

Estudo Comparativo de Técnicas de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência em Arranjos Fotovoltaicos

Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Techniques in Photovoltaic Arrays

Davi Carvalho Moreira,^{a,*} Alexandre de Souza Brasil^b, Marcus Vinicius Alves Nunes^a

^a Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, CEP 66075-110, Belém-PA, Brasil.

*E-mail: davicarvalhomoreira@hotmail.com.br

Recebido em: 2 de Abril de 2021

Aceito em: 14 de Abril de 2021

Publicado online: 29 de julho de 2021

This paper presents a modeling of a photovoltaic (PV) array connected to a Boost-type DC-DC converter to perform a comparative analysis between two maximum power point tracking (MPPT) methods. It was chosen a conventional method, Disturbance and Observation (P&O), for its wide use, and an artificial intelligence method, Fuzzy Logic Control (FLC), for its robustness and independence to the PV arrangement model. The comparison between the techniques considered steady state error, dynamic response and efficiency over a wide power range. The P&O and FLC algorithms were used to establish the reference voltage and the cyclic ratio, respectively, to regulate the terminal voltage of the PV array. In general, the MPPT Fuzzy and MPPT P&O methods performed efficient and accurate maximum power point tracking and the advantages of each technique were discussed.

Keywords: Photovoltaic energy; MPPT; P&O; fuzzy

1. Introdução

Atualmente, a exigência de geração de energia elétrica levou a uma intensa pesquisa de formas alternativas de geração. Uma das formas possíveis de geração de energia elétrica é a energia fotovoltaica. Esta energia é gerada através de arranjos fotovoltaicos (PV) e possuem grande potencial para fornecer energia com um impacto mínimo ao meio ambiente, uma vez que é limpa e livre de poluição. Estes arranjos apresentam características próprias, como a característica elétrica não é linear, e necessita de técnicas de controle para operação com maior eficiência devida variação da irradiância solar ao longo do dia.¹

Vários métodos de rastreamento do ponto de máxima potência, conhecidas do acrônimo em inglês MPPT, “*Maximum Power Point Tracking*” foram estudados e implementados em arranjos PV. Os métodos MPPT podem ser classificados como: técnicas off-line,² e técnicas on-line.³ As técnicas off-line requerem um modelo de painel fotovoltaico e a medição da temperatura e irradiância solar. As técnicas on-line não requerem a medição da temperatura e irradiância solar. De acordo com Xiao e Dunford (2004),⁴ entre os recursos mais desejáveis nas técnicas de MPPT estão o seguinte: (i) Estabilidade; (ii) Resposta dinâmica rápida; (iii) Erro pequeno no estado estacionário; (iv) Robustez a distúrbios; e (v) Eficiência em uma grande faixa de potência. Os métodos convencionais on-line podem ser classificados como: Tensão Constante, Perturbação e Observação (P&O) e Condutância Incremental. Algumas variações desses métodos também são apresentadas na literatura.

O método de Perturbação e Observação (P&O), frequentemente usado em arranjos fotovoltaicos, opera perturbando o valor de referência para mover o ponto de operação em direção ao MPP, abreviação de *Maximum Power Point*.⁵ Essa técnica apresenta resposta dinâmica lenta e erro no estado estacionário. A escolha de altos valores de perturbação fornece um rastreamento rápido para a tensão no MPP, mas possui grandes oscilações. Se a perturbação tiver um valor baixo, o MPPT será mais lento, mas terá pequenas oscilações ao redor do MPP. Os métodos de inteligência artificial, como por exemplo a Lógica de Controle Fuzzy (LCF), são bem aceitos devido o desempenho estável e robusto, além de considerar processos complexos apenas como um relacionamento entre entradas e saídas.⁶ Por fim, este trabalho compara dois algoritmos MPPT, em que a variável de saída irá atuar diretamente em um conversor tipo Boost (CC-CC) a fim de buscar a tensão no MPP. O sistema PV foi modelado em Matlab e uma análise comparativa do erro de estado estacionário, resposta dinâmica e eficiência foi realizada.

