

Algoritmo Híbrido de MPPT Baseado em SA-IC para Sistemas Fotovoltaicos Operando sob Sombreamento Parcial

GABRIEL R. PREVIERO*, RAFAELA D. SILVEIRA**, SERGIO A. O. DA SILVA***, LEONARDO P. SAMPAIO****

Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, PR 86.300-000, Brasil, (Tel: 43-3520-4000).

*E-mails: *gabrielpreviero@alunos.utfpr.edu.br, **rafaeladsilveira@hotmail.com, ***augus@utfpr.edu.br, ****sampaio@utfpr.edu.br.*

Abstract: This paper presents a hybrid maximum power point tracking (MPPT) implementation, which combines metaheuristic and heuristic optimization methods applied in a photovoltaic system. Heuristic methods do not present well performance under partial shading conditions, not being able to track the global maximum power point (GMPP). Thus, MPPT algorithms based on metaheuristic methods have been used to extract the maximum power from photovoltaic arrays. However, these methods present random behavior in transients, causing large power oscillations and the performance can be affected under slight variations in solar irradiation. Therefore, this paper uses the metaheuristic method called Simulated Annealing (SA) to achieve the GMPP. The MPPT algorithm is switched to the heuristic method Incremental Conductance (IC) after convergence. Results and performances of the proposed hybrid algorithm are compared considering each algorithm (SA and IC) methods separately in the PV system by means of computational simulation.

Resumo: Este trabalho apresenta a implementação de um algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*) híbrido baseado na combinação de métodos de otimização, heurístico e meta-heurístico, aplicado em um sistema fotovoltaico (FV). Métodos heurísticos possuem seu desempenho afetado sob condições de sombreamento parcial, não sendo capazes de garantir a busca pelo ponto de máxima potência global (GMPP). Assim sendo, algoritmos de MPPT baseados em meta-heurísticas têm sido utilizados na extração da máxima potência de arranjos FV. Porém, tais métodos apresentam comportamentos aleatórios em regime transitório provocando grandes oscilações de potência e podem apresentar desempenho afetado sob pequenas variações na irradiação solar. Portanto, este trabalho emprega o método de otimização meta-heurístico denominado Arrefecimento Simulado (SA – *Simulated Annealing*) para garantir o rastreamento do GMPP, sendo substituído pelo método heurístico Condutância Incremental (IC – *Incremental Conductance*) após a convergência. Os resultados do algoritmo híbrido são comparados considerando cada algoritmo (IC e SA) utilizado individualmente no sistema FV por meio de simulações computacionais.

Keywords: Photovoltaic System; Maximum Power Point Tracking; Simulated Annealing; Incremental Conductance.

Palavras-chaves: Sistemas Fotovoltaicos; Rastreamento do Ponto de Máxima Potência; Arrefecimento Simulado; Condutância Incremental.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente atrelada a busca por uma matriz energética diversificada tem contribuído com o aproveitamento cada vez maior das fontes renováveis de energia. Nesse sentido, as tecnologias envolvidas na geração de energia por fontes renováveis abrigam grandes focos de pesquisa e investimentos, seja para novas implantações e diversificação destas ou para se obter uma maior eficiência das já existentes. Neste contexto, a energia solar fotovoltaica se destaca como uma das principais alternativas, apresentando o

maior crescimento entre as fontes renováveis de energia em foco atualmente [Almeida, 2015; Barreto, 2014].

No cenário da geração distribuída (GD), a energia proveniente da fonte solar tem sido fundamental para a disseminação e fortalecimento deste seguimento [Silva, 2016]. Tal modalidade proporciona auto suprimento de eletricidade além de benefícios para o setor elétrico como o adiamento nos investimentos para expansão da Rede Básica. No entanto, mesmo com essas vantagens, a obtenção de energia elétrica usando módulos fotovoltaicos (FV) possui baixa eficiência, dificilmente ultrapassando os 20% nos módulos comerciais,

atrelado ao fato dos custos iniciais serem elevados [Rocha, 2018].

Dessa forma, o desenvolvimento de estratégias capazes de maximizar a potência gerada por módulos FV têm sido vastamente discutidos na literatura, a fim de se otimizar o desempenho geral dos sistemas FV e, consequentemente elevar o nível de energia que pode ser injetada na rede elétrica.

