

Avaliações de Desempenho de um Sistema Fotovoltaico Monofásico sob Condições de Sombreamento Parcial Baseadas em Otimizações no MPPT P&O

André Luiz de Oliveira Nunes*. Evandro Ailson de Freitas Nunes*.

* 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).

Abstract: Despite the advantages as a renewable source, photovoltaic generators still have low efficiency in converting light into electricity. Furthermore, they are sensitive to variations in solar irradiance and temperature. When weather conditions are unfavorable, the greatest impact is on electricity generation, which can be significantly reduced. In order to maximize the performance of PV system, MPPT techniques have been developed. However, when a PV system is installed in places where external agents shade the photovoltaic modules, the conventional MPPT algorithms are drastically undermined. In this context, the present work aims to evaluate two optimization methods applied to a MPPT algorithm. Supported by PSIM software, algorithms are developed and a 300 Wp single-phase PV system grid-connected is presented. Simulation results demonstrate benefits and drawbacks related to the influence of optimization on the overall efficiency of this PV system.

Resumo: Apesar das vantagens como fonte renovável, os geradores fotovoltaicos ainda apresentam baixa eficiência na conversão de luz em eletricidade. Além disso, são sensíveis às variações de irradiância solar e de temperatura. Quando as condições climáticas são desfavoráveis, o maior impacto é na geração de energia elétrica, que pode ser reduzida de forma significativa e, para maximizar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos (SFV), técnicas de rastreamento da máxima potência (MPPT, do inglês *Maximum Power Point Tracking*) foram desenvolvidas. No entanto, quando um SFV é instalado em locais onde agentes externos sombreiam os painéis fotovoltaicos (PFV), os algoritmos MPPT convencionais são drasticamente prejudicados. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar dois métodos de otimização aplicados a um algoritmo MPPT. Com o auxílio do *software* PSIM, foram desenvolvidos os algoritmos e dimensionado um SFV monofásico de 300 Wp conectado à rede elétrica. Os resultados da simulação demonstram as vantagens e desvantagens relacionados à influência da otimização sobre a eficiência global desse SFV.

Keywords: Genetic Algorithm; MPPT; PSO; Single-Phase PV System; Partial Shading.

Palavras-chaves: Algoritmo Genético; MPPT; PSO; Sistema Fotovoltaico Monofásico; Sombreamento Parcial.

1. INTRODUÇÃO

Os investimentos tecnológicos ao longo dos anos aprimoraram os processos de fabricação das células fotovoltaicas, barateando e incrementando a eficiência dos PFV (Panigrahi et al. 2020). Como consequência, os SFV conectados à rede elétrica ficaram cada vez mais atrativos, com grande participação de consumidores de baixa tensão que agora são capazes de gerar sua própria eletricidade (Panigrahi et al. 2020).

A eficiência dos PFV depende das características construtivas e das condições climáticas, como irradiância solar e temperatura (Heringer, 2016). Na medida em que ocorrem oscilações nessas variáveis, a potência entregue por esses sistemas também possui um perfil oscilatório (Kamarzaman; Tan, 2014). Os sistemas fotovoltaicos empregam o chamado

controle MPPT, com o objetivo de mitigar os efeitos causados pela mudança na intensidade da irradiância solar e outros aspectos ambientais (Subudhi; Pradhan, 2013).

Para atingir a produção máxima de energia de um arranjo fotovoltaico, este controle busca o ponto de máxima potência (PMP) da curva P-V característica de um PFV. Dentre vários métodos descritos na literatura, o P&O é o mais popular devido ao seu razoável rastreamento de potência sob condições de irradiância solar uniformes e facilidade de implementação (Gonzatti et al., 2017).

Para arranjos fotovoltaicos que experimentam uma condição de sombreamento parcial, situação em que uma ou mais células fotovoltaicas estão sob níveis diferentes de irradiância solar, a curva P-V característica de um PFV apresenta múltiplos picos de máxima potência local (PMPL) e um

único pico de máxima potência global (PMPG) (Choutapalli; Bharath; Kanakasabapathy, 2018). Essa situação é um problema para os métodos MPPT que utilizam métodos de escalada, como no caso do P&O, pois, não são capazes de diferenciar durante a sua operação o PMPG, que é a melhor condição de operação no sombreamento parcial, de um PMPL (Huang; Chen; Ye, 2018).

