# Simulação de microrrede cc de veículos elétricos em plataforma HIL de baixo-custo

**Daniel S. Gomes** [*] **Diego A. Apaza** [**] **Diego F. M. Guarda** [*]
**Renan F. Bastos** [***] **Heverton A. Pereira** [*] **Rodolpho V. A. Neves** [*]

[*] *Depto. de Eng. Elétrica, Universidade Federal de Viçosa, MG, (e-mail: {daniel.d.gomes, diego.guarda, heverton.pereira, rodolpho.neves}@ufv.br).*
[**] *Depto. de Eng. Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, (e-mail: diego.laura@edu.ufes.br).*
[***] *Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, MG (e-mail: renan.bastos@ufop.edu.br)*

**Abstract:** Concerns with the use of non-renewable energy sources have driven research towards electric vehicles (EVs), which are more efficient and considered a green energy solution. The simulation in hardware-in-the-loop (HIL) has been increasingly used in the development of new control strategies for EVs, allowing the implementation of automated tests by simulating vehicle dynamics through discretized differential equations. This work aims to develop an electrical model of a DC microgrid of an EV and embed this model in a DSP, which should act as a low-cost HIL platform. The HIL platform should be able to simulate the switching effects of semiconductors in the microgrid and show the switching effects in the circuits. Comparisons between simulation results in the Plexim/PLECS software will be used as a reference for the tests of the HIL platform in open and closed loop. The results showed that the HIL platform can be used for the development of real control strategies, without the need for larger investments in the construction of the real vehicle microgrid.

**Resumo**: Preocupações com a utilização de fontes energéticas não renováveis têm impulsionado pesquisas em direção a veículos elétricos (VEs), que são mais eficientes e considerados uma solução de energia verde. A simulação em hardware-in-the-loop (HIL) tem sido cada vez mais utilizada no desenvolvimento de novas estratégias de controle para VEs, permitindo a implementação de testes automatizados, simulando as dinâmicas veiculares por meio de equações diferenciais discretizadas. Este trabalho visa desenvolver um modelo elétrico de uma microrrede cc de um VE e embarcar este modelo em um DSP, que deve atuar como uma plataforma HIL de baixo custo. A plataforma HIL deve ser capaz de simular os efeitos de chaveamento de semicondutores da microrrede e mostrar os efeitos de chaveamento nos circuitos. As comparações entre resultados de simulação no software Plexim/PLECS serão utilizadas como referência para os testes da plataforma HIL em malha aberta e malha fechada. Os resultados mostraram que a plataforma HIL pode ser utilizada para o desenvolvimento de estratégias de controle reais, sem a necessidade de investimentos maiores na construção da microrrede veicular real.

*Keywords:* HIL Simulation; Electric Vehicle; DSP; Bidirectional converter.
*Palavras-chaves:* Simulação em HIL; Veículo Elétrico; DSP; Conversor bidirecional.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a preocupação com a utilização das fontes energéticas não renováveis, associados a metas de redução de emissões de poluente, tem levado o foco de pesquisas na direção de fontes energéticas limpas e mais eficientes. Diante disso, um exemplo de solução é a utilização de veículos elétricos (VE), que se enquadram neste cenário buscado, pois são mais eficientes que veículos a combustível fóssil, além de serem considerados como uma solução de energia verde, indo em direção a um futuro com menos poluição (Ali, 2023).

Nos veículos elétricos, inicialmente, a tensão de bateria deve ser elevada ao nível necessário do barramento do motor, por meio de um conversor CC-CC. Além disso, nas situações de frenagem, o sistema auxiliar de armazenamento de energia absorve a energia regenerada. Para estas situações, topologias de conversores bidirecionais, como o *Buck-Boost*, podem ser aplicadas, com eficiência superior a 95% para ambos os modos de operação (Rahman et al., 2021). Um modelo simplificado para uma roda do circuito elétrico de um VE é apresentado na Fig. 1, nela vemos que o motor de imã permanente (MIP) ora está consumindo energia da bateria, ora esta a recarregando.

Dadas as aplicações de um conversor CC-CC bidirecional para VEs, é necessário que a microrrede cc seja contro-

[⋆] O presente trabalho foi realizado com apoio da FAPEMIG.