2. Configuração do Arranjo Fotovoltaico

Neste trabalho utilizou-se o modelo de célula fotovoltaica de único diodo, com circuito equivalente mostrado na Figura 1. Geralmente a resistência à derivação é muito grande,⁷ e a resistência em série é muito pequena.⁸ Portanto, as resistências podem ser desprezadas para simplificar a análise. A característica I(V) de uma célula solar pode ser descrita pela Equação 1.⁹

$$I = I_g - I_{sat} \cdot \left[\exp \frac{q \cdot (V + I R_s)}{A \cdot k \cdot T} - 1 \right] \quad (1)$$

onde: V = Tensão de saída do arranjo fotovoltaico em V; I = Corrente de saída do arranjo fotovoltaico em A; I_g = Corrente gerada sob uma dada irradiância em A; I_{sat} = Corrente reversa de saturação em A; q = Carga do elétron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ V); A = Fator de idealidade do diodo; k = Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ (J/K)); T = Temperatura em K.

De acordo com Yu *et al.* (2002),¹⁰ as correntes I_g e I_{sat} são dadas pelas seguintes Equações 2 e 3:

$$I_{sat} = I_{or} \cdot \left[\frac{T}{T_r} \right]^3 \exp \left[\frac{q \cdot E_g}{k \cdot A} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2)$$

$$I_g = [I_{sc} + k_i \cdot (T - T_r)] \cdot \frac{G}{100} \quad (3)$$

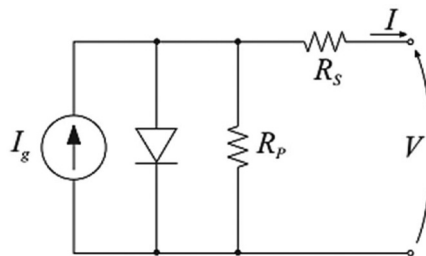


Figura 1. Circuito equivalente do arranjo fotovoltaico

onde: T_r = Temperatura de referência em K; I_{or} = Corrente de saturação a temperatura T_r em A; E_g = Energia da banda do semiconductor usado no arranjo em J; k_i = Coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito; G = Irradiância em W/cm^2 .

O arranjo selecionado possui potência de 5,8 kW, é composto de 7 conexões paralelas de 5 painéis conectados em série, sua curva característica P-V é mostrada na Figura 2. Foi utilizado o modelo KC130GT do fabricante Kyocera Solar para cada painel fotovoltaico. Na Tabela 1 são mostrados os parâmetros do painel escolhido e os resultados da simulação.

3. Modelagem do Conversor Boost

O arranjo fotovoltaico geralmente gera energia em baixa tensão e, dependendo da potência do processo, essa característica pode representar um inconveniente. Nesses casos, um conversor Boost pode ser utilizado devido à sua alta eficiência e ao seu pequeno número de componentes.¹¹ Para satisfazer a faixa de valores de corrente em que se encontram o ponto de máxima potência na saída do painel, foi modelado um conversor Boost, mostrado na Figura 3, operando em modo de condução contínuo, de acordo com o trabalho de Magno *et al.* (2018).¹² O conversor Boost foi modelado conforme a Equação 4. A Tabela 2 mostra as especificações para o projeto do conversor Boost.