Um grande número de métodos foi proposto para contornar esta restrição e eles podem ser classificados em duas categorias principais: métodos baseados em inteligência artificial e métodos de otimização (Radjai et al., 2014). De acordo com Podder, Roy e Pota (2019), em termos de velocidade de convergência, ajuste periódico e dependência de arranjo fotovoltaico, algoritmos de otimização funcionam melhor no sombreamento parcial do que outros métodos clássicos.

Este trabalho apresenta um sistema fotovoltaico monofásico de 300 Wp conectado à rede elétrica. Os estudos realizados avaliam os efeitos na potência alcançada por meio de um conversor *boost* operando com algoritmo P&O e dois algoritmos de otimização: Algoritmo Genético (AG) e Otimização por Enxame de Partículas (PSO, do inglês *Particle Swarm Optimization*), frente às condições de sombreamento parcial.

A estratégia de controle de potência implementada nesse SFV garante a operação com fator de potência unitário. Simulações detalhadas demonstram a influência do comportamento de cada algoritmo com posterior comparação entre eles.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA E RECURSOS DE CONTROLE

Na Figura 1 é ilustrado o SFV empregado para a realização dos estudos de avaliação. Dois módulos fotovoltaicos monocristalinos, semelhantes ao modelo TSM-160M, do fabricante Topsolar, são conectados em série para a obtenção de 300 Wp. O fornecimento de energia para a rede elétrica é realizado por um sistema de conversão de dois estágios.

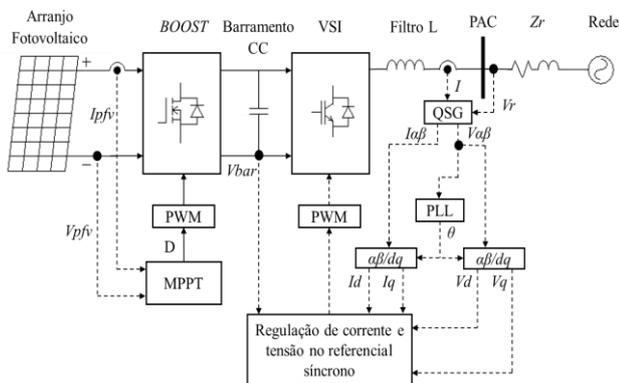


Fig. 1 - SFV monofásico conectado à rede elétrica com dois estágios de conversão.

No primeiro e segundo estágio, é utilizado um conversor *boost* e um conversor do tipo fonte de tensão (VSI, do inglês *Voltage Source Inverter*) de ponte completa monofásico,

respectivamente. Ambos são controlados pela técnica de modulação de largura de pulso (PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*) (NUNES et al., 2018).

A conexão ao Ponto de Acoplamento Comum (PAC) é feita por meio de um filtro L para reduzir o conteúdo harmônico de corrente entregue à rede elétrica. 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).

Devido a característica monofásica deste sistema, para o PLL são necessários métodos para emular um sistema de tensão em quadratura artificial, os QSG (do inglês, *Quadrature Signal Generator*) (Caracas, 2013). Dessa forma, foi implementado um PLL baseado na transformada inversa de Park.

A partir de sensores de corrente e tensão, os valores dessas grandezas são direcionados para o bloco MPPT, responsável pela maximização da eficiência do SFV. Os algoritmos desenvolvidos nesse trabalho buscam o melhor ponto de operação atuando na razão cíclica de trabalho do conversor *boost*.

A estratégia de controle utilizada é baseada na regulação de corrente e tensão no referencial síncrono, que permite uma implementação digital de forma simplificada, processando sinais contínuos a partir do uso de controladores Proporcional-Integral (PI). Nessa estratégia de controle, ilustrada na Figura 2, duas malhas atuam em conjunto, como um efeito em cascata, e os controladores PI são projetados para regular a tensão do capacitor do barramento CC e a corrente de saída do SFV (Marangoni, 2012).

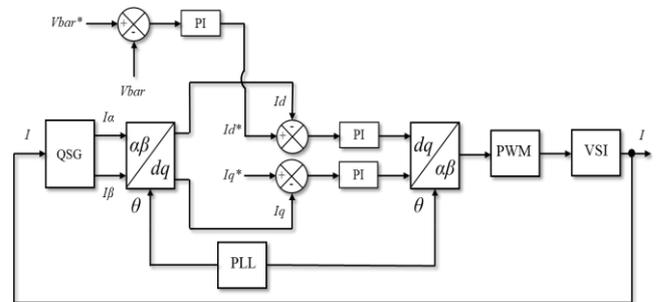


Fig. 2 - Sistema de controle no referencial *d-q*.

