

Otimização baseada em algoritmo genético aplicada a um MPPT P&O durante condições de sombreamento parcial

André Luiz de Oliveira Nunes*. Evandro Ailson de Freitas Nunes *.
Brunna Santana de Vasconcellos*.

**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia*
(Tel: (74) 99125-1333; e-mail: andreluiz_6894@hotmail.com).
(Tel: (84) 99450-3656; e-mail: evandro.nunes@ifba.edu.br).
(Tel: (83) 99929-0166; e-mail: brunna.vasconcellos@ifba.edu.br).

Abstract: Photovoltaic systems have shown a significant growth in the global energy matrix, faced with the needs of obtaining alternative sources of electricity. However, these systems, in addition to having low efficiency, are sensitive to climatic variations, causing a reduction in energy production. In order to avoid these problems, methods for extracting maximum power were developed, to deal with undesirable operating conditions for photovoltaic modules. One of the techniques that stands out the most is the perturbation and observation (P&O) algorithm, the most widespread due to its low complexity. However, this method fails when the photovoltaic generators are under the influence of partial shading, which is the effect that causes several power peaks over the P-V curve. In order to mitigate these influences, this article presents the optimization of a traditional P&O method, with an embedded genetic algorithm, that seeks the difficulty of tracking peak power overcome.

Resumo: Os sistemas fotovoltaicos têm apresentado um significativo crescimento na matriz energética mundial, diante das necessidades de se obter fontes alternativas de energia elétrica. No entanto, esses sistemas, além de possuírem uma baixa eficiência, são sensíveis às variações climáticas, ocasionando redução na produção de energia. Para contornar esses problemas, foram desenvolvidos métodos de extração da máxima potência, diante de condições desfavoráveis de operação dos módulos fotovoltaicos. Uma das técnicas que mais se destaca é o algoritmo de perturbação e observação (P&O), o mais difundido devido a sua baixa complexidade e facilidade de implementação. Contudo, esse método falha quando os geradores fotovoltaicos estão sob a influência de um sombreamento parcial, que é o efeito que provoca diversos picos de potência na curva P-V. Para tentar mitigar essas influências, o presente artigo apresenta uma otimização de um método P&O tradicional, que em conjunto com um algoritmo genético, busca superar a dificuldade de rastrear picos de potência.

Keywords: Genetic Algorithm; MPPT; P&O; Photovoltaic System; Partial Shading.

Palavras-chaves: Algoritmo Genético; MPPT; P&O; Sistema Fotovoltaico; Sombreamento Parcial.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética, juntamente com a preocupação com os impactos ambientais provocados pelas fontes tradicionais de energia, têm tornado o uso da energia solar fotovoltaica, oriunda dos painéis fotovoltaicos (PFV), cada vez mais atrativo. Por ser uma fonte que depende essencialmente da irradiação solar, é considerada como natural, abundante, limpa e disponível por todo o planeta (Brito et al., 2010).

No Brasil, aliada a sofisticação da produção das células fotovoltaicas, a promulgação da NR 482 e 687 favoreceu o crescimento da micro e minigeração de sistemas fotovoltaicos (SFV). Além disso, o território brasileiro, por ter uma localização geográfica privilegiada, possui elevados níveis de irradiação solar que são superiores aos de países referência na

produção desse tipo de energia, como no caso da Alemanha (Brito et al. 2010).

Apesar das vantagens como fonte de energia limpa, os geradores fotovoltaicos possuem uma baixa eficiência na conversão de luz em eletricidade e, na medida em que ocorrem variações de irradiação e de temperatura, a potência entregue por esses sistemas possui um perfil oscilatório (Karmarzman; Tan, 2014).

A ferramenta utilizada para garantir que a produção de energia de um SFV seja máxima, é o algoritmo de rastreamento da máxima potência (MPPT, do inglês *Maximum Power Point Tracking*) (Choutapalli; Bharath; Kanakasabapathy, 2018). Dentre as inúmeras técnicas existentes na literatura, o algoritmo de perturbação e observação é o mais adotado para os geradores fotovoltaicos

devido à sua simplicidade de implementação (Harrag; Messalti, 2015).

