

EXTRAÇÃO DA MÁXIMA POTÊNCIA DE UM ARRANJO FOTOVOLTAICO OPERANDO SOB CONDIÇÕES DE SOMBREAMENTO PARCIAL EMPREGANDO O ALGORITMO BIOINSPIRADO DOS MORCEGOS

MAYKON V. DA ROCHA, LEONARDO P. SAMPAIO, SÉRGIO A. O. DA SILVA

Laboratório de Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia e Energias Renováveis, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Av. Alberto Carazzai, 1640. CEP. 86.300-000 Cornélio Procopio – PR - Brasil

E-mails: maykon@alunos.utfpr.edu.br, sampaio@utfpr.edu.br, augus@utfpr.edu.br

Abstract— This paper presents a maximum power point tracking (MPPT) algorithm for a photovoltaic system operating under partial shading conditions, which is based on the Bat-Inspired algorithm, named as Bat-based MPPT. Considering that a photovoltaic array may be subject to non-uniform solar irradiation (partial shading), it may simultaneously exhibit distinct local maximum points together with only one global maximum point. In this way, the presented algorithm is able to track the global maximum power point for the photovoltaic arrangement operating under different climatic conditions. The studied algorithm presents a good efficiency in the tracking the global maximum point with low power oscillations in the steady-state. To validate the effectiveness of the MPPT Bat-based algorithm, this algorithm was compared with the traditional Perturb and Observe method by means of computational simulation. The results obtained demonstrate that the Bat-based MPPT has superior tracking efficiency to the traditional method. In addition, the speed of convergence and the power oscillations are taken into account in the performance evaluation of the presented algorithm.

Keywords— Bat-Inspired Algorithm, Maximum Power Point Tracking, Partial Shading Conditions, Photovoltaic Systems, Power Electronics.

Resumo— Este artigo apresenta um algoritmo de rastreamento do ponto de máxima de potência (MPPT) de um sistema fotovoltaico operando sob condições de sombreamento parcial, o qual tem como base o algoritmo bioinspirado dos morcegos, denominado como *Bat-based* MPPT. Considerando que um arranjo fotovoltaico pode estar submetido a uma irradiação solar não uniforme (sombreamento parcial), o mesmo pode apresentar simultaneamente distintos pontos de máximos locais em conjunto com apenas um ponto de máximo global. Desta forma, o algoritmo apresentado é capaz de rastrear o ponto global de máxima potência para o arranjo fotovoltaico operando sob diferentes condições climáticas. O algoritmo estudado apresenta uma boa eficiência no rastreamento e baixas oscilações de potência em regime permanente. Para validar a eficácia do algoritmo *Bat-based* MPPT, este algoritmo foi comparado com o método tradicional Perturbe e Observe por meio de simulação computacional. Os resultados obtidos demonstram que o algoritmo *Bat-based* MPPT possui uma eficiência de rastreamento superior ao método tradicional de MPPT. Além disso, a velocidade de convergência e as oscilações de potência são levadas em consideração na avaliação de desempenho do algoritmo apresentado.

Palavras-chave— Algoritmo bioinspirado dos Morcegos, Rastreamento do Máximo Ponto de Potência, Condições de Sombreamento Parcial, Sistemas Fotovoltaicos, Eletrônica de Potência.

1 Introdução

Atualmente, tem aumentada a demanda de energia elétrica pela sociedade, e isso, motivou tanto os consumidores quanto as concessionárias de energia elétrica na busca de fontes alternativas de energia elétrica (Jeyaprabha and Selvakumar, 2017), ao invés de utilizar as já existentes baseadas nas gerações tradicionais, como as provenientes do carvão, do petróleo ou até mesmo do gás natural para suprir esta necessidade crescente (de Brito *et al.*, 2013).

Deste modo, tanto a energia solar (de Brito *et al.*, 2015), quanto a energia eólica (Todeschini and Emanuel, 2010) vem recebendo um maior destaque dentre as diversas fontes alternativas de energia empregadas atualmente.

A geração de energia elétrica utilizando a energia solar, ou seja, utilizando painéis fotovoltaicos (PV) possui inúmeras vantagens. No entanto, a eficiência de conversão desta energia em energia elétrica ainda é considerada baixa, tendo a máxima eficiência registrada de 25% utilizando células de silício (Catchpole,

2016). Além disso, o custo inicial de aquisição e instalação dos sistemas PVs ainda é alto em muitos países. A partir desses fatos, vários estudos e investimentos estão sendo empregados na área de pesquisa e desenvolvimento com o objetivo de maximizar a eficiência energética desses sistemas (Guan and Zhuo, 2017).

