

Utilização de Controladores de Corrente para Rastreamento do Ponto de Máxima Potência em Arranjo Fotovoltaico

Davi C. Moreira*, Alexandre S. Brasil**, Marcus V. A. Nunes***

*Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil (e-mail: davicarvalhomoreira@hotmail.com.br)

**Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil (e-mail: axesbr@gmail.com)

***Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil (e-mail: mvnprof@gmail.com)

Abstract: This paper presents photovoltaic (PV) array maximum power point tracking (MPPT) using conventional current control based on current, irradiance and temperature measurement. PV array modeling connected to a Boost DC-DC converter was performed and independent hysteresis and proportional-integral current controls were implemented for maximum power point tracking after abrupt irradiance variations. The performance of the methods using current controls are compared with an artificial intelligence method, fuzzy logic control, for its stable and robust performance in the most diverse processes. The comparison between the techniques considered steady state error, dynamic response and efficiency over a wide power range. The MPPT Hist Indep and MPPT PI have efficiently and accurately tracked the maximum power point and its advantages and disadvantages over MPPT Fuzzy have been discussed.

Resumo: Este artigo apresenta o rastreamento de ponto máxima potência (MPPT) de arranjo fotovoltaico (PV) usando controle de corrente convencional baseado em medições de corrente, irradiância e temperatura. Foi realizada modelagem do arranjo PV conectado a um conversor CC-CC do tipo *Boost* e controles de corrente tipo histerese independente e proporcional-integral foram implementados para rastreamento de ponto máxima potência após variações abruptas de irradiância. O desempenho dos métodos utilizando controles de corrente foram comparados com um método de inteligência artificial, lógica de controle fuzzy, escolhido pelo seu desempenho estável e robusto nos mais diversos processos. A comparação entre as técnicas considerou o erro de estado estacionário, a resposta dinâmica e a eficiência em uma ampla faixa de potência. O MPPT Hist Indep e MPPT PI realizaram rastreamento do ponto de máxima potência de forma eficiente e precisa e suas vantagens e desvantagens em relação ao MPPT Fuzzy foram discutidas.

Keywords: Photovoltaic energy; MPPT; Independent hysteresis; PI; Fuzzy.

Palavras-chaves: Energia fotovoltaica; MPPT; Histerese independente; PI; 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 (Karami, Moubayed e Outbib, 2017).

Vários métodos MPPT, abreviação de *Maximum Power Point Tracking*, foram estudados e implementados em arranjos PV. Os métodos MPPT podem ser classificados como: técnicas off-line e técnicas on-line (Cavalcanti et al. 2006). As técnicas off-line requerem um modelo de painel fotovoltaico e a medição da temperatura e irradiância solar e as técnicas on-line não requerem a medição da temperatura e irradiância solar.

De acordo com Xiao e Dunford (2004), 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.

De acordo com Luz et al. (2018), para medição da irradiância, dispõem-se, essencialmente, de três tipos de sensores: o piranômetro (para medição da irradiância solar direta e difusa), o pireliômetro (para medição da irradiância solar direta) e o albedômetro (para medir a irradiância solar refletida). Dessa forma, este artigo mostra que técnicas off-line de MPPT podem ser realizadas através de técnicas de controle de corrente tradicionalmente utilizadas controle máquinas elétrica.

O desempenho da técnica de rastreamento do ponto de máxima potência usando controle de corrente do tipo histerese independente (MPPT Hist Indep) e proporcional-integral (MPPT PI) são comparados com uma técnica on-line que utiliza inteligência artificial (MPPT Fuzzy), pelo seu desempenho estável e robusto nos mais diversos processos.

2. MODELAGEM DO ARRANJO FOTOVOLTAICO

2.1 Modelo Matemático da Célula Fotovoltaica

Foi utilizado o modelo de célula fotovoltaica de único diodo, com circuito equivalente mostrado na Fig. 1. Este circuito consiste em uma fonte de corrente I_{ph} , um diodo D , uma resistência paralela equivalente R_p e uma resistência em série equivalente R_s .