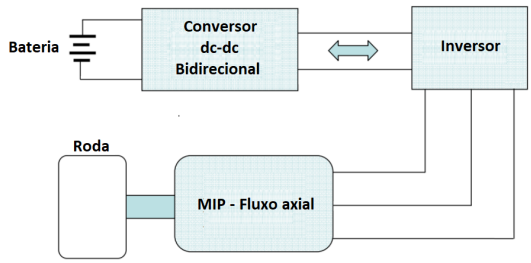


Figura 1. Diagrama de uma microrrede cc com sistema regenerativo de energia, composta por baterias (sistema de armazenamento de energia primário), conversor cc-cc bidirecional, inversor de acionamento e motor de ímã permanente (MIP) de fluxo axial da roda.

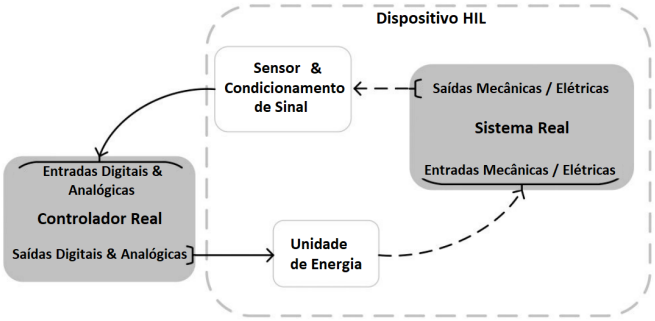


Figura 2. Lógica de funcionamento de um dispositivo HIL. Adaptado de (Bastos et al., 2019)

lada nas diferentes condições às quais pode ser exposta, garantindo segurança e confiabilidade ao VE. O desenvolvimento de estratégias de controle para o gerenciamento da microrrede cc é feita inicialmente por simulações em programas como Matlab/Simulink ou Plecs. Entretanto, o estudo destas estratégias de controle em ambiente totalmente virtual pode não revelar as limitações destas estratégias, sendo necessário ensaios práticos em bancada (Brayanov & Stoynova, 2019).

A simulação em *hardware-in-the-loop* (HIL) vem ganhando cada vez mais espaço no desenvolvimento de novas estratégias de controle. O HIL possibilita que modelos matemáticos sejam embarcados em plataformas dedicadas de processamento. A Fig. 2 apresenta uma representação da lógica do HIL (Bastos et al., 2019). O funcionamento do HIL é iniciado a partir da leitura dos sinais dos atuadores, passando pela realização dos cálculos das variáveis por meio das equações diferenciais dos modelos embarcados e finalizando com a disponibilização das variáveis calculadas nas portas de saídas analógicas e digitais (Mihalič et al., 2022). As entradas e as saídas do HIL serão conectadas a um controlador real, que pode ser implementado em qualquer plataforma com interface compatível, como unidades de controle eletrônico (ECUs) dos carros elétricos.

A realização de testes automatizados em ECUs e HILs permitem a implementação com prototipagem rápida, a partir de um modelo matemático, com total segurança (Mihalič et al., 2022). Além disso, as simulações em HIL abrangem adversidades que podem acontecer apenas dentro de simuladores, como por exemplo, interferência de ruídos e perdas nas conexões, erros dos conversores analógico-digital e digital-analógico, entre outros. Assim, o processo de desenvolvimento utilizando plataformas HIL diminuem os custos de desenvolvimento e torna mais seguro os testes em condições críticas, como curtos circuito, sobretensões, entre outros (Bastos et al., 2019).

Para a realização de simulações HIL, são utilizadas plataformas dedicadas que embarcam os periféricos necessários para a integração deste sistema ao mundo real. Plataformas *Field Programmable Gate Array* (FPGA) são os principais sistemas de simulação em tempo real no mercado. Contudo, estes equipamentos possuem um alto custo, o que as tornam pouco acessíveis para testes com pequeno orçamento (Li et al., 2020). Além dos FPGAs, processadores digitais de sinais (DSPs) têm sido utilizados como unidades de processamentos para embarcar modelos de circuitos para simulação em HIL (Bastos et al., 2019; Brayanov & Stoynova, 2019; Ortega-García et al., 2021; Mihalič et al., 2022).

Avaliando mais a fundo um DSP, como o TMS 320F28379D da Texas Instruments, Manita & Boltianska (2021) descreve o dispositivo como um potente e moderno microcontrolador de 32 bits, o qual possui um poder computacional suficiente para a cálculo de equações com seu processador de dois núcleos, bem como periféricos ricos e variados. Além disso, suporta vários canais de transmissão de dados e possuem um alto grau de confiabilidade e segurança. Entretanto, é necessário reconhecer as limitações deste dispositivo, como design complexo, exigência de sistema operacional próprio, de ferramentas de depuração e conhecimento intermediário de programação.

