



Projeto do conversor buck-boost bidirecional para aplicações em sistemas de armazenamento de energia

Bidirectional buck-boost converter design for applications in energy storage systems

Letícia Ferreti¹, Ezequiel Gonschorowski², Rafael Cardoso³

RESUMO

Este estudo apresenta o projeto do conversor *buck-boost* bidirecional, visando integrar os processos de geração e armazenamento de energia em fontes intermitentes, como a geração eólica e solar. Após a fase de modelagem, uma simulação em malha aberta foi realizada, e os resultados indicam que o conversor é adequado para o cenário proposto.

PALAVRAS-CHAVE: *buck-boost* bidirecional; conversor híbrido; modelagem.

ABSTRACT

This study presents the design of the bidirectional buck-boost converter, aiming to integrate the processes of energy generation and storage in intermittent sources, such as wind and solar generation. After the modeling phase, an open-loop simulation was conducted, and the results indicate that the converter is suitable for the proposed scenario.

KEYWORDS: bidirectional buck-boost; hybrid converter; modeling.

INTRODUÇÃO

Desde o início da Revolução Industrial, a maior parte da energia consumida globalmente provém de fontes de combustíveis fósseis. Um grande desafio associado ao seu uso é a aceleração do efeito estufa (DOĞAN; EROL, 2019). Assim, torna-se imperativo buscar fontes de energia mais limpas que não dependam de combustíveis fósseis.

Fontes de energia limpas são aquelas que apresentam pouca ou nenhuma emissão de CO_2 . Alguns exemplos são a energia fotovoltaica e a eólica (ERSÖZ; BÜLBÜL, 2022). Para integrá-las eficientemente ao sistema elétrico, é necessário utilizar conversores de energia que permitam a transferência eficiente de energia entre essas fontes e as cargas. Para a geração fotovoltaica e eólica, a intermitência da irradiância solar e do vento, respectivamente, resulta em um perfil de geração variável e não despachável. Uma possibilidade para tornar o perfil de geração despachável é o uso de um sistema de armazenamento de energia com baterias. Para isso, são necessários conversores

¹ Aluna do curso de bacharelado em Engenharia Elétrica. Bolsista do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) da Fundação Araucária. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil. E-mail: leticiaferreti@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 8682884880801285.

² Aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil. E-mail: gonschorowski@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 9805608250376137.

³ Docente no Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil. E-mail: rcardoso@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8148387096236908.



para integrar o sistema de armazenamento de energia ao sistema de geração e processamento de energia. Dentro desse contexto, para aplicações residenciais de baixa potência, o conversor *buck-boost* bidirecional é uma possibilidade para ser utilizado juntamente com a geração fotovoltaica. O conversor é simples, de baixo custo e é capaz de, através de um sistema de controle adequado, controlar o processo de carga e descarga da bateria.

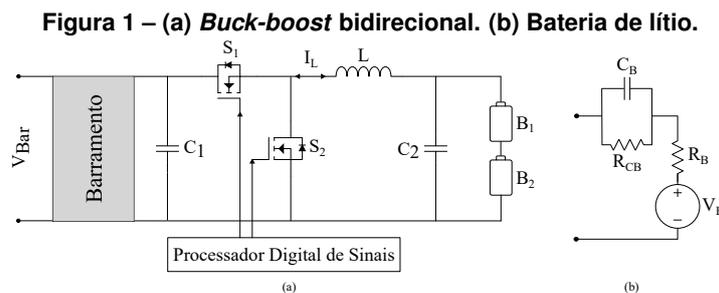
Este trabalho tem como objetivos: (i) dimensionar os elementos elétricos passivos do referido conversor de acordo com parâmetros estipulados; (ii) obter os modelos matemáticos para seu controle; (iii) simular o circuito projetado em malha aberta; e (iv) analisar e inferir sobre os resultados.

