



Implementação prática do conversor CC-CC tipo Boost empregando controle em modo corrente com aplicação em sistemas fotovoltaicos

Practical implementation of the Boost type DC-DC converter employing control in current mode with application in photovoltaic systems

João Vinícius Leonel Henrique¹, Christian Struzik dos Reis², Vinicius Dario Bacon³,
Leonardo Bruno Garcia Campanhol⁴

RESUMO

Em sistemas fotovoltaicos de duplo estágio, o conversor CC/CC Boost tem por objetivo fornecer o nível de tensão adequado aos terminais de entrada do conversor CC/CA, além de realizar o rastreamento da máxima potência do arranjo fotovoltaico. Isso permite reduzir a quantidade de módulos solares conectados em série, visto sua característica de elevação de tensão. Como característica da geração solar fotovoltaica ser intermitente, variável em função de temperatura e radiação solar, faz-se necessário utilização de técnicas de controle que atue no ciclo de chaveamento do conversor CC/CC, de modo a operar sempre no ponto de máxima potência mediante tais variações momentâneas. O controle em modo corrente é a técnica utilizada neste trabalho, no qual o controlador atua na corrente conduzida pelo indutor do Boost, sendo está a corrente extraída do arranjo fotovoltaico. Com base em sua resposta dinâmica as variações de condições e análise computacional em malha fechada, o presente trabalho tem por objetivo implementação prática desta aplicação, dando início a montagem do conversor CC/CC em malha aberta por meio de circuito impresso para realização de testes empíricos, possibilitando posteriormente fechar a malha com controle digital através do microcontrolador (DSP), adicionando o arranjo fotovoltaico como fonte de alimentação do conversor CC/CC Boost.

PALAVRAS-CHAVE: Conversor Boost; Controle de corrente; Sistemas Fotovoltaicos

ABSTRACT

In double-stage photovoltaic systems, the DC/DC Boost converter aims to provide the appropriate voltage level to the input terminals of the DC/AC converter, in addition to tracking the maximum power of the photovoltaic array. This allows to reduce the number of the solar panels connected in series, given their voltage rise characteristic. As a characteristic of photovoltaic solar generation being intermittent, variable depending on temperature and solar radiation, it is necessary to use control techniques that act on the switching cycle of the DC/DC converter, in order to always operate at the point of maximum power through momentary variables. Control in current mode is the technique used in this work, in which the controller acts on the current conducted by the Boost inductor, this being the current extracted from the photovoltaic array. Based on its dynamic response to variations in conditions and computational analysis in closed loop, the present work aims to implement this application practically, starting the assembly of the DC/DC converter in open loop using a printed circuit to carry out empirical tests. , making it possible to later close the loop with digital control through the microcontroller (DSP), adding the photovoltaic array as a power source for the DC/DC Boost converter.

KEYWORDS: Boost Converter; Current Control; PV Systems

¹ Bolsista Voluntariado em Iniciação Científica - PIVIC. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: jhenrique@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 6631587188506280.

² Aluno de Graduação do Curso de Engenharia Elétrica - COELT-AP. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: christianreis@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 5348427616957382.

³ Docente na Coordenação de Engenharia Elétrica - COELT-AP. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: viniciusbacon@utfpr.edu.br. ID Lattes: 0702667817086590.

⁴ Docente na Coordenação de Engenharia Elétrica - COELT-AP. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: campanhol@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8053457373498978.

INTRODUÇÃO

O princípio de funcionamento de um conversor CC/CC tipo Boost é fornecer níveis de tensão de saída maior ou igual a sua entrada, configurando um circuito CC/CC elevador de tensão. É uma topologia com comum aplicação em motores de corrente contínua e retificadores com ajuste no fator de potência. Esta topologia é caracterizada pela conexão elétrica de um indutor em série com a fonte de alimentação, configurando uma fonte de corrente, um diodo que permite o fluxo de potência entre entrada e carga, quando polarizado em condução, e um capacitor em paralelo com a carga, identificando uma fonte de tensão. A relação de tensão de entrada por saída é obtida em função da razão cíclica de chaveamento do dispositivo e seu dimensionamento (BARBI, 2000).

A topologia Boost tem aplicabilidade em projetos solares fotovoltaicos (PV - *Photovoltaic*), mais precisamente em sistemas de duplo estágio, utilizando o conversor CC/CC para garantir o nível de tensão necessário em seu barramento de saída para operação do conversor CC/CA (inversor). Outra funcionalidade deste conversor está associada ao rastreamento de máxima potência do arranjo PV, possibilitando maior autonomia nestas conexões em virtude da intermitência da geração de energia solar em função da variação de radiação solar e/ou temperatura (OLIVEIRA, 2015).

