3.1.2)$$

A corrente do capacitor do circuito da Figura 3, $I_{C_{Bt}} = I_{Bt}$, é definida pela equação (3.1.3). Para realização da simulação da operação deste circuito, foi realizada a discretização desta equação pelo método de Euler regressivo (Herbst and Levitt, 2008), que passa a ser descrita por (3.1.4), onde Δt e $V_{C_{Bt}}$ denotam, respectivamente, o passo de simulação e a tensão sobre C_{Bt} . Esta equação representa o modelo de acompanhamento de C_{Bt} , como representado na Figura 4, que mostra o circuito equivalente utilizado na simulação em tempo real do banco de baterias embarcado no VE. Deste circuito, são obtidas as equações (3.1.5) e (3.1.6), utilizadas no sistema de simulação HIL proposto.

$$I_{Bt} = C_{Bt} \frac{dV_{C_{Bt}}}{dt} \quad (3.1.3)$$

$$I_{Bt}(n) = \frac{V_{C_{Bt}}(n) - V_{C_{Bt}}(n-1)}{R_{C_{Bt}}}, \quad (3.1.4)$$

$$\text{com } R_{C_{Bt}} = \frac{\Delta t}{C_{Bt}}.$$

$$V_{C_{Bt}}(n) = V_{C_{Bt}}(n-1) + I_{Bt}(n) \cdot R_{C_{Bt}}. \quad (3.1.5)$$

$$V_{Bt}(n) = V_{C_{Bt}}(n) - I_{Bt}(n) \cdot R_{Bt}. \quad (3.1.6)$$

Para validar o modelo desenvolvido, foi realizada a comparação da simulação em tempo real e do comportamento de uma bateria de íons de lítio submetida a um degrau de carga. A bateria considerada neste teste foi a NCR18650A, disponível em laboratório e que apresenta as seguintes especificações nominais: $Q_{Bt} = 3,1$ Ah, $V_{Bt} = 3,8$ V, $R_{Bt} = 40$ mΩ, $V_i = 4,2$ V e $V_f = 3,3$ V. A simulação em tempo real foi implementada utilizando o DSC TMS320F28069 (Texas Instruments), em que cada passo de simulação teve um período definido por uma interrupção periódica e as variáveis de interesse foram externadas por meio de DAC (PWM associado a filtro passa-baixas) e medidas

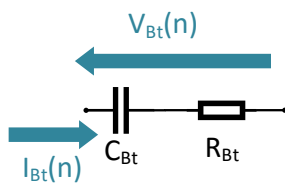


Figura 3: Modelo de bateria considerado.

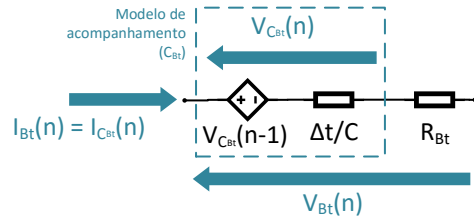


Figura 4: Circuito equivalente utilizado na simulação em tempo real do banco de baterias.

em osciloscópio. A Figura 5 mostra a comparação do resultado experimental (traço azul) e simulado em tempo real (traço vermelho) para uma variação de carga em degrau, partindo da operação a vazio à entrada de carga resistiva de $150\ \Omega$ (no instante de tempo $0,5 \cdot 10^{-4}$ s). A sutil diferença na dinâmica da resposta observada está associada, principalmente, ao filtro passa-baixas utilizado na implementação do DAC por meio de PWM.

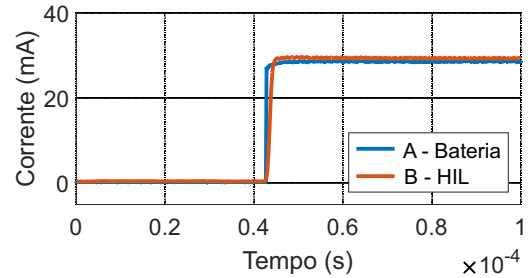


Figura 5: Resposta ao degrau de carga obtida em teste realizado com bateria (traço azul) e em simulação em tempo real (traço vermelho).