Em Bastos et al. (2019), os autores utilizam um DSP para simular diferentes conversores de energia. As comparações feitas com os dispositivos reais mostram que os DSP podem substituir fielmente os equipamentos de circuitos elétricos, desde que possam ser modelados matematicamente. Além disso, os testes em malha fechada mostram como o HIL pode ser aplicado no desenvolvimento dos controladores, além dos DSPs possuírem custo inferior ao FPGA, o que os torna muito atrativos, mas com limitações de tempo de amostragem.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo elétrico de uma microrrede cc de um veículo elétrico e embarcar este modelo em uma plataforma HIL de baixo custo. Comparações entre resultados de simulação no software Plexim/PLECS serão utilizados como referência para os testes da plataforma HIL em malha aberta e malha fechada. A plataforma HIL deste trabalho deve ser capaz de simular os efeitos de chaveamento de semicondutores da microrrede e mostrar os efeitos de chaveamento no circuitos.

## 2. MODELO EMBARCADO NA PLATAFORMA HIL

A microrrede cc mais simples de um veículo puramente elétrico é composta por um sistema de armazenamento de energia principal, como baterias ou células combustíveis, motores de tração, que podem ser um para cada roda e um conversor que controla o fluxo de energia entre entre o sistema de armazenamento e os motores de tração. Eventualmente, o veículo pode contar com um sistema de recuperação de energia, que aproveita o motor elétrico da roda para funcionar como um gerador, frenando o veículo

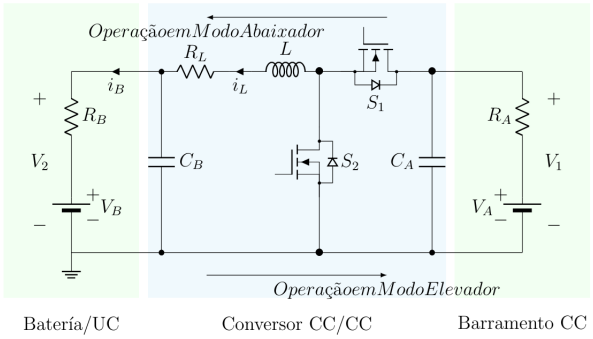


Figura 3. Sistema bidirecional de energia do veículo elétrico.

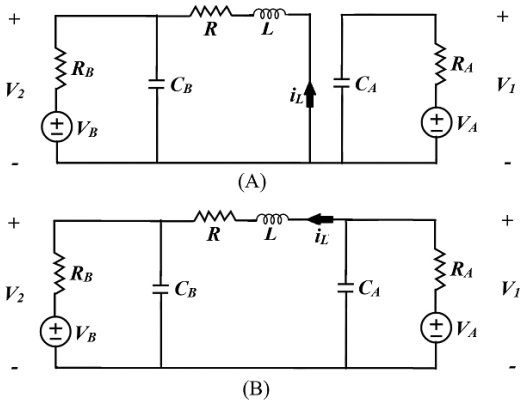


Figura 4. Modelo do conversor abaixador-elevador com (A) $S_1$ aberta e $S_2$ em curto ($D = 0$) e (B) $S_1$ em curto e $S_2$ aberta ($D = 1$).

e fornecendo energia para a microrrede armazenar em sistemas de armazenamento secundários, como supercapacitores, ou no primário, caso seja uma bateria. Com isso, o conversor da microrrede precisa ser capaz de operar em modo bidirecional, controlando a energia ora da bateria para os motores (elevador), ora do gerador para as baterias (abaixador). Um exemplo de uma microrrede cc deste tipo é apresentado na Fig. 3.

O desenvolvimento da plataforma HIL utilizando um DSP passa pela modelagem do circuito da Fig. 3 para os diferentes estados das chaves semicondutoras $S_1$ e $S_2$. Com as equações para os estados de chave aberta e fechada, elas devem ser embarcadas no DSP para simular o funcionamento da microrrede cc nos modos de operação elevador e abaixador de tensão. A microrrede cc simulada pela plataforma HIL é o suficiente para a realização de testes em malha aberta e malha fechada, com um controlador real implementado em outro DSP.

### *2.1 Modelo discretizado da microrrede cc de um veículo elétrico*

As equações que modelam o conversor cc-cc bidirecional podem ser encontradas utilizando o método de modelo médio. Pela lógica do conversor bidirecional, as chaves $S_1$ e $S_2$ possuem o sinal de chaveamento complementares. A Fig. 4 apresenta o circuito utilizado nos dois possíveis estados em que o conversor pode operar, dependendo do chaveamento de $S_1$ e $S_2$.

