



Controle de conversor não-isolado de alto ganho de tensão

Non-isolated high voltage gain converter control

André Felipe Pereira Pedroso (orientado) *, Dr. Rafael Cardoso (orientador) †

RESUMO

Este artigo descreve o projeto de um controlador em cascata para regular a tensão de entrada de um conversor *boost* quadrático a fim de que o conversor possa ser utilizado em microinversores fotovoltaicos com algoritmos de *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Para representar o conversor *boost* e o painel fotovoltaico linearmente, um modelo médio de pequenos sinais é desenvolvido considerando um ponto de operação de acordo com as características I-V do painel. O controle em cascata é formado por duas malhas fechadas que utilizam controladores PI. A malha interna é responsável pelo controle da corrente do segundo indutor do conversor *boost*, enquanto a malha externa regula a tensão de entrada do conversor, a tensão do painel PV. Simulações no *software* PSIM foram realizadas para validar o funcionamento do controlador. Foi verificado que os controladores mantêm a estabilidade do sistema e garantem o rastreamento das referências, mesmo na ocorrência de perturbações de temperatura e irradiância, as quais modificam o ponto de operação do sistema. Através dos resultados obtidos, é possível afirmar que o controlador pode ser utilizado com algoritmos de MPPT.

Palavras-chave: Conversores CC-CC. Geração de energia fotovoltaica. Eletrônica de potência

ABSTRACT

This paper describes the design of a cascade controller to regulate the input voltage of a quadratic *boost* converter so that the converter can be used in photovoltaic microinverters with *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) algorithms. To represent the *boost* converter and the photovoltaic panel linearly, an average small-signal model is developed considering an operating point according to the I-V characteristics of the panel. The cascade control consists of two closed loops that use PI controllers. The internal loop is responsible for controlling the current of the boost converter's second inductor, while the external loop regulates the input voltage of the converter, the voltage of the PV panel. Simulations in the PSIM software were performed to validate the controller's operation. It was verified that the controllers maintain the stability of the system and guarantee the tracking of references, even in the event of temperature and irradiance disturbances, which modify the system's operating point. Through the obtained results, it is possible to affirm that the controller can be used with MPPT algorithms.

Keywords: DC-DC converters. Photovoltaic energy generation. Power electronics.

1 INTRODUÇÃO

O mercado de geração fotovoltaica teve um grande incentivo com o avanço de novas tecnologias no ramo, como painéis bifaciais, painéis duplos e dispositivos eletrônicos com melhor eficiência (KUMAR et al., 2020). Apesar de os avanços nesse ramo terem contribuído para aumento da potência e do rendimento de painéis

* UTFPR - Campus Pato Branco, Departamento Acadêmico de Elétrica, Coordenação de Engenharia Elétrica, Engenharia elétrica; pedroso.2016@alunos.utfpr.edu.br.

† UTFPR - Campus Pato Branco, Departamento Acadêmico de Elétrica, Coordenação de Engenharia Elétrica, Engenharia Elétrica; rcardoso@utfpr.edu.br ; <https://orcid.org/0000-0002-2193-2056>.

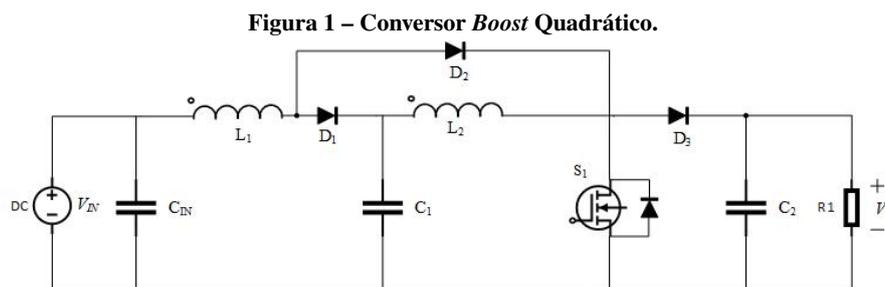
individuais, esses ainda possuem um nível reduzido de tensão. Isso dificulta o processamento da energia gerada para a inserção na rede de distribuição. Para lidar com esse obstáculo, é comum a conexão dos painéis em série, o que eleva a tensão fornecida pelo sistema. Contudo, painéis conectados em paralelo ou de forma modular possuem um melhor rendimento em locais com constante sombreamento, característica comum em ambientes residenciais (OLIVEIRA REITER et al., 2012).