A equação do diodo de Shockley, que descreve a característica $I(V)$, é dada por

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_d}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

onde I_d é a corrente direta do diodo, I_0 é a corrente reversa de saturação, V_d é a tensão direta do diodo, n é o fator de diodo (geralmente entre 1 e 2) e V_T é a tensão térmica que é expressa pela equação:

$$V_T = \frac{K \cdot T}{q} \quad (2)$$

onde K é a constante de Boltzmann, T é a temperatura de operação da célula expressa em Kelvin e q é a carga do elétron.

A corrente reversa de saturação I_0 varia com a temperatura, conforme indicado a seguir:

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \exp\left[q \cdot E_g \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (3)$$

onde T_r é a temperatura de referência da célula, I_{rs} é a corrente reversa de saturação em T_r e E_g é a energia da banda do semiconductor usado na célula solar.

Considerando o circuito equivalente da Fig. 1, geralmente a resistência em paralelo é muito grande (Ozdemir, Altin e Sefa, 2017), portanto, pode ser desprezada para simplificar a análise (Cavalcanti et al. 2006) e a característica $I(V)$ de uma célula solar pode ser descrita pela seguinte equação (Guenounou, Dahhou e Chabour, 2014):

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

onde V é a tensão da célula que é igual à tensão do painel fotovoltaico dividida pelo número de células em série e R_s é a resistência equivalente em série.

Equação (5) fornece o corrente da célula fotovoltaica I_{ph} , que depende da irradiação G (W/m^2) e da temperatura T (K):

$$I_{ph} = I_{sc} [1 + \alpha \cdot (T - T_r)] \frac{G}{1000} \quad (5)$$

onde I_{sc} é a corrente de curto-circuito da célula na temperatura de referência T_r e α é o coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito da célula.

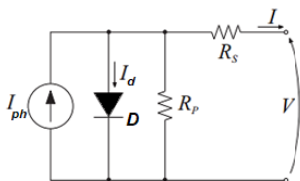


Fig. 1 Circuito equivalente da célula fotovoltaica.

2.2 Configuração do Arranjo Fotovoltaico

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 Fig. 2. Foi utilizado, para cada painel PV, o modelo KC130GT do fabricante Kyocera Solar e seus parâmetros junto com os resultados de simulação são mostrados na Tabela 1.

A Fig. 2 mostra que existem pontos de operação no painel PV em que eficiência é máxima, para uma determinada temperatura e irradiação.

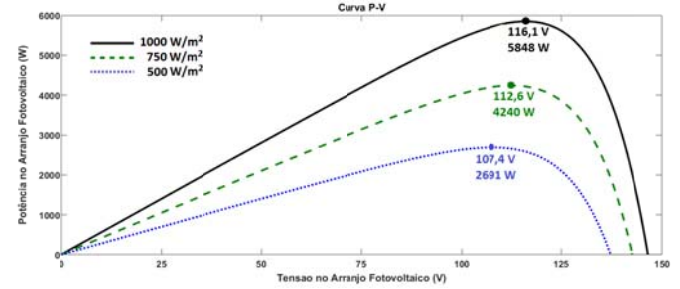


Fig. 2 Curva P-V do arranjo fotovoltaico à 25°C.

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

Características	Grandeza	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

3. MODELAGEM DO CONVERSOR

O arranjo PV 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 (Mohapatra et al., 2017).

Para satisfazer a faixa de valores de corrente em que se encontram o Ponto de Máxima Potência (MPP) na saída do painel PV, foi modelado um conversor tipo *Boost* (Fig. 3) operando em modo de condução contínua, de acordo com o trabalho de Mango et al. (2018). O modelo matemático do conversor *Boost* é mostrado em (6). A Tabela 2 mostra as especificações para o dimensionamento dos componentes do conversor.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{(S-1)}{L} \\ \frac{(1-S)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} V_P \quad (6)$$

A Fig. 3 mostra os principais componentes do conversor *Boost* normalmente usado em sistemas PV. A chave de

potência S modula a transferência de energia da fonte de entrada para a carga quando controlado por um ciclo de trabalho variável, chamado de razão cíclica (DC), abreviação de *Duty Cycle*.