A Fig. 4-A representa o estado $D = 0$ ($S_1 = 0$ e $S_2 = 1$) resultado nas equações

$$i_L s = (-V_2 - i_L R_L)\frac{1}{L} \tag{1}$$

para a corrente no indutor $i_L$,

$$V_1 s = -\frac{V_1 - V_A}{R_A C_A} \tag{2}$$

para a tensão no barramento de alta tensão $V_1$ e

$$V_2 s = \frac{i_L}{C_B} - \frac{V_2 - V_B}{R_B C_B} \tag{3}$$

para a tensão na bateria $V_2$, no domínio da frequência, na qual $s$ é a variável da transformada de Laplace das equações diferenciais. Já para o estado $D = 1$ ($S_1 = 1$ e $S_2 = 0$), conforme apresentado na Fig. 4-B, as equações para $i_L$, $V_1$ e $V_2$ podem ser escritas conforme (4), (5) e (6), respectivamente.

$$i_L s = (V_1 - V_2 - i_L R_L)\frac{1}{L} \tag{4}$$

$$V_1 s = -\frac{i_L}{C_A} - \frac{V_1 - V_A}{R_A C_A} \tag{5}$$

$$V_2 s = \frac{i_L}{C_B} - \frac{V_2 - V_B}{R_B C_B} \tag{6}$$

Depois de modelar as variáveis para cada estado de funcionamento do conversor bidirecional, é calculado o modelo médio do circuito unificando as equações das variáveis $i_L$, $V_1$ e $V_2$ e, por último, é feita a discretização pelo método retangular para frente (*Euler's forward method*), na qual $T_s$ é o período de amostragem da discretização. As equações (7), (8) e (9) representam as equações diferença dos modelos médios discretizados das três variáveis do conversor bidirecional. O termo $k$ indica o valor da amostragem atual e o termo $k-1$, o valor da amostragem anterior.

$$\begin{aligned} i_L(k) = i_L(k-1) + T_s\,(V_1(k-1)D - \\ -V_2(k-1) - i_L(k-1)R_L)\,\frac{1}{L} \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} V_1(k) = V_1(k-1) - \\ -\frac{T_s}{C_A}\left(i_L(k-1)D + \frac{V_1(k-1) - V_A}{R_A}\right) \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} V_2(k) = V_2(k-1) + \\ +\frac{T_s}{C_B}\left(i_L(k-1) + \frac{V_2(k-1) - V_B}{R_B}\right) \end{aligned} \tag{9}$$

### *2.2 Simulador hardware-in-the-loop utilizando DSP*

A Fig. 5 apresenta a rotina de funcionamento do código embarcado no DSP atuando como HIL. As equações (7), (8) e (9) são resolvidas durante a execução do bloco "Resolver modelo", dentro de uma interrupção por tempo, que garante a iteração do código a cada intervalo de $T_s$ segundos. A cada interrupção, o HIL faz a leitura de uma entrada digital e registra o valor de D, que vem de um modulador por largura de pulso (PWM) externo. Se o PWM estiver em valor alto, $D = 1$. Caso contrário, $D = 0$. Ainda, no mesmo ciclo de interrupção, o HIL resolve as equações do modelo e repassa para os conversores digital-analógico para que sejam disponibilizados na saída do DSP. O HIL voltar para a execução do "Loop Vazio" para aguardar a próxima interrupção.

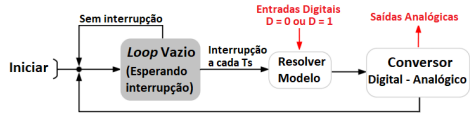


Figura 5. Fluxograma de execução do código embarcado no DSP atuando como HIL. Adaptado de Bastos et al. (2019).

### *2.3 Estratégias de controle com HIL*

O sinal de PWM necessário para resolver as equações do modelo embarco e a leitura das saída do HIL podem ser feitas por um microcontrolador conectado à plataforma HIL. Outro DSP pode ser utilizado para embarcar uma estratégia de controle, sem que seja necessário que ambos os microcontroladores estejam sincronizados. Dependendo da capacidade deste microcontrolador, diferentes topologias de controle podem ser desenvolvidas, como controladores PID, fuzzy, adaptativos, entre outros.

