



Conversor Boost para sistemas fotovoltaicos

Boost converter for photovoltaic systems

Pedro Henrique Soccio Eller¹, Ezequiel Gonschorowski², Rafael Cardoso³

RESUMO

Este trabalho descreve a implementação de um sistema de controle com compensadores PI e algoritmo de rastreamento do ponto de maior potência (MPPT), considerando o método perturba e observa (P&O), para extrair a maior potência possível de um arranjo fotovoltaico no decorrer de seu funcionamento. Isso leva em consideração as variações dos fatores ambientais que influenciam nessa geração de energia elétrica. Para isso, fez-se uso de simulações nos *softwares* PSIM e MATLAB para verificar a implementação tanto de um conversor Boost quanto dos códigos de programação para a aplicação do controle e a atuação do MPPT. O resultado apresentado foi um funcionamento adequado para o controle de tensão e corrente nos terminais do sistema fotovoltaico, sendo capaz de encontrar as novas referências para os sinais após alguma perturbação. E, a partir dessas novas referências, o sistema é levado à estabilidade em um tempo de resposta apropriado e apresentando baixo erro.

PALAVRAS-CHAVE: conversor Boost; sistemas de controle; sistemas fotovoltaicos.

ABSTRACT

This paper describes the implementation of a control system, which uses PI compensators and maximum power point tracking (MPPT) algorithm, considering the perturbation and observation (P&O) method, so that the maximum power can be extracted from a photovoltaic array during its operation. This considers the variations of environmental factors that influence this generation of electrical energy. To this end, simulation software such as PSIM and MATLAB were used to implement both a Boost converter and the programming codes to the controllers and MPPT. The result presented was an adequate operation for voltage and current control at the photovoltaic system's terminals, being capable to find new signals' references after some perturbation. And, following these new references, the system is led to stability in an appropriate response time and with low error.

KEYWORDS: Boost converter; control systems; photovoltaic systems.

INTRODUÇÃO

Atualmente, percebe-se um crescimento no uso de sistemas fotovoltaicos como fonte auxiliar de energia elétrica, também, em pequenos negócios e residências. Esse fornecimento de energia se dá pela potência produzida, que depende da corrente e tensão presentes nos terminais do sistema gerador. A interação 'tensão x corrente' de um sistema fotovoltaico acaba por desenhar um gráfico onde a máxima potência se encontra no joelho da curva. Entretanto, a relação 'corrente x tensão' pode ser modificada de acordo com fatores ambientais, como a irradiância nas placas e a sua temperatura, como apresentado em CANADIAN SOLAR INC. (2016).

Dessa forma, é válido aplicar um sistema para que a potência máxima seja extraída do gerador independente das perturbações que possam vir a afetar as placas fotovoltaicas.

¹ Estudante do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil. E-mail: eller@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 4756038721153194.

² Estudante 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 Curso de Engenharia Elétrica/Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil. E-mail: rcardoso@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8148387096236908.



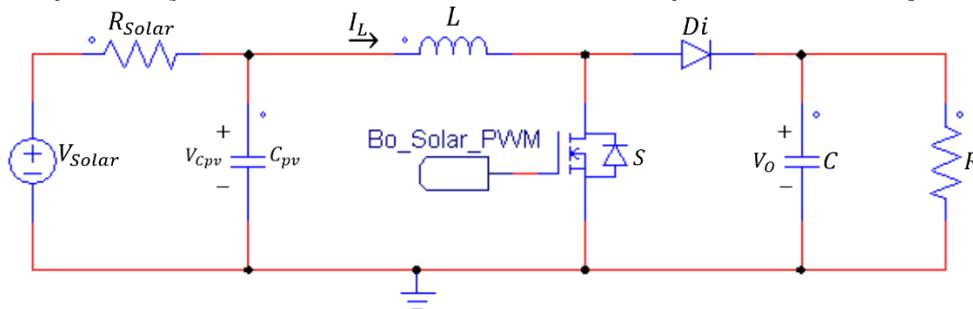
Segundo GONÇALVES (2020), conversores CC-CC elevadores são utilizados para executar tal tarefa. Sendo assim, adotou-se o Boost citado acoplado ao sistema fotovoltaico.