Desse modo, é interessante, para geração de energia fotovoltaica, o estudo de conversores CC-CC com alto ganho de tensão e alto rendimento para possibilitar a conexão do sistema à rede de distribuição. Esse artigo irá abordar o desenvolvimento de um controlador para um conversor *Boost* quadrático para aplicação em um sistema fotovoltaico modular.

Com intuito de controlar a tensão de entrada do conversor, isto é, a tensão do painel fotovoltaico, será projetado um controle em cascata para manter o nível de tensão em um valor desejado apesar das alterações nos fatores que influenciam o fornecimento de energia do painel. Esse controle é necessário para a aplicação de algoritmos para rastrear o ponto de máxima potência do sistema. A problemática do artigo pode ser descrita como, é viável utilizar o controle da tensão de entrada do conversor *boost* quadrático em um algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência de um sistema fotovoltaico modular?

2 DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR E PROJETO DO CONTROLADOR

Neste artigo, é proposto o emprego de um conversor *Boost* quadrático para propiciar o necessário ganho de tensão para o painel fotovoltaico. Este conversor está ilustrado na Figura 1. A topologia é uma variação do conversor *Boost* em cascata e utiliza apenas uma chave semicondutora ativa. O fato de apresentar menos elementos ativos diminui a complexidade do conversor. Entretanto, a alta corrente que irá passar pela chave ativa aumentará as perdas nesse elemento (LEYVA RAMOS et al., 2008).



Fonte: Autoria própria (2021).

O circuito opera através de duas etapas: chave S_1 conduzindo e não conduzindo, com intervalos de tempo DT_s e $(1 - D)T_s$, respectivamente, onde D representa a razão cíclica do conversor e T_s é o período de comutação. Na etapa de condução, a energia da fonte é transferida para os indutores. Em seguida, com a abertura da chave, essa energia é transferida para a carga (LUO; YE, 2018, p. 314).

2.1 Dimensionamento do conversor

Para o dimensionamento dos componentes, considerou-se que o conversor será alimentado por um painel fotovoltaico que fornece um potência de 260 W para uma irradiância de 1000 W/m^2 e temperatura de 25°C . Nestas condições, a tensão e corrente de máxima potência são $V_{PVMP} = 30,4 \text{ V}$ e $I_{PVMP} = 8,56 \text{ A}$, respectivamente

(CANADIANSOLAR. . . , s.d.). As equações utilizadas para o dimensionamento do filtro são descritas em (LUO; YE, 2018, p. 315). Deste modo, os valores de C_1 , C_2 , C_{IN} , L_1 e L_2 são de $3,9 \mu F$, $330 \mu F$, $10 \mu F$, $202 \mu H$ e $2,5 mH$ respectivamente. Para uma tensão de saída (V_o) de 380 V e uma frequência de chaveamento de 40 kHz

2.2 Modelagem do sistema

Com objetivo de desenvolver um controlador para a tensão do painel fotovoltaico, primeiramente, é necessário entender o comportamento dinâmico do conversor. Para isso, é interessante desenvolver um modelo linear do sistema conversor e painel fotovoltaico, e assim, possibilitar a aplicação de métodos de análise e projeto de controle.

Inicialmente, é necessário desenvolver um modelo para o painel fotovoltaico. Entretanto, as relações não lineares entre a corrente e tensão do painel tornam sua modelagem complexa (YANG et al., 2018, p. 46). Para representar o painel em estudo linearmente, foi considerada a relação tensão e corrente no ponto de máxima potência do mesmo. Assim o painel é representado pela resistência $R_{PV} = \frac{V_{PVMP}}{I_{PVMP}} = -3,55\Omega$. O valor negativo ocorre devido ao coeficiente angular da relação I-V (SOKOLOV et al., 2010).

Para a modelagem do conversor, o método aplicado consiste em obter os modelos em espaço de estados para cada uma das etapas de operação e, posteriormente, calcular um modelo médio do conversor (ERICKSON; MAKSIMOVIĆ, 2020, p. 216). Na representação do sistema apresentada na Figura 1, a tensão de saída (V_o) é considerada fixa pois, em um sistema real, seu valor será regulado pelo inversor conectado a rede (SOKOLOV et al., 2010).