Além disso, as relações entre tensão e corrente no módulo FV apresentam características não-lineares e são influenciadas por fatores como a irradiância solar e a temperatura [Barreto, 2014]. Devido à dependência direta destas condições climáticas, o sistema FV pode apresentar diversos modos ótimos de operação, tornando a aplicação dos métodos de rastreamento de máxima potência (MPPT-*Maximum Power Point Tracking*) indispensáveis durante a atuação deste tipo de sistema na GD.

Diversos métodos baseados em otimização heurística vêm sendo estudados e usados comercialmente em inversores de potência, tornando-se técnicas convencionais de rastreamento, como é o caso do Perturba e Observa (P&O-*Perturbe and Observe*), Condutância Incremental (IC-*Incremental Conductance*), entre outros. Tais métodos apresentam simplicidade de implementação, porém, sob determinadas condições operacionais no sistema FV, essas técnicas podem apresentar um desempenho insatisfatório.

O sombreamento parcial pode ser causado por condições naturais ou qualquer outra situação em que haja a obstrução da passagem da luz solar atingindo apenas parte de um arranjo FV. Quando este arranjo FV faz uso de dispositivos como os diodos *bypass*, na ocorrência de um sombreamento parcial a sua curva característica de saída potência-tensão (P-V) apresenta múltiplos pontos de máxima potência (MPP-*Maximum Power Point*), sendo classificados em um ponto de máximo global (GMPP-*Global Maximum Power Point*) e demais pontos de máximos locais (LMPP-*Local Maximum Power Point*), resultando na incapacidade de técnicas de MPPT convencionais distinguir tais MPP, o que implica em perdas de energia no sistema FV.

Além da limitação no rastreamento do GMPP, as técnicas de MPPT convencionais, tais como P&O e IC, têm os seus desempenhos influenciados pelo passo de incremento, uma vez que passos grandes implicam em perda na eficiência do rastreamento, enquanto que passos pequenos resultam em dinâmica lenta [Tang, 2017].

A partir disso, passaram a ser propostos na literatura, métodos baseados em otimização meta-heurísticos como respaldo aos problemas associados aos sombreamentos parciais em sistemas FV. Técnicas de MPPT baseadas em PSO (*Particle Swarm Optimization*), GWO (*Grey Wolf Optimization*), ACO (*Ant Colony Optimizer*), SA (*Simulated Annealing*) têm sido apresentadas em [Fan, 2016; Rocha, 2019; Silva, 2016; Sundareswaran, 2016]. É importante mencionar que, apesar de garantirem a busca do GMPP, os métodos meta-heurísticos possuem comportamentos aleatórios no regime transitório, aumentando o tempo de convergência ao GMPP, além disso, qualquer mudança abrupta nas condições climáticas, a busca

pelo GMPP pode ser reiniciada de forma aleatória produzindo grandes oscilações, o que pode afetar o desempenho do sistema.

Com base nisso, dentre as diversas técnicas meta-heurísticas utilizadas para otimização de sistemas lineares e não-lineares, o método SA se destaca por sua simplicidade de implementação e facilidade de definição dos parâmetros a serem sintonizados no algoritmo. Sendo considerado então, uma opção para aplicação em técnicas de MPPT com capacidade rápida e eficiência de convergência no rastreamento do GMPP.

Neste trabalho, é proposto uma combinação entre os métodos SA e IC, resultando em uma técnica de MPPT híbrida com a finalidade de aliar as vantagens de cada método. Primeiramente, o SA realiza a busca do GMPP e, após atingir a convergência, o método IC passa a atuar evitando assim que pequenas alterações nas condições climáticas resultem na incapacidade de atuação do MPPT. Portanto, para avaliar o desempenho da técnica proposta MPPT-SA-IC, um sistema FV composto por um arranjo FV, um conversor CC-CC e carga resistiva é implementado. Além disso, análises comparativas entre as técnicas de MPPT baseadas nos métodos IC, SA e SA-IC são fornecidas por meio de implementações computacionais.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA FV

Os arranjos FV são formados pela associação de módulos solares, os quais são constituídos por um conjunto de células FV. Neste trabalho, o modelo de um diodo é adotado para representar o circuito elétrico equivalente de uma célula FV como mostrado na Fig. 1 [Casaro, 2008]. Este modelo é composto por um diodo (D) em antiparalelo com uma fonte de corrente (I_{ph}), a qual representa a corrente gerada pela célula. R_s e R_p , são as resistências série e paralela associadas, respectivamente.