A partir disso, este trabalho visa projetar o conversor, a malha de controle e a implementação de um algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT, do inglês *Maximum Power Point Tracking*) para alcançar máxima potência. O MPPT escolhido foi o Perturba e Observa (P&O), que é de um funcionamento mais simples com apenas duas iterações (COELHO *et al.*, 2008).

MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1 ilustra um conversor Boost que tem em sua entrada um arranjo fotovoltaico. Nesta figura o arranjo fotovoltaico é representado por um circuito equivalente formado pela fonte V_{solar} e R_{solar} .

Figura 1 – Representação do conversor Boost com circuito equivalente do arranjo fotovoltaico



Fonte: Autoria própria.

O arranjo fotovoltaico é composto por quatro placas da marca MAXPOWER, modelo CS6U330P, em série. As características da placa em questão e os parâmetros para o projeto do Boost estão apresentados, respectivamente, nas Tabelas 1 e 2.

Com isso, os componentes calculados para o conversor da Figura 1, utilizando-se o método descrito por Hart (2010), estão descritos no Quadro 1.

Tabela 1 – Características das placas do arranjo fotovoltaico

Número de Pacas Fotovoltaicas em Série - N	4
Potência Máxima por Placa - P_{MAX} (W)	330
Tensão de Operação Máxima por Placa - V_{MP} (V)	37,2
Corrente de Operação para Máxima Potência - I_{MP} (A)	8,88
Tensão em Circuito Aberto por Placa - V_{OC} (V)	45,6
Corrente de Curto-Circuito - I_{CC} (A)	9,45

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Parâmetros para o conversor Boost

Tensão de Entrada Máxima - V_{in} (V)	182,4
Tensão de Saída - V_o (V)	380
Potência de Saída - P (W)	1320
Frequência de Chaveamento - f_s (Hz)	40000
Ondulação para a Corrente no Indutor - ΔI_L (%)	10
Ondulação para a Tensão de Saída - ΔV_o (%)	5

Fonte: Autoria própria.

Quadro 1 – Componentes para o conversor Boost

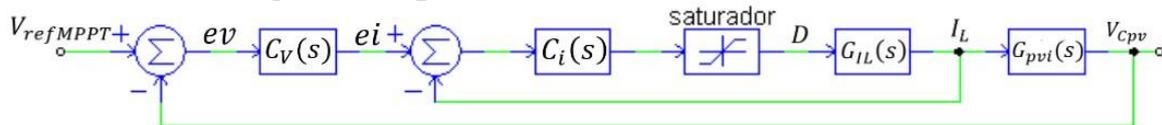
Indutor - L (mH)	2,2
Capacitor de Entrada - C_{pv} (μ F)	6,25
Capacitor de Saída - C (μ F)	2,06
Resistência de Saída - R (Ω)	109,394
Resistência Equivalente da Placa - R_{solar} (Ω)	3,784
Tensão Equivalente da Placa - V_{solar} (V)	182,4

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Utilizando a modelagem por espaço de estados, conforme Barbi (2015), e o modelo médio de pequenos sinais, considerando como variáveis de estado tensão a tensão nos capacitores de entrada (V_{Cpv}) e saída (V_o), e a corrente no indutor (I_L), foi possível encontrar funções de transferência para o sistema em função da variação de razão cíclica (d).

Analisando a malha de controle por sistema de blocos, na Figura 2, percebe-se que as funções de transferência referentes ao Boost são I_L em função de d ($G_{IL}(s)$) e V_{Cpv} em função de I_L ($G_{pvi}(s)$), que são descritas, respectivamente, nas Eq. (1) e (2).

Figura 2 – Diagrama de blocos do sistema de controle



Fonte: Autoria própria.

$$G_{IL}(s) = \frac{I_L(s)}{d(s)} = \frac{1,49 \cdot 10^5 \cdot s^2 - 7,279 \cdot 10^9 \cdot s - 4,141 \cdot 10^{13}}{s^3 + 45570 \cdot s^2 + 2,233 \cdot 10^8 \cdot s + 1,12 \cdot 10^{12}} \quad (1)$$

$$G_{pvi}(s) = \frac{V_{Cpv}(s)}{I_L(s)} = \frac{-2,383 \cdot 10^{10} \cdot s - 1,567 \cdot 10^{14}}{1,49 \cdot 10^5 \cdot s^2 + 7,279 \cdot 10^9 \cdot s + 4,141 \cdot 10^{13}} \quad (2)$$