METODOLOGIA

A Figura 1(a) ilustra a estrutura do conversor *buck-boost* bidirecional. A corrente I_L é representada por uma seta bidirecional, indicando que sua direção varia conforme o fluxo de potência desejado. O conversor é formado por duas chaves, S_1 e S_2 , dois capacitores, C_1 e C_2 , e um indutor, L . Durante a modelagem do conversor, as seguintes não-idealidades serão levadas em consideração: resistências dos capacitores R_{C1} e R_{C2} , resistências das chaves R_{S1} e R_{S2} , quedas de tensão nos diodos das chaves V_{D1} e V_{D2} , e resistência do indutor R_L .

O conversor está ligado a um barramento de corrente contínua (CC) de 380V, que está associado ao barramento CC de um conversor fotovoltaico híbrido, representando sua tensão mais elevada. Na saída, ele se conecta a duas baterias em série, B_1 e B_2 , totalizando aproximadamente 96V ($2 \cdot 48V$). A Figura 1(b) mostra a topologia da bateria de lítio usada na modelagem, composta por: tensão interna V_B , resistência interna R_B , capacitância equivalente C_B e resistência equivalente R_{CB} relacionada à dinâmica “lenta” (MENEGETTI et al., 2020). As não-idealidades das baterias serão representadas com seus respectivos subscritos.

Para simplificar o projeto dos elementos passivos do conversor, o processo foi segmentado em duas etapas: análise do modo de carga (modo *buck*) e análise do modo de descarga (modo *boost*). O termo “modo *buck*” é usado porque, durante o carregamento da bateria, o fluxo de potência se assemelha ao de um conversor *buck*, com a corrente movendo-se do potencial mais alto (barramento) para o mais baixo (bateria). Analogamente, o “modo *boost*” reflete o fluxo de potência de um conversor *boost*, onde a corrente se desloca do potencial mais baixo para o mais alto. Para os propósitos deste estudo, foram adotados valores de referência para as chaves e diodos (MENEGETTI et al., 2020).



Fonte: Elaborado por autores (2023).



MODO *BUCK*

Para o modo *buck*, a razão cíclica é definida pela Eq. (1), a indutância pela Eq. (2) e a capacitância pela Eq. (3). Estas equações foram derivadas da análise da corrente no indutor e da queda de tensão no circuito durante as duas etapas de chaveamento (HART, 2016).

$$D_{Buck} = \frac{R_{S2} \cdot I_L + R_L \cdot I_L + V_{D2} + V_{B1} + V_{B2} + I_L(R_{B1} + R_{B2} + R_{CB1} + R_{CB2})}{V_{Bar} - R_{S1} \cdot I_L - V_{D1} + R_{S2} \cdot I_L + V_{D2}} \quad (1)$$

$$L_{Buck} = \frac{D_{Buck}(V_{Bar} - V_{D1} - (V_{B1} + V_{B2} + I_L \cdot (R_{B1} + R_{B2} + R_{CB1} + R_{CB2})) - I_L(R_L + R_{S1}))}{\Delta I_L \cdot f} \quad (2)$$

$$C_{Buck} = \frac{(D_{Buck} - 1) \cdot (I_L(R_{S2} + R_L) + V_{D2})}{8 \cdot \Delta V_O \cdot L \cdot f^2} \quad (3)$$

MODO *BOOST*

Analogamente à análise do modo *buck*, as equações para o modo *boost* são apresentadas a seguir. A Eq. (4) define a razão cíclica, a Eq. (5) a indutância e a Eq. (6) a capacitância para este modo.

$$D_{Boost} = \frac{V_{D1} + V_{Bar} + I_L(R_{B1} + R_{B2} + R_L + R_{S1} + R_{CB1} + R_{CB2}) - V_{B1} - V_{B2}}{V_{D1} - V_{D2} + V_{Bar} + I_L(R_{S1} - R_{S2})} \quad (4)$$

$$L_{Boost} = \frac{D_{Boost}(I_L(-R_{S2} - R_L - R_{B1} - R_{B2} - R_{CB1} - R_{CB2}) - V_{D2} + V_{B1} + V_{B2})}{\Delta I_L \cdot f} \quad (5)$$

$$C_{Boost} = \frac{V_{Bar} \cdot D_{Boost}}{R_{Bar} \cdot \Delta V_O \cdot f} \quad (6)$$

PARÂMETROS DE PROJETO

A Tabela 1 lista os requisitos definidos para o projeto do conversor. A corrente $I_{L_{nom}}$ definida para ambos os modos é de 10A. A tensão $V_{O_{nom}}$ para o modo *buck* é de 96,74V (que é a soma das quedas de tensão de B_1 e B_2), enquanto para o modo *boost* é de V_{Bar} .