Para a linearização do modelo médio obtido, é aplicado o método de linearização de pequenos sinais apresentado em (ERICKSON; MAKSIMOVIĆ, 2020, p. 221). Deste modo, o modelo linear que representa o conversor é descrito pela Eq. (1), onde as variáveis indicadas com $\bar{\cdot}$ representam variações destas variáveis sobre o ponto de operação,

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{I}}_{L1} \\ \dot{\bar{I}}_{L2} \\ \dot{\bar{V}}_{CIN} \\ \dot{\bar{V}}_{C1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{L1} & -\frac{(1-D)}{L1} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L2} \\ -\frac{1}{C_{PV}} & 0 & \frac{1}{R_{PV}CIN} & 0 \\ \frac{(1-D)}{C1} & -\frac{1}{C1} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{L1} \\ \bar{I}_{L2} \\ \bar{V}_{CIN} \\ \bar{V}_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_o(1-D)}{L1} \\ \frac{V_o}{L2} \\ 0 \\ -\frac{V_o(1-D)^2}{R_{PV}C1} \end{bmatrix} \bar{d} + \begin{bmatrix} 0 \\ -(1-D)V_o \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \bar{V}_o. \quad (1)$$

2.3 Projeto do controlador para tensão de entrada

O controle da tensão de entrada do conversor é realizado por uma estrutura de controle em cascata. Essa estrutura de controle oferece melhores resultados na dinâmica do sistema em malha fechada (BACHA; MUNTEANU; BRATCU, 2014, p. 194).

Neste método, há duas malhas de controle, uma interna e outra externa. A malha externa, malha da tensão V_{PV} , gera a referência para malha interna, da corrente I_{L2} , e essa, por sua vez, irá atuar sobre a variável manipulada que é a variação da razão cíclica do conversor sobre seu ponto de operação (\bar{d}). Nesse caso, a malha externa é responsável pelo controle da tensão de entrada e a interna da corrente do indutor L_2 (BELLINASSO et al., 2019).



2.3.1 Controlador da malha interna

O controlador é projetado através da frequência de cruzamento e margem de fase desejada para o sistema controlado em malha aberta (ANGÉLICO; CAMPANHOL; SILVA, 2014). Para o controlador de corrente, é definida uma margem de fase de 120° e uma frequência de cruzamento de 6000 rad/s . Para determinar os parâmetros do controlador, primeiramente, é analisada a função de transferência $\frac{\bar{I}_{L2}(s)}{d(s)}$ descrita pela Eq. (2), que é obtida através da Eq. (1).

$$G_{id}(s) = \frac{\bar{I}_{L2}(s)}{d(s)} = \frac{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}, \quad (2)$$

onde,

$$a_3 = 1.52 \cdot 10^5, \quad a_2 = 5.161 \cdot 10^9, \quad a_1 = 1.309 \cdot 10^{14}, \quad a_0 = 1.306 \cdot 10^{18}, \\ b_3 = 2.817 \cdot 10^4, \quad b_2 = 6.993 \cdot 10^8, \quad b_1 = 5.753 \cdot 10^{12}, \quad b_0 = 5.077 \cdot 10^{16}.$$

Aplicando a metodologia apresentada em (ANGÉLICO; CAMPANHOL; SILVA, 2014), é projetado um controlador PI que controle o sistema com as características estipuladas. O controlador para a malha interna é descrito por

$$PI_i(s) = 20 \cdot 10^{-3} \frac{(150 \cdot 10^{-6} s + 1)}{s}. \quad (3)$$

2.3.2 Controlador da malha externa

A partir da Eq. (1), obtém-se a função de transferência $\frac{\bar{V}_{PV}(s)}{\bar{I}_{L2}(s)}$, descrita por

$$G_v(s) = \frac{\bar{V}_{PV}(s)}{\bar{I}_{L2}(s)} = -\frac{A_0}{s^3 + B_2 s^2 + B_1 s + B_0}, \quad (4)$$

onde,

$$A_0 = 3,592 \cdot 10^{13}, \quad B_2 = 2,817 \cdot 10^4, \quad B_1 = 5,967 \cdot 10^8, \quad B_0 = 2,864 \cdot 10^{12}.$$