Entretanto, o MPPT P&O apresenta algumas limitações quando os PFV estão submetidos a um sombreamento parcial. O sombreamento parcial produz, na curva P-V característica dos PFV, múltiplos picos de máxima potência local (PMPL) e um pico de máxima potência global (PMPG). Por ser um algoritmo de escalada o P&O se torna ineficaz, não conseguindo distinguir, durante a sua operação, o PMPG de um PMPL (Huang; Chen; Ye, 2018).

Várias técnicas não convencionais de MPPT vêm sendo propostas. O principal objetivo é obter uma melhor eficiência dos PFV nas condições de mudanças climáticas e no caso do sombreamento parcial (Hadji; Gaubert; Krim, 2018). Técnicas de inteligência artificial como controlador lógico difuso (FLC, do inglês, *fuzzy logic controller*) e rede neural artificial (ANN, do inglês *Artificial Neural Network*), apresentam melhorias na extração de potência. No entanto, o desempenho dessas estratégias é reduzido em condições de sombreamento parcial (Andrade et al., 2019).

Alguns métodos vêm recebendo atenção da comunidade científica, por apresentarem menor grau de complexidade e desempenho próximo às técnicas de inteligência artificial. São algoritmos inspirados no comportamento animal, na natureza e estruturas biológicas como a otimização de enxame de partículas (PSO, do inglês *Particle Swarm Optimization*), algoritmo genético (AG), colônia de formigas, dentre outros (Andrade et al., 2019).

Portanto, este artigo tem por objetivo otimizar o algoritmo P&O, com funcionalidades de um AG, para obtenção de uma maior eficiência na extração de um gerador fotovoltaico operando em condições de sombreamento parcial.

2. SOMBREAMENTO PARCIAL

A corrente elétrica gerada pelo PFV é proporcional ao nível de irradiação solar que incide nas células fotovoltaicas (Villalva, 2015). Na condição de sombreamento parcial uma ou mais células estão sob níveis diferentes de irradiação, logo, a corrente produzida pelas células sombreadas será menor que as demais (Heringer, 2016).

Uma vez que são conectadas em série, a corrente circulante por esse conjunto de células será a mesma. A única maneira das células sombreadas atingirem o mesmo nível de corrente das não sombreadas é operando na região de polarização inversa. Nessa condição as células passam a consumir potência elevando a temperatura, podendo ocasionar danos irreversíveis nos PFV (Heringer, 2016).

A mitigação desse problema é conectar diodos de *bypass* em paralelo aos PFV. Isso impede a passagem de correntes produzidas pelas células mais irradiadas para as sombreadas. No entanto, esse artifício ocasiona quedas repentinas de potência e prejudica a geração de energia. Como consequência, múltiplos picos de potência são formados na curva P-V do SFV (Choutapalli; Bharath; Kanakasabapathy, 2018).

3. MODELAGEM DO PFV

Modelos eletricamente equivalentes, ajudam a compreender o comportamento eletrônico das células fotovoltaicas, o mais utilizado é o de diodo único, como observado na Figura 1. O modelo consiste em uma fonte de corrente em paralelo com um diodo, e ainda para uma melhor precisão, considerando as não linearidades, uma resistência série R_s e uma resistência paralelo R_p são adicionadas (Casaro; Martins, 2008).

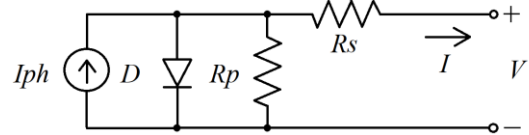


Fig. 1 Circuito elétrico equivalente do modelo de diodo único, adaptado de (Casaro; Martins, 2008).

Com base no modelo de diodo único é possível equacionar as variáveis apresentadas pelas Equações (1) – (4) (Casaro; Martins, 2008).

$$I = I_{ph} - I_r \cdot [e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1] - \left(\frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \right) \quad (1)$$

$$I_{ph} = [I_{sc} + \alpha \cdot (T - T_r)] \cdot G \quad (2)$$

$$I_r = [I_{rr} \cdot \left(\frac{T}{T_r} \right)^3] \cdot e^{\left[\left(\frac{q \cdot E_g}{\eta \cdot k} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (3)$$

$$I_{rr} = \frac{I_{sc} - \left(\frac{V_{oc}}{R_p} \right)}{e^{\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{\eta \cdot k \cdot T_r} \right)} - 1} \quad (4)$$

Em que: I , I_{sc} , I_r e I_{rr} representam as correntes de saída, de curto circuito, de saturação reversa e de saturação reversa referência da célula fotovoltaica respectivamente; I_{ph} é a fotocorrente; V e V_{oc} são as tensões de saída e de curto circuito da célula fotovoltaica; T é a temperatura ambiente e T_r a temperatura referência; R_s e R_p representam as resistências série e paralelo; Já as constantes q , η , k , α , G e E_g são respectivamente a carga do elétron, fator de qualidade da junção p-n, constante de Boltzmann, coeficiente de temperatura, intensidade de irradiação solar e a energia do gap do semiconductor.

4. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O diagrama esquemático do SFV implementado é ilustrado na Figura 2. O arranjo fotovoltaico completo é composto por quatro *strings* conectadas em paralelo, contendo oito PFV conectados em série. Dois estágios de conversão caracterizam a operação do SFV. No primeiro estágio, composto por um conversor CC-CC tipo *boost*, é realizada a geração e adequação da corrente produzida. No segundo estágio é realizado o sincronismo com a rede e entrega de potência, por um conversor CC-CA do tipo fonte de tensão (VSI, do inglês *voltage source inverters*), controlado pela técnica de

modulação de largura de pulso (PWM, do inglês *pulse width modulation*) (Nunes et al., 2018). O barramento CC é composto por um capacitor responsável pelo balanço de energia. A conexão do sistema com a rede é feita por meio de um filtro L, a fim de diminuir distorções harmônicas das correntes entregue ao sistema.

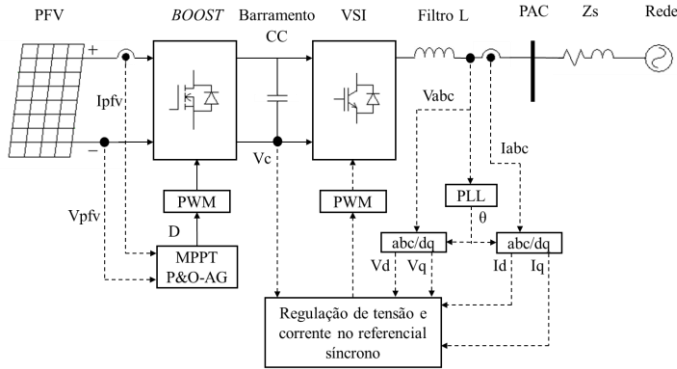


Fig. 2 Esquema do SFV implementado.

Todo o sistema é controlado e regulado no referencial síncrono e garante o sincronismo com a rede por meio de um PLL (do inglês, *Phase Locked Loop*) (Nunes et al., 2017). Por fim, o MPPT P&O-AG é responsável pela maximização da eficiência do SFV.

4.1 MPPT P&O

O fluxograma do algoritmo P&O convencional pode ser observado na Figura 3. O modo de operação desse MPPT consiste em provocar perturbações no sistema, incrementando ou decrementando valores na razão cíclica de trabalho (D) do conversor CC-CC, na medida em que são computadas as amostras de índice k das variações de potência de saída (ΔP) dos PFV.

Valores positivos de ΔP indicam que a perturbação está direcionando o sistema para o ponto de máxima potência (PMP). No caso em que ΔP é negativo, a potência do sistema está se distanciando desse PMP (Karmarzaman; Tan, 2014). Quando ΔP é nulo significa que o PMP foi identificado.

4.2 Algoritmo Genético

O AG é um método de otimização heurístico, que parte dos princípios da teoria da evolução de Darwin. As informações e dados anteriores e atuais servem para guiar um problema para o conjunto das possíveis soluções, em uma busca aleatório-direcionada, como citado em (Cunha et al, 2016). Os principais operadores do AG são a seleção natural, cruzamento e mutação. Na Figura 4 é mostrado o fluxograma do AG.

Inicialmente é necessário criar uma população composta por indivíduos aleatórios. Na etapa seguinte é avaliada a aptidão de cada indivíduo por uma função *fitness*. Após o cálculo de aptidão, o processo seguinte é a seleção natural, que escolhe as melhores soluções que continuam para a etapa do

cruzamento. Quanto as piores soluções, estas serão eliminadas (Karmarzaman; Tan, 2014).