3.2 Modelo do Conversor CC-CC

Neste trabalho foi considerado o uso de um conversor CC-CC do tipo buck/boost bidirecional em corrente para operação na gestão de energia do VE. Esta topologia de conversor, cujo circuito é exibido na Figura 6, é utilizado para tal função em VEs comerciais e em desenvolvimentos acadêmicos (Ferreira, 2007; Rodrigues, 2014). Na modelagem deste conversor CC-CC foi considerado que o banco de baterias o alimenta por meio de uma tensão CC e constante. O circuito “AECM” foi representado por uma fonte de corrente CC, que retira determinada potência da saída do conversor CC-CC.

Para a simulação em tempo real, assim como feito com a bateria, os elementos armazenadores de energia foram substituídos pelos seus modelos de acompanhamento (Herbst and Levitt, 2008). Para o caso do capacitor, foi considerado o mesmo tipo de modelo de acompanhamento utilizado para a simulação do banco de baterias. Já para o indutor, foi utilizada representação com o modelo composto por uma fonte de corrente em paralelo

Tabela 1: Etapas de operação - Conversor CC-CC

D	Interruptores	Circuito equivalente
"1"	S_0 : bloqueado S_1 : em condução	Figura 7
"0"	S_0 : em condução S_1 : bloqueado	Figura 8

com uma resistência no valor de $\frac{L}{\Delta t}$, sendo L o valor da indutância e Δt o valor do período da simulação (como destacado nas Figuras 7 e 8).

O conversor CC-CC foi simulado em tempo real por meio da avaliação das variáveis de interesse ($I_L(n)$, $V_C(n)$ e $V_O(n)$), em cada uma de suas etapas de operação, definidas em função dos estados de condução dos interruptores S_1 e S_2 (que operam de forma complementar). Tais interruptores e os diodos do circuito foram considerados como ideais. O sinal de acionamento do conversor CC-CC, D , gerado pela saída PWM do DSC responsável pelo controle do sistema (elemento a ser testado na simulação HIL), realiza a comutação dos estados de condução destes interruptores e, portanto, do circuito equivalente a ser avaliado, conforme descrito na Tabela 1.

Quando S_0 está bloqueado e S_1 em condução ($D = 1$), o circuito a ser avaliado é o apresentada na Figura 7. Neste caso, é realizada a análise de duas malhas independentes, por meio da solução das equações (3.2.1) a (3.2.3).

$$I_L(n) = \frac{V_{Bt}(n) + \frac{L}{\Delta t} I_L(n-1)}{\frac{L}{\Delta t} + R_L} \quad (3.2.1)$$

$$V_C(n) = V_C(n-1) - \frac{\Delta t}{C} I_O \quad (3.2.2)$$

$$V_O(n) = V_C(n) - R_C I_O \quad (3.2.3)$$

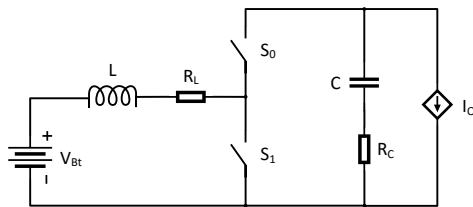


Figura 6: Conversor Buck/Boost bidirecional

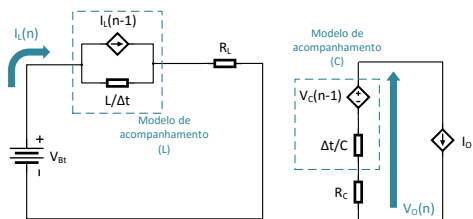


Figura 7: Circuito equivalente para $D = 1$.

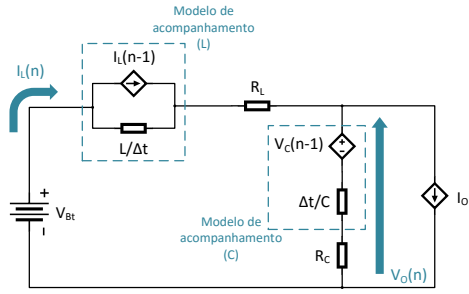


Figura 8: Circuito equivalente para $D = 0$.