A malha interna é responsável pelo controle da corrente produzida na saída do VSI, e deve responder mais rapidamente as variações do sistema do que a malha externa. A malha de controle externa é responsável em garantir que a tensão no barramento CC esteja constante, tendo na sua saída a corrente de eixo direto referência, I_d^* (Crispim, 2018). Além disso, objetivando a operação do SFV com fator de potência unitário, a corrente de eixo em quadratura referência, I_q^* , é definida como zero.

3. OTIMIZAÇÃO DO MPPT P&O COM ALGORITMO GENÉTICO

O AG é um método heurístico de otimização global que parte dos conceitos da seleção natural, em que os indivíduos mais

adaptados sobrevivem para as próximas gerações, e da genética, em que os pais repassam características para seus descendentes. Nessa técnica, é necessário armazenar um histórico das variáveis para guiar um problema para as melhores soluções. Essas ações são realizadas por meio de interações, denominadas de gerações (Silva, 2005). Na aplicação deste trabalho, as funcionalidades do AG são combinadas com o P&O convencional, como no fluxograma ilustrado na Figura 3. Basicamente o AG atua quando é identificada uma condição de sombreamento parcial.

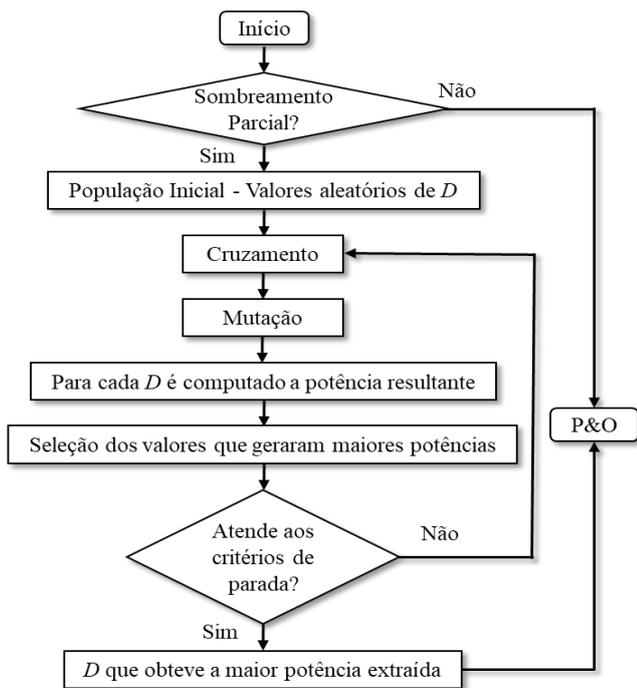


Fig. 3 - Fluxograma da otimização do MPPT P&O com AG.

A criação de um conjunto de indivíduos aleatórios que compõem uma população inicial, determina o início da rotina do algoritmo. Os indivíduos da população são definidos como valores da razão cíclica de trabalho do conversor *boost*, *D*, dentro de um intervalo que garanta a operação no modo de condução contínua do conversor. Nos processos seguintes, de cruzamento e mutação, os valores de *D* são convertidos para a notação binária, assim, os dígitos “0” e “1” podem ser modificados ou combinados entre os indivíduos, possibilitando a formação de novos valores.

No cruzamento, partes dos dígitos de dois indivíduos são combinados, originando um novo valor. Na etapa da mutação ocorre a substituição aleatória de um dígito, de “0” para “1” e vice-versa. Além disso, a mutação é uma condição aleatória, podendo ou não ocorrer entre as gerações e tem por objetivo evitar que as soluções fiquem limitadas a um pequeno espaço, o que resultaria em uma solução local ao invés de uma global (Cunha et al., 2016).

Os valores gerados nas etapas de cruzamento e mutação são convertidos para notação decimal, logo, ao final dessas etapas o algoritmo dispõe um conjunto de valores para a variável *D*. Durante a operação do SFV cada valor de *D* é executado individualmente por um determinado período de tempo, e

após a estabilização é computada a potência média na saída do arranjo fotovoltaico. Portanto, para cada *D* vai existir uma potência associada.