Para simular o conversor computacionalmente, é essencial desenvolver uma modelagem matemática que descreva seu comportamento nos modos *buck* e *boost*. As funções de transferência, que caracterizam o desempenho da tensão de saída e da corrente do indutor em resposta às variações na razão cíclica, foram derivadas da análise dos modelos médio e de pequenos sinais para cada modo, conforme citado em (BARBI, 2015). Essas relações são representadas pelas equações Eq. (7), Eq. (8), Eq. (9) e Eq. (10). A variável \bar{d} denota uma pequena variação em torno do ponto de operação.

$$G_{VoBuck}(s) = \frac{V_{oBuck}(s)}{\bar{d}(s)} = \frac{5,629 \cdot 10^9 s^2 + 7,26 \cdot 10^{11} s + 2,336 \cdot 10^{13}}{s^4 + 7,939 \cdot 10^5 s^3 + 2,015 \cdot 10^8 s^2 + 1,587 \cdot 10^{10} s + 3,989 \cdot 10^{11}} \quad (7)$$



XIII Seminário de Extensão e Inovação XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR

Ciência e Tecnologia na era da Inteligência Artificial: Desdobramentos no Ensino Pesquisa e Extensão
20 a 23 de novembro de 2023 - Campus Ponta Grossa, PR



SEI-SICITE
2023

Tabela 1 – Parâmetros de projeto do conversor *buck-boost* bidirecional.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Tensões e Razões Cíclicas			
Tensão do barramento CC	V_{Bar}	380	V
Tensão nominal da bateria	$V_{B1,B2}$	48	V
Razão cíclica do modo <i>buck</i>	D_{Buck}	0,2672	
Razão cíclica do modo <i>boost</i>	D_{Boost}	0,7620	
Queda de tensão no diodo	$V_{D1,D2}$	0,7	V
Variação na tensão de saída	ΔV_O	$1\% \cdot V_{O_{nom}}$	
Correntes e Indutâncias			
Corrente no indutor	I_L	10	A
Variação na corrente do indutor	ΔI_L	$5\% \cdot I_{L_{nom}}$	
Indutor	L	380	mH
Frequência e Capacitâncias			
Frequência de chaveamento	f	50k	Hz
Capacitor equivalente da bateria	$C_{B1,B2}$	5,15	F
Capacitor do modo <i>buck</i>	C_2	1,6471	μF
Capacitor do modo <i>boost</i>	C_1	9,5460	μF
Resistências			
Resistência do barramento CC	R_{Bar}	159,6409	Ω
Resistência da chave	$R_{S1,S2}$	0,01	Ω
Resistência do indutor	R_L	0,4	Ω
Resistência do capacitor	$R_{C1,C2}$	0,7	Ω
Resistência da bateria	$R_{B1,B2}$	0,0342	Ω
Resistência equivalente da bateria	$R_{CB1,CB2}$	0,00315	Ω

Fonte: Elaborado por autores (2023).

$$G_{IBuck}(s) = \frac{I_{Buck}(s)}{\bar{d}(s)} = \frac{1,037 \cdot 10^5 s^3 + 8,231 \cdot 10^{10} s^2 + 1,015 \cdot 10^{13} s + 3,127 \cdot 10^{14}}{s^4 + 7,939 \cdot 10^5 s^3 + 2,015 \cdot 10^8 s^2 + 1,587 \cdot 10^{10} s + 3,989 \cdot 10^{11}} \quad (8)$$

$$G_{VoBoost}(s) = \frac{V_{oBoost}(s)}{\bar{d}(s)} = \frac{-1,03 \cdot 10^6 s^3 + 2,28 \cdot 10^9 s^2 + 2,927 \cdot 10^{11} s + 9,14 \cdot 10^{12}}{s^4 + 952,6 s^3 + 1,834 \cdot 10^6 s^2 + 2,162 \cdot 10^8 s + 6,569 \cdot 10^9} \quad (9)$$