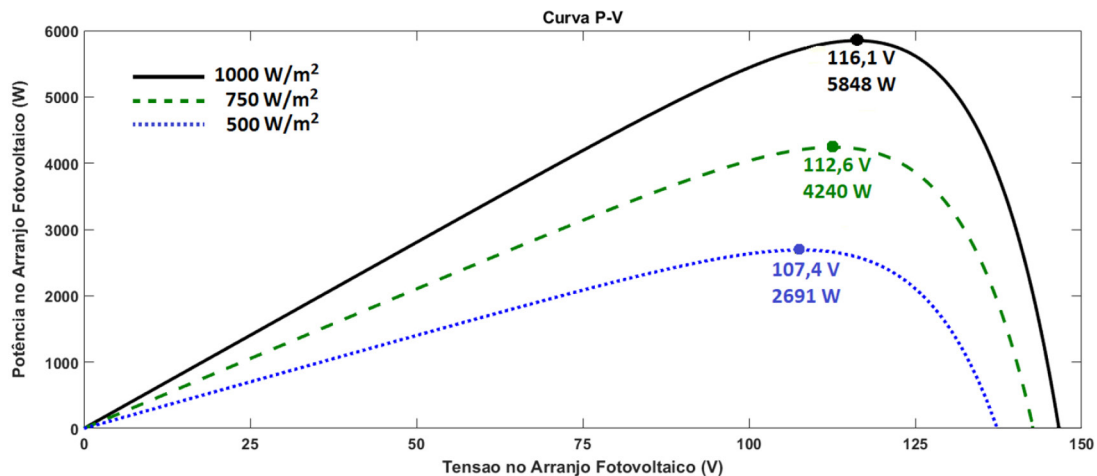


Figura 2. Curva característica P-V do arranjo fotovoltaico

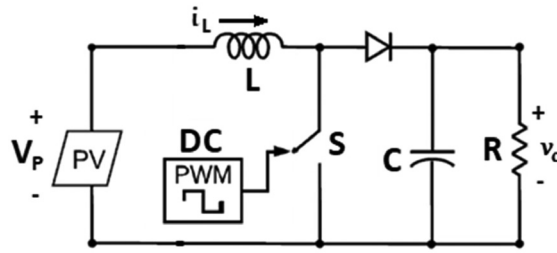


Figura 3. Conversor Boost conectado ao arranjo fotovoltaico

Tabela 1. Parâmetros elétricos do painel PV, KC130GT (25 °C – 1000 W/m²)

Características	Grandezas	Fabricante	Simulação
Potência máxima	P_{max} (W)	130	130
Tensão de potência máxima	V_{MPP} (V)	17,6	18,6
Corrente de potência máxima	I_{MPP} (A)	7,39	6,99
Tensão de circuito aberto	V_{oc} (V)	21,9	23,8
Corrente de curto circuito	I_{sc} (A)	8,02	8,02
Nº células fotovoltaicas	un.	36	36

Tabela 2. Características e parâmetros para cálculo dos elementos do conversor

f_s	Δi_L	Δv_o	V_p	V_o	P_{max}
20 kHz	10%	10%	116,1 V	380 V	5848 W

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{(S-1)}{L} \\ \frac{(1-S)}{C} & -\frac{1}{R.C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L \\ v_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_p \quad (4)$$

$$L = \frac{V_p \cdot DC}{f_s \cdot \Delta i_L} \quad (7)$$

A resistência (ou a carga) foi calculada através da lei de Ohm, retornando o valor de $R = 24,7 \Omega$. Com as tensões de entrada (V_p) e saída (V_o) para irradiação solar máxima, foi calculada a razão cíclica com a Equação 5.

$$DC = \frac{V_o - V_p}{V_o} \quad (5)$$

Com o valor da resistência R foi calculado a capacitância pela Equação 6, em seguida foi calculada a indutância L usando a Equação 7.

$$C = \frac{DC}{R \cdot f_s \cdot \Delta V_o} \quad (6)$$

O conversor CC-CC necessita de um PWM (*Pulse Width Modulation*). O PWM tem a função de modular um ciclo de pulsos binários, e essa possível variação, entre 0% - 100%, do ciclo de pulsos é capaz de alterar o valor de tensão. Esta variação é chamada de razão cíclica (DC), abreviação de *Duty Cycle*. A Figura 4 mostra a topologia completa implementada.

4. Perturbação e Observação (P&O)

O método Perturbação e Observação (P&O) compara a potência da etapa anterior com a potência da nova etapa, de forma a aumentar ou diminuir a tensão em busca do MPP.^{13,14} De acordo com Silva (2015),¹⁵ o valor do MPP