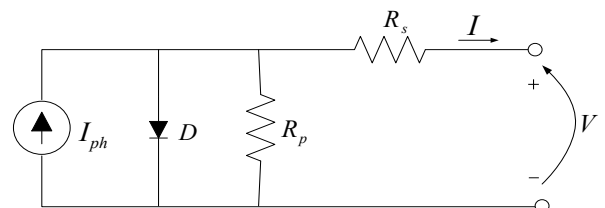


Fig. 1 Circuito equivalente do modelo da célula fotovoltaica.

Na Fig. 2 é apresentado o esquema elétrico do sistema FV implementado nas simulações para teste das técnicas de MPPT. A topologia apresenta um conversor CC-CC *boost* conectado a um arranjo FV composto por quatro módulos FV ligados em série. A técnica de MPPT é responsável por fornecer a razão cíclica (d) do modulador PWM (*Pulse-Width-Modulation*).

3. ALGORITMOS DE MPPT

Os algoritmos de MPPT têm sido empregados em sistemas FV de modo a garantir a extração da máxima potência disponível. Nesta seção são apresentados os métodos implementados neste trabalho.

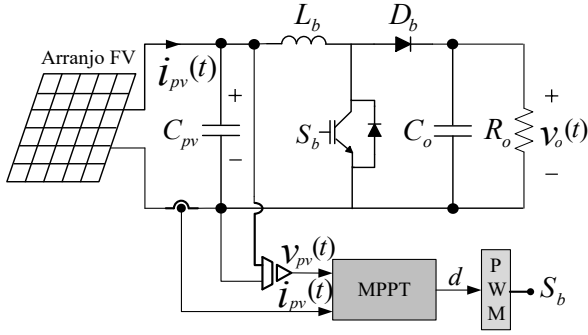


Fig. 2 Sistema FV utilizado na simulação.

3.1 Condutância Incremental (MPPT-IC)

O algoritmo de MPPT condutância incremental possui sua dinâmica com base na análise do MPP na curva característica P-V. Sabe-se que a tangente no ponto máximo deve ser nula, bem como positiva no lado esquerdo e negativa à direita da curva [Brito, 2010]. Portanto, o algoritmo tende a alterar os valores de referência da razão cíclica do conversor de acordo com um passo de incremento fixo pré-definido (neste trabalho adotado como valor de 0,02), buscando sempre se manter no ponto de máximo. O fluxograma do método de otimização heurístico IC implementado como MPPT pode ser observado na Fig. 3.

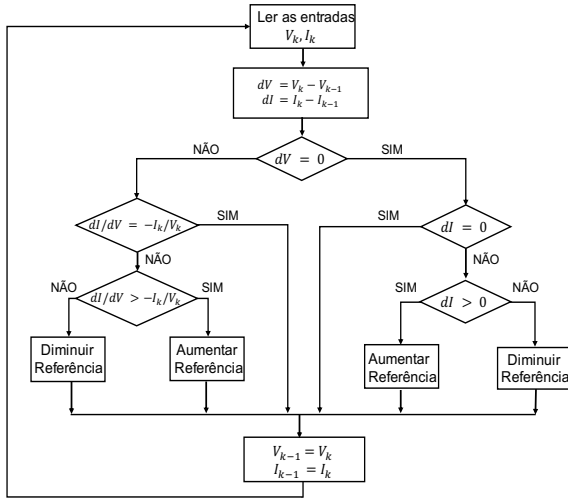


Fig. 3 Fluxograma do algoritmo MPPT-IC.

3.2 Arrefecimento Simulado (MPPT-SA)

O arrefecimento simulado é um método baseado em otimização meta-heurística e bastante conhecida por sua simplicidade de implementação e rapidez de convergência. Esse método é baseado no resfriamento de materiais, onde o estágio ideal de resistência é obtido através de um processo gradual de resfriamento [Chaves, 2016].