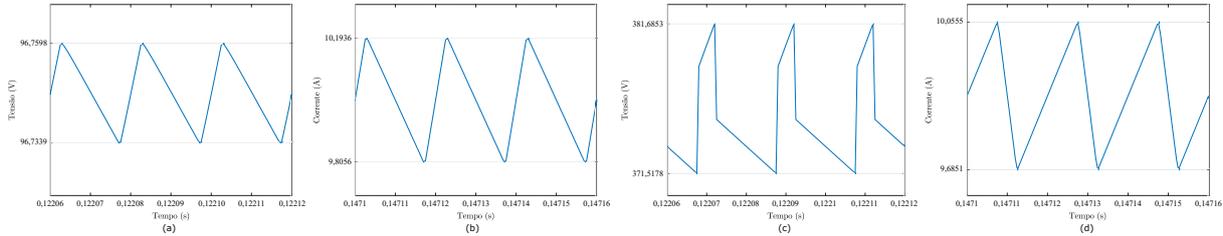
$$G_{IBoost}(s) = \frac{I_{Boost}(s)}{\bar{d}(s)} = \frac{1,038 \cdot 10^5 s^3 + 1,472 \cdot 10^8 s^2 + 1,696 \cdot 10^{10} s + 5,107 \cdot 10^{11}}{s^4 + 952,6 s^3 + 1,834 \cdot 10^6 s^2 + 2,162 \cdot 10^8 s + 6,569 \cdot 10^9} \quad (10)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a simulação do conversor em malha aberta, foi utilizado o *software* PSim®. A Figura 2 ilustra os *ripples* na tensão de saída e na corrente do indutor nos modos *buck* e *boost*. Na Figura 2(b), nota-se que ΔI_L está dentro das margens definidas pelos parâmetros de projeto, com uma magnitude inferior a 5% em relação à corrente nominal. Analogamente, a Figura 2(a) confirma ΔV_O com magnitude inferior a 1% em relação à tensão nominal. As mesmas observações sobre o *ripple* se aplicam a Figura 2(d). No entanto, na Figura 2(c), o *ripple* na tensão de saída excede o valor

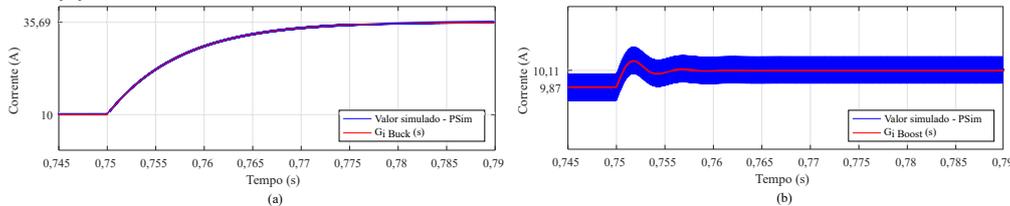
estipulado, algo que será justificado posteriormente devido às perdas ôhmicas e ao comportamento não linear do conversor *boost*.

Figura 2 – Modo *buck*: (a) Variação na tensão de saída. (b) Variação na corrente do indutor. Modo *boost*: (c) Variação na tensão de saída. (d) Variação na corrente do indutor.



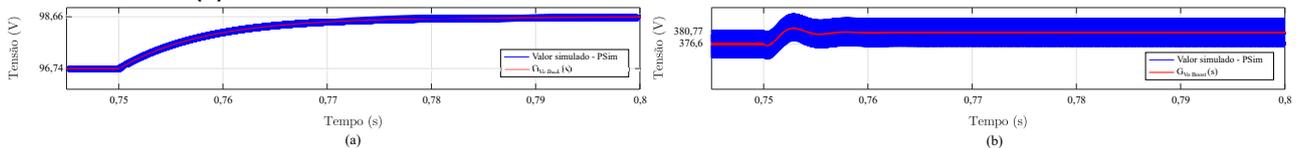
Fonte: Elaborado por autores (2023).