Em seguida, ocorre a seleção natural que escolhe as melhores soluções, por meio de uma função *fitness*. Nesse trabalho, foi definida a função *fitness* como a potência média, ou seja, os valores que obtiveram as maiores potências continuam nas próximas gerações. As piores soluções, os indivíduos menos aptos, são eliminados. Por fim, quando o critério de parada for alcançado o algoritmo finaliza, entregando o melhor valor de *D* para que seja executado o P&O convencional.

Caso o critério de parada não seja atingido, todas as etapas são retomadas a partir do cruzamento, dando seguimento as novas gerações. 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). Nesse trabalho é definido a quantidade de gerações como critério de parada.

4. OTIMIZAÇÃO DO MPPT P&O COM PSO

O PSO é um algoritmo baseado no comportamento de animais que se relacionam em grupo, como peixes e aves, na tentativa de encontrar alimentos. Os indivíduos são determinados como partículas, enquanto que o grupo de partículas é denominado como enxame (Leopoldino, 2019). Essas partículas percorrem um determinado espaço de busca, com isso, avaliam os melhores pontos de operação.

As partículas possuem sua própria experiência e podem avaliar, ao decorrer das interações do algoritmo, a qualidade dessa experiência numa aprendizagem cognitiva. Existe ainda o conhecimento do desempenho das partículas vizinhas, que origina uma aprendizagem social.

Dessa forma, cada partícula toma a melhor decisão a partir do conhecimento do desempenho individual e coletivo do passado (Luz, 2019). As Equações 1 e 2 definem o modo de operação do PSO, sendo a primeira a equação da velocidade e a segunda a equação da posição.

$$V^{k+1} = w \cdot V_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (Pbest_i - x_i^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (Gbest - x_i^k), \quad (1)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + V_i^{k+1}, \quad (2)$$

nas quais, *i* representa o número da partícula, *x* é a posição da partícula, *k* é o número da interação, *V* a velocidade da partícula, *Pbest* e *Gbest* representam a melhor posição individual e a melhor posição global de cada partícula, respectivamente (Andrade et al., 2019).

A variável *w* é conhecida como coeficiente de inércia ou peso inercial, responsável por influenciar na velocidade das partículas. Na literatura, o valor de *w* não é bem definido, mas, pequenos valores de *w* resultam em um rastreamento mais lento, restringindo a pesquisa para um máximo local. Já valores maiores proporcionam uma melhor pesquisa global. (Andrade et al., 2019). As variáveis *c*₁ e *c*₂ representam a aceleração da parte cognitiva e social, respectivamente. Esses valores influenciam no movimento do enxame para a melhor

posição individual ou global, dessa forma, os ajustes nessas variáveis devem ser feitos de acordo com a aplicação do algoritmo. r_1 e r_2 são valores aleatórios, entre 0 e 1, gerados a cada interação (Leopoldino, 2019).

Assim como no AG, o desempenho de cada partícula é avaliado de acordo com uma função *fitness* e nas interações em que não é atingido o critério de parada, serão atualizados o $Gbest$ e o $Pbest$. Na aplicação do presente trabalho, as partículas são definidas como valores de D , dessa forma, as Equações 1 e 2 são modificadas para as Equações 3 e 4, conforme apresentadas no trabalho de Andrade et al. (2019). Para a otimização, as etapas do PSO operam em conjunto com P&O convencional, como mostra o fluxograma na Figura 4.

$$V_i^{k+1} = w \cdot V_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (Dbest_i - D_i^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (GDbest - D_i^k), \quad (3)$$