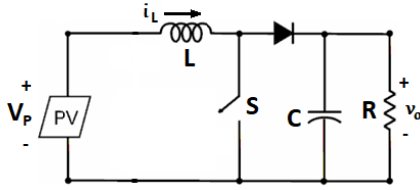


Fig. 3 Conversor *Boost* conectado ao arranjo fotovoltaico.

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

A resistência (ou a carga) foi calculada através da lei de Ohm usando (7). Com as tensões de entrada (V_p) e saída (V_o) para irradiação solar máxima, foi calculada a DC usando (8).

$$R = \frac{V_o^2}{P_{max}} \quad (7)$$

$$DC = \frac{V_o - V_p}{V_o} \quad (8)$$

Usando o valor da resistência de carga R , foi calculada a capacitância C através de (9), em seguida foi calculada a indutância L usando (10).

$$C = \frac{DC}{R f_s \Delta V_o} \quad (9)$$

$$L = \frac{V_p DC}{f_s \Delta i_L} \quad (10)$$

3. CONTROLE POR HISTERESE INDEPENDENTE

Há décadas os controladores por histerese são bastante utilizados por serem simples e robustos. O controle por histerese independente é geralmente aplicado ao controle de corrente, sendo necessário o estabelecimento de limites máximo e mínimo da corrente para realizar o chaveamento em função de serem atingidos tais valores extremos.

O controle por histerese independente necessita de uma corrente de referência, que neste estudo é a corrente de potência máxima (I_{MPP}). Essa corrente foi obtida através de cálculo da tensão de máxima potência (V_{MPP}) e medições de irradiação (G) e temperatura (T).

Neste estudo, primeiramente foi gerada uma equação de segunda ordem, mostrada em (11), relacionando os diversos valores de G com V_{MPP} , conforme mostrado na Fig 4.

$$V_{MPP} = -0,19G^2 + 4,62G + 89 \quad (11)$$

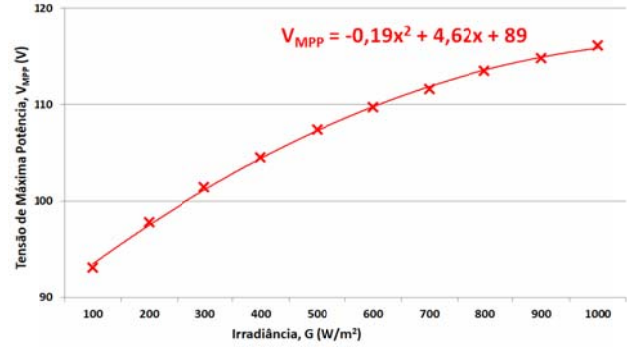
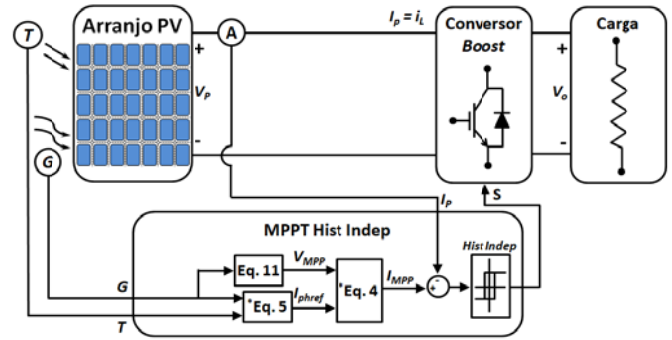


Fig. 4 Relação entre tensão de potência máxima (V_{MPP}) e irradiação (G).

Com as medições de irradiação (G) e temperatura (T), calcula-se a corrente de referência da célula fotovoltaica (I_{phref}) através de (5). Em seguida, utilizando I_{phref} e o valor de V_{MPP} calculado por (11), calcula-se a corrente de referência do controlador por histerese independente (I_{MPP}) usando (4), conforme mostrado na Fig. 5. A largura da banda de histerese foi escolhida em 0,5% da corrente de potência máxima I_{MPP} (insolação de 1000 W/m²), ou seja, uma banda de 0,35 A.