Aplicando o mesmo método utilizado no projeto do controlador da malha interna, um controlador PI é projetado para atender os seguintes requisitos para o sistema controlado em malha aberta: 120° de margem de fase e uma frequência de cruzamento de 1000 rad/s . O controlador PI para o controle da tensão do painel é representado por

$$PI_v(s) = 0,056 \frac{(900 \cdot 10^{-6} s + 1)}{s}. \quad (5)$$

3 RESULTADOS

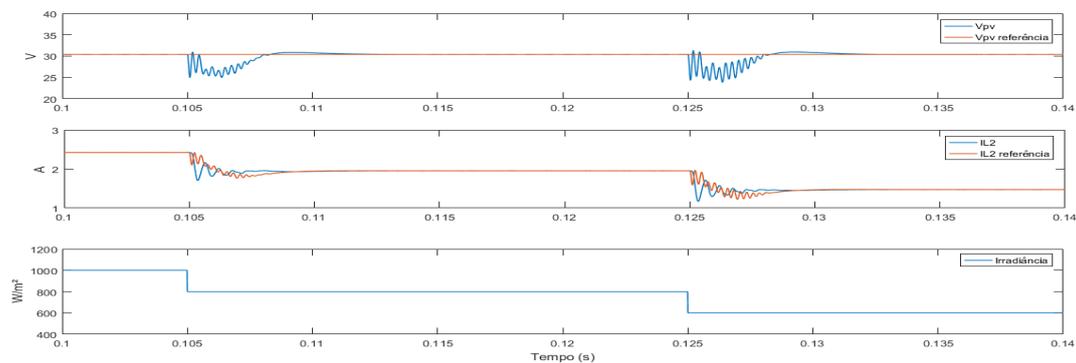
Deseja-se verificar a capacidade do controlador de garantir que a tensão de entrada, ou seja, do painel fotovoltaico, siga a referência. Também deseja-se que o controlador mantenha a estabilidade do sistema mesmo na ocorrência de variações de irradiância e de temperatura as quais alteram o ponto de operação do sistema. Estas situações são comuns em aplicações práticas. Para isso, foi utilizado o *software* PSIM. O programa possibilita modelar e simular um painel fotovoltaico e sua curva I-V com base nas especificações do fabricante do painel.

Foram realizadas simulações onde a temperatura dos painéis e irradiância foram alteradas bruscamente para se verificar a reação do controlador para esses casos. Na Figura 2 está ilustrado o comportamento do controle de

tensão e corrente para alterações bruscas de irradiância considerando-se a temperatura constante. Do mesmo modo, a Figura 3 apresenta o comportamento das mesmas variáveis com a variação da temperatura dos painéis considerando-se a irradiância constante. Como a temperatura altera significativamente a tensão do ponto de máxima potência, foi alterado também o sinal de referência da tensão para verificar a reação do sistema.

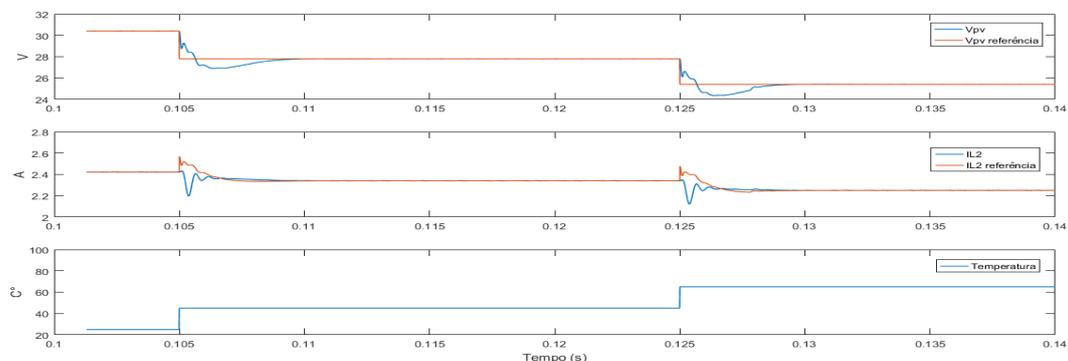
Observa-se nestes resultados que o sistema de controle projetado é capaz de garantir o rastreamento das referências mesmo sob diferentes condições de irradiância e temperatura. A convergências das variáveis controladas para os valores de referência se dá de maneira rápida e com transitórios aceitáveis.

Figura 2 – Desempenho do controladores de tensão e corrente sob ocorrência de mudanças de irradiância para temperatura de operação de 25°C.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 3 – Desempenho dos controladores de tensão e corrente sob ocorrência de mudanças de temperatura para irradiância de 1000 W/m².