Figura 3 – Variação de razão cíclica para a validação das funções de transferência da corrente no indutor: (a) Modo *buck*. (b) Modo *boost*.



Fonte: Elaborado por autores (2023).

Figura 4 – Variação de razão cíclica para a validação das funções de transferência da tensão de saída: (a) Modo *buck*. (b) Modo *boost*.



Fonte: Elaborado por autores (2023).

A Figura 3 apresenta o comportamento das funções de transferência que definem a corrente do indutor para ambos os modos após variações na razão cíclica. Para este ensaio, inicialmente foram usadas as razões cíclicas D_{Buck} e D_{Boost} para seus respectivos modos, tendo I_L como referência. Após o sistema encontrar-se em regime permanente, uma variação na razão cíclica é aplicada ($\bar{d}_{Buck} = 0,0328$ e $\bar{d}_{Boost} = 0,0031$). Os modelos matemáticos simulados, representados pelas funções de transferência, estão alinhados com os resultados simulados do circuito, validando-os.

Na Figura 3(a), observa-se a estabilidade da corrente média no indutor em 10A, conforme o parâmetro de projeto. Já na Figura 3(b), a corrente não se manteve na referência de 10A, o que pode ser atribuído ao uso da resistência R_{Bar} para representar o barramento CC. Mesmo com a modelagem precisa das não-idealidades, a carga resistiva pode ser um fator para a corrente não atingir exatamente a referência, ficando próxima devido às perdas ôhmicas. Além disso, a não linearidade no conversor *boost*, especialmente durante as transições entre os modos de condução, pode resultar em comportamentos que não seguem precisamente a referência desejada.



Assim como o resultado validado pelas funções de transferência que definem o comportamento da corrente no indutor, a Figura 4 indica que o mesmo se aplica às funções de transferência das tensões de saída. A referência para o modo *buck* é 96,74V, enquanto para o modo *boost* é V_{Bar} .

CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o projeto de um conversor *buck-boost* bidirecional para aplicações em sistemas de armazenamento de energia. A modelagem matemática foi desenvolvida e validada por meio de simulações computacionais. Os resultados obtidos indicam que o conversor é adequado para operar no cenário planejado, com pequenas variações em relação aos valores de referência estabelecidos. Tais variações podem ser justificadas pela presença de resistências representativas e pela não linearidade do conversor *boost*. Para trabalhos futuros, sugere-se o dimensionamento de componentes ativos, como chaves eletrônicas e diodos, e a implementação de um sistema de controle em malha fechada para o conversor, visando melhorar a precisão e a resposta dinâmica do sistema. Além disso, a realização de testes experimentais pode fornecer informações adicionais sobre o desempenho real do conversor e possíveis otimizações.

Agradecimentos

À Fundação Araucária, pelo apoio a este estudo através do Programa de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC).

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

- BARBI, Ivo. Modelagem de conversores CC-CC empregando modelo médio em espaço de estados. **Florianópolis: Edição do autor**, 2015.
- DOĞAN, Battal; EROL, Derviş. The future of fossil and alternative fuels used in automotive industry. **3th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies**, IEEE, p. 1–8, 2019.
- ERSÖZ, Betül; BÜLBÜL, Halil İbrahim. A Research on Importance of Using Renewable Energy Sources by Organizations within The Scope of Green Deal Preparations. **11th International Conference on Renewable Energy Research and Application**, IEEE, p. 213–218, 2022.
- HART, Daniel W. **Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos**. McGraw Hill Brasil: [s.n.], 2016.
- MENEGHETTI, Luiz Henrique et al. **Estratégia de controle e modos de operação para inversores multifuncionais**. 2020. Diss. (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.