*Equações adaptadas para arranjo série e paralelo de painéis PV.

Fig. 5 Esquemático MPPT Hist Indep implementado.

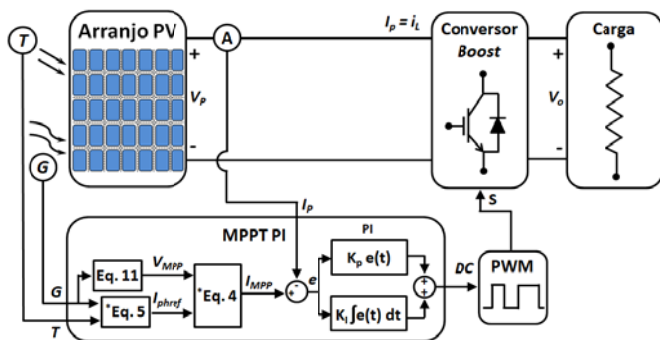
Uma implementação analógica simples deste controle pode ser adaptada para realizar controle por histerese independente de V_{MPP} . Para isso, necessitaria da substituição do sensor de corrente por sensor de tensão, eliminação do sensor de temperatura e a utilização de uma equação de primeira ordem para obtenção de V_{MPP} , essa solução geraria maior erro de potência em regime estacionário.

4. CONTROLE PROPORCIONAL E INTEGRAL

O controle proporcional e integral (PI) é uma técnica de controle de processos em que o sinal de erro é minimizado pela ação proporcional e zerado pela ação integral.

A corrente de referência deste controlador PI, que neste estudo é a corrente de potência máxima (I_{MPP}), foi obtida da mesma forma que o controle por histerese independente.

O sinal de saída do controle PI foi sintetizado por um PWM, abreviação de *Pulse Width Modulation*, para atuação no conversor *Boost*. A escolha das constantes do PI ($K_p = 100$ e $K_i = 50$) foram feitas através de várias tentativas. A Fig. 6 mostra um esquemático do MPPT PI implementado.



*Equações adaptadas para arranjo série e paralelo de painéis PV.

Fig. 6 Esquemático MPPT PI implementado.

5. CONTROLE POR LÓGICA FUZZY

O controle por lógica fuzzy é um método que permite a construção de controladores não lineares a partir de informações heurísticas provenientes do conhecimento de um especialista. A Fig. 7 mostra o diagrama de blocos de um controle por lógica Fuzzy (Algarín, Giraldo e Álvarez, 2017).

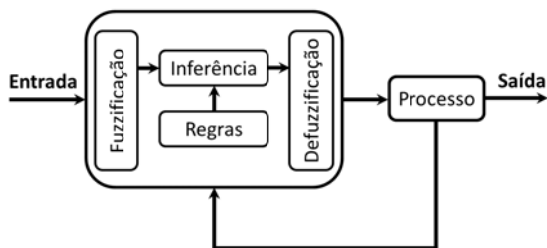


Fig. 7 Esquemático de um controle por lógica fuzzy.

A lógica de controle Fuzzy para sistemas PV, geralmente consiste na medição de tensão e corrente para atuação no conversor através de um PWM, um esquemático pode ser observado na Fig. 8.

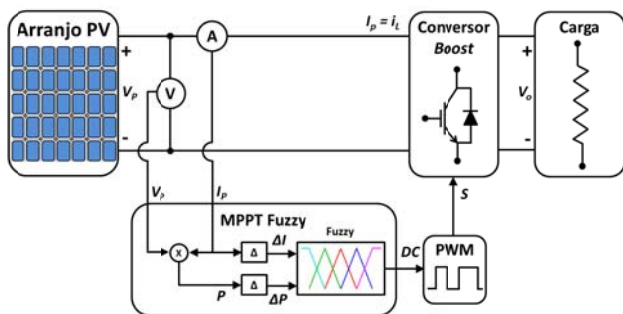


Fig. 8 Esquemático MPPT Fuzzy implementado.