Já quando S_0 está em condução e S_1 bloqueada ($D = 0$), o circuito equivalente a ser analisado passa a ser o apresentado na Figura 8. Neste caso, o conjunto das equações (3.2.4) a (3.2.6) deve ser avaliado.

$$I_L(n) = \frac{V_{Bt}(n) + \frac{L}{\Delta t} I_L(n-1) - V_C(n-1) + I_O (\frac{\Delta t}{C} + R_C)}{\frac{L}{\Delta t} + R_L + \frac{\Delta t}{C} + R_C} \quad (3.2.4)$$

$$V_C(n) = V_C(n-1) - \frac{\Delta t}{C} [I_L(n) - I_O] \quad (3.2.5)$$

$$V_O(n) = V_C(n) - R_C [I_L(n) - I_O] \quad (3.2.6)$$

Para ambos os modelos, foi aplicada a restrição $V_C(n) \geq 0$, em função das características do conversor CC-CC considerado.

A fim de validar o modelo do conversor, é exibida, na Figura 9, a comparação entre a simulação do circuito, utilizando os parâmetros da Tabela 2, realizada com o *software* PSIM e sua simulação em tempo real, implementada em um DSC TMS320F28069. Nesta comparação, em que o conversor CC-CC foi acionado com razão cíclica fixa de 40%, pode-se observar que ambas simulações apresentaram resultados muito próximos, apresentando grande conformidade durante o período transitório, bem como em regime permanente. Os parâmetros utilizados nesta simulação (Tabela 2) são baseados nos parâmetros de um *kart cross* elétrico apresentados em (Rodrigues, 2014).

Tabela 2: Parâmetros - simulação da operação do conversor CC-CC

Parâmetros	Valores
Tensão de Entrada (V_n)	48 V
"AECM" (I_O)	5 A
Indutor (L)	50 mH
Resistência do Indutor (R_L)	100 mΩ
Capacitor (C)	10 mF
Resistência do Capacitor (R_C)	100 mΩ
Frequência de Comutação (F_C)	5 kHz
Passo de simulação (Δt)	5 μs

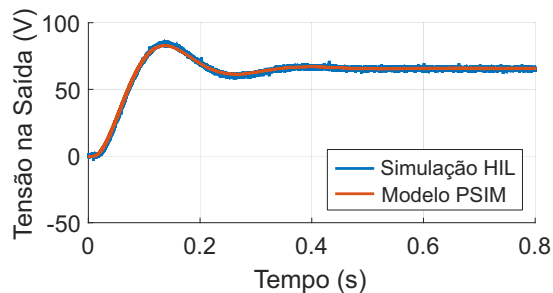


Figura 9: Comparação da Simulação em tempo real (HIL) e simulação “off-line” utilizando o *software* PSIM.

3.3 Modelo do Acionamento Eletrônico/Carga Mecânica

O sistema de acionamento eletrônico e a carga mecânica imposta ao motor elétrico, no atual estágio de desenvolvimento deste trabalho, foram modelados de forma simplificada, visando representar a energia demandada do sistema composto pelo banco de baterias e conversor CC-CC. Foi considerada, conforme descrito na seção anterior, a representação do sistema “AECM” por uma fonte de corrente CC, responsável por consumir (aceleração) ou fornecer (frenagem regenerativa) determinada potência da saída do conversor CC-CC.

A fim da realização de testes no sistema, foi proposto para o sistema “AECM” um regime baseado no ciclo europeu de condução urbana ECE-15, exibido na Figura 10, em que a velocidade varia em certos níveis, alternando entre aceleração, cruzeiro e frenagem (Araújo, 2015). Este perfil de variação de velocidade foi associado a um perfil de variação de corrente (representado em termos de valores médios, exibido na Figura 11), proporcional à variação da velocidade no ciclo de condução. Deste modo, foi definido um regime com valores

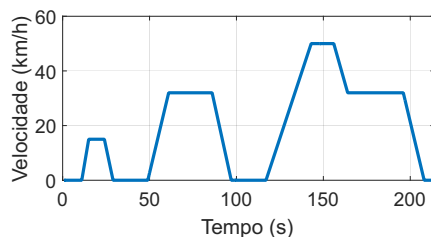


Figura 10: Ciclo de condução urbana (ECE-15)