Para simular o resfriamento dos materiais, com o decorrer das iterações do algoritmo a temperatura inicial é gradativamente reduzida, como pode ser observado por (1), linearmente ou não de acordo com o coeficiente α nos momentos em que há uma

variação positiva na energia do sistema. Esse coeficiente de arrefecimento é dado em (2), e representa a velocidade em que o sistema é resfriado.

Quando o processo está no início, ou seja, o sistema apresenta temperatura longe do seu estado final (congelado), há grande possibilidade de serem considerados casos de piora. Porém, essa probabilidade reduz conforme o material é resfriado. Essa consideração auxilia o algoritmo a não se estabilizar em máximos locais e pode ser acompanhado de acordo com (3) [Fan, 2016].

$$T_k = \alpha T_{k-1} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + \beta} \quad (2)$$

$$P = \exp\left(\frac{P_k - P_{k-1}}{T_k}\right) \quad (3)$$

Onde T_k é a temperatura atual e T_{k-1} a temperatura da iteração anterior, P_k a potência atual e P_{k-1} a potência da iteração anterior e P a probabilidade de serem considerados casos de piora. Portanto, basicamente o algoritmo de MPPT-SA necessita da definição das temperaturas iniciais e finais do sistema e β (parâmetro que ajusta o coeficiente de arrefecimento α) [Goldberg, 2016]. Neste trabalho foram usados $T_k = 25^\circ$, $T_{k-1} = 0,1^\circ$ e $\beta = 0,4$. O fluxograma deste algoritmo atuando como MPPT está apresentado na Fig 4.

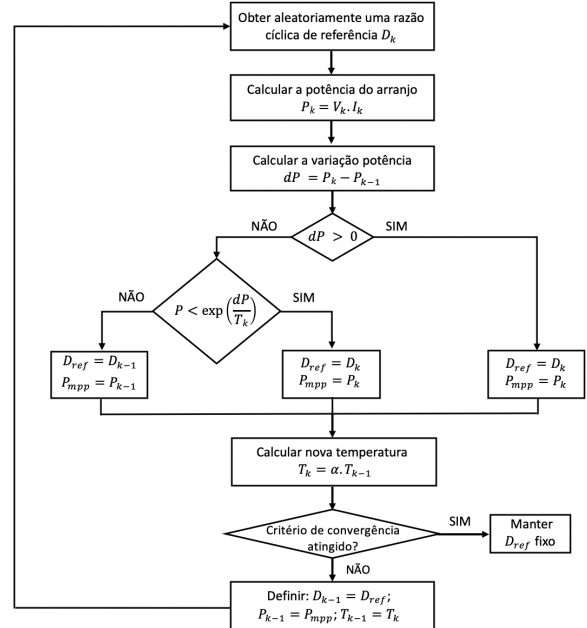


Fig. 4. Fluxograma do algoritmo MPPT-SA.

3.3 Algoritmo de MPPT Híbrido (MPPT-SA-IC)

Os métodos de MPPT convencionais possuem limitações no rastreamento do GMPP como por exemplo em determinadas condições de sombreamento parcial. Sendo assim, técnicas meta-heurísticas podem ser empregadas para solucionar esse problema. Entretanto, o desempenho dos algoritmos de MPPT

baseados em meta-heurísticas podem ser afetados sob pequenas variações de irradiação solar.

Pensando nestas situações, este trabalho busca unir ambas técnicas (SA e IC) para aproveitar as vantagens de cada uma por meio de um algoritmo híbrido, melhorando o desempenho no rastreamento do GMPP em condições que se assemelham a realidade. Na Fig. 5 pode ser visualizado um fluxograma do algoritmo híbrido desenvolvido neste trabalho para atuar como MPPT no sistema FV. Este associa a técnica convencional IC e o método meta-heurístico SA. Os parâmetros utilizados foram mencionados na seção anterior, exceto o passo de incremento do MPPT-IC, adotado 0,01 neste caso.