Nesse estudo MPPT Fuzzy proposto utiliza como variáveis de entrada a variação da potência (ΔP) e a variação da corrente (ΔI) e como variável de saída a razão cíclica (DC), pois a resposta de potência melhor correspondeu ao conjunto de regras implementado. Estas variáveis foram representadas pelas curvas *negative big* (nb), *negative small* (ns), *positive small* (ps) e *positive big* (pb) formando as funções de pertinência e função de saída mostradas nas Figs. 9 e 10, respectivamente. Estas funções adicionadas ao conjunto de regras apresentado na Tabela 3 geraram a superfície de regras mostrada na Fig. 11.

Tabela 3. Tabela de regras do MPPT Fuzzy.

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

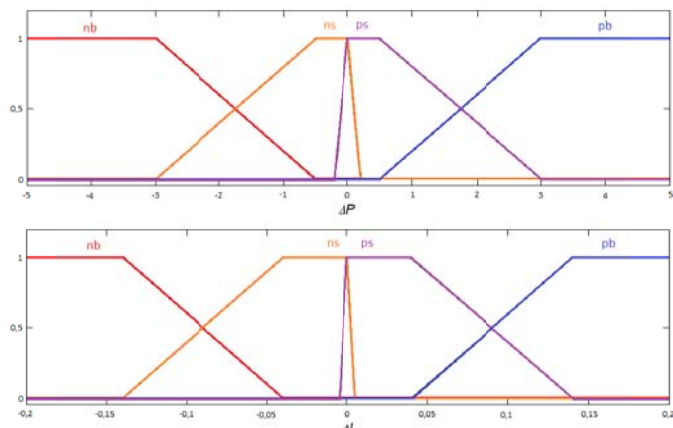


Fig. 9 Funções de pertinência do MPPT Fuzzy.

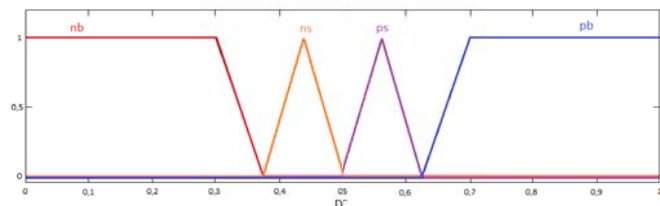


Fig. 10 Função de saída do MPPT Fuzzy.

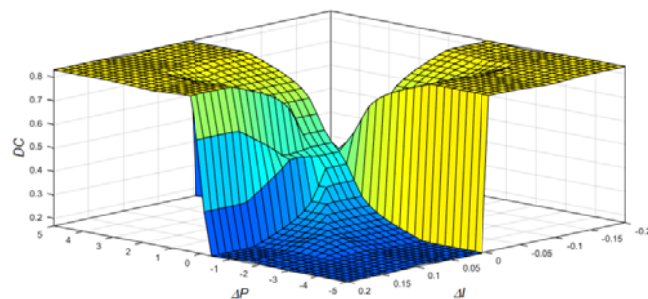


Fig. 11 Superfície de regras do MPPT Fuzzy.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações com os três métodos MPPT foram feitas com os mesmos parâmetros do conversor *Boost* ($R = 24,7 \Omega$; $L = 40,3 \text{ mH}$; $C = 14,0 \mu\text{F}$) para possibilitar uma análise comparativa, no entanto, destaca-se que a frequência chaveamento do método MPPT Hist Indep é variável e dos métodos MPPT PI e MPPT Fuzzy foi de 20 kHz. As simulações ocorreram variando a intensidade da irradiação solar com o tempo, conforme Tabela 4.

Tabela 4. Variação da irradiação com o tempo.

Tempo (seg)	Irradiação Solar (W/m^2)
0 a 1	500
1 a 2	750
2 a 3	1000

O método MPPT Hist Indep apresentou uma excelente resposta dinâmica de potência para variações abruptas de irradiância (em torno de 5 ms), além de um baixo erro de potência no estado estacionário (em torno de 1 W), conforme mostrado na Fig. 12. Verifica-se na Fig. 13 um elevado nível de chaveamento e que a amplitude da corrente de entrada do conversor foi limitada pela histerese. Observa-se na Fig. 14 uma elevada variação da tensão de saída do conversor, indicando que o método MPPT Hist Indep ocasiona desgaste expressivo nas chaves semicondutoras de potência do conversor *Boost*.