A Fig. 6 apresenta o diagrama da estratégia de controle para a conexão do HIL com o controlador que pode ser desenvolvido. A partir de uma referência de corrente na carga $i_{Lref}$ definida pelo operador e da leitura analógica da corrente $i_L$, o erro $E_r$ é calculado e repassa para o controlador PI embarcado. O controlador PI calcula o ciclo de trabalho ($d$) que deve repassar para que o PWM possa operar para controlar a corrente do conversor bidirecional. O PWM aplica níveis lógicos altos e baixos para a plataforma HIL realizar os cálculos das variáveis do modelo.

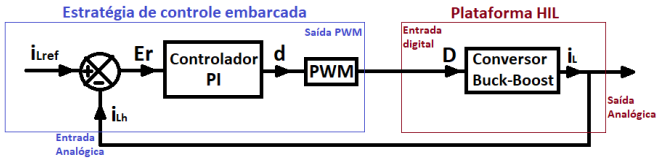


Figura 6. Controlador embarcado conectado à plataforma HIL para simulação de sistemas em malha fechada.

A função de transferência do controlador PI de corrente é dada por

$$\frac{d}{E_r} = K_p + \frac{K_i}{s}, \tag{10}$$

na qual $K_p$ e $K_i$ são os ganhos proporcionais e de integração do controlador. A discretização de (10) pode ser feita aplicando a discretização trapezoidal (método de Tustin), resultando na equação diferença

$$\begin{aligned} d(k) = d(k-1) + K_p(E_r(k) - E_r(k-1)) \\ + K_i\frac{T_{s2}}{2}(E_r(k) - E_r(k-1)) \end{aligned} \tag{11}$$

do controlador. O período de amostragem $T_{s2}$ pode ser diferente de $T_s$, por se tratarem de sistemas diferentes e não sincronizados.

## 3. RESULTADOS E ANÁLISES UTILIZANDO UM DSP COMO PLATAFORMA HIL

O comportamento da plataforma HIL foi comparada com simulações nominais no *software* Plexim/PLECS. Os valores dos parâmetros do circuito da microrrede cc simulada e do controlador PI de corrente, implementado para testes em malha fechada, são apresentados na Tabela 1. Uma foto da bancada utilizada para realizar os experimentos é apresentada na Fig. 7.

Tabela 1. Parâmetros e valores dos componentes da microrrede cc e do controlador PI de corrente.

Circuito da microrrede cc

| Parâmetro | Valor | Unidade |
|---|---|---|
| $C_A$ | 1 | mF |
| $C_B$ | 1 | mF |
| $R_L$ | 36 | mΩ |
| $L$ | 125 | μH |
| $f$ | 20 | kHz |
| $T_s$ | 1 | μs |

Controlador PI de corrente

| Parâmetro | Valor | Unidade |
|---|---|---|
| $T_{s2}$ | 4 | μs |
| $K_p$ | 0,0035 | $A^{-1}$ |
| $K_i$ | 80 | $(A.s)^{-1}$ |

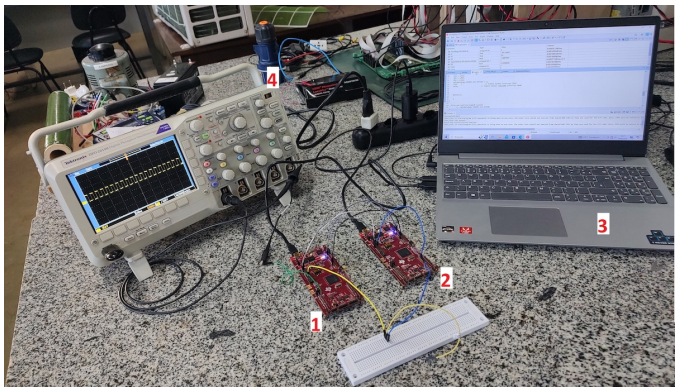


Figura 7. Experimento para testes com um DSP TMS 320F28379D para emular uma plataforma HIL (1), um DSP para testar estratégias de controle (2), um computador para programar os DSPs (3) e um osciloscópio Tektronix DPO 2014B (4) para aquisitar os sinais das placas.