Tradicionalmente, uma das formas empregadas para maximizar a eficiência nos sistemas PV é a utilização de técnicas para o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*), a qual tem o objetivo de extrair a máxima potência disponível no arranjo PV, independente das condições climáticas (*e.g.* irradiação solar e temperatura) (de Brito *et al.*, 2013; Subudhi and Pradhan, 2013).

Para realizar a avaliação e/ou comparação dos algoritmos de MPPT deve-se considerar alguns fatores, tais como: fator de rastreamento, eficiência de rastreamento, tempo de estabelecimento, complexidade de implementação, entre outros (de Brito *et al.*, 2013). Além disso, é comum que um arranjo PV possa estar operando sob condições de sombreamento parcial, ou seja, condição na qual a distribuição de irradiação so-

lar não é uniforme no arranjo, devido a sujeira, sombras, nuvens, entre outros fatores. Sendo assim, este efeito não pode ser desprezado, uma vez que a eficiência global do sistema PV pode ser comprometida (Silva *et al.*, 2017).

Geralmente, técnicas baseadas em estratégias perturbativas, como o método da condutância incremental (IC) e o método Perturbe e Observe (P&O), vêm sendo amplamente utilizadas para o rastreamento do MPP. Essas técnicas de MPPT apresentam bons resultados, porém, alguns fatores limitam seu desempenho: (i) influência do tamanho do passo de incremento, ou seja, um pequeno passo gera uma dinâmica lenta, enquanto um longo passo gera muita oscilação de potência (reduzindo a eficiência); (ii) tanto operações transitórias quanto estacionárias geram oscilações em torno do MPP; (iii) dificuldades em realizar o MPPT em sistemas com sombreamento parcial, ficando restrito a pontos locais de máxima potência (LMPP) (de Brito *et al.*, 2013).

Devido a estas limitações, algoritmos de otimização bioinspirados estão sendo empregados para lidar com problemas de sombreamentos parciais na busca do MPP (Chen *et al.*, 2014), podendo citar o algoritmo de colônias de formigas (Sundareswaran *et al.*, 2016), algoritmos de enxame de partículas (Silva *et al.*, 2017), o algoritmo de otimização dos lobos cinzentos (Mohanty, Subudhi and Ray, 2016), entre outros. Estes algoritmos garantem que o ponto global de máxima potência (GMPP) consiga ser rastreado em condições de sombreamento parcial.

Portanto, este trabalho apresenta uma técnica de MPPT baseada no algoritmo bioinspirado dos morcegos (*Bat-based MPPT*). Com o objetivo de avaliar o desempenho do algoritmo *Bat-based MPPT* é realizada uma comparação com o algoritmo tradicional de MPPT, o método P&O. As comparações de desempenho dos métodos foram realizadas considerando os seguintes casos: 1) arranjo PV operando na condição de teste padrão (STC); e 2) arranjo PV operando sob condições de sombreamento parcial.

Este artigo é apresentado da seguinte forma: a Seção 2 mostra as principais características relacionadas ao arranjo PV, incluindo o modelo matemático da célula PV adotado. A Seção 3 apresenta as técnicas MPPT utilizadas neste artigo, enquanto os resultados obtidos a partir de simulações computacionais utilizando o Matlab/Simulink são mostrados na Seção 4. Além disso, uma análise comparativa entre os algoritmos de MPPT também é apresentada. Finalmente, a Seção 5 apresenta as conclusões finais.

2 Descrição do Sistema PV

A Figura 1 apresenta o sistema fotovoltaico utilizado para avaliar o desempenho dos algoritmos de MPPT que serão apresentados neste trabalho. O sistema é composto por um arranjo fotovoltaico e um conversor CC-CC elevador (*Boost*). O arranjo fotovoltaico é composto por quatro painéis PVs conectados em série, de modo que este arranjo é capaz de gerar

uma potência máxima de aproximadamente 981 Wp em STC.

Neste trabalho, o modelo de um único diodo foi adotado para a célula fotovoltaica, conforme ilustra a Figura 2. Pode-se notar que o modelo da célula fotovoltaica é composto por uma fonte de corrente (I_{ph}), um diodo antiparalelo (D_{pv}), uma resistência série (R_s) e uma paralela (R_p). A descrição do circuito e sua modelagem matemática completa foram apresentadas em detalhes em (Gow and Manning, 1999; Rahman, Varma and Vanderheide, 2014).