A partir das funções de transferência e com o auxílio da ferramenta *Control System Designer* do MATLAB, obteve-se os controladores das Eq. (3) e (4), os quais são compensadores PI, com objetivo de zerar o erro e ajustar o tempo de resposta. Os parâmetros estabelecidos foram que, para funcionar de acordo com a frequência de atualização do MPPT (20 Hz), o controle da malha deveria apresentar uma resposta em



menos de 0,05 s, enquanto o controle da corrente teria de ser dez vezes mais rápido que o sistema todo.

$$C_i(s) = 0,227 + \frac{98,528}{s} \quad (3)$$

$$C_v = -0,135 - \frac{30}{s} \quad (4)$$

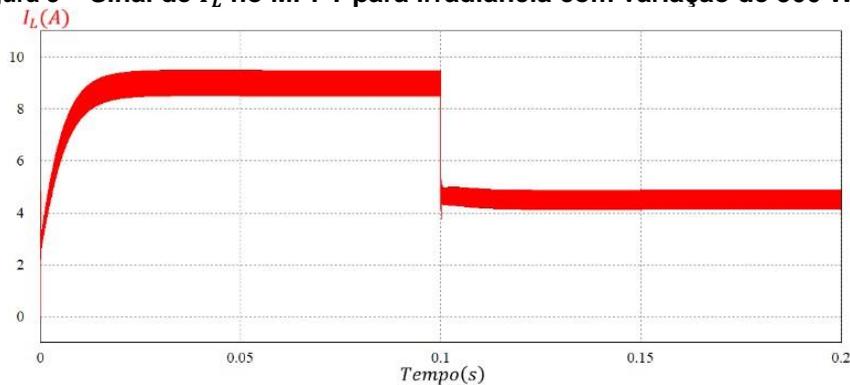
Esses controladores têm tempo de resposta de, respectivamente, 4,3 e 45,9 ms, portanto, estabilizam o sistema em tempo adequado.

Por fim, foi desenvolvido o código MPPT P&O (COELHO *et al.*, 2008). Aqui, foi selecionada uma taxa de variação (ΔV) de 0,5 V para a tensão de referência. E, assim, foram realizadas as simulações no *software* PSIM, para conferir a ação de controle considerando valores fixos e variáveis para a irradiância nas placas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

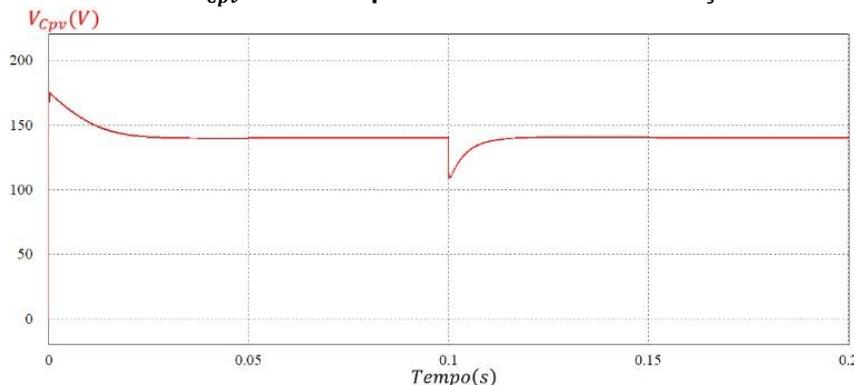
Inicialmente, considerou-se valores fixos para a irradiância, de 1000 W/m², e temperatura, com 25°C. Nesse caso, os valores esperados para I_L , V_{Cpv} e P são de, respectivamente, 8,8 A, 144,31 V, 1269,7 W. Em seguida, aplicou-se uma variação na irradiância de -500 W/m². Com isso, os valores esperados para I_L , V_{Cpv} e P passam a ser de, respectivamente, 4,41 A, 144,49 V, 637,44 W. Considerando uma simulação de 0,2 s, obteve-se os sinais apresentados nas Figuras 3, 4 e 5.

Figura 3 – Sinal de I_L no MPPT para irradiância com variação de 500 W/m²



Fonte: Autoria própria.