De modo a garantir a efetiva funcionalidade do conversor CC/CC aplicado ao arranjo PV, faz-se necessário utilizar técnicas de controle que permitam obtenção dos níveis de tensão adequados no link CC, e extração da máxima potência da conexão PV, diante os valores atuais de radiação solar e temperatura.

O foco deste trabalho é realizar o estudo acerca do controle do conversor CC/CC Boost no modo corrente, com referência a esta variável conduzida no indutor, de modo a proporcionar implementação prática futura. Em primeira análise são extraídos resultados computacionais do sistema em condições ideais e controlador em malha fechada, para em seguida realizar verificações de não idealidade e montagem do conversor em malha aberta para realização de testes práticos em bancada.

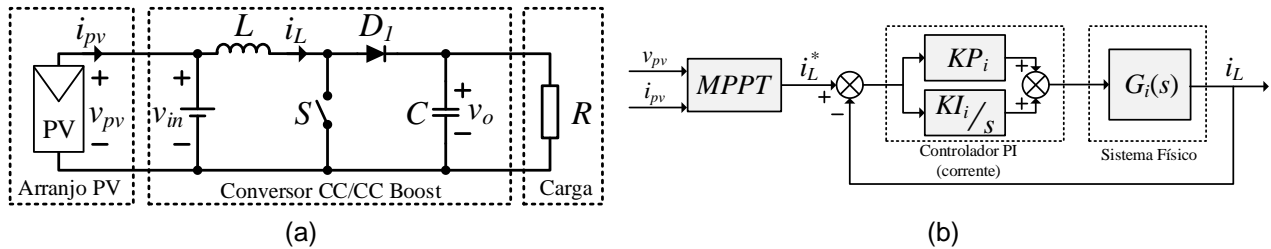
ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PARA O CONVERSOR CC/CC BOOST

Conforme as características dos sistemas de geração solar fotovoltaica, faz-se necessário empregar alguma técnica de controle que proporcione a operação do conversor CC/CC em MPP (*Maximum Power Point*), extraindo a máxima potência gerada pelo arranjo PV. Em seguida é apresentado o controlador em modo corrente a ser empregado em um conversor CC/CC tipo Boost.

ESTRATÉGIA DE CONTROLE NO MODO CORRENTE

Pela característica do conversor Boost se comportar como uma fonte de corrente na entrada, possibilita-se controlá-lo no modo corrente, conforme malha de controle mostrada no diagrama em blocos da Figura 1(b). Utiliza-se esta tipologia em situações que requer elevação do nível de corrente no arranjo PV, com a corrente no indutor (i_L) como variável de controle em relação a corrente de referência extraída do PV. As equações características, função de transferência e respectivo projeto do controlador são apresentados em detalhes em (OLIVEIRA, 2015).

Figura 1 – Conversor Boost: (a) Estrutura de potência; (b) Malha de controle por corrente