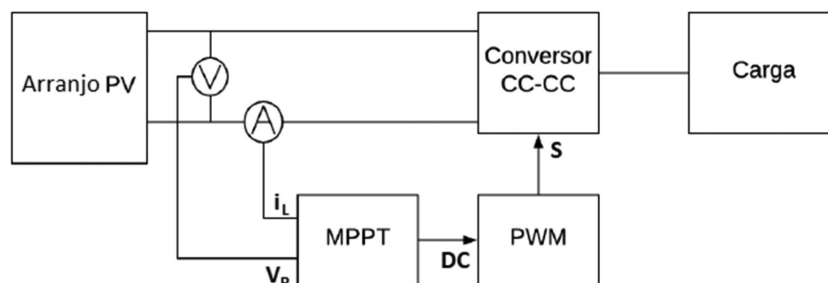


Figura 4. Esquemático da topologia completa implementado

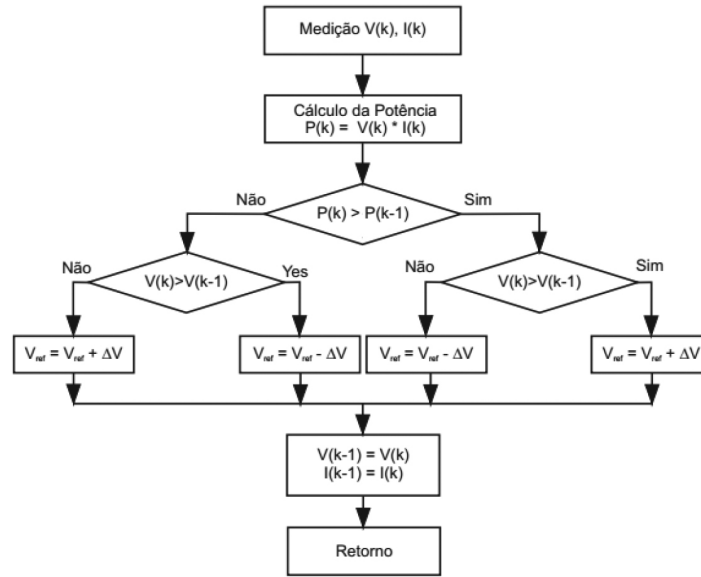


Figura 5. Fluxograma do método P&O

nunca é atingido de forma definitiva, pois as perturbações tem função apenas de deixar o sistema oscilando próximo ao MPP em regime permanente.

O método P&O apresenta bons resultados quando a irradiância ou temperatura não variam rapidamente com o tempo. Por outro lado, entre as desvantagens do método, além do erro em regime permanente, a resposta dinâmica é considerada lenta, quando ocorrem mudanças rápidas na temperatura e radiação solar.¹⁶ O fluxograma desta técnica com a variação da tensão de referência é mostrado na Figura 5.

5. Lógica de Controle Fuzzy (LCF)

O controle por lógica Fuzzy (LCF) é um método que permite a construção de controladores não lineares a partir de informações heurísticas provenientes do conhecimento de um especialista.¹⁷ A LCF consiste na variação de tensão (ou corrente) e potência do arranjo PV, e de acordo com estas variações, o algoritmo atua no conversor, através de um PWM, a fim de corrigir a tensão do MPP. O MPPT Fuzzy é uma técnica bem estabelecida, geralmente atuando na variação da potência (ΔP) e variação da tensão (ΔV). Neste trabalho foi substituída a variável ΔV pela variação da corrente (ΔI), pois neste arranjo implementado a variável ΔI correspondeu melhor ao conjunto de regras do Fuzzy.

O MPPT Fuzzy implementado consistiu nas variáveis de entrada ΔP e ΔI , e variável de saída DC. Estas variáveis foram representadas pelas curvas *negative big* (nb), *negative small* (ns), *positive small* (ps) e *positive big* (pb). As Figuras 6 e 7 mostraram as funções de pertinência e a função de saída, respectivamente, já na Figura 8 é mostrada a superfície da LCF com base no conjunto de regras apresentado na Tabela 3.

6. Resultados e Discussão

As simulações dos dois métodos MPPT foram feitas com os mesmos parâmetros do conversor Boost ($R = 24,7 \Omega$; $L = 40,3 \text{ mH}$; $C = 14,0 \mu\text{F}$) e a mesma frequência de chaveamento ($f_s = 20 \text{ kHz}$), para possibilitar uma análise comparativa. As simulações ocorreram variando a intensidade da irradiação solar com o tempo, conforme a Tabela 4.

O método MPPT P&O apresentou um comportamento oscilatório significativo de potência (variação máxima de 116 W) no instante das mudanças de irradiância (Figura 9) com tempo de estabilização em torno de 80 ms, porém observa-se um baixo erro no estado estacionário em torno de 0,07%. Observa-se na Figura 10 uma elevada variação na tensão de saída do conversor (aproximadamente 22 V), indicando um maior desgaste nas chaves semicondutoras de potência do conversor Boost.