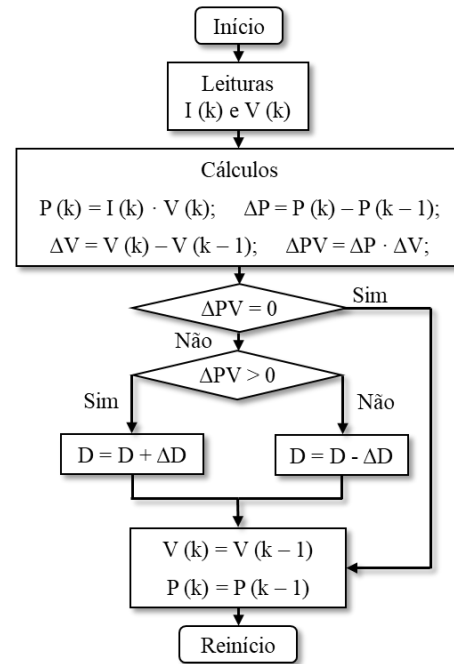


Fig. 3 Fluxograma do MPPT P&O convencional.



Fig. 4 Fluxograma do AG.

No processo de cruzamento, os indivíduos repassam suas características para os descendentes, similarmente à reprodução sexuada dos organismos. O procedimento seguinte é a mutação que tem por objetivo evitar que os indivíduos das gerações fiquem limitados a um pequeno espaço de soluções, o que resultaria em uma solução local ao invés de uma solução global (Cunha et al, 2016). Por fim, é analisado se o critério de parada foi estabelecido. Em caso negativo, as etapas são retomadas com os indivíduos selecionados para compor a nova geração.

Os critérios de parada dependem da complexidade do que se pretende otimizar, logo, podem ser definidos critérios como tempo pré-definido de execução do algoritmo, número de gerações ou convergência para a função *fitness* (Harrag; Messalti, 2015).

4.3 MPPT híbrido P&O-AG

Na Figura 5 é ilustrado o fluxograma do P&O-AG. O algoritmo MPPT proposto unifica a forma de operação do método P&O com as operações de um AG, originando um método híbrido P&O-AG. No início são gerados valores aleatórios de D, dentro de um intervalo que garanta a operação no modo de condução contínua do conversor *boost*. Os valores da população inicial são convertidos para o sistema de numeração binário, para que os procedimentos de cruzamento e mutação possam ser realizados.

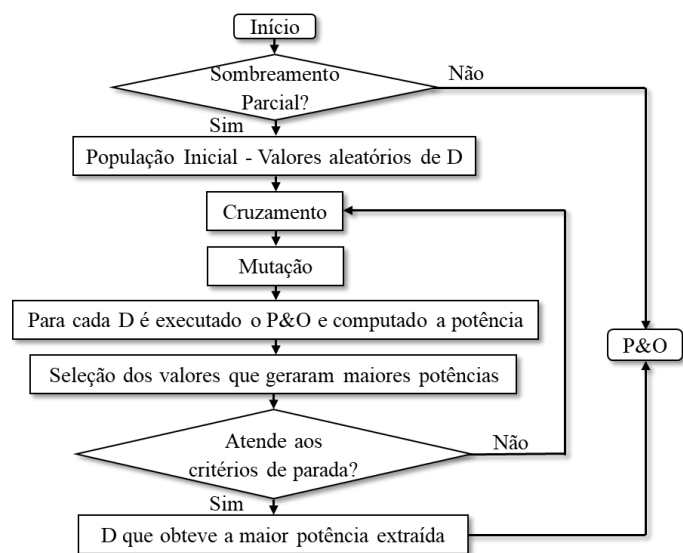


Fig. 5 Fluxograma do P&O-AG.

O processo de cruzamento se dá com a combinação dos dígitos, da representação binária, de dois indivíduos da população. Essa dinâmica pode ser visualizada na Figura 6, na qual, os cinco primeiros dígitos do Pai 1 se combinam com os cinco últimos dígitos do Pai 2 e originam um novo indivíduo. Já nas mutações, um indivíduo é escolhido aleatoriamente e tem um dos dígitos modificados: se o valor do dígito escolhido for 0, este será modificado para 1 e vice-versa.

Realizadas as etapas de cruzamento e mutação, todos os valores são convertidos do sistema binário para o sistema decimal, para que em seguida seja avaliada a aptidão de cada indivíduo da população. Na aplicação do algoritmo proposto, a função *fitness* é definida como a potência extraída pelo SFV. Dessa forma, o algoritmo P&O é inicializado com um dos valores de D da população inicial. Ao final dos ajustes do MPPT P&O, é computada a potência resultante. Esse processo se repete para cada um dos demais valores de ciclo de trabalho, com isso, cada D criado e modificado pelo AG está associado a uma potência.