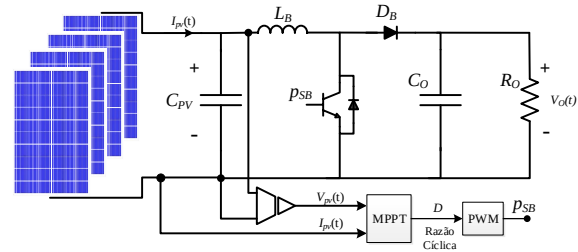


Figura 1. Sistema PV utilizado para avaliar os métodos do MPPT

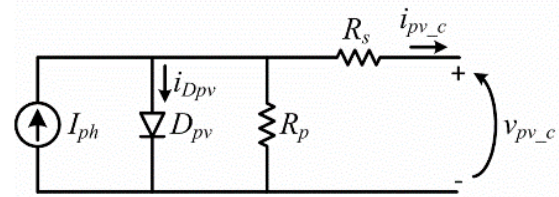


Figura 2. Circuito equivalente para a célula fotovoltaica

3 Técnicas de MPPT

Nesta seção, são apresentadas as técnicas de MPPT P&O e *Bat-based MPPT*, as quais são utilizadas neste trabalho.

3.1 Método Perturbe e Observe (P&O)

O algoritmo P&O é um dos métodos tradicionais mais empregados para realizar o MPPT, e também é conhecido como método da escalada (*Hill-Climbing*) (D'Souza, Lopes and Liu, 2010). O princípio deste método é incrementar ou decrementar o sinal de saída do algoritmo com base na comparação entre a potência do ciclo atual com a potência do ciclo anterior (de Brito *et al.*, 2013). Este sinal de saída do algoritmo pode ser a referência de corrente, a de tensão ou o próprio sinal da razão cíclica do conversor *Boost*, dependendo da estratégia empregada. Em outras palavras, o método consiste em escalar a curva característica $P_{pv} \times V_{pv}$ com objetivo de encontrar o ponto de máxima potência do arranjo PV.

Neste trabalho, adotou-se no algoritmo de MPPT P&O o sinal de saída da razão cíclica do conversor *Boost*, sendo que o tamanho do passo de incremento desta razão cíclica foi definido em $\Delta D = 0,01$, com objetivo de minimizar as oscilações do algoritmo em regime permanente. O fluxograma do algoritmo de MPPT P&O é apresentado na Figura 3.

Uma das desvantagens do algoritmo de MPPT P&O é que ele pode ficar preso em um LMPP quando o arranjo PV é submetido a condições de sombreamento parcial.

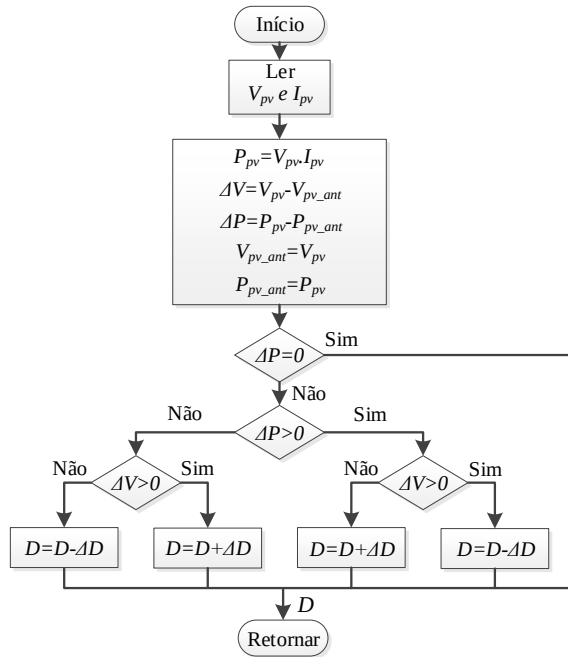


Figura 3. Fluxograma do método de MPPT P&O

3.2 Algoritmo Bat-based MPPT

O algoritmo dos morcegos (*Bat-Inspired*) é um algoritmo que vem sendo utilizado em problemas de otimização para a busca de máximo global (Singh, Salgotra and Singh, 2017). Este algoritmo é baseado na ecolocalização dos morcegos, o qual levando em conta o comportamento destes indivíduos para caçar e navegar, com o objetivo de encontrar sua presa, mesmo em completa escuridão (Singh, Salgotra and Singh, 2017).