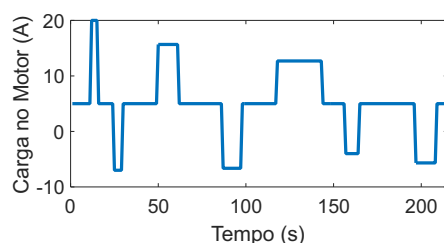


Figura 11: Carga definida para teste a partir do ciclo de condução ECE-15.

variados, positivos e negativos, simulando tanto o comportamento de consumo de energia do banco de baterias, quanto frenagem regenerativa.

4 Resultados - Simulação em Tempo Real HIL

Na avaliação da operação do sistema proposto, foram conduzidos testes baseados no ciclo de condução descrito considerando os parâmetros de um *kart cross* elétricos descritos na Tabela 2. Este VE utiliza banco de baterias de 48 V/100 Ah (16 células SE100Ah) e motor elétrico de 5 kW alimentado em 72 V (CC) (Rodrigues, 2014). A gestão de energia do sistema de propulsão foi realizada por meio de um sistema de controle em malha fechada, cujo diagrama de blocos é exibido na Figura 12, responsável por controlar a corrente no banco de baterias e a tensão de saída do conversor CC-CC (mantida em 72 V). O dimensionamento dos controladores deste sistema de controle são descritos em (Ferreira, 2007).

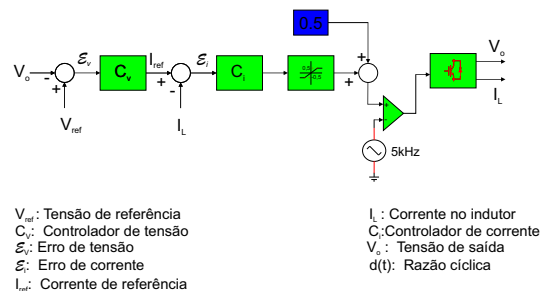


Figura 12: Diagrama de blocos do sistema de controle do conversor CC-CC.

Conforme citado na Seção 2, os modelos para simulação em tempo real foram implementados utilizando módulos independentes. Deste modo, foram utilizados três módulos do DSC TMS320F2869, (banco de baterias, conversor CC-CC e “AECM”, vj. Figura 2). Um quarto módulo do mesmo tipo de DSC foi utilizado para implementar o sistema de controle do conversor CC-CC (*hardware* sob teste no sistema HIL). Uma foto do sistema implementado para realização dos testes descritos nesta seção é exibida na Figura 13.

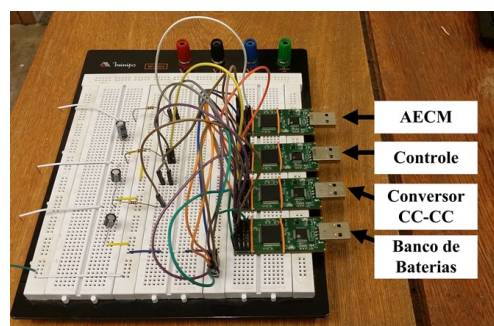


Figura 13: Foto da montagem do sistema HIL em laboratório.

Na Figura 14, são exibidos os resultados da simulação em tempo real HIL da operação do *kart cross* elétrico descrito seguindo o ciclo de condução ECE-15, de duração igual a 200 s. A potência consumida na saída do conversor CC-CC é apresentada na Figura 14(a), em que os valores negativos estão associados à regeneração de energia durante a frenagem do veículo. Já a tensão na saída do conversor, exibida na Figura 14(b), é mantida em valores próximos ao seu *set point* (72 V), evidenciando o bom desempenho do sistema de controle sob teste. Devido à curta duração deste ciclo de condução, praticamente não há variação no estado de carga do banco de baterias embarcado, como visto na Figura 14(c).