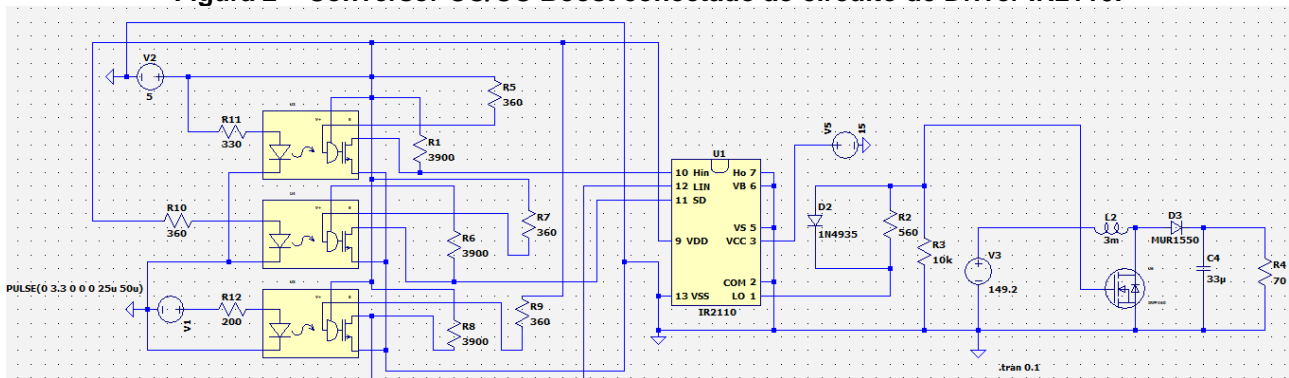


Fonte: Próprio autor

IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA DO CONVERSOR CC/CC BOOST

Com base no estudo teórico consolidado a respeito dos conversores CC/CC Boost, a continuidade do trabalho consiste na consideração de não idealidade dos elementos do circuito, resistência série dos componentes, e simulação via LTSpice com valores comerciais, de modo a verificar a dinâmica do conversor em malha aberta (MA) para prosseguir com a montagem da placa de circuito impresso (PCB - Printed Circuit Board). Para acionamento da chave de potência (MOSFET IRFP460), utiliza-se o IR2110 como circuito integrado de driver, conectado aos optoacopladores 6N1237 de modo a promover o condicionamento do sinal de comando PWM vindo do gerador de funções, isolando-o da parte de potência do conversor CC/CC de modo a garantir o efetivo funcionamento do circuito. O gerador de função fornece um sinal pulsante de tensão de 3,3V, com razão cíclica próxima a 50%. O dimensionamento dos resistores dos optoacopladores são calculados em função dos níveis de tensão em seus terminais e valores típicos via datasheet do fabricante, assim como os componentes conectados ao IR2110, com base em realização de teste empíricos (VISHAY, 2023; RECTIFIER, 2019).

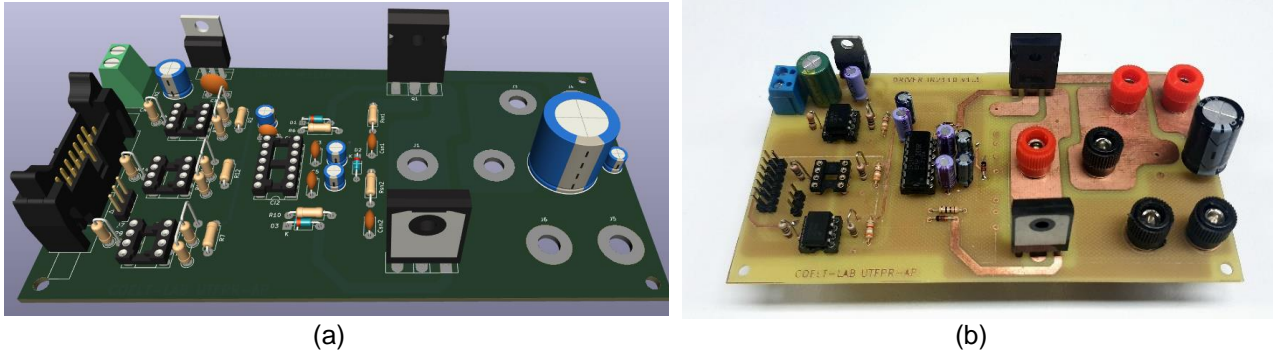
Figura 2 – Conversor CC/CC Boost conectado ao circuito de Driver IR2110.



Fonte: Próprio autor

Os dados obtidos a partir da simulação em MA do circuito da Figura 2 foram satisfatórios, com dinâmica semelhante aos resultados gerados via Simulink em MF. Com isso, a continuidade do trabalho está em confeccionar a PCB para realização dos testes práticos, Figura 3(b), avançando nos estudos de modo a permitir fechar a malha de controle de corrente do conversor CC/CC e conectar em sua entrada um arranjo PV.

Figura 3 – Implementação prática do conversor Boost: (a) Layout da PCB do conversor CC/CC Boost; (b) Imagem da placa desenvolvida.



Fonte: Próprio autor

RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Em primeira análise foi simulado via software MATLAB/Simulink o circuito em malha fechada com controle no modo corrente. Adotou-se um arranjo PV composto por 4 painéis conectados em série, da fabricante DAH Solar, modelo DHP72-330W com potência nominal de 330W, de modo a verificar a relação de ganho do conversor na elevação de tensão, possibilitando aplicação deste em strings reduzidas, mantendo o valor de tensão elevada desejada. Com base em seus parâmetros construtivos e considerando condições de teste padrão (STC - temperatura a 25°C e radiação solar de 1000w/m²). Com base no dimensionamento projetado, para $V_{in} = V_{pv} \approx 149,2V$ (associação PV série), deseja-se obter $V_o \approx 300V$, logo, tensão de saída será aproximadamente o dobro da entrada. Na Tabela 1 são mostrados os parâmetros adotados em simulação.