Idealizando algumas características de ecolocalização dos morcegos, diversos algoritmos bioinspirados podem ser desenvolvidos, deste modo, neste artigo, as seguintes suposições são feitas (Yang, 2010):

1. Todos os morcegos utilizam a ecolocalização para detectar a distância além de “conhecerem” a diferença entre alimentos e barreira;

2. Os morcegos voam aleatoriamente com velocidade v_i na posição x_i com uma frequência fixa f_{vmin} , variando seu comprimento de onda λ e volume A_0 na procura de presas. Dependendo da proximidade de seu alvo, os morcegos podem ajustar automaticamente tanto o comprimento de onda (ou frequência) de seus pulsos emitidos quanto a taxa de emissão de pulso $r \in [0,1]$, onde 0 significa nenhum pulso e 1 significa a taxa máxima de emissão de pulso;

3. Embora a intensidade de volume (*loudness*) (A) possa variar de maneiras distintas, foi considerado que esta intensidade varia de um valor grande (positivo) A_0 para um valor mínimo A_{min} .

Além das simplificações descritas anteriormente, ainda foi utilizada mais uma simplificação: a frequência f_v num intervalo $[f_{vmin}, f_{vmax}]$ corresponde a uma gama de comprimentos de onda $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$, onde a frequência f_v é dada em Hz e o comprimento de onda λ dado em mm (Yang, 2010).

Para fins de simplificação, pode-se definir $f_v \in [0, f_{vmax}]$. Sabe-se que frequências grandes têm comprimentos de onda curtos e percorrem uma menor distância. Para os morcegos, os intervalos típicos são de alguns metros (Yang, 2010).

A população inicial para n morcegos é gerada aleatoriamente pela seguinte equação:

$$x_i = x_{min} + rand * (x_{min} - x_{max}) \quad (1)$$

onde $i = 1, 2, \dots, n$; x_{min} é limite inferior e x_{max} é limite superior. Além disso, é necessário definir a maneira como as posições x_i e as velocidades v_i serão atualizadas em um espaço de busca, neste caso, elas são definidas da seguinte forma (Yang, 2010):

$$f v_i = f v_{min} + (f v_{max} - f v_{min}) \beta \quad (2)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t - x_*) f v_i \quad (3)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (4)$$

onde, x_i^t representa a nova solução na iteração t ; v_i^t representa a nova velocidade na iteração t ; e $\beta \in [0,1]$, sendo este um vetor randômico que segue uma distribuição uniforme (Yang, 2010).

A melhor solução no momento, definida x_* , é definida depois de realizar a comparação de todas as soluções entre todos os n morcegos. No início, cada morcego é associado aleatoriamente a uma frequência, que foi distribuída uniformemente entre $[f_{vmin}, f_{vmax}]$. Para uma busca local, assim que uma solução é selecionada entre as melhores soluções, uma nova solução para cada morcego é gerada utilizando um passo aleatório (Yang, 2010):

$$x_{new} = x_{old} + \varepsilon A^t \quad (5)$$

onde $\varepsilon \in [-1,1]$ é um número aleatório, e $A^t = \langle A_i^t \rangle$ é a média entre as intensidades de volumes (*loudnesses*) de todos os morcegos no tempo t . O modo em que as velocidades e posições dos morcegos são atualizadas é semelhante ao do algoritmo de enxame de partículas (Kennedy and Eberhart, 1995) onde $f v_i$ basicamente controla o ritmo e a distância de movimento das partículas.

A intensidade de volume e a taxa de emissão de pulso sofrem alterações de valor a cada iteração. Conforme o morcego chega mais perto de sua presa, o valor da intensidade de volume A diminui enquanto o valor da taxa de emissão de pulso r aumenta. Esses valores são atualizados pelas equações:

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t, r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - e^{-\gamma t}] \quad (6)$$

$$A_i^t \rightarrow 0, r_i^t \rightarrow r_i^0, \text{ quando } t \rightarrow \infty \forall \alpha, \gamma < 2 \quad (7)$$

Ambos os valores de α e γ são iguais a 0,9. O valor inicial de A , o A_i^0 , pode estar tipicamente entre [1, 2]. Os valores da taxa de emissão de pulso r e da intensidade de volume A só serão atualizados se uma solução melhor for encontrada.

No algoritmo proposto, a frequência mínima e máxima foi definida, $f_{vmin} = 0$ e $f_{vmax} = 0,2$ Hz, respectivamente. Além disso, o número de morcegos foi definido em 5, $x_{min} = 0$ e $x_{max} = 0,85$, que neste caso, representa a razão cíclica (D) do conversor CC-CC Boost. Finalmente, a taxa de emissão de pulso r foi definida em 0,5, a intensidade de volume (*loudness*) em 0,95 e o número total de iterações em 7. Ainda, foi definido que a variável *best*, a qual representa a melhor posição no momento (x_*) e a variável *fmin* representa o valor *Fitness* dessa posição.

Com base nestas simplificações e nas equações mostradas anteriormente, a Figura 4 apresenta o fluxograma para o algoritmo bioinspirado nos morcegos, o *Bat-based* MPPT.