Primeiramente, foram realizados ensaios em malha aberta, para mostrar o ponto de equilíbrio para o qual o controlador foi ajustado. Depois, já com o conversor cc bidirecional em malha fechada para controle de corrente, foram testadas as regularizações para diferentes pontos de operação de corrente de referência. Ambos os modos de operação são controlados pelo mesmo controlador, ajustado para o modo de operação elevador de tensão. Por último, foram variadas a carga alimentada e a tensão de alimentação do conversor para que as repostas fossem comparadas. As correntes $i_L$ foram aquisitadas, considerando valores positivos para a operação de abaixador de tensão e valores negativos como operação de elevador de tensão.

### *3.1 Comparação de resposta em malha aberta*

A comparação da simulação no PLECS e na plataforma HIL no DSP em malha aberta é apresentada na Fig, 8. Foi aplicado um sinal de controle em ciclo de trabalho, repassado para um PWM, fixo em 40%, configurando uma operação no modo abaixador. Para esta comparação, os

valores de tensão utilizados são: $V_A = 0$ V, $V_B = 60$ V, $R_A = 3\ \Omega$ e $R_B = 0,1\ \Omega$, além dos outros parâmetros conforme a Tabela 1.

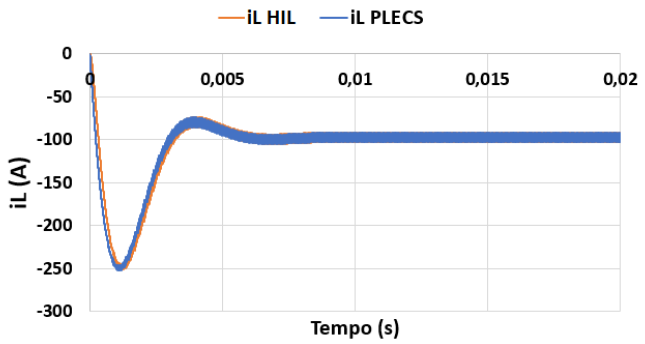


Figura 8. Comparação de $i_L$ em malha aberta.

É possível notar que há um pequeno atraso da plataforma HIL em relação à simulação no PLECS. Entretanto, a similaridade das respostas, principalmente em relação à dinâmica do sistema em malha aberta, pode ser considerada satisfatória.

### *3.2 Comparação de respostas em malha fechada*

Utilizando um segundo DSP para atuar como o controlador PI de corrente, foi feito a comparação do comportamento de $i_L$ para uma mudança de referência de corrente, durante a operação em modo abaixador e em modo elevador de tensão do conversor cc bidirecional. Na operação no modo abaixador, a corrente de referência foi alterada de 50 A para 20 A. Já no modo elevador de tensão, a corrente de referência foi alterada de -50 A para -80 A. As Figs. 9 e 10 apresentam a comparação das respostas da plataforma HIL e da simulação no PLECS.

A comparação de alteração de referência de corrente no modo abaixador, Fig. 9, mostra que em ambas as respostas os controladores conseguiram controlar a corrente no indutor para os valores desejados. Mesmo com um *ripple* de corrente de $\pm 10$ A, ambas as plataformas obtiveram comportamento dinâmico semelhantes. No caso do conversor operando no modo elevador, ambos os *ripples* foram

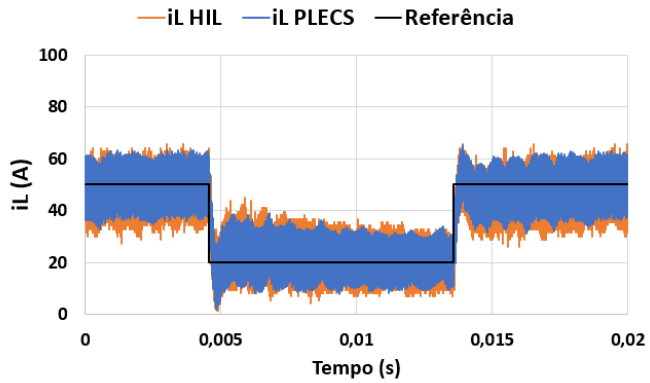


Figura 9. Comparação da corrente $i_L$ durante a alteração da corrente de referência no modo de operação abaixador de tensão.

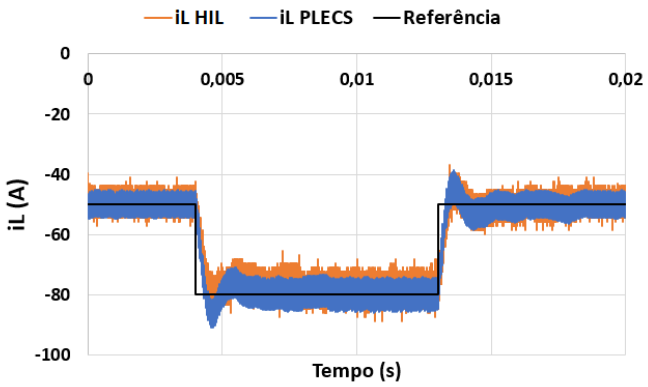


Figura 10. Comparação da corrente $i_L$ durante a alteração da corrente de referência no modo de operação elevador de tensão.