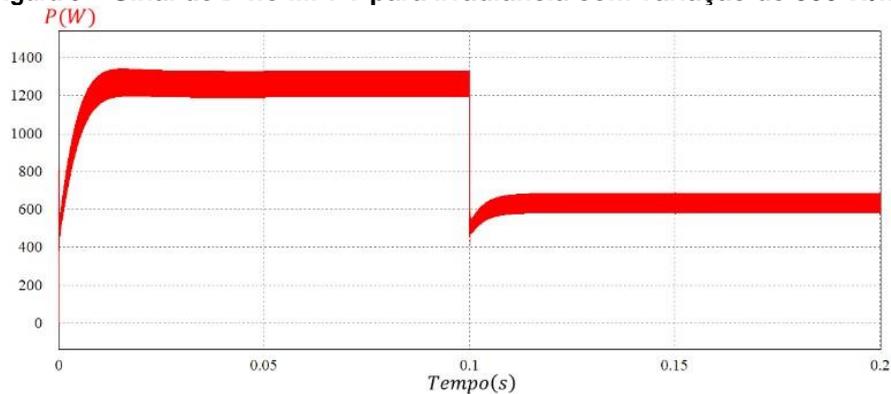
Figura 4 – Sinal de V_{Cpv} no MPPT para irradiância com variação de 500 W/m²



Fonte: Autoria própria.



Figura 5 – Sinal de P no MPPT para irradiância com variação de 500 W/m^2



Fonte: Autoria própria.

Com base nessas duas situações, os valores para I_L , V_{Cpv} e P quando o sistema é estabilizado foram extraídos dos gráficos da simulação e são organizados nos Quadros 2 e 3.

Quadro 2 – Dados dos sinais para irradiância de 1000 W/m^2

I_L (A)	8,96
Oscilação de I_L (A)	0,99
Erro de I_L (%)	1,75
V_{Cpv} (V)	141,26
Oscilação de V_{Cpv} (V)	0,5
Erro de V_{Cpv} (%)	2,11
P (W)	1265,13
Oscilação de P (W)	139,51
Erro de P (%)	0,36

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Quadro 3 – Dados dos sinais para irradiância de 500 W/m^2

I_L (A)	4,52
Oscilação de I_L (A)	0,74
Erro de I_L (%)	2,33
V_{Cpv} (V)	140,31
Oscilação de V_{Cpv} (V)	0,37
Erro de V_{Cpv} (%)	2,89
P (W)	633,89
Oscilação de P (W)	103,92
Erro de P (%)	0,56

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Percebe-se que, para ambos os casos, o MPPT foi capaz de localizar as referências correspondentes para I_L e V_{Cpv} , fazendo com que fosse extraída a maior potência possível



do sistema. As oscilações respeitaram os limites estabelecidos e os erros foram baixos. Ainda, pode se considerar que o tempo para a ação do sistema de controle foi satisfatório.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, percebe-se que a malha de controle projetada foi bem-sucedida. Observando a resposta dos sinais de tensão, corrente e potência, nota-se que o sistema consegue seguir a referência estabelecida e alterar essa referência corretamente de acordo com as perturbações presentes, apresentando baixo erro. O tempo da resposta transitória e as oscilações também foram condizentes com os valores estipulados teoricamente.

Com isso, o trabalho está apto a avançar para a montagem prática do sistema, considerando as não idealidades dos componentes reais e, também, a variação natural dos fatores climáticos.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio da UTFPR – Campus Pato Branco, e da equipe de pesquisa composta pelos alunos Leticia Ferreti e Ricardo Senna de Campos. Agradeço, especialmente, ao pós-graduando Ezequiel Gonschorowski pela sua contribuição a este trabalho.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

BARBI, Ivo. **Modelagem de Conversores CC-CC, Empregando Modelo Médio em Espaço de Estados**. Florianópolis, SC, BR: Edição do Autor, 2015.

CANADIAN SOLAR INC. **Ficha Técnica: MAXPOWER CS6U-315|320|325|330P**. 2016.

COELHO, R. F. et al. **Estudo dos conversores buck e boost aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos**. Florianópolis, SC, 2008.

GONÇALVES, M. M. **ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONVERSOR CC-CC BOOST ENTRELAÇADO PARA UM SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE**. 96 p. Dissertação (Pós-graduação) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2020.

HART, D. W. **Power Electronics**. Nova Iorque, NY, USA: McGraw-Hill Professional, 2010.