Tabela 3. Tabela de regras MPTT Fuzzy

$\Delta P \backslash \Delta I$	nb	ns	ps	pb
	nb	pb	pb	nb
ns	pb	ps	ns	nb
ps	nb	ns	ps	pb
pb	nb	nb	pb	pb

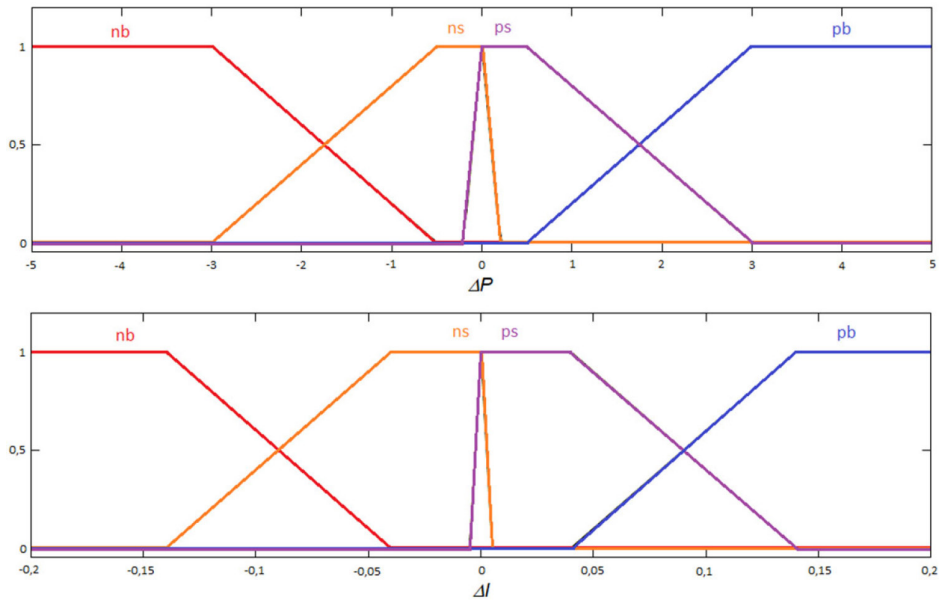


Figura 6. Funções de pertinência

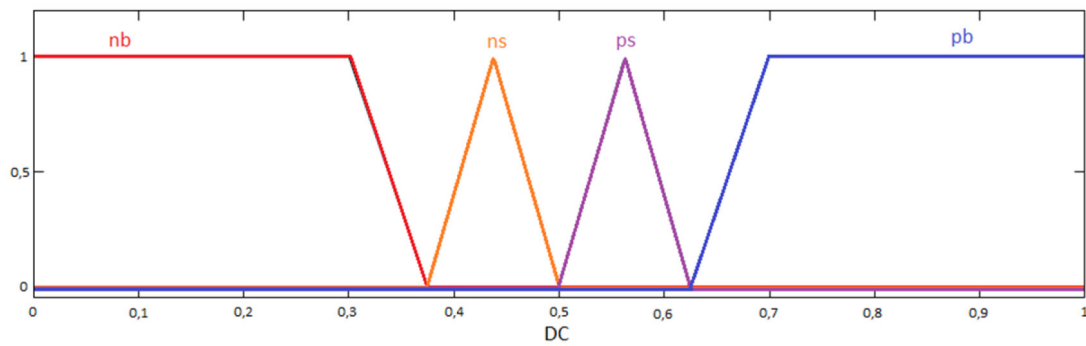


Figura 7. Função de saída

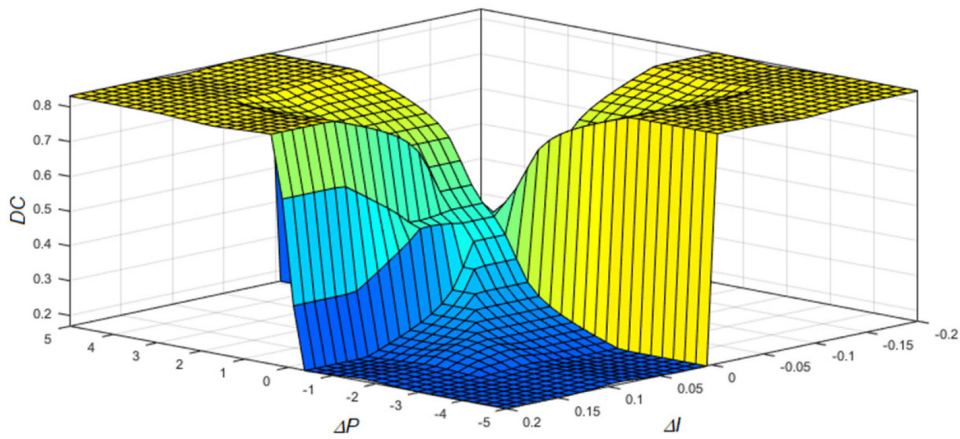


Figura 8. Superfície de regras do Fuzzy

Tabela 4. Variação da irradiação solar com o tempo

Tempo (seg)	Irradiância (W/m ²)
0 a 1	500
1 a 2	750
2 a 3	1000

