



Desenvolvimento e análise de conversor CC-CC com sistema de MPPT

Development and analysis of DC-DC converter with MPPT system

Eduardo Paganini *, Carlos Marcelo de Oliveira Stein†

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a implementação de um sistema de extração de potência para painéis fotovoltaicos, ou seja, conversor *boost* operando em conjunto com o algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) perturba e observa, que apresente um nível de eficiência acima dos 90 por cento, rigorosamente em razões cíclicas de operação elevadas, por meio da utilização de semicondutores constituídos de carbeto de silício (SiC). A curva característica de um módulo fotovoltaico apresenta um único ponto de máxima potência (MPP), que varia de acordo com as condições climáticas. Por meio de sistemas rastreadores pode-se identificar e induzir o painel a operar nesse MPP, variando a impedância do conversor, que ocorre pelo controle da corrente de saída do módulo. Para alcançar o objetivo, faz-se a análise e projeto do conversor *boost* e circuitos auxiliares de acionamento, alimentação, condicionamento de sinais e proteção. Os testes para verificação da operação do sistema foram realizados por meio da emulação do painel fotovoltaico. O conversor apresentou eficiência superior a 94 por cento e o sistema implementado foi capaz de operar sob condições climáticas variadas.

Palavras-chave: painéis fotovoltaicos. conversor *boost*. algoritmo MPPT.

ABSTRACT

This work aims to implement a power extraction system for photovoltaic panels, that is, a boost converter operating in conjunction with the maximum power point tracking (MPPT) algorithm perturbs and observes, which presents an efficiency level above of 90 percent, strictly in high cyclical operating ratios, through the use of semiconductors made of Silicon Carbide (SiC). The characteristic curve of a photovoltaic module has a single Maximum Power Point (MPP), which varies according to weather conditions. Through tracking systems it is possible to identify and induce the panel to operate in this MPP, varying the impedance of the converter, which occurs by controlling the output current of the module. To achieve the objective, the boost converter and auxiliary circuits for activation, power supply, signal conditioning and protection are analyzed and designed. The tests to verify the system operation were carried out through the emulation of the photovoltaic panel. The converter presented efficiency above 94 percent and the implemented system was able to operate under varied climatic conditions.

Keywords: photovoltaic panels. boost converter. MPPT algorithm.

1 INTRODUÇÃO

O uso de sistemas fotovoltaicos na produção de energia renovável aumentou significativamente nas últimas décadas. Tem-se: “O mercado mundial fotovoltaico vem crescendo exponencialmente nos últimos anos, atingindo, em 2015, conforme IEA(2016), a capacidade total instalada de 227 GWp” (NASCIMENTO, 2017, p.6).

* Departamento de engenharia elétrica; edupaganini1@hotmail.com.

† Departamento de engenharia elétrica; cmstein@utfpr.edu.br.



A otimização da produção de energia fotovoltaica é um fator explorado em sistemas de geração, pois, a eficiência dos módulos ainda é relativamente baixa e apresenta custo inicial de instalação elevado (BRITO et al., 2010, p.1). Da curva característica dos módulos, tem-se um ponto de operação em que a potência extraída é máxima, denominado ponto de máxima potência (MPP), que varia de acordo com as condições climáticas de operação (GOMES, 2014, p.26). Faz-se então o seguinte questionamento: “Como manter a potência extraída em níveis máximos em diferentes condições climáticas?”.

Para contornar este problema, implementa-se um algoritmo rastreador do ponto de máxima potência (MPPT), que consiste em técnicas que avaliam, através de condicionais, a potência extraída e tomam decisões com base nos dados obtidos, gerando uma referência equivalente ao MPP, maximizando a eficiência do painel (GOMES, 2014, p.32). A utilização do algoritmo MPPT em conjunto com um conversor, nesse caso o *boost*, opera como uma impedância variável, controlando a corrente e conseqüentemente a resistência vista pelo painel fotovoltaico (RIBEIRO, 2011, p.20). Nesse sentido, o objetivo desse trabalho é implementar um sistema de extração de potência constituído de um conversor *boost* e um algoritmo MPPT perturba e observa. Destaca-se que o sistema pode ser utilizado em trabalhos futuros para análise de painéis e conversores.

2 MÉTODO

Inicia-se o projeto do conversor *boost* definindo os parâmetros de entrada. Nesse caso, corrente, tensão e potência definidas pelo painel fotovoltaico. A Tabela 1 apresenta as características do módulo em condição de operação nominal de irradiação de 1.000 W/m^2 e temperatura de 25°C .

Tabela 1 – Especificações do painel fotovoltaico.