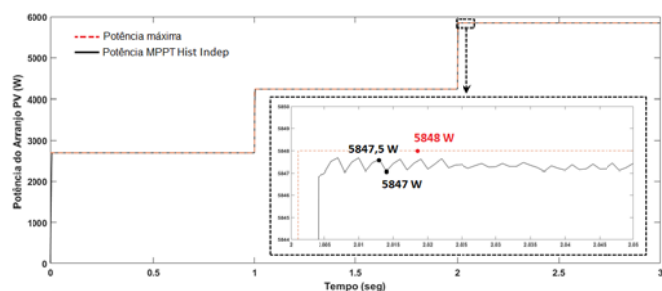


Fig. 12 Potência do arranjo PV usando MPPT Hist Indep.

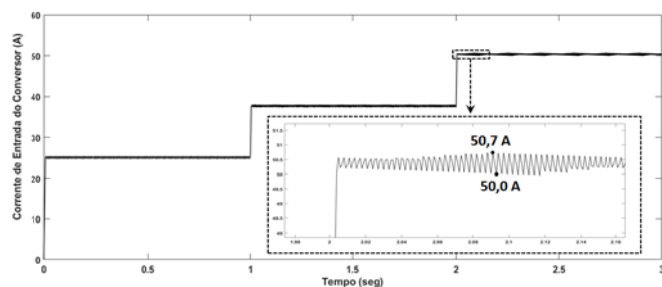


Fig. 13 Corrente do conversor (i_L) usando MPPT Hist Indep.

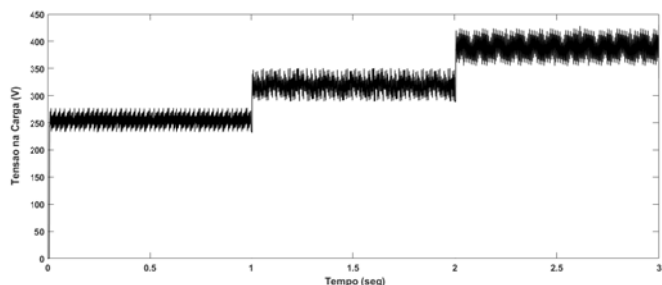


Fig. 14 Tensão na carga (V_o) usando MPPT Hist Indep.

O método MPPT PI apresentou um excelente tempo de subida até o estado estacionário em torno de 6 ms, com erro de potência em torno de 1,5 W sem oscilações (Fig. 15). Ajustes nos ganhos K_P e K_I podem melhorar o erro de potência no estado estacionário, porém prejudicando a resposta da tensão na carga. Verifica-se na Fig. 16 corrente de entrada do conversor com baixa variação. Observa-se na Fig. 17 uma baixa variação na tensão de saída do conversor (aproximadamente 5 V).

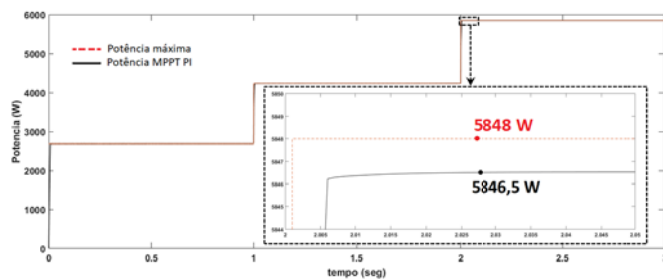


Fig. 15 Potência do arranjo PV usando MPPT PI.