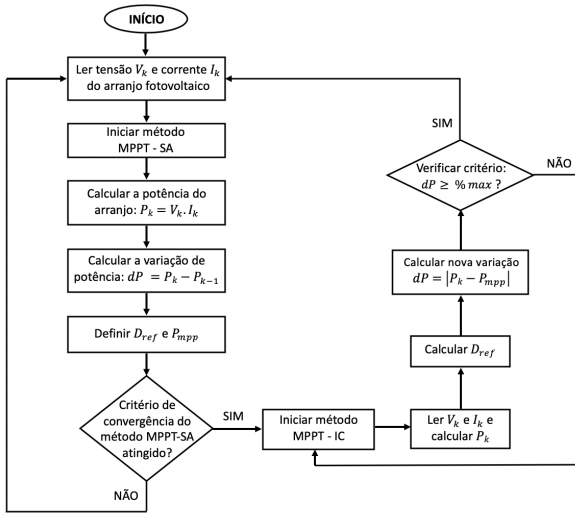


Fig. 5. Fluxograma do algoritmo híbrido MPPT-SA-IC.

Como pode ser observado, o algoritmo SA inicia a busca pelo MPP para garantir que seja rastreado sempre o GMPP. Após sua convergência, o método IC passa a atuar para permitir que o sistema, atuando em torno do GMPP, possa facilmente oscilar para pontos ao redor quando o arranjo é submetido a pequenos degraus de irradiação solar, algo que não seria possível apenas com as meta-heurísticas padrão, as quais estabelecem um ponto fixo de referência após a convergência do GMPP. A busca aleatória é retomada quando a variação de potência (dP) é superior a 15%.

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Os algoritmos de MPPT estudados neste trabalho foram testados por meio de simulações utilizando a ferramenta computacional Matlab/Simulink®. O algoritmo híbrido proposto MPPT-SA-IC é comparado com as técnicas SA e IC implementadas individualmente como MPPT, buscando evidenciar as vantagens do método híbrido.

As especificações referentes ao modelo do módulo FV utilizado neste trabalho estão apresentadas na Tabela 1 enquanto que os parâmetros do conversor *boost* estão dispostos na Tabela 2.

Para avaliar o desempenho dos algoritmos de MPPT foram consideradas duas condições operacionais para o arranjo FV, conforme ilustrado na Fig. 6. Para a primeira (Caso 1), o

arranjo FV opera em condição nominal, onde todos os módulos FV são expostos a irradiação solar uniforme. Já na segunda condição (Caso 2), os módulos FV são submetidos a perfis de sombreamento parcial.

Durante a simulação do arranjo FV sob condição do Caso 2, os dois módulos FV superiores da *string* (ver Figura 6), são submetidos a três degraus de irradiação solar, resultando em três perfis diferentes de sombreamento parcial. No perfil 1 de sombreamento parcial (SP1), do início até os 3s do tempo de simulação, os dois módulos FV superiores são expostos a 900 W/m^2 de irradiação solar, posteriormente, no perfil 2 (SP2), de 3 a 5s, 800 W/m^2 , e por fim, 1000 W/m^2 para o perfil 3 (SP3). Os dois módulos inferiores do arranjo FV permanecem sem alteração, operando com 300 W/m^2 durante todo o tempo de simulação.

Tabela 1. Parâmetros do módulo fotovoltaico SW 245 Solarworld em STC.

Máxima Potência do módulo PV	$P_{max} = 245 \text{ W}$
Tensão no MPP	$V_{mpp} = 30,8 \text{ V}$
Corrente no 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 de simulação.

Indutância do conversor <i>boost</i>	$L_b = 2,5 \text{ mH}$
Resistência interna do indutor do conversor <i>boost</i>	$R_{Lb} = 220 \text{ m}\Omega$
Capacitância de entrada do conversor <i>boost</i>	$C_{pv} = 470 \mu\text{F}$
Capacitância de saída do conversor <i>boost</i>	$C_o = 470 \mu\text{F}$
Carga resistiva	$R_o = 120 \Omega$
Frequência chaveamento do conversor <i>boost</i>	$f_c = 20 \text{ kHz}$