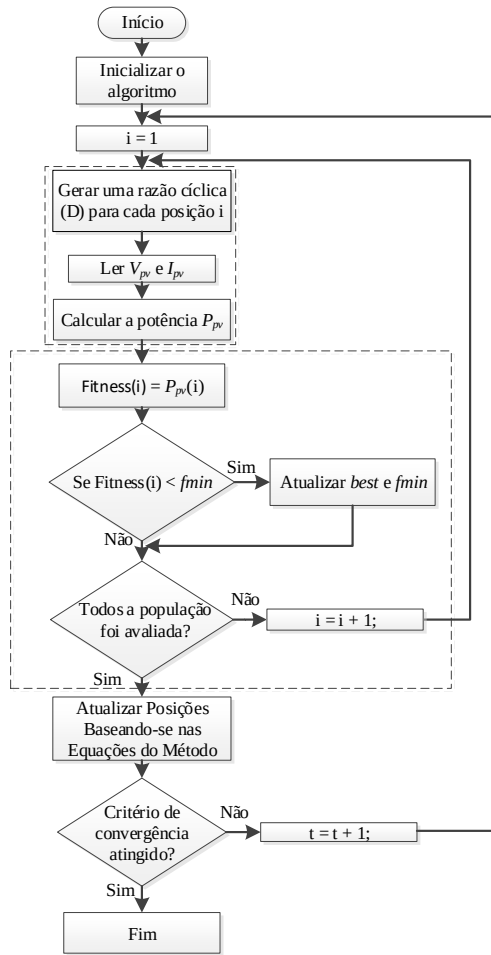


Figura 4. Fluxograma do Método *Bat-based* MPPT

4 Resultados de Simulação

O desempenho do algoritmo *Bat-based* MPPT foi avaliado por meio de resultados de simulação computacional empregando o software MatLab/Simulink®. O algoritmo *Bat-based* MPPT foi comparado ao tradicional algoritmo P&O-based MPPT. As Tabelas 1 e 2 apresentam as características do painel PV e os parâmetros do conversor Boost utilizado nas simulações computacionais, respectivamente.

Tabela 1. Condições de Teste Padrão (STC) para o painel PV SolarWorld® Sunmodule Plus SW 245.

Máxima potência do painel	$P_{max} = 245 \text{ Wp}$
Tensão de MPP	$V_{mpp} = 30,8 \text{ V}$
Corrente de MPP	$I_{mpp} = 7,96 \text{ A}$
Tensão de circuito aberto	$V_{oc} = 37,5 \text{ V}$
Corrente de curto circuito	$I_{sc} = 8,49 \text{ A}$

Tabela 2. Parâmetros do Conversor CC-CC Boost.

Capacitância de entrada	$C_{pv} = 117 \mu\text{F}$
Indutância do conversor	$L_b = 2,5 \text{ mH}$
Capacitância de saída	$C_o = 50 \mu\text{F}$
Carga resistiva	$R_o = 69 \Omega$
Frequência de chaveamento	$f_s = 20 \text{ kHz}$

Ambos os algoritmos de MPPT foram comparados considerando os seguintes casos: 1) o arranjo fotovoltaico opera em STC (conforme Figura 5.a); e 2): o arranjo fotovoltaico opera sob condição de sombreamento parcial (conforme Figura 5.b). Neste último caso, dois painéis fotovoltaicos estão sombreados parcialmente, no qual o primeiro está submetido a uma irradiação solar de 300W/m^2 , enquanto o segundo encontra-se com 500W/m^2 de irradiação solar, respectivamente. A Figura 6 apresenta a curva característica do arranjo PV ($P_{pv} \times V_{pv}$) para o caso 1, enquanto a Figura 7 apresenta a curva característica $P_{pv} \times V_{pv}$ para o caso 2.

Os resultados da simulação apresentados nesta seção apresentam a potência extraída do arranjo PV, assim como a tensão e a corrente nos terminais de saída do arranjo obtidas para cada algoritmo de MPPT.