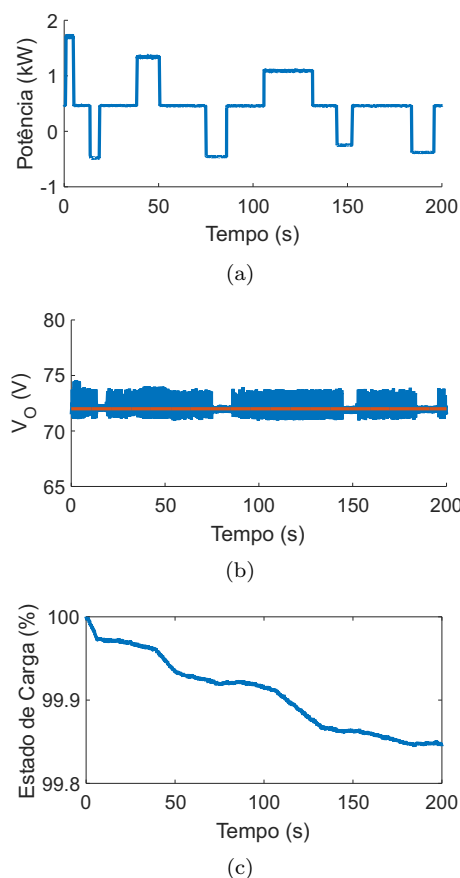


Figura 14: Simulação em tempo real HIL para o ciclo de condução ECE-15: (a) potência de saída do conversor CC-CC; (b) tensão de saída do conversor CC-CC (azul) e seu *set point* (vermelho); (c) Estado de carga do banco de baterias.

5 Conclusões

Neste trabalho foi apresentado, de forma detalhada, o desenvolvimento de um sistema de simulação em tempo real “*hardware-in-the-loop*” dos elementos do sistema de propulsão de um VE. Foram descritos e validados os modelos matemáticos do banco de baterias embarcado e do conversor CC-CC responsável pela gestão de energia do VE,

bem como apresentado um modelo simplificado do sistema de acionamento eletrônico do veículo.

Os bons resultados obtidos na simulação em tempo real HIL de um *kart cross* elétrico operando em ciclo de condução padronizado fornecem evidência da possibilidade de uso do sistema desenvolvido na avaliação de estratégias de gestão de energia em VEs.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG e ao IF Sudeste MG pelo suporte financeiro ao desenvolvimento deste projeto de pesquisa, bem como ao Prof. André A. Ferreira (UFJF) pela sua contribuição neste trabalho.

Referências

- Araújo, B. J. O. (2015). Desenvolvimento de um modelo de caracterização energética de ciclos de condução. Universidade do Minho.
- Ehsani, M., Gao, Y. and Emadi, A. (2010). *Modern Electric Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles*, CRC Press.
- Ferdowsi, M. (2007). Plug-in hybrid vehicles - a vision for the future, *Proceedings of the IEEE Vehicle Power Propulsion Conference (VPPC'2007)*, pp. 457–462.
- Ferreira, A. A. (2007). *Sistema Supervisório de Gestão de Múltiplas Fontes de Suprimento para aplicações em Veículos Elétricos*, PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas.
- Herbst, S. and Levitt, A. (2008). Companion models for basic non-linear and transient devices.
- Hu, H., Xu, G. and Zhu, Y. (2009). Hardware-in-the-loop simulation of electric vehicle powertrain system, *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1–5.
- Kokenyesi, T. and Varjasi, I. (2013). Comparison of real-time simulation methods for power electronic applications, *4th International Youth Conference on Energy (IYCE)*.
- Maclay, D. (1997). Simulation gets into the loop, *IEE Review* pp. 109–112.
- Oliveira, A. D., Silva, L. R. M., Rodrigues, M. C. B. P., Barbosa, P. G., Ferreira, A. A. and Duque, C. A. (2010). Middleware-in-the-loop como uma técnica de simulação flexível e de baixo custo, *9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON 2010)*.
- Rodrigues, M. C. B. P. (2014). *Integração de Filtro Ativo de Potência Monofásico e Bifásico ao Sistema de Propulsão de um Veículo Elétrico*, PhD thesis, Universidade Federal de Juiz de Fora.
- Zorpette, G. (2004). The smart hybrid, *IEEE Spectrum* 41(1): 44–51.