$$D_i^{k+1} = D_i^k + V_i^{k+1}. \quad (4)$$

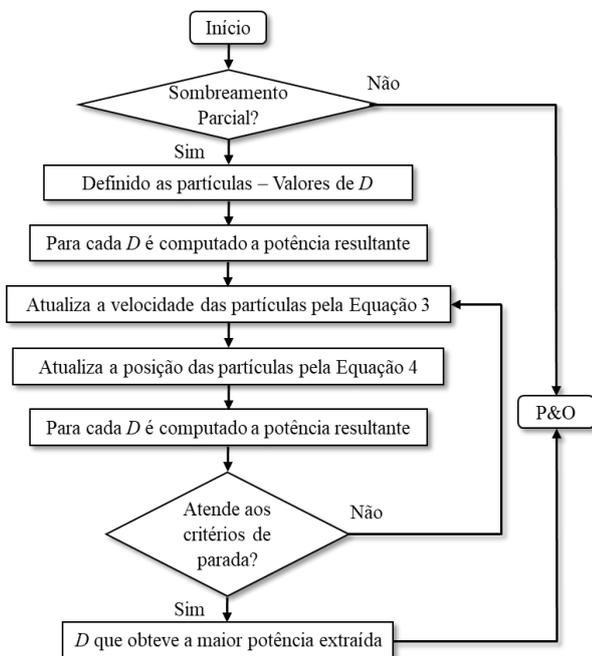


Fig. 4 - Fluxograma da otimização do MPPT P&O com PSO.

Assim como na otimização com o AG, identificado o sombreamento parcial o PSO é executado. Inicialmente é definida as partículas e nas etapas seguintes é atualizada a velocidade e posição pelas Equações 3 e 4. Na sequência cada valor é executado e computado a potência média resultante, já que, a função *fitness* é definida também como a potência medida na saída dos PFV.

Realizadas essas operações, será avaliado o critério de parada, definido como a quantidade de interações do algoritmo. Em seguida, o algoritmo entrega o melhor D e o P&O convencional é executado.

Em caso de não atendimento do critério, as etapas de atualização de velocidade e posição são reiniciadas. Se tratando do coeficiente de inércia, w , foi adotado uma configuração segundo o trabalho de Merchaoui, Sakly e

Mimouni (2018), no qual os autores utilizam uma variação não linear de w , com forme descrito na Equação 5.

$$w^{k+1} = w^k \cdot e^{\left(\frac{-k}{kmax}\right)}, \quad (5)$$

em que, w^{k+1} é o coeficiente de inercia atualizado, w^k é o coeficiente de inercia anterior, k o número de interação e $kmax$ o número máximo de interações. Nessa configuração, w apresenta maiores valores nas primeiras interações, resultando em uma maior velocidade das partículas, auxiliando na exploração global.

O valor de w diminui à medida que são realizadas as interações, conseqüentemente, a velocidade das partículas reduz, contribuindo para uma exploração local (Merchaoui; Sakly; Mimouni, 2018). Dessa forma, há um equilíbrio entre a exploração local e global, o que impede que as partículas se afastem do PMPG ou prolonguem o rastrear o PMPG.

5. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Com o auxílio do *software* PSIM, são avaliados os desempenhos do algoritmo P&O convencional e das otimizações baseados no AG e PSO. Nas Tabelas 1 e 2 estão apresentados os parâmetros elétricos do arranjo fotovoltaico e do SFV para as simulações, respectivamente. Além disso, os algoritmos foram desenvolvidos na mesma plataforma de simulação, em linguagem C/C++.

Tabela 1. Parâmetros Elétricos do Arranjo Fotovoltaico em Condições Ideais de Teste (25 °C e 1000 W/m²)

Ponto de Máxima Potência	300,00 W
Tensão de Circuito Aberto	87,00 V
Corrente de Curto Circuito	4,60 A
Tensão de Máxima Potência	70,50 V
Corrente de Máxima Potência	4,26 A

Tabela 2. Parâmetros do SFV

Indutância do Conversor <i>boost</i>	6,80 mH
Indutância do Filtro Indutivo	4,30 mH
Capacitância do Barramento CC	2700,00 uF
Tensão no Barramento CC	250,00 V
Frequência de Chaveamento	18,00 kHz
Tensão Eficaz da Rede Elétrica	127,00 V
Frequência da Rede Elétrica	60,00 Hz

As simulações são realizadas em dois cenários de sombreamento parcial, como ilustrado na Figura 5. Nos cenários, os dois PFV operam em diferentes níveis de irradiância solar, no cenário 1 os valores estabelecidos são 1000 W/m² e 700 W/m², enquanto que para o cenário 2 os valores são 700 W/m² e 200 W/m².

Os cenários de sombreamento apresentam dois picos de potência, sendo um PMPG e um PMPL. Em todas as simulações os cenários de sombreamento parcial são iniciados a partir de 1,0 segundo, antes disso, o SFV opera em condições ideais de operação. Nessas simulações foi definido o passo de integração como 100 µs.