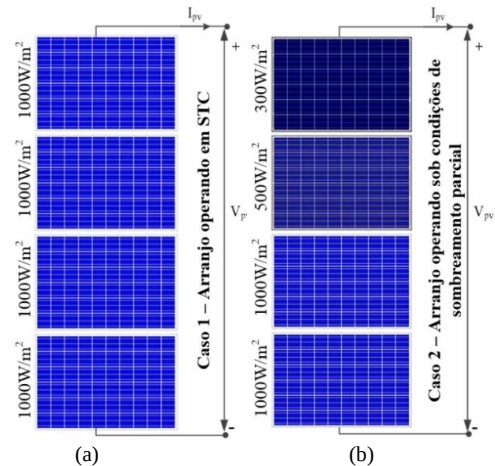


Figura 5. Arranjo Fotovoltaico adotado no trabalho: (a) sem sombreamento parcial; (b) com sombreamento parcial

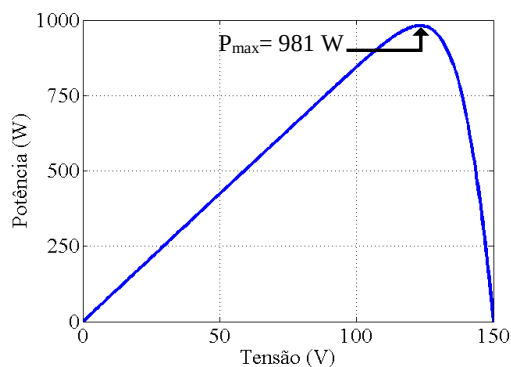


Figura 6. Curva característica P_{pv} x V_{pv} para o arranjo operando em STC

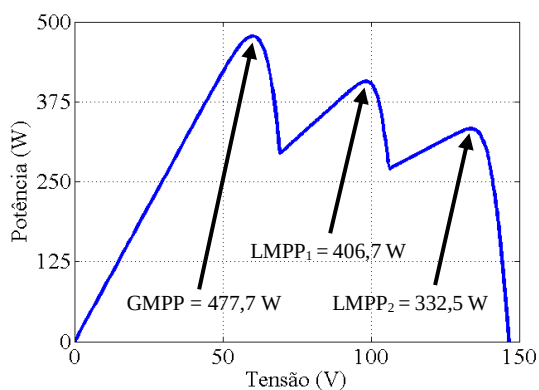


Figura 7. Curva característica P_{pv} x V_{pv} para o arranjo PV operando sob condição de sombreamento parcial

4.1 Arranjo PV operando em STC

A Figura 8 mostra a potência extraída do arranjo PV operando em STC. Conforme mostrado na Figura 6, existe apenas um MPP, sendo a máxima potência do PV a ser extraída igual a 981 W. Como pode ser observado na Figura 8, o algoritmo MPPT baseado no método P&O consegue rastrear o MPP, apresentando oscilações em regime permanente.

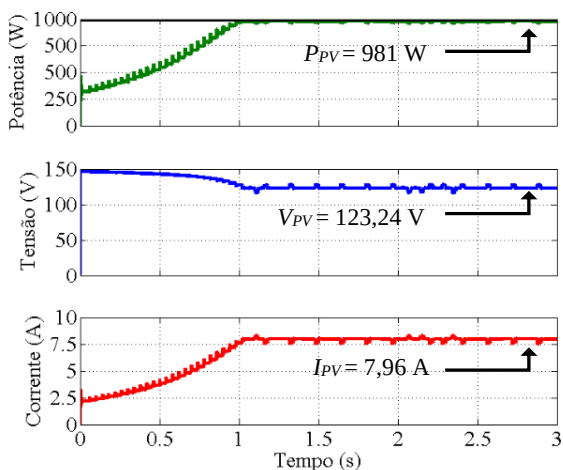


Figura 8. Resultados da simulação para o algoritmo de MPPT P&O para o caso 1 (arranjo PV operando em STC)

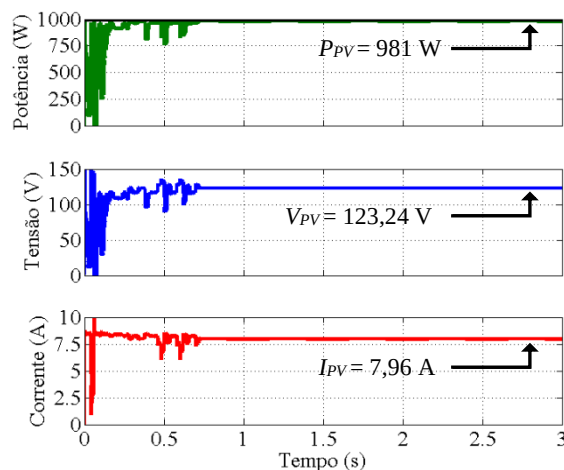


Figura 9. Resultados da simulação para o algoritmo *Bat-based* MPPT para o caso 1 (arranjo PV operando em STC)

Os resultados obtidos para o algoritmo proposto, o *Bat-based* MPPT são mostrados na Figura 9. Pode-se verificar que o algoritmo proposto também foi capaz de alcançar o MPP. Pode-se notar que este algoritmo apresenta menores oscilações de potência em regime permanente quando comparado ao método P&O.