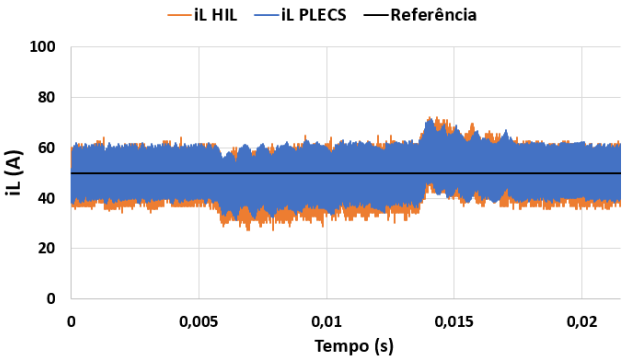


Figura 11. Comparação de $i_L$ com a alteração da resistência de carga $R_B$ no modo de operação abaixador de tensão.

menores, cerca de $\pm 7,5$ A. Já no ponto de vista do comportamento dinâmico, ambas as plataformas apresentam tempos de resposta e amortecimento semelhantes, mostrando a viabilidade da aplicação da plataforma HIL para implementação de estratégias de controle. É importante ressaltar que as respostas no modo elevador de tensão foram mais precisas porque foi o modo de operação utilizado para ajuste da malha de controle.

### *3.3 Comparação de respostas para rejeição de distúrbios*

Com o intuito de comparar as respostas das plataformas para diferentes cenários, foram realizadas alterações nos parâmetros do circuito da microrrede cc. No modo abaixador de tensão, as Figs. 11 e 12 apresentam as respostas para alteração da resistência da carga ($R_B$) e para a tensão de alimentação ($V_A$). Da mesma forma, no modo elevador de tensão, as Figs. 13 e 14 apresentam as respostas para alteração de $R_A$ e $V_B$. Em todos os casos, é esperado que o controlador de corrente mantenha a operação no mesmo ponto de operação, corrigindo o ciclo de trabalho do PWM para manter os níveis de corrente de acordo com a referência.

Em ambos os modos de operação, as resistências de carga foram alteradas de 3 Ω para 1, 5 Ω e para 3 Ω novamente. Já a alteração das tensões de alimentação foram, no modo abaixador, de 210 V para 280 V e para 210 V novamente,

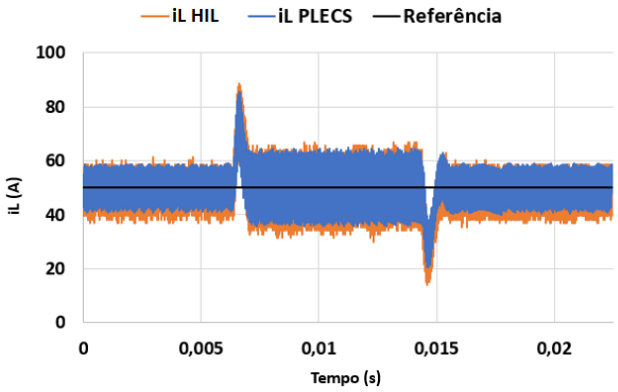


Figura 12. Comparação de $i_L$ com a alteração da tensão na fonte de alimentação $V_A$ no modo de operação abaixador de tensão.

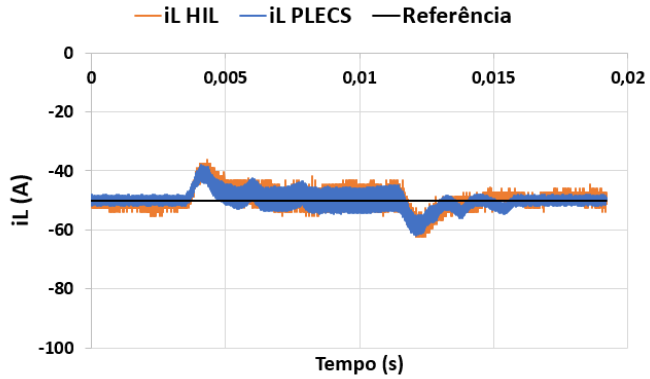


Figura 13. Comparação de $i_L$ com a alteração da resistência de carga $R_A$ no modo de operação elevador de tensão.