Modelo CS6U-325P		
Potência no MPP	P_{MPP}	325 W
Corrente no MPP	I_{MPP}	8,78 A
Tensão no MPP	V_{MPP}	37,0 V
Corrente de curto-circuito	I_{cc}	9,34 A
Tensão de circuito-aberto	V_{oc}	45,5 V

Fonte: INC (2016).

A Tabela 2 apresenta as características de projeto do conversor *boost*.

Tabela 2 – Requisitos de projeto do conversor *boost*.

Tensão de saída do conversor	V_O	240 V
Frequência de chaveamento	f	40 kHz
Ondulação de corrente no indutor	$\% \Delta I_L$	7 %
Ondulação de tensão no capacitor	$\% \Delta V_C$	1 %
Eficiência do conversor	η	> 90 %

Fonte: Autoria própria (2021).

Definidos os requisitos de projeto, pode-se determinar os componentes do conversor *boost*. Implementa-se o indutor e especifica-se os demais. Utilizou-se semicondutores constituídos de carbeto de silício (SiC), visando aumentar a eficiência do conversor. Calculou-se os valores dos componentes com base nas equações apresentadas na análise do conversor *boost* proposta em Hart (2011). No Quadro 1, observa-se os componentes determinados



para a implementação.

Quadro 1 – Componentes para a implementação do conversor *boost*.

Componente	Especificações
Indutor	1,2586 mH 75,94 mΩ Núcleo EE 65/13 73 Espiras Condutores AWG 24 Entreferro 1,4 mm
Chave	C2M0080120D V_{DS} 1200 V I_D 25 A $R_{DS(on)}$ (25°C) 80 mΩ
Diodo	C3D12065A V_{RRM} 650 V I_F (135°C) 16 A Q_C 34 nC
Capacitor	4 x 3 μ F 800 V Resistência 0,5 mΩ Poliéster
Carga Resistiva	2 x 350 Ω 300 W

Fonte: Autoria própria (2021).

Em sequência, faz-se a análise do conversor *boost* por meio da técnica de espaço de estados médio, que permite a obtenção de circuitos e equações equivalentes a operação em regime permanente e funções de transferência para pequenas perturbações, em função da razão cíclica ou tensão de entrada. Considerou-se as resistências em série com os elementos que representam as perdas por condução e as tensões de limiar dos semicondutores, referidas ao mínimo potencial elétrico aplicável para que se altere do estado de bloqueio para condução. A modelagem foi baseada em Barbi (2015).

Determina-se a eficiência máxima do conversor por meio da análise em regime permanente do circuito equivalente. Define-se eficiência máxima, pois, perdas como as de comutação não foram introduzidas na modelagem do sistema, implicando na redução da eficiência total. Estimou-se uma eficiência de 95,45%.

A energia extraída do painel fotovoltaico pode ser maximizada ao zerar o erro entre a referência do MPPT e a variável de interesse aferida, através de controladores que alteram a planta em malha fechada do conversor. Das funções de transferência, determinou-se o controlador da corrente de entrada no indutor do conversor, nesse caso, um PID.

Por fim, realiza-se a implementação do algoritmo MPPT perturba e observa no sistema para maximizar os níveis de extração de potência para diferentes condições climáticas. O algoritmo perturba e observa consiste em causar perturbações de corrente na saída do painel fotovoltaico e analisar quais são os efeitos sobre a potência extraída (GOMES, 2014, p.44).

Em precedente a implementação, destaca-se a execução de testes por meio de simulações dos circuitos, com objetivo de verificar a operação do sistema em malha aberta, fechada e com MPPT.

Circuitos auxiliares são necessários para a adequação dos sinais de tensão e corrente para o microcontrolador, alimentação dos circuitos de medição e realização da proteção do conversor. Implementou-se quatro circuitos divididos em: acionamento da chave semicondutora, alimentação dos circuitos de instrumentação, condicionamento de sinais de corrente e tensão e proteção do conversor.

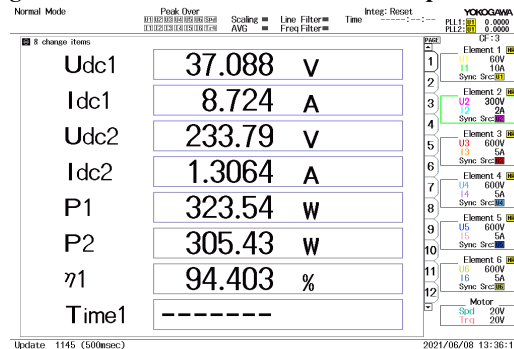
Os resultados experimentais do sistema de extração de potência foram obtidos por meio do ensaio em bancada utilizando a fonte ITECH IT6018C-800-60, que possui um *software* para a emulação de painéis fotovoltaicos, possibilitando a escolha da irradiação e temperatura incidentes sobre o módulo.