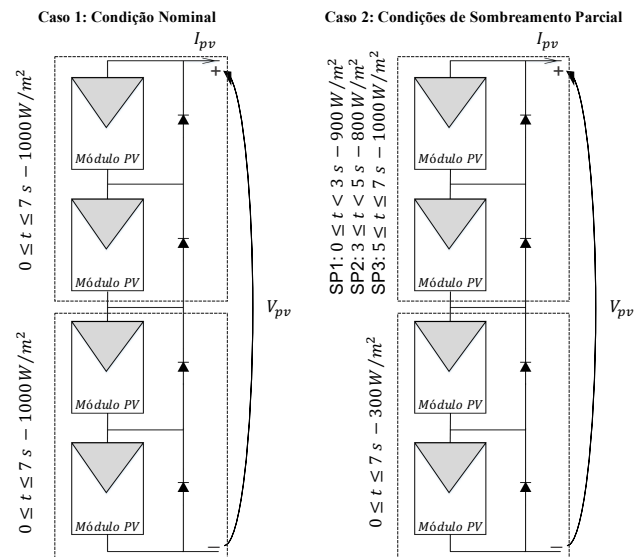


Fig. 6 Irradiação incidente em condições nominais e sob sombreamento parcial.

4.1 Caso 1: Condição Nominal

A Fig. 7 demonstra a curva característica P-V resultante do arranjo FV operando nas condições padrão de teste (STC – *Standard Test Condition*, 25°C e 1000 W/m²). Observa-se que apenas um ponto GMPP é localizado, em torno de 981 W.

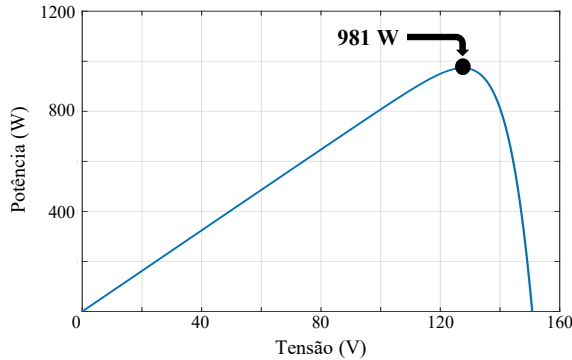


Fig 7. Curva PV para arranjo em condições nominais.

Já na Fig. 8 são apresentados os resultados de tensão (V_{pv}), corrente (I_{pv}) e potência (P_{pv}) do arranjo FV, obtidos a partir da atuação dos algoritmos de MPPT.

Considerando as condições em STC, o rastreamento do GMPP foi alcançado por todos algoritmos de MPPT. É possível notar que, em regime transitório, os algoritmos SA e SA-IC apresentam maiores oscilações de potência por empregarem variáveis aleatórias na busca do GMPP. No entanto, em regime estacionário, o algoritmo de MPPT baseado no SA apresenta a menor oscilação de potência. Já com relação à eficiência de rastreamento, ou seja, a potência extraída do arranjo FV, o MPPT-SA-IC apresentou melhor desempenho.

A Tabela 3 resume os resultados obtidos com o sistema FV operando em condições STC, de irradiação solar uniforme. Pode-se observar que o tempo de convergência foi maior para o algoritmo de MPPT híbrido. Isso ocorre, pois, após o método SA rastrear um ponto próximo ao GMPP, o IC realiza ajustes finos da razão cíclica sendo capaz de elevar o nível de potência extraída do arranjo FV, tornando-o mais eficiente.

Tabela 3 – Resultados de simulação para condições nominais.

Algoritmos de MPPT	IC	SA	SA-IC
Potência extraída (W)	977,91	966,1	980,40
Eficiência (%)	99,68	98,48	99,94
Tempo de convergência (s)	1,30	1,29	1,35

4.2 Caso 2: Condições de Sombreamento Parcial

A Fig. 9 ilustra as curvas características P-V para o arranjo FV em cada perfil de sombreamento parcial apresentados detalhadamente na Fig. 6. O maior nível de potência é encontrado na curva de SP3 com o GMPP localizado em 478 W. Nas condições SP1 e SP2, a potência máxima é de 427 W e 379 W, respectivamente. Como esperado, o LMPP

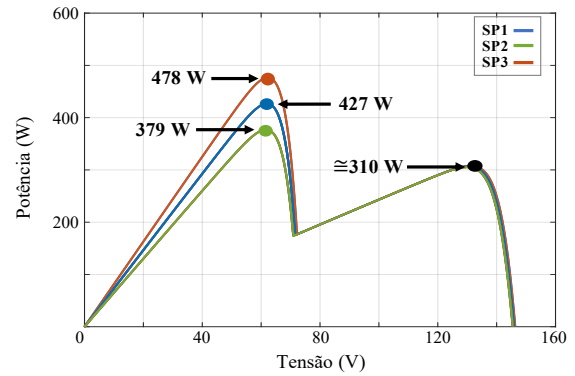


Fig. 9 Curvas P-V para arranjo sob diferentes condições de sombreamento parcial.