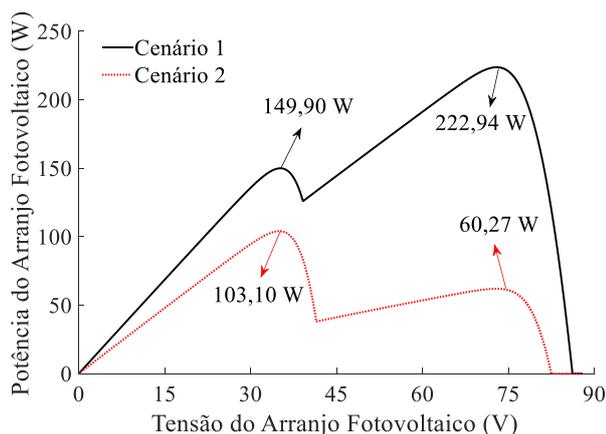


Fig. 5 - Curva P-V dos cenários de sombreamento parcial.

5.1 Desempenho do MPPT P&O Convencional

Na Figura 6 é ilustrado o comportamento da curva de potência na saída do arranjo fotovoltaico, quando o SFV opera com o MPPT P&O convencional.

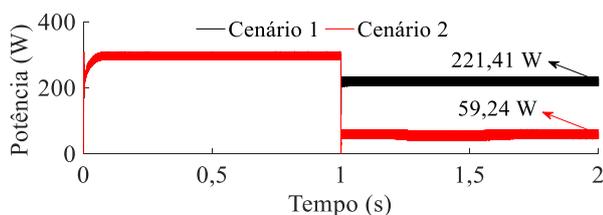


Fig. 6 - Curva da potência de saída do arranjo fotovoltaico na operação do MPPT P&O convencional.

No cenário 1, a potência média obtida pelo P&O, após a incidência do sombreamento parcial, é 221,41 W. Um valor que configura o PMPG teórico, observado na Figura 5. Quando avaliado o cenário 2, o desempenho do algoritmo não é satisfatório e a potência de saída do arranjo fotovoltaico fica limitada a um PMPL, com média de 59,24 W. Dessa forma, o SFV tem uma eficiência média de potência de 57,46%.

5.2 Desempenho das Otimizações do MPPT P&O

Esta seção apresenta o comportamento dos métodos AG e PSO em conjunto com o P&O convencional, nas mesmas condições de operação dos dois cenários de sombreamento parcial. Na otimização com o AG e o PSO, cada valor de D é executado pelo período de 0,2 segundos, período de tempo necessário para que o SFV estabilize e assim, seja computada a potência média resultante.

No total foram realizadas três simulações para cada cenário com cada um dos métodos de otimização. As simulações diferem entre si em relação as quantidades de gerações e interações, definidas para ambas como 4, 5 e 6.

Na Tabela 3 são ilustrados os parâmetros do PSO. O número total de partículas do PSO é definido como 4 e são valores distribuídos de forma uniforme entre 0 e 1. As variáveis c_1 e

c_2 são definidos conforme o trabalho de Andrade et al. (2019). Como o valor de c_2 é maior que c_1 , as partículas tendem a se mover para a melhor solução global ao invés da melhor solução individual. Além disso, um valor mínimo para w é adotado de acordo com Merchaoui, Sakly e Mimouni (2018).

Tabela 3. Parâmetros do PSO

c_1	0,80
c_2	1,20
w	0,80
w_{min}	0,10
Valor Inicial das Partículas	(0,20; 0,40; 0,60; 0,80)

As curvas de potência, quando o SFV opera com a otimização do AG, são ilustradas nas Figuras 7 e 8. Diferentemente da atuação do P&O convencional, a otimização com AG garante o rastreamento do PMPG nos dois cenários avaliados, obtendo uma eficiência média de 99,20% e 99,51% nos cenários 1 e 2, respectivamente.