Não obstante, é possível visualizar em tempo real a curva de potência do painel, e conseqüentemente em qual ponto de operação o sistema se encontra. Pode-se assim comprovar a operação do sistema rastreador de máxima potência, por meio dos pontos de potência e eficiência registrados pela própria fonte a cada 1 segundo.

3 RESULTADOS

O primeiro resultado apresenta a eficiência do conversor *boost* implementado para o ponto de operação nominal, obtida utilizando o equipamento Yokogawa WT1800, de acordo com a Fig. 1.

Figura 1 – Eficiência do conversor *boost* implementado.

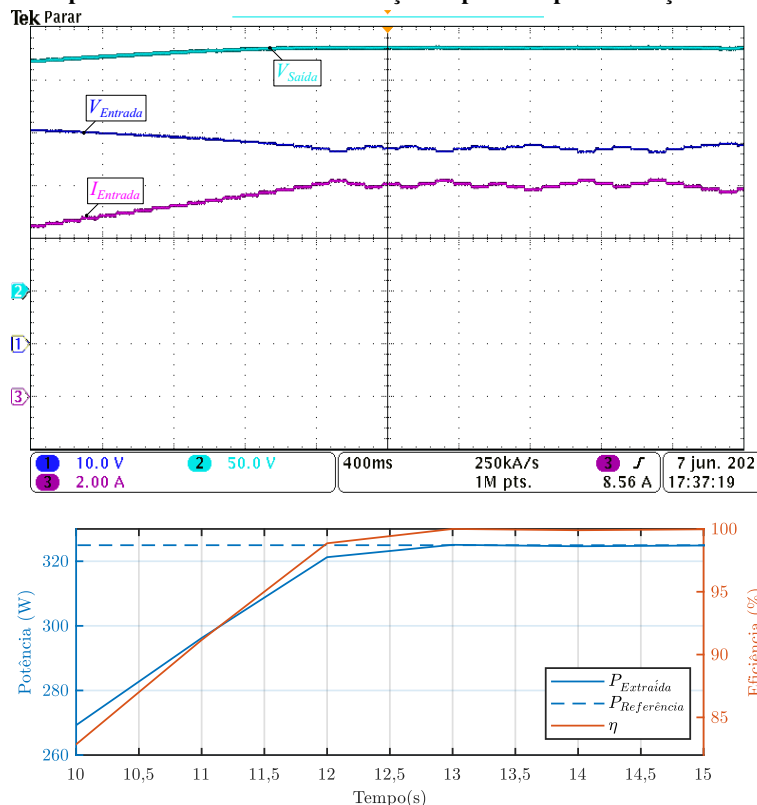


Fonte: Autoria própria (2021).

Observa-se que o conversor apresentou uma eficiência de 94,403%, operando com razão cíclica de 0,8492, respeitando o requisito de projeto de eficiência superior a 90%. Obteve-se este resultado, pois, as resistências de condução dos elementos utilizados apresentam valores reduzidos, principalmente da chave SiC.

Quanto aos resultados do sistema de extração, na Fig. 2 é possível observar as curvas de corrente e tensão no conversor e de potência extraída, gerados com dados obtidos com o emulador fotovoltaico, para condições climáticas constantes de 1000 W/m² e 25°C.

Figura 2 – Curvas experimentais do sistema de extração de potência para condições de entrada constante.



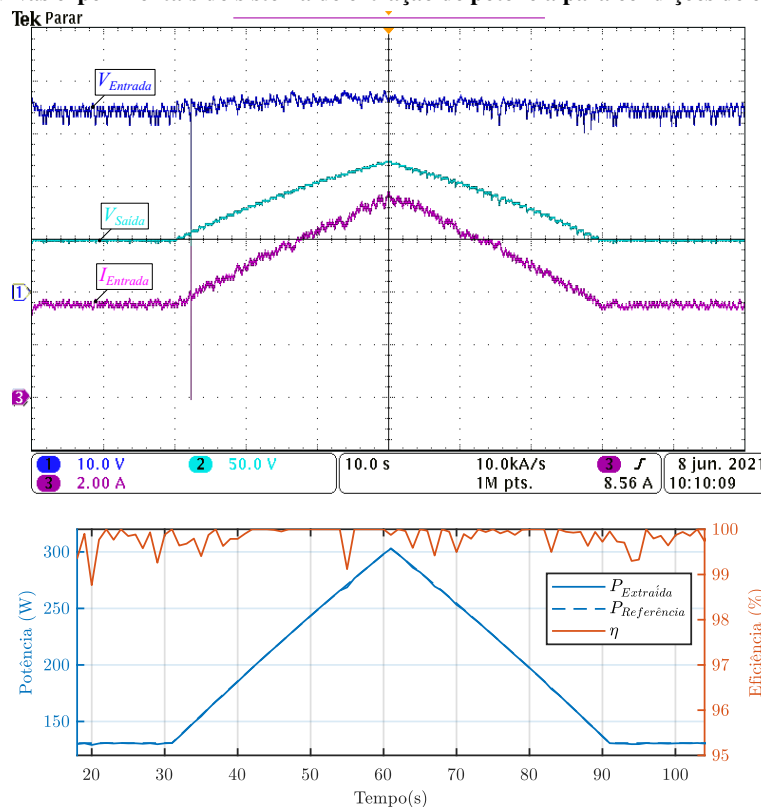
Fonte: Autoria própria (2021).