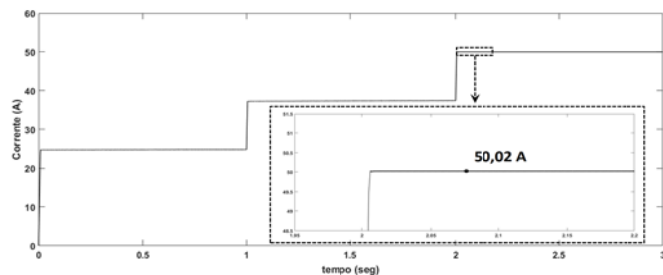


Fig. 16 Corrente do conversor (i_L) usando MPPT PI.

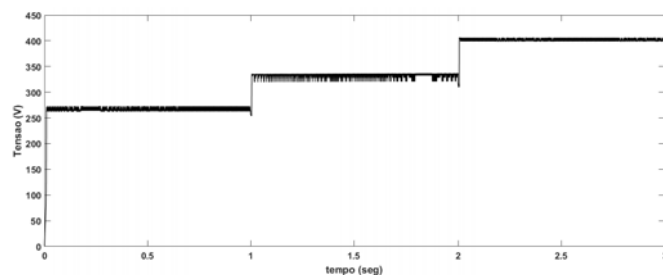


Fig. 17 Tensão na carga (V_o) usando MPPT PI.

O método MPPT Fuzzy apresentou resposta rápida para variações abruptas de irradiância (Fig. 18), com tempo de subida até o estado estacionário em torno de 5 ms e sem oscilações transitórias. Houve um erro de potência no estado estacionário (em torno de 10 W), maior que o obtido pelo MPPT Hist Indep e MPPT PI, devido ao controle ser em malha aberta e haver uma variação de potência e corrente especificadas nas curvas de pertinência. Verifica-se que na Fig. 19 que a corrente de entrada do conversor não possui variações significativas, sendo essa uma das vantagens do MPPT Fuzzy. Observa-se na Fig. 20 uma tensão de saída do conversor bem uniforme e com baixa variação nos três períodos de irradiância, indicando que o MPPT Fuzzy levou a potência gerada pelo arranjo PV ao valor de estado estacionário rapidamente e manteve este valor com baixa oscilação.

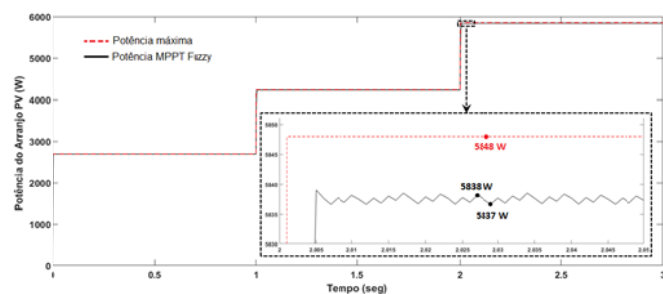


Fig. 18 Potência do arranjo PV usando MPPT Fuzzy.

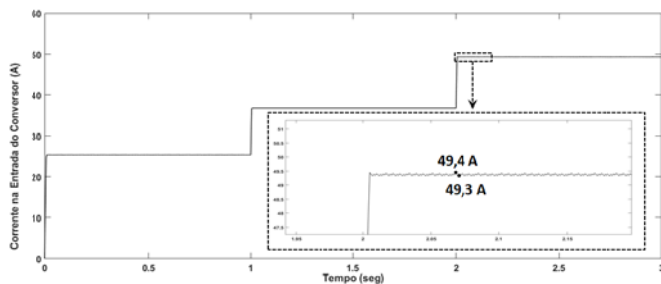


Fig. 19 Corrente do conversor (i_L) usando MPPT Fuzzy.

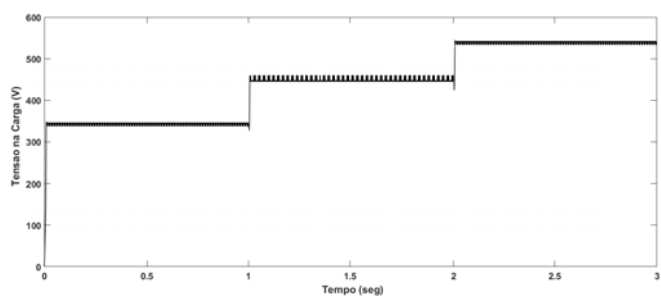


Fig. 20 Tensão na carga (V_o) usando MPPT Fuzzy.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a modelagem de um arranjo fotovoltaico conectado a um conversor *Boost* para realização do rastreamento do ponto de máxima potência utilizando controles de corrente por histerese independente e PI.