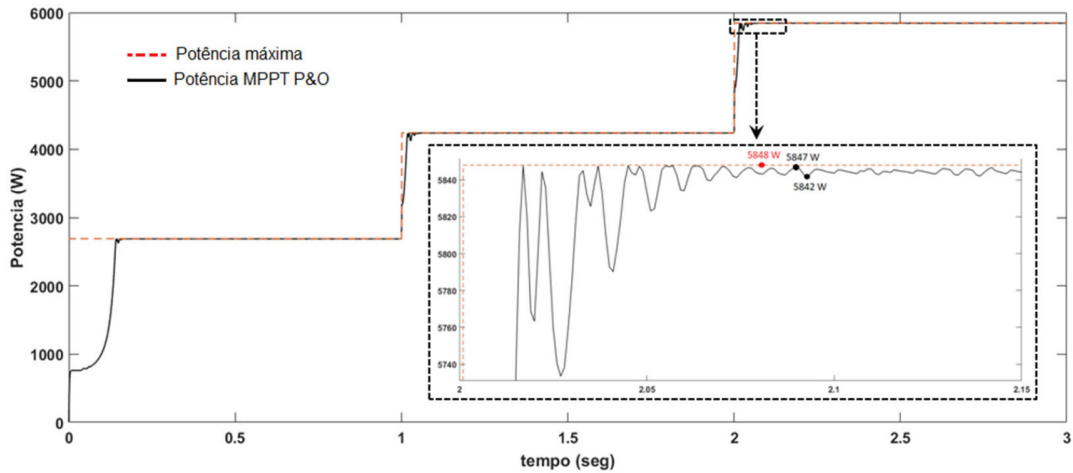


Figura 9. Potência fornecida pelo arranjo PV usando o método MPPT P&O

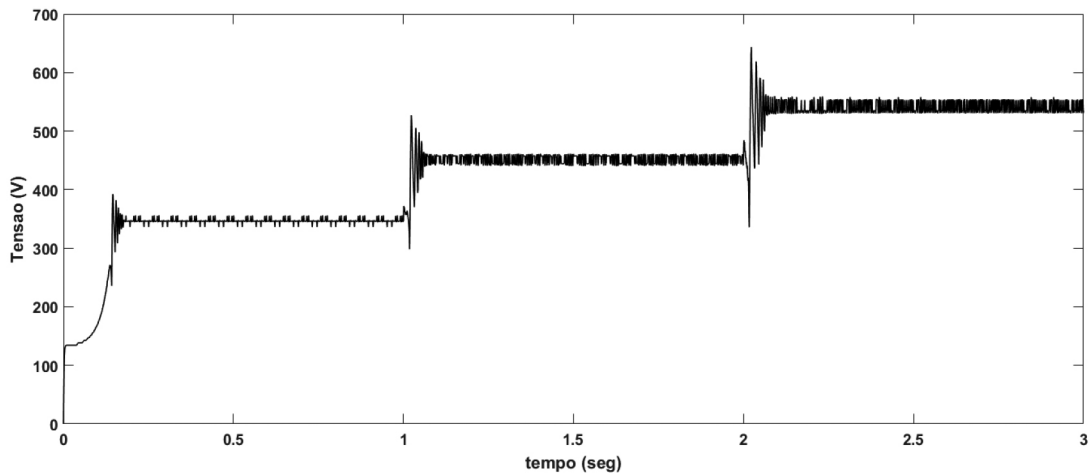


Figura 10. Tensão na saída do conversor *Boost* usando o método MPPT P&O

O método MPPT Fuzzy apresentou uma excelente resposta dinâmica nas variações abruptas de irradiância (Figura 11), com tempo de subida até o estado estacionário em torno de 5 ms e sem oscilações transitórias. Houve um erro no estado estacionário de 0,17% devido o