Observa-se que após um período de transitório no rastreamento, as curvas estabilizam-se em torno do MPP estipulado pela fonte. A nova referência gerada pelo algoritmo MPPT é atualizada a cada 100 ms (10 Hz), de acordo com as variações.

Como foi citado, as curvas de potência e eficiência apresentadas abaixo dos resultados experimentais são dados obtidos com o emulador FV, que validam o rastreamento do MPP. Nos instantes iniciais a potência extraída aumenta de acordo com a velocidade do algoritmo MPPT. Após entrar em regime, o sistema atinge e mantém os níveis de extração próximos à potência máxima de 324,97 W, como pode-se observar na curva de potência extraída, de acordo com as medições da fonte, apresentada na Fig. 2. Os resultados indicam que após o transitório, a eficiência na extração de potência do método é maior a 99%.

No segundo teste variou-se a temperatura de 15°C para 45°C em uma taxa de 1°C por segundo. A irradiação foi incrementada de 400 W/m² até 1000 W/m² em uma taxa de 20 W/m² por segundo. As curvas obtidas experimentalmente são apresentadas na Fig. 3.

Figura 3 – Curvas experimentais do sistema de extração de potência para condições de entrada variável.



Fonte: Autoria própria (2021).

Observa-se que a corrente de entrada e tensão de saída do conversor apresentaram o mesmo comportamento da variação de irradiação em formato de rampa. Mesmo variando-se os dois parâmetros de entrada do painel, foi possível realizar o rastreamento do MPP em todo o período do teste. O sistema de extração manteve os níveis de potência muito próximos a nominal fornecida no decorrer dos testes. A eficiência superou os 98,5% durante todo o período do teste, mantendo uma média de 99,77%.



4 CONCLUSÕES

A utilização da técnica de espaços de estados médios permitiu a modelagem do conversor *boost* com grande precisão, possibilitando a obtenção de parâmetros de operação em regime permanente, como ganho estático e eficiência, e em regime transitório, por meio das funções de transferência. A eficiência do conversor (94,403%) apresentou um erro relativo de 1,097% em comparação com o calculado (95,45%).

A utilização da fonte para a emulação do painel permitiu a realização de testes em diversos cenários, objetivo principal do trabalho. Os resultados experimentais indicam que o sistema de extração pode operar em cenários de irradiação e temperatura constantes e variáveis.

O emprego do algoritmo perturba e observa mostrou-se uma opção simples e viável, entregando níveis de eficiência elevados na extração de potência, geralmente acima dos 99%.

5 AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho foi possível graças ao PIBIC e UTFPR, instituição financiadora. Agradeço também a meu orientador, Carlos Marcelo de Oliveira Stein, por sempre me dar suporte e orientar da melhor forma o desenvolvimento do trabalho. Por fim, agradeço ao PPGEE-PB por disponibilizar os equipamentos e laboratórios.

6 REFERÊNCIAS

- BARBI, I. **Modelagem de conversores CC-CC empregando modelo médio em espaço de estados**. Edição do autor. Florianópolis-SC, 2015.
- BRITO, M. A. D. et al. Avaliação das principais técnicas para obtenção de mppt de painéis fotovoltaicos. In: **IEEE. 2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications-INDUSCON 2010**. [S.l.], 2010. p. 1-6.
- GOMES, A. C. **Análise, projeto e implementação de um conversor Boost com técnica de rastreamento de máxima potência para sistemas fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014. 142 p.
- HART, D.W. **Power electronics**. New York: Tata McGraw-Hill, 2011. ISBN 9780071321204.
- INC, C. S. **Folha de dados: maxpower CS6U-315|320|325|330P**. 2016. Acessado em: 05 ago. 2021. Disponível em: <https://download.aldo.com.br/pdfprodutos/Produto34223IdArquivo4478.pdf>.
- NASCIMENTO, R. L. **Energia solar no Brasil: situação e perspectivas**. Brasil: Câmara Legislativa, 2017. 1-46 p.
- RIBEIRO, R. V. **Sistema fotovoltaico autônomo baseado em conversores CC-CC boost**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. 146 p.