O desempenho computacional de cada método MPPT deste estudo, foram semelhantes, na faixa de 3-4 minutos usando um processador Intel Core i7-4500U e o software Matlab (versão R2016a).

O MPPT Hist Indep proposto neste artigo apresentou menor erro de potência em regime estacionário, melhor resposta a variações de irradiância e tempo de acomodação da potência quando comparado ao MPPT Fuzzy implementado.

O MPPT PI proposto neste artigo apresentou um maior tempo de subida e acomodação quando comparado ao MPPT Fuzzy; no entanto, apresentou menor erro de potência em estado estacionário.

A implementação do MPPT Hist Indep e MPPT PI são mais simples que o MPPT Fuzzy, no entanto, uma desvantagem relevante é a utilização de sensores para medição de temperatura e principalmente irradiância.

A frequência de chaveamento variável é uma desvantagem do método MPPT Hist Indep, porém essa desvantagem pode ser minimizada se o método for adaptado de forma que o erro de corrente seja comparado com onda triangular com frequência fixa, estratégia de controle chamada de *Ramp Comparison*.

Este trabalho mostrou que controles de corrente podem ser utilizados para rastrear o ponto de máxima potência de arranjo fotovoltaico.

Importante destacar que MPPT Fuzzy possui maior complexidade computacional, que dificulta a implementação em campo ou laboratório e em aplicações práticas impacto de ruído de sensores deve ser levados em consideração.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal do Pará (UFPA) pelo seu incentivo e assistência técnica-científica.

REFERÊNCIAS

- Algarín, C.R., Giraldo, J.T. and Álvarez, O.R. (2017). Fuzzy logic based MPPT controller for a PV system, *Energies* v. 10, n. 12:2036. doi:10.3390/en10122036.
- Cavalcanti, M.C., Oliveira, K.C., Azevedo, G.M., Moreira, D.C. and Neves, F.A.S. (2006). Maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems. *Przegląd Elektrotechniczny*, v. 82, pp. 46–56.
- Guenounou, O., Dahhou, B. and Chabour, F. (2014). Adaptive fuzzy controller based MPPT for photovoltaic systems. *Energy Conversion and Management*. v. 78, pp. 843–850. doi: 10.1016/j.enconman.2013.07.093.
- Karami, N., Moubayed, N. and Outbib, R. (2017). General review and classification of different mppt techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 68, pp. 1–18. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.132.
- Luz, C.M.A., Vicente, E.M., Vicente, P.S. and Tofoli, F.L. (2018). Análise comparativa de medidores de irradiância. *XXII Congresso Brasileiro de Automática*. doi:10.20906/CPS/CBA2018-1437.
- Magno, L.C.C., Silva, J.H.M., Santos, R.S., Silva, F.V.R. and Gomes, A.C. (2018). Controle MPPT paa painel fotovoltaico baseado em redes neurais artificiais, *Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica*. doi:10.14295/2596-2221.xviceel.2018.227.
- Mohapatra, A., Nayaka, B., Dasa, P., Mohanty, K.B., (2017). A review on MPPT techniques of PV system under partial shading condition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 80, pp. 854–867. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.083.
- Ozdemir, S., Altin, N., Sefa, I., (2017). Fuzzy logic based MPPT controller for high conversion ratio quadratic boost converter. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, pp. 17748–17759. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.02.191.
- Xiao, W. and Dunford, W.G. (2004). A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems. *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1957–1963. doi: 10.1109/PESC.2004.1355417.
- Yilmaza, U., Kircaya, A. and Borekcib, S. (2018). PV system fuzzy logic MPPT method and PI control as a charge controller. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, pp. 994–1001. doi: 10.1016/j.rser.2017.08.048.