Fonte: Autoria própria (2021).

4 CONCLUSÕES

Nesse artigo, foi apresentado o desenvolvimento de um controlador para a tensão de entrada de um conversor *Boost* quadrático não isolado com alto ganho de tensão. O intuito desse estudo foi analisar o funcionamento do conversor para uso em conjunto com um painel fotovoltaico em sistemas baseados em microinversores.

Através dos resultados obtidos, é possível afirmar que o controlador foi projetado corretamente. O controlador é capaz de seguir a referência desejada mesmo com perturbações no ponto de operação do sistema. Logo, o sistema em malha fechada está apto para ser utilizado juntamente com um algoritmo de *Maximum Power Point*



Tracking (MPPT) que irá definir a tensão de referência para a extração da máxima potência do painel fotovoltaico.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação Araucária (FA), pela bolsa de Iniciação Científica (Edital PROPPG 02/2020 — PIBIC) concedida ao acadêmico André Felipe Pereira Pedroso.

REFERÊNCIAS

- ANGÉLICO, Bruno A.; CAMPANHOL, Leonardo B.G.; SILVA, Sérgio A. Oliveira da. Proportional–integral/proportional–integral-derivative tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using Bode diagram. **IET Power Electronics**, Institution of Engineering e Technology (IET), v. 7, n. 10, p. 2647–2659, out. 2014. DOI: [10.1049/iet-pel.2013.0789](https://doi.org/10.1049/iet-pel.2013.0789). Disponível em: [↗](#).
- BACHA, Seddik; MUNTEANU, Iulian; BRATCU, Antoneta Iuliana. **Power Electronic Converters Modeling and Control**. [S.l.]: Springer London, 2014. DOI: [10.1007/978-1-4471-5478-5](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5478-5). Disponível em: [↗](#).
- BELLINASSO, Lucas Vizzotto et al. Cascade Control With Adaptive Voltage Controller Applied to Photovoltaic Boost Converters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 55, n. 2, p. 1903–1912, 2019. DOI: [10.1109/TIA.2018.2884904](https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2884904).
- CANADIANSOLAR - Painel Solar Fotovoltaico 265Wp - Canadian CSI CS6P-265P - BR. [S.l.]. Disponível em: [↗](#).
- ERICKSON, Robert W.; MAKSIMOVIĆ, Dragan. **Fundamentals of Power Electronics**. 3. ed. [S.l.]: Springer International Publishing, 2020. DOI: [10.1007/978-3-030-43881-4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-43881-4). Disponível em: [↗](#).
- KUMAR, Nallapaneni Manoj et al. Chapter 3 - Solar PV module technologies. In: GORJIAN, Shiva; SHUKLA, Ashish (Ed.). **Photovoltaic Solar Energy Conversion**. [S.l.]: Academic Press, 2020. P. 51–78. ISBN 978-0-12-819610-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819610-6.00003-X>. Disponível em: [↗](#).
- LEYVA RAMOS, J. et al. Control of a cascade boost converter with a single active switch. In: 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference. [S.l.: s.n.], 2008. P. 2383–2388. DOI: [10.1109/PESC.2008.4592298](https://doi.org/10.1109/PESC.2008.4592298).
- LUO, Fang Lin; YE, Hong. **Essential DC/DC Converters**. [S.l.]: CRC Press, out. 2018. DOI: [10.1201/9781420037104](https://doi.org/10.1201/9781420037104). Disponível em: [↗](#).
- OLIVEIRA REITER, Renan Diego de et al. Comparative analysis of series and parallel photovoltaic arrays under partial shading conditions. In: 2012 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications. [S.l.: s.n.], 2012. P. 1–5. DOI: [10.1109/INDUSCON.2012.6452791](https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2012.6452791).
- SOKOLOV, Michael et al. Dynamic analysis of photovoltaic system with MPP locus emulation. In: 2010 IEEE 26-th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel. [S.l.: s.n.], 2010. P. 000212–000215. DOI: [10.1109/EEEI.2010.5661961](https://doi.org/10.1109/EEEI.2010.5661961).
- YANG, Yongheng et al. **Advances in Grid-Connected Photovoltaic Power Conversion Systems**. [S.l.: s.n.], set. 2018. ISBN 9780081023396.