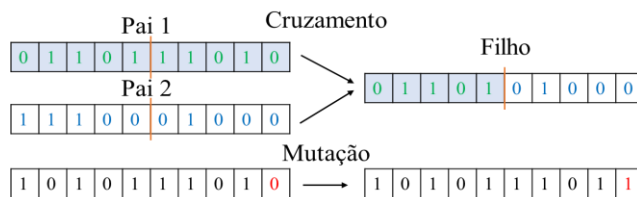


Fig. 6 Ilustração do processo de cruzamento e mutação.

Os melhores indivíduos são os que obtiveram os maiores valores de potência. Por fim, o P&O-AG reinicia as etapas anteriores com os novos indivíduos. Nesse trabalho, o critério de parada consiste no número limite de gerações.

5. VALIDAÇÃO DO ALGORITMO PROPOSTO EM CENÁRIOS SIMULADOS

Para avaliar o desempenho do algoritmo P&O convencional e do P&O-AG, é realizada uma simulação de onze cenários de operação do SFV descrito na seção 4, por meio do *software* PSIM, que utiliza a linguagem C/C++. O passo de integração adotado nas simulações é de 100 μ s.

De acordo com o número de pontos de máximos locais e global, os cenários de sombreamento analisados são divididos em dois tipos: 4 e 6 pontos. Dentre os resultados gerais obtidos, três simulações são apresentadas em detalhe nesse trabalho. Os cenários são definidos conforme ilustrado na Figura 7.

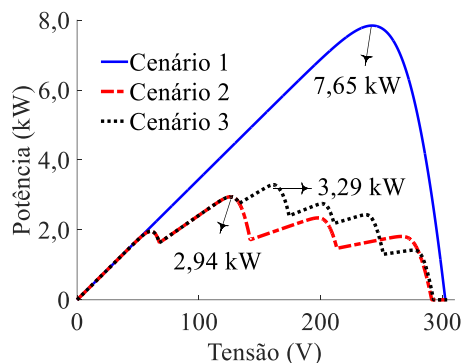


Fig. 7 - Curva P-V das condições de operação para avaliação dos algoritmos.

O cenário 1 consiste na ausência do sombreamento parcial do SFV, enquanto que os cenários 2 e 3 representam sombreamentos parciais, de 4 e 6 picos, respectivamente, com as características sumarizadas na Tabela 1. Para os demais cenários foi avaliado o desempenho do algoritmo em condições de sombreamento aleatórias.

Tabela 1. Percentual de irradiação por *string* (%)

PFV	1	2	3	4	5	6	7	8
Cenário 2	100	100	70	70	35	35	20	20
Cenário 3	100	100	70	70	60	40	30	15

O SFV é composto por PFV com características elétricas equivalentes ao modelo YL245P-29b do fabricante *Yingli Solar*. Os principais parâmetros elétricos, em condições ideais de operação (STC, do inglês, *Standard Test Conditions*), estão presentes na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros elétricos YL245P-29b

Potência máxima (PMP)	245 W
Tensão no PMP (V _{pmp})	30,2 V
Corrente no PMP (I _{pmp})	8,11 A
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	37,8 V
Corrente de curto circuito (I _{sc})	8,63 A
Número de células fotovoltaicas	60

5.1 Avaliação do P&O convencional

O desempenho do P&O para os cenários 1, 2 e 3, é ilustrado na Figura 8. As curvas de potência extraídas de acordo com os cenários de operação podem ser observadas na Figura 8 (a). As análises dos cenários 2 e 3 têm início após a estabilização do SFV, que ocorre por volta de 0,6 segundos. Após esse período, é possível avaliar a eficiência do SFV com base na Figura 8 (b).