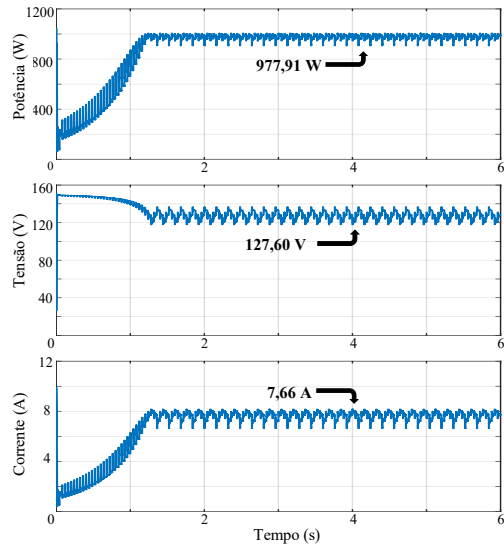
permanece aproximadamente constante em 310 W para os três perfis de sombreamento parcial uma vez que a irradiação solar nos módulos FV inferiores não foi alterada.

A Fig. 10 apresenta os resultados obtidos com cada algoritmo de MPPT atuando nas condições do Caso 2. Inicialmente, na condição SP1, o algoritmo baseado no método SA bem como o algoritmo híbrido SA-IC, rastreia o mesmo ponto, próximo ao GMPP. Porém, no algoritmo híbrido, o método IC continua o rastreamento após a convergência do SA, pois, ajustes são realizados para que a busca se aproxime mais precisamente ao ponto ideal de operação do arranjo FV.

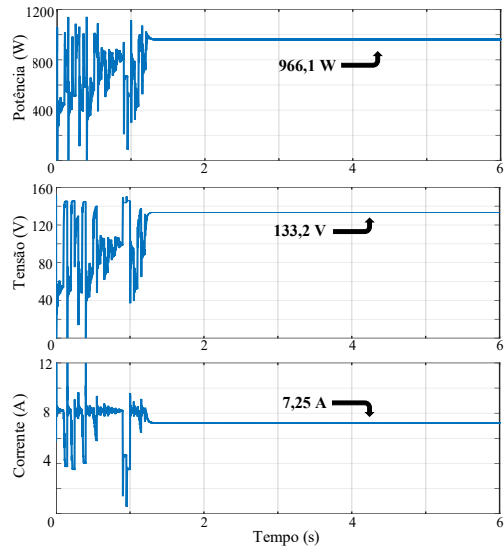
Como pode ser observado pelos resultados apresentados na Fig. 10 (a), o algoritmo MPPT-IC se manteve limitado ao LMPP durante as três condições, demonstrando seu desempenho afetado quando o arranjo FV está sob sombreamento parcial.

As pequenas variações na irradiação solar sobre os módulos FV tendem a representar condições operacionais próximas de situações reais. Métodos que são baseados em otimização meta-heurística necessitam de uma margem de variação de potência para que a busca aleatória reinicie, neste trabalho foi considerado necessária uma variação de 15% da potência atual do arranjo FV para que o algoritmo SA volte a atuar da busca do GMPP. Sendo assim, pequenos degraus de irradiação podem fazer com que essa variação de potência não seja o suficiente para retomar o rastreamento, como pode ser observado nos resultados obtidos pelo método SA, no qual mesmo com as variações do GMPP o algoritmo manteve fixo sua referência de razão cíclica.