A Tabela 3 resume os principais resultados de simulação para os dois algoritmos de MPPT. Os resultados da simulação confirmam que o algoritmo MPPT *Bat-based* é capaz de convergir rapidamente para o GMPP quando o arranjo fotovoltaico está funcionando em STC. Além disso, o algoritmo baseado nos morcegos apresenta reduzida oscilação de potência na busca do MPP. Ambos algoritmos de MPPT P&O e *Bat-based* apresentaram uma boa eficiência de rastreamento na busca do MPP.

Tabela 3. Comparação entre as técnicas de MPPT para o caso 1.

Avaliação do Sistema Fotovoltaico	Arranjo PV operando em STC	
Técnicas de MPPT	P&O	<i>Bat-based</i>
Tempo de estabelecimento (s)	1,05	0,75
Oscilação de potência em regime permanente (%)	1,23	0,32
Potência extraída no MPP (W)	981	981
Eficiência de rastreamento (%)	100	100

4.2 Arranjo PV operando sob condições de sombreamento parcial

A Figura 10 ilustra a potência extraída do arranjo PV operando sob condição de sombreamento parcial empregando o algoritmo P&O. Conforme mostrado na Figura 7, a curva característica P_{pv} x V_{pv} tem um GMPP e dois LMPP, sendo o GMPP igual a 477,7W, os LMPP iguais a 332,5 W e 406,7W, respectivamente. A partir do resultado apresentado, pode-se verificar que o algoritmo de MPPT baseado no método P&O não atinge o GMPP, ficando preso em um LMPP.

A Figura 11 ilustra a potência extraída do arranjo PV para o algoritmo *Bat-based* MPPT. Pode-se observar que o GMPP é alcançado e o método consegue ex-

trair uma potência de 469,5 W. Além disso, este método de MPPT apresenta reduzidas oscilações de potência em regime permanente.

A Tabela 4 resume os principais resultados de simulação para os algoritmos de MPPT P&O e *Bat-based*, levando em conta que o arranjo PV está operando no caso 2. Os resultados apresentados demonstram que o algoritmo *Bat-based* MPPT é capaz de convergir rapidamente para o GMPP quando o arranjo PV está operando sob condição de sombreamento parcial. Além disso, em regime permanente o método *Bat-based* MPPT apresentou menor oscilação de potência e uma maior eficiência no rastreamento quando comparado ao método tradicional (P&O).

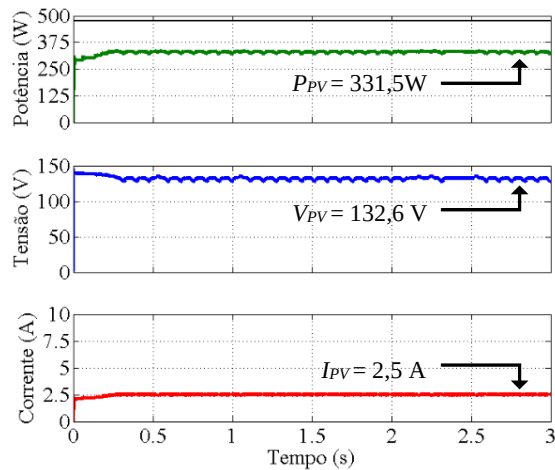


Figura 10. Resultados da simulação para o algoritmo de MPPT P&O para o caso 2 (arranjo PV operando sob condição de sombreamento parcial)

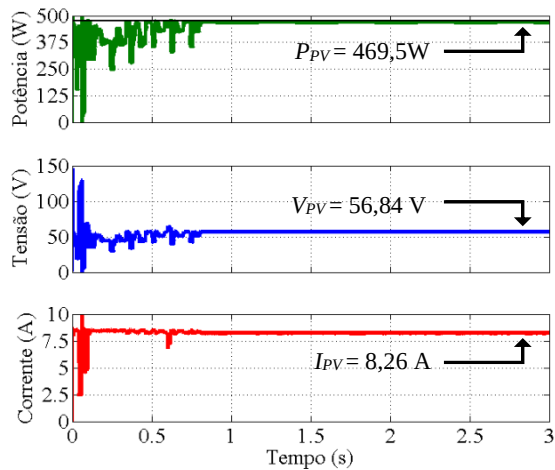


Figura 11. Resultados da simulação para o algoritmo *Bat-based* MPPT para o caso 2 (arranjo PV operando sob condição de sombreamento parcial)

Tabela 4. Comparação entre as técnicas de MPPT para o caso 2.