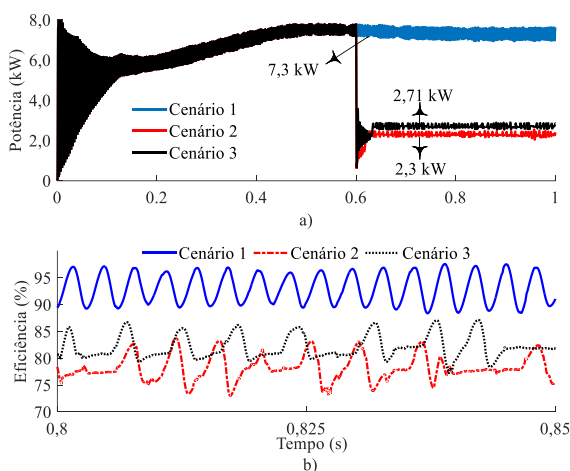


Fig. 8 – Comportamento da (a) potência extraída do SFV e das (b) eficiências obtidas com o método P&O convencional.

No cenário 1, o MPPT P&O consegue extrair uma potência média de 7,3 kW que equivale a uma eficiência média de 95,42%. No cenário 2 a potência obtida não é a máxima e atinge um valor médio de 2,3 kW, equivalente a um PMPL. O SFV deixa de extrair 600 W de potência em relação ao máximo disponível para esse cenário. A eficiência média do algoritmo cai para 78,23%, perdendo cerca de 17% da sua eficiência em comparação com o cenário 1.

No cenário 3 o P&O obteve potência média de 2,71 kW o que caracteriza também um PMPL, uma vez que, o PMPG nessas condições é apresentado na Figura 7 como 3,29 kW. O

SFV perde pouco mais de 550 W, com eficiência média equivalente a 82,37%, que é 13% inferior em relação ao cenário 1.

5.2 Avaliação do P&O-AG

O desempenho do P&O-AG para os cenários 2 e 3, pode ser observado na Figura 9. A cada ajuste e teste dos ciclos de trabalho, o sistema necessita de 0,2 segundos para estabilizar. A potência extraída pelo SFV é novamente medida somente após ocorrida a estabilização. A quantidade de indivíduos por geração é definida como seis, já o critério de parada é atingido quando o número de gerações for equivalente a dez. Esses critérios foram adotados com o objetivo de diminuir o tempo de execução do algoritmo e garantir o seu funcionamento adequado. Como resultado, é possível observar a potência extraída pelo algoritmo nas Figuras 9 (a) e (b). Durante o regime permanente, ambas as potências dos cenários sombreados são mostradas na Figura 9 (c), seguida pelos perfis da eficiência na Figura 9 (d).

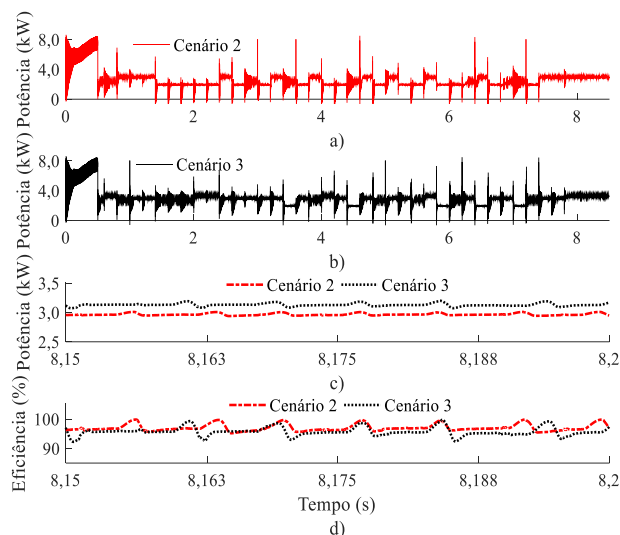


Fig. 9 – Perfil de potência extraída pelo P&O-AG para o a) cenário 1, b) cenário 2, c) ambos cenários e d) eficiência das potências.

O valor médio da potência extraída pelo P&O-AG no cenário 2, conforme a Figura 9 (c), é de 2,93 kW. Essa potência caracteriza um PMPG para esse cenário, mostrado na curva P-V na Figura 7. A operação nesse nível de potência resulta em uma eficiência média de 97,03%, que é 18,80% superior à eficiência do P&O convencional nas mesmas condições.

Na avaliação do cenário 3, a potência obtida pelo P&O-AG tem valor médio de 3,26 kW. Assim como no cenário 2, o SFV operado com o P&O-AG conseguiu entregar potência com eficiência média de 95,71%. O valor da eficiência obtida é superior em 13,34% que no mesmo cenário com o P&O, aumentando a obtenção de potência em 550 W. Na Tabela 3 são sumarizados os valores percentuais de eficiência média referente a todos os cenários analisados. A eficiência média total do P&O nos cenários de sombreamento equivale a

81,99%, enquanto que o P&O-AG, nas mesmas condições de operação, apresentou eficiência média total de 95,99%. Isso representa um aumento de 14% na extração de potência em condições de sombreamento parcial.