Tabela 1 – Parâmetros do conversor Boost.

Elementos da estrutura de potência		
Indutância L	3mH	definidos pelo autor
Capacitância saída C_o	33uF	
Capacitância entrada C_i	1uF	
Frequência de chaveamento	20kHz	
Ganhos do controlador PI de corrente (Figura 1)		
Ganho proporcional (KP_i)	118,2	(OLIVEIRA, 2015)
Ganho integral (KI_i)	4,9867k	

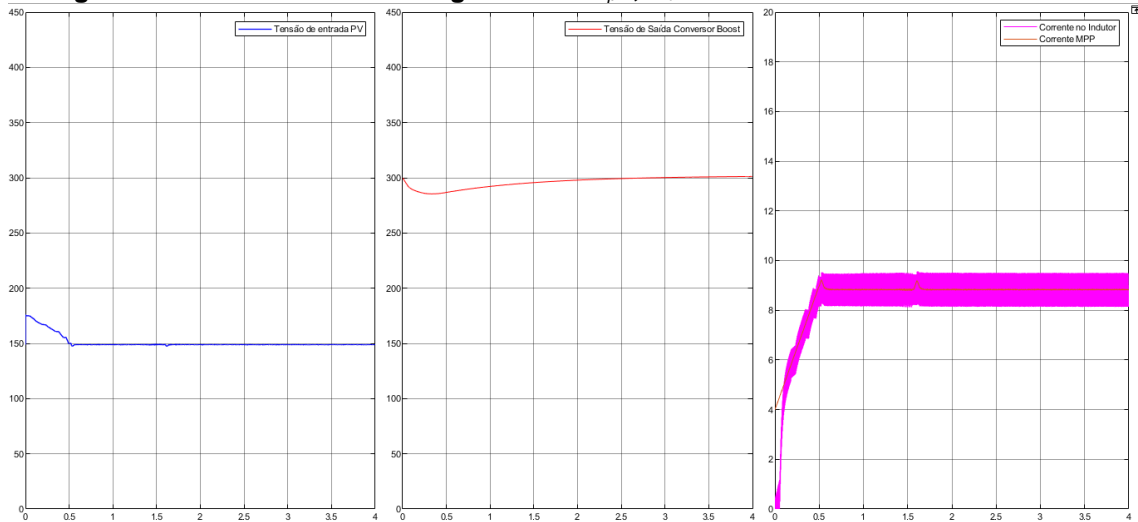
Fonte: Próprio autor

Na Figura 4 são apresentados os resultados do sistema para o conversor Boost controlado no modo corrente, demonstrando o comportamento dinâmico da tensão de entrada ($V_{in} = V_{pv}$) e saída (V_o), e corrente no indutor (i_L) do conversor Boost. Nota-se, em regime permanente, a relação de elevação da tensão na saída próxima a 300V, sendo praticamente o dobro da entrada, cerca de 150V, validando a topologia. Após alcançar o regime permanente, a corrente i_L apresenta valor médio próximo a 8,85A (valor nominal de corrente do módulo DHP72-330W em MPP, para STC). Com isso, para obtermos mesmo valores sem aplicação do conversor CC-CC, seria necessário utilizar 8 módulos conectados em série. Nesta aplicação, nota-se a vantagem da utilização do conversor Boost na função



de elevação de tensão em sistemas fotovoltaicos, possibilitando redução das associações série de módulos fotovoltaicos.