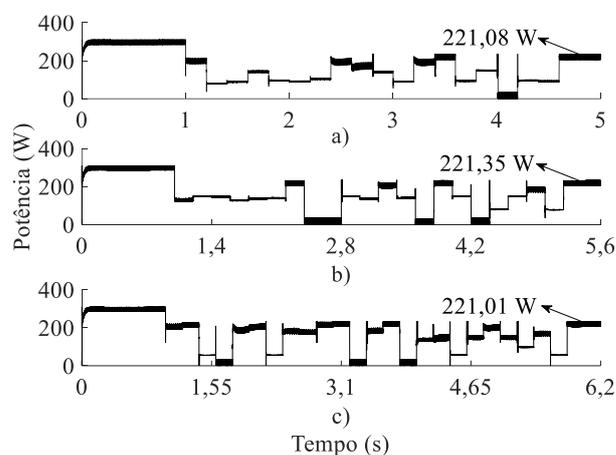


Fig. 7 - Curva de potência do arranjo fotovoltaico no cenário 1 na otimização com AG para (a) 4, (b) 5 e (c) 6 gerações.

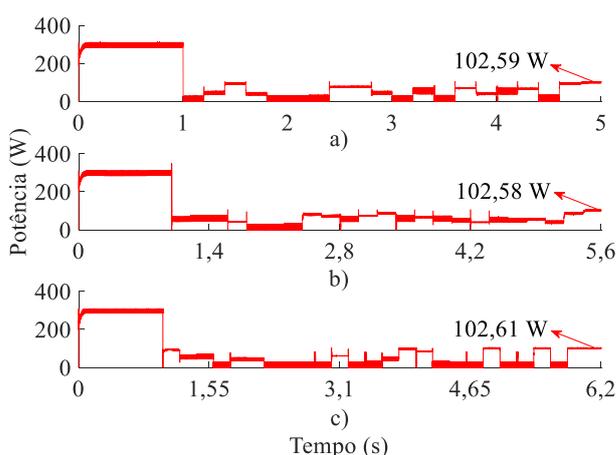


Fig. 8 - Curva de potência do arranjo fotovoltaico no cenário 2 na otimização com AG para (a) 4, (b) 5 e (c) 6 gerações.

Quando avaliado o desempenho do P&O em conjunto com o PSO, ilustrado por meio das Figuras 9 e 10, o SFV consegue entregar a máxima potência disponível em cada uma das condições estabelecidas. Em relação ao método de

otimização anterior, não houve grandes discrepâncias entre a potência média, sendo obtido para os cenários 1 e 2 uma eficiência média de 99,23% e 99,50%, respectivamente. Na Tabela 4 são sumarizadas a potência e eficiência média obtida a partir dos cenários analisados.

Vale mencionar que o número de gerações e interações adotados, não trouxe melhorias significativas no desempenho dos algoritmos, resultando apenas em maior ou menor tempo de rastreo.

6. CONCLUSÕES

O grande diferencial entre a otimização com AG e o PSO é a quantidade de oscilações entre as gerações e interações durante a execução dos algoritmos. Devido a característica do PSO em direcionar todas as partículas para o PMPG, pelo processo de aprendizagem cognitivo e social, o algoritmo tem um desempenho mais balanceado, estabilizando a potência próximo a melhor condição de operação antes do resultado final. Diferentemente, o AG implementado apresenta acentuadas oscilações de potência entre as gerações, mesmo próximo ao resultado final. Isso se deve à condição do AG em possuir muitos fatores aleatórios, como nos processos de cruzamento e mutação, que provocam uma maior variação entre os valores de ciclos de trabalho formados e testados.

Em complemento a essas afirmações, o tempo de execução do MPPT P&O, executado com o AG, é superior quando comparado com a operação em conjunto com o PSO. Dessa forma, a otimização com o PSO garantiu resultados mais satisfatórios. Trabalhos futuros podem abordar a otimização do desempenho P&O em regime transitório, de forma que o tempo de busca seja o mais eficiente possível em conjunto com menores níveis de oscilação.

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).
- Caracas, J. V. M. (2013). Avaliação das Estratégias de Controle e Projeto de Inversores para Conexão de Fontes Fotovoltaicas à Rede CA. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Maranhão. 2013.
- 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).
- Crispim, K. S. (2018). Estudo do controle do conversor back-to-back para conversão de Frequências. Monografia - Universidade Federal de Ouro Preto.
- 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.
- Gonzatti, R. B., Guimarães, B. P. B., Pereira, R. R., Silva, L. E. Borges da, Lambert-Torres, G. (2017). Implementation of a single-stage single-phase grid