Avaliação do Sistema Fotovoltaico	Arranjo operando sob condição de sombreamento parcial	
	P&O	Bat-based
Técnicas de MPPT		
Tempo de estabelecimento (s)	0,29	0,84
Oscilação de potência em regime permanente (%)	4,03	0,36
Potência extraída no MPP (W)	331,5	469,5
Eficiência de rastreamento (%)	69,39	98,28

5 Conclusão

Este artigo apresentou um algoritmo bioinspirado nos morcegos para a extração da máxima potência da de arranjos fotovoltaicos, o *Bat-based* MPPT. A eficiência do algoritmo de MPPT apresentado foi validada por meio da comparação com o algoritmo de MPPT P&O.

A partir dos resultados obtidos empregando simulação computacional, demonstrou-se que o algoritmo *Bat-based* MPPT foi capaz de convergir rapidamente para o GMPP quando o arranjo fotovoltaico está operando em STC, assim como quando o mesmo está submetido a condições de sombreamento parcial. Além disso, o algoritmo *Bat-based* MPPT apresentou reduzidas oscilações de potência em regime permanente e maior eficiência de rastreamento na busca do GMPP.

Desta forma, o método *Bat-based* MPPT apresenta um bom desempenho para lidar com problemas de máximos locais e global em sistemas PVs submetidos a sombreamento parcial, maximizando a eficiência global do sistema.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (processo 400837/2016-1) pelo suporte no desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- de Brito, M. A. G., Galotto, L., Sampaio, L. P., de Azevedo Melo, G. and Canesin, C. A. (2013) 'Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(3), pp. 1156–1167.
- de Brito, M. A. G., Sampaio, L. P., De Azevedo Melo, G. and Canesin, C. A. (2015) 'Three-phase tri-state buck-boost integrated inverter for solar applications', *IET Renewable Power Generation*, 9(6), pp. 557–565.
- Catchpole, K. (2016) 'Optical and electrical modelling for high efficiency perovskite/silicon tandem solar cells', in *2016 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD)*, pp. 179–180.
- Chen, K., Tian, S., Cheng, Y. and Bai, L. (2014) 'An Improved MPPT Controller for Photovoltaic System Under Partial Shading Condition', *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5(3), pp. 978–985.
- D'Souza, N. S., Lopes, L. A. C. and Liu, X. (2010) 'Comparative study of variable size perturbation and observation maximum power point trackers for PV systems', *Electric Power Systems Research*. Elsevier, 80(3), pp. 296–305.
- Gow, J. A. and Manning, C. D. (1999) 'Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies', *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 146(2), pp. 193–

- Guan, T. and Zhuo, F. (2017) 'An improved SA-PSO global maximum power point tracking method of photovoltaic system under partial shading conditions', in *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe)*, pp. 1–5.
- Jeyaprabha, S. B. and Selvakumar, A. I. (2017) 'Model-Based MPPT for Shaded and Mismatched Modules of Photovoltaic Farm', *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(4), pp. 1763–1771.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. C. (1995) 'Particle swarm optimization', in *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*. Perth, Australia, IEEE Service Center, Piscataway, NJ, pp. 1942–1948.
- Mohanty, S., Subudhi, B. and Ray, P. K. (2016) 'A New MPPT Design Using Grey Wolf Optimization Technique for Photovoltaic System Under Partial Shading Conditions', *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7(1), pp. 181–188.
- Rahman, S. A., Varma, R. K. and Vanderheide, T. (2014) 'Generalised model of a photovoltaic panel', *IET Renewable Power Generation*, 8(3), pp. 217–229.
- Silva, S. A. O. da, Sampaio, L. P., Oliveira, F. M. de and Durand, F. R. (2017) 'Feed-forward DC-bus control loop applied to a single-phase grid-connected PV system operating with PSO-based MPPT technique and active power-line conditioning', *IET Renewable Power Generation*, 11(1), pp. 183–193.
- Singh, D., Salgotra, R. and Singh, U. (2017) 'A novel modified bat algorithm for global optimization', in *2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)*, pp. 1–5.
- Subudhi, B. and Pradhan, R. (2013) 'A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems', *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(1), pp. 89–98.
- Sundareswaran, K. *et al.* (2016) 'Development of an Improved P and O Algorithm Assisted Through a Colony of Foraging Ants for MPPT in PV System', *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 12(1), pp. 187–200.
- Todeschini, G. and Emanuel, A. E. (2010) 'Wind energy conversion systems as active filters: Design and comparison of three control methods', *IET Renewable Power Generation*, 4(4), pp. 341–353.
- Yang, X.-S. (2010) 'A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm', in Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 65–74.