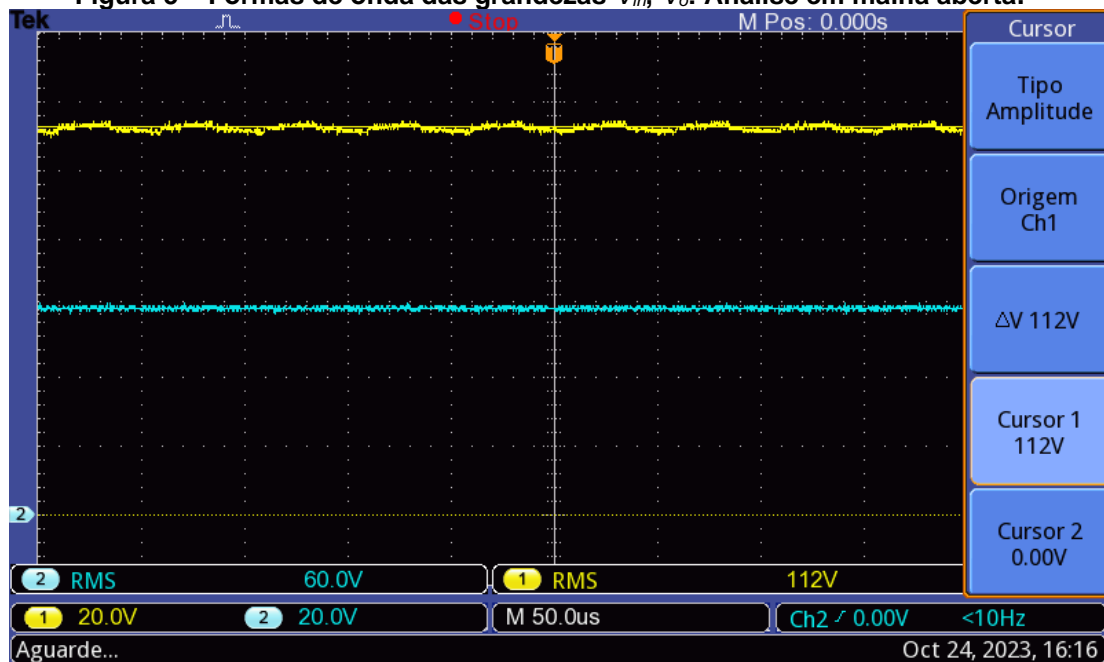
Figura 4 – Formas de onda das grandezas V_{pv} , V_o e i_L : Controle no modo corrente.



Fonte: Próprio autor

Na Figura 5 são demonstrados os resultados experimentais obtidos com o protótipo do conversor Boost implementado em bancada (Figura 3(b)). Nesta figura são mostradas as formas de onda de tensão de entrada ($V_{in}=60V$) e saída ($V_o \approx 112V$), para o circuito operando em malha aberta. Verifica-se novamente a relação de aumento de tensão, característica da topologia Boost. Contudo, como esperado, é observado um leve desvio na tensão de saída quando comparado com o ganho ideal do circuito para a razão cíclica adotada, devido às não idealidades dos elementos do circuito.

Figura 5 – Formas de onda das grandezas V_{in} , V_o : Análise em malha aberta.



Fonte: Próprio autor

CONCLUSÃO

Para a efetiva funcionalidade do conversor CC/CC Boost aplicados em arranjos PV, faz-se necessário projetos de controle que possibilitem o rastreamento de máxima potência do arranjo, operando em condições satisfatórias na elevação de tensão, característico da topologia. O modo de controle em corrente é utilizado como método neste estudo, apresentando resultados condizentes com fundamentação teórica, obtidos em simulação. O seguimento do trabalho é progredir para implementação prática do conversor CC/CC Boost, primeiramente em malha aberta, considerando reposta dinâmica do sistema simulado sem condições ideais, utilizando dos componentes comerciais, para em sequência fecha a malha com controlador em corrente e acoplar a entrada do conversor CC/CC um arranjo PV, visando obter na prática os resultados vistos em simulação.

Agradecimentos

Os autores agradecem a UTFPR-AP/COELT-AP pela estrutura disponibilizada para estudos e desenvolvimentos das atividades de pesquisa.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

- BARBI, I.; MARTINS, D. **Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. 2º Edição. ed. rev. Florianópolis, SC: Edição dos Autores, 2000. 377 p.
- OLIVEIRA, F. M. **Rastreamento da máxima potência em arranjos fotovoltaicos sob efeito de sombreamento parcial baseado no método de otimização por enxame de partículas**. 97 p. Dissertação – Mestrado em Engenharia Elétrica, UTFPR. Cornélio Procópio, 2015.
- NEVES, J. A. C. **Procedimentos metodológicos de projeto do controlador PI multimalhas aplicado na malha de controle de tensão de um sistema PV de duplo estágio de conversão de energia**. 60 p. Dissertação - Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Elétrica, UTFPR. Cornélio Procópio, 2021.
- SILVA, S. A. O. et al. **Feed-Forward DC-bus control loop applied to a single-phase gridconnected PV system operating with PSO-based MPPT technique and active power-line conditioning**. IET Renewable Power Generation, v. 11, n. 1, p. 183-193, 2017.
- HART, D. W. **Eletrônica de potência: análise de potência**. Porto Alegre, AMGH, 2017.
- VISHAY. **High Speed Optocoupler, Single and Dual, 10MBd**. Datasheet: 6N137, Vishay Semiconductors, Rev. 2.2, 2023.
- RECTIFIER, I. O. **High and Low Side Driver**. Datasheet: IR2119, No. PD60147, Rev. V, 2019.