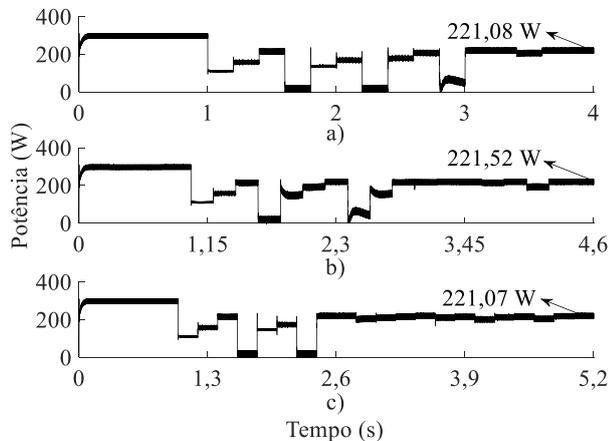


Fig. 9 - Curva de potência do arranjo fotovoltaico no cenário 1 na otimização com PSO para (a) 4, (b) 5 e (c) 6 interações.

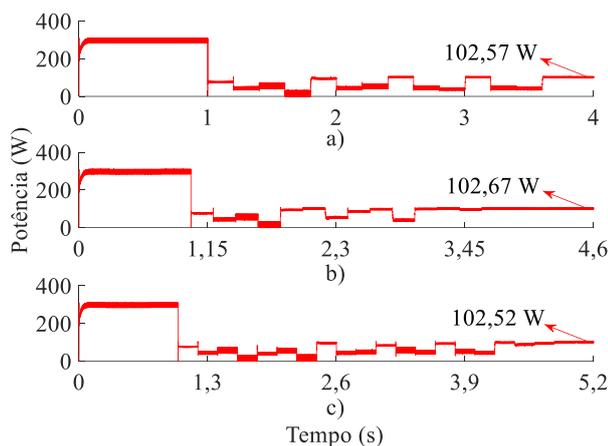


Fig. 10 - Curva de potência do arranjo fotovoltaico no cenário 2 na otimização com PSO para (a) 4, (b) 5 e (c) 6 interações.

Tabela 4. Resultados Obtidos nos Cenários Propostos

Desempenho do MPPT P&O Convencional			
Cenários	Potência Ideal	Potência Média Obtida	Eficiência Média Obtida
1	222,94 W	221,41 W	99,31%
2	103,10 W	59,24 W	57,46%
Desempenho do MPPT P&O em Conjunto com AG			
Cenários	Potência Ideal	Potência Média Obtida	Eficiência Média Obtida
1	222,94	221,15 W	99,20%
2	103,10	102,59 W	99,51%
Desempenho do MPPT P&O em Conjunto com AG			
Cenários	Potência Ideal	Potência Média Obtida	Eficiência Média Obtida
1	222,94	221,22 W	99,23%
2	103,10	102,59 W	99,50%

- connected PV converter. Brazilian Power Electronics Conference (COBEP).
- 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 de Mestrado - 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*.
- Leopoldino, A. L. M. (2019). Estratégia híbrida para rastreamento de máxima potência em sistemas fotovoltaicos sombreados. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- Luz, C. M. A. da (2019). Análise comparativa de técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos sob condição de sombreamento parcial. Universidade Federal de São João del-Rei.
- Marangoni, F. (2012). Inversores Monofásicos para Conexão de Sistemas Fotovoltaicos à Rede. Dissertação de Mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco.
- Merchaoui, M., Sakly, A., Mimouni, M. F. (2018). Improved fast particle swarm optimization based PV MPPT. The 9th International Renewable Energy Congress (IREC).
- 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.
- Panigrahi, R., Mishra, S. K., Srivastava, S. C., Srivastava, A. K., Schulz, N. N. Schulz (2020). Grid Integration of Small-Scale Photovoltaic Systems in Secondary Distribution Network—A Review. In *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 3.
- Podder, A. K., Roy, N. K., Pota, H. R. (2019). MPPT methods for solar PV systems: A critical review based on tracking nature. *IET Renewable Power Gener.*, vol. 13, no. 10.
- Radjai, T., Rahmani, L. Mekhilef, S., Gaubert, J. P. (2014). Implementation of a modified incremental conductance MPPT algorithm with direct control based on a fuzzy duty cycle change estimator using Dspace. *Sol. Energy* 110.
- Silva, A. J. M. (2005). Implementação de um Algoritmo Genético utilizando o Modelo de Ilhas. COPPE/UFRJ.
- Subudhi, B., Pradhan, R. (2013). A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems. *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 1.