Tabela 3. Eficiência média dos algoritmos em todos os cenários (%)

Cenários	P&O	P&O-AG
1	95,42	-
2	78,23	97,03
3	82,37	95,71
4	96,12	95,97
5	85,02	92,89
6	82,55	96,53
7	79,26	96,55
8	94,85	94,79
9	70,27	96,83
10	75,95	96,94
11	75,32	96,75

6. CONCLUSÕES

Este trabalho propõe um método de MPPT híbrido, que utiliza características de um algoritmo genético para otimizar o desempenho de sistemas fotovoltaicos, que operam em condições de sombreamento parcial. Nos cenários avaliados, o P&O-AG obteve desempenho superior ao P&O convencional. Isso decorre da capacidade do método em distinguir um PMPG de um PMPL.

Tendo em vista que o P&O convencional leva cerca de 0,7 segundos para identificar o melhor ponto de operação, o tempo de processamento do P&O-AG é bem superior, pois, foram necessários mais de 7 segundos para que todos os valores fossem testados e o método atingisse o melhor resultado, de acordo com os critérios adotados. Em aplicações que apresentem um número maior de PMPL ou necessitem de mais gerações e indivíduos, o período de rastreamento do PMPG pelo P&O-AG poderá ser ainda maior. Portanto, a redução do tempo de processamento e rastreamento, se torna o principal objeto para trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do IFBA por meio da PRPGI.

REFERÊNCIAS

Andrade, L. M., Vicente, P. S., Tofoli, F. L., Vicente, M. E. (2019). A critical analysis of PSO and its variations

applied to MPPT for PV Systems under Partial Shading Condition. *IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*.

Brito, M. A. G., Junior, L. G., Sampaio, L., Canesin, C. (2010). Avaliação das Principais Técnicas para Obtenção de MPPT de Painéis Fotovoltaicos. *9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (Induscon)*. São Paulo.

Casaro, M. M., Martins, D. C. (2008). Modelo de Arranjo Fotovoltaico Destinado a Análises em Eletrônica de Potência Via Simulação. *Eletrônica de Potência*, vol. 13, no. 3.

Choutapalli, H., Bharath, K. R., Kanakasabapathy, P. (2018). A Review on Advanced MPPT Methods for SPV system under Partial Shaded Conditions. *International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCPCT)*.

Cunha, V. H., Campos, E. S., Guimarães, L. C., Dantas, M. J. P. (2016). Algoritmo genético de codificação real aplicado à otimização de funções de Benchmark. *XLVIII SBPO, Simpósio Brasileiro de Pesquisas Operacionais*.

Hadji, S., Gaubert, J., Krim, F. (2018). Real-Time Genetic Algorithms-Based MPPT: Study and Comparison (Theoretical and Experimental) with Conventional Methods. *ENERGIES*.

Harrag, A., Messalti, S. (2015). Variable step size modified P&O MPPT algorithm using GA-based hybrid offline/online PID controller. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Heringer, N. M. F. (2016). Modelagem de arranjo fotovoltaico com sombreamento parcial para referência de emuladores estáticos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Espírito Santo.

Huang, Y., Chen, X., Ye, C. (2018). A hybrid maximum power point tracking approach for photovoltaic systems under partial shading conditions using a modified genetic algorithm and the firefly algorithm. *Hindawi, International Journal of Photoenergy*.

Kamarzaman, N. A., Tan, C. W. (2014). A comprehensive review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Nunes, E. A. F., Alves, D. K., Dantas, E. S., Rocha, T. O. A., Ribeiro, R. L. A., Costa, F. B. (2017). Impact of pv systems on microgrids under different levels of penetration and operational scenarios. *Congresso brasileiro de eletrônica de potência - COBEP*.

Nunes, E. A. F., Silveira, L. F. Q., Alves, D. K., Dantas, E. S., Pessoa, G. A. P. C. A. (2018). Avaliação do impacto harmônico de corrente devido à inserção de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica. *XXII Congresso Brasileiro de Automática – CBA – João Pessoa*.

Villalva, M. G. (2015). *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações*. 2ª Ed. São Paulo.