MPPT Fuzzy ser em malha aberta e ser especificada uma variação de potência (± 5 W) e corrente (± 0.2 A) nas curvas de pertinência. Observa-se na Figura 12 uma baixa variação da tensão de saída do conversor em torno de 8 V.

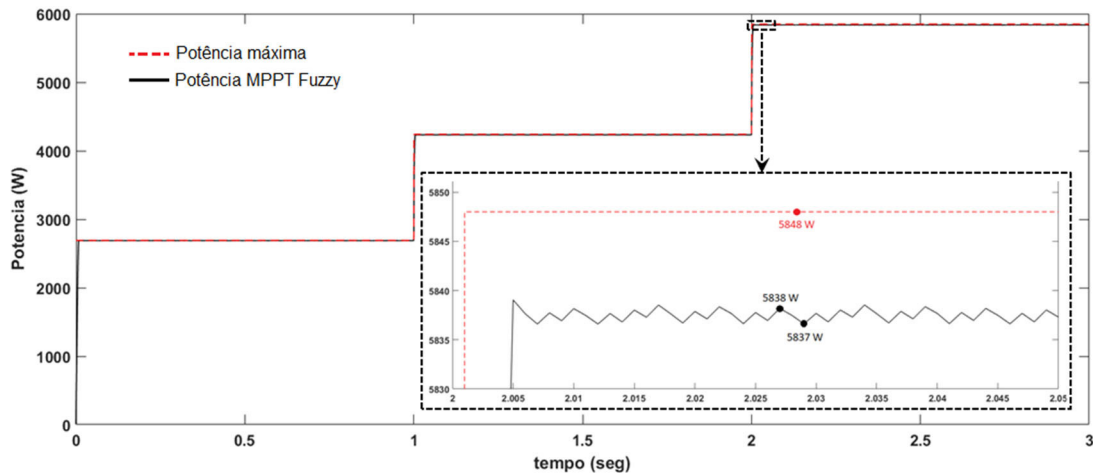


Figura 11. Potência fornecida pelo arranjo PV usando o método MPPT Fuzzy

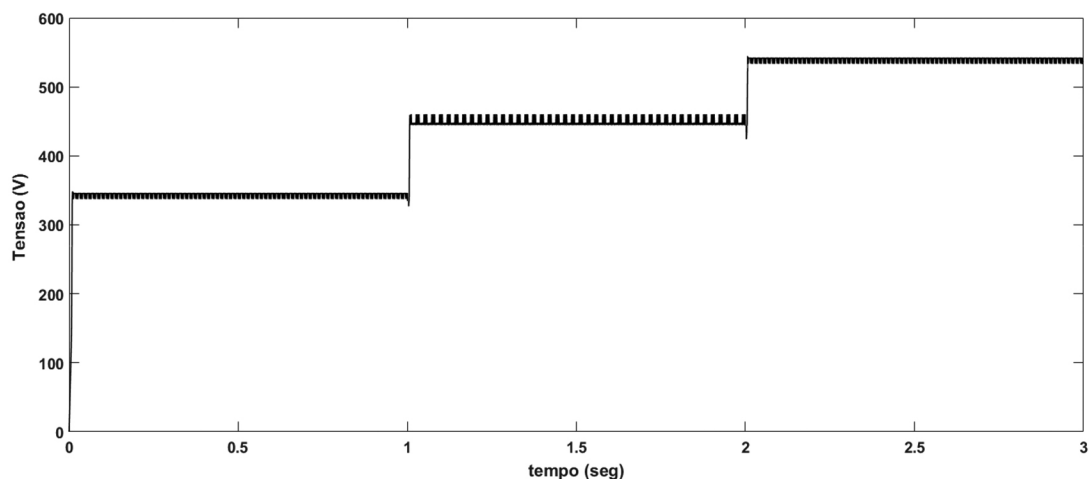


Figura 12. Tensão na saída do conversor *Boost* usando o método MPPT Fuzzy

7. Conclusão

Este trabalho apresentou a modelagem de um sistema fotovoltaico conectado a um conversor Boost para realização de uma análise comparativa entre dois métodos de rastreamento de máxima potência. De maneira geral, os métodos MPPT P&O e MPPT Fuzzy realizaram o controle em malha aberta do conversor Boost para rastreamento do ponto de máxima potência de forma eficiente e precisa, porém cada um dos métodos apresentou vantagens em algumas características específicas dos resultados apresentados.