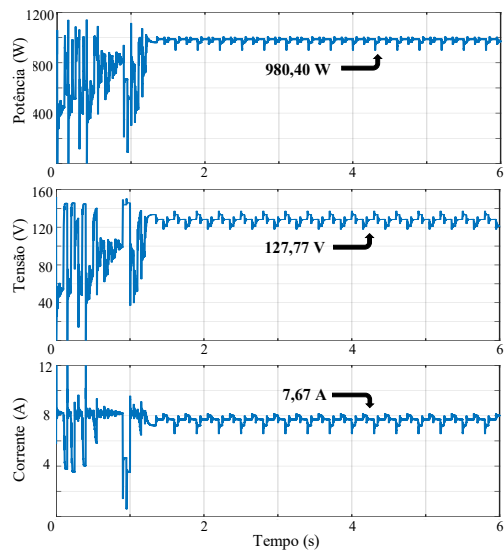
O perfil SP1 manteve uma irradiação de 900 W/m² e posteriormente, no tempo de 3s e 5s, essa irradiação foi respectivamente alterada para 800 W/m² e 1000 W/m², ou seja, uma variação de 100 W/m² menor e maior respectivamente. Essa variação não foi o suficiente para que o método SA, cujo comportamento pode ser conferido através da Fig. 10 (b), reiniciasse as buscas aleatórias pelo GMPP, fazendo com que o MPPT-SA mantivesse o GMPP rastreado no SP1. Já na Fig. 10 (c), é possível notar que o algoritmo MPPT-SA-IC foi capaz de se adaptar aos pequenos degraus de irradiação solar mantendo a eficiência superior aos 99% em todos os perfis de sombreamento parcial.



(a)

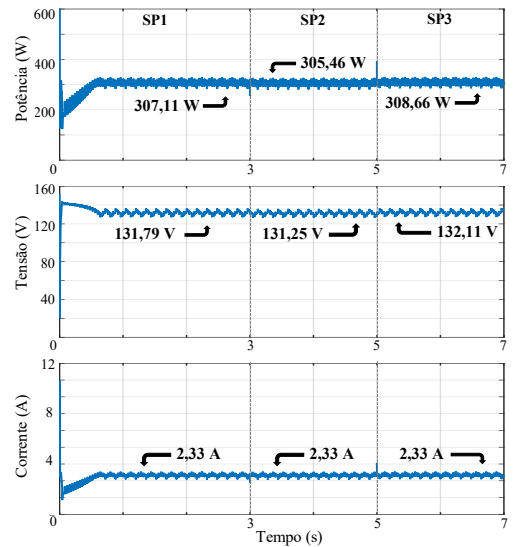


(b)

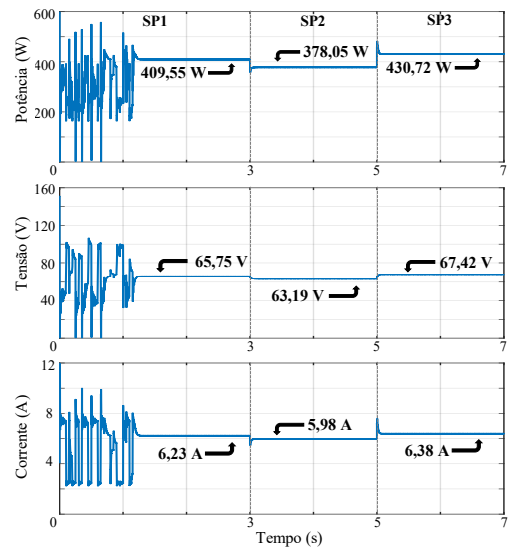


(c)

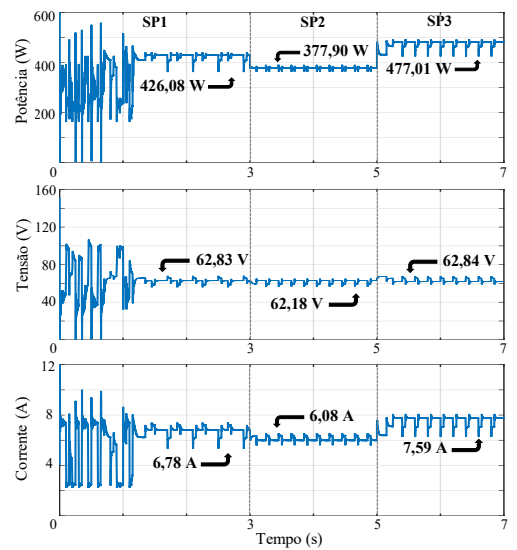
Fig 8. Resultados de simulação em condições nominais para os algoritmos: (a) MPPT