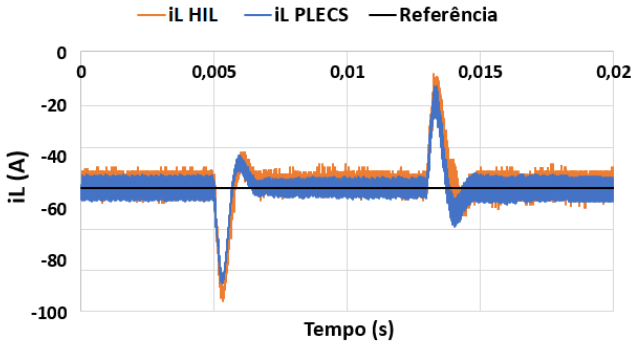


Figura 14. Comparação de $i_L$ com a alteração da tensão na fonte de alimentação $V_B$ no modo de operação elevador de tensão.

e, no modo elevador de tensão, de 66 V para 95 V e 66 V novamente. É possível reparar que, dinamicamente, todas as respostas foram semelhantes, conforme o esperado. Entretanto, durante os transitórios da Fig. 13 ocorrem pequenas oscilações na resposta de $i_L$ PLECS que não foram vistas na resposta da plataforma HIL. Mais detalhes desta operação precisam ser verificados para corrigir esta diferença de operação.

## 4. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo implementar uma plataforma *hardware-in-the-loop* (HIL) de baixo-custo utilizando um processador de sinais digitais (DSP) TMS 320F28379D para realizar simulações de um conversor cc-cc bidirecional de uma microrrede veicular cc. Foram feitas comparações entre o conversor simulado no *software* PLECS e o conversor discretizado embarcado no DSP em malha aberta, malha fechada, com um controlador externo à plataforma HIL, e com alteração de parâmetros na microrrede.

Os resultados de comparação mostram que as respostas da plataforma HIL foram visualmente semelhantes em termos de comportamento dinâmico, tempo de resposta e amortecimento, às respostas simuladas no PLECS. Ainda, as comparações mostraram que a plataforma HIL pode ser utilizada para o desenvolvimento de estratégias de controle digital, que podem ser testados no mundo real em testes de bancada.

O TMS 320F28379D foi capaz de simular o circuito de uma microrrede cc de um veículo elétrico, com algumas limitações de discretização, mostrando-se uma alternativa à dispositivos FPGA, especialmente considerando seu baixo custo. Trabalhos futuros podem realizar a comparação do DSP com o circuito real, afim de mostrar o quão fidedigna é a representação do circuito implementado na plataforma HIL. Além disso, uma exploração mais profunda sobre diferentes estratégias de controle digital podem ser adotadas com o auxílio desta plataforma.

## REFERÊNCIAS

Ali, H.M. (2023). Thermal management systems for batteries in electric vehicles: A recent review. *Energy Reports*, 9, 5545–5564.

Bastos, R.F., Fuzato, G.H., Aguiar, C.R., Neves, R.V., & Machado, R.Q. (2019). Model, design and implementation of a low-cost hil for power converter and microgrid emulation using dsp. *IET Power Electronics*, 12(14), 3833–3841.

Brayanov, N. & Stoynova, A. (2019). Review of hardware-in-the-loop-a hundred years progress in the pseudo-real testing. *Electrotechnica & Electronica (E+ E)*, 54.

Li, F., Wang, Y., Wu, F., Huang, Y., Liu, Y., Zhang, X., & Ma, M. (2020). Review of real-time simulation of power electronics. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 8(4), 796–808.

Manita, I. & Boltianska, N. (2021). Development of digital technologies in the field of agricultural production.

Mihalič, F., Truntič, M., & Hren, A. (2022). Hardware-in-the-loop simulations: A historical overview of engineering challenges. *Electronics*, 11(15).

Ortega-García, L.E., Rodriguez-Sotelo, D., Nuñez-Perez, J.C., Sandoval-Ibarra, Y., & Perez-Pinal, F.J. (2021). Dsp-hil comparison between im drive control strategies. *Electronics*, 10(8).

Rahman, M.D., Rabbi, M.N., & Sarowar, G. (2021). Development of dc-dc converters–a review. In *2021 International Conference on Computational Performance Evaluation (ComPE)*, 341–347. IEEE.