O método MPPT Fuzzy se mostrou mais robusto em comparação ao método P&O, devido ter apresentado melhor tempo de acomodação, ou seja, resposta rápida de potência sem oscilações no instante das variações de irradiância. No estado estacionário, o desempenho do MPPT Fuzzy foi inferior ao MPPT P&O, pois apresentou maior erro, devido às curvas de pertinência e o nível de oscilação. Importante destacar que MPPT Fuzzy possui maior complexidade computacional, o que dificulta a implementação em campo ou laboratório.

Referências Bibliográficas

1. Karami, N.; Moubayed, N.; Outbib, R.; General review and classification of different mppt techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2017**, *68*, 1. [CrossRef]
2. Appelbaum, J.; The operation of loads powered by separate sources or by a common source of solar cells. *IEEE Transaction on Industry Applications* **1989**, *4*, 351. [CrossRef]
3. Guenounou, O.; Dahhou, B.; Chabour, F.; Adaptive fuzzy controller based MPPT for photovoltaic systems. *Energy Conversion and Management* **2014**, *78*, 843. [CrossRef]
4. Xiao, W.; Dunford, W. G.; *Proceedings of the IEEE 35th Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, Germany, 2004. [CrossRef]
5. Liu, X.; Lopes, L. A. C.; *Proceedings of the IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, Germany 2004. [CrossRef]
6. Gomide, F. A. C.; Gudwin R. R.; Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy. *Controle & Automação*, **1994**, *4*, 97. [Link]
7. Ozdemir, S.; Altin, N.; Sefa, I.; Fuzzy logic based MPPT controller for high conversion ratio quadratic boost converter. *International Journal of Hydrogen Energy* **2017**, *42*, 17748. [CrossRef]
8. Cavalcanti, M. C.; Oliveira, K. C.; Azevedo, Gl. M.; Moreira, D. C.; Neves, F. A. S.; Maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems. *Przeegląd Elektrotechniczny* **2006**, *82*, 49. [Link]
9. Kuo, Y.-C.; Liang, T.-J.; Chen, J.-F.; A high-efficiency single-phase three-wire photovoltaic energy conversion system. *IEEE Transaction on Industrial Electronics* **2003**, *50*, 116. [CrossRef]
10. Yu, G. J.; Jung, Y. S.; Choi, J. Y.; Choy, I.; Song, J. H.; Kim, G. S.; *Proceedings of the IEEE 29th Photovoltaic Specialists Conference*, New Orleans, Estados Unidos, 2002. [CrossRef]
11. Mohapatra, A.; Nayak, B.; Das, P.; Mohanty, K. B.; A review on MPPT techniques of PV system under partial shading condition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2017**, *80*, 854. [CrossRef]
12. Magno, L. C. C., Silva, J. H. M.; Santos, R. S. S.; Vincenzi, F.; Silva, R.; Gomes, A. C.; *Proceedings of the XVI Electrical Engineering Studies Conference*, Uberlândia, Brasil, 2018. [CrossRef]
13. Hua, C.; Lin, J.; Shen, C.; Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking. *IEEE Transaction on Industrial Electronics* **1998**, *45*, 99. [CrossRef]
14. Femia, N.; Petrone, G.; Spagnuolo, G.; Vitelli, M.; *Proceedings of the IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, Germany, 2004. [CrossRef]
15. Silva, L. R. C.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Uberlândia, 2015. [Link]
16. Oliveira, K. C.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Pernambuco, 2007. [Link]
17. Algarín, C. R.; Giraldo, J. T.; Álvarez, O. R. Fuzzy logic based MPPT controller for a PV system. *Energies* **2017**, *10*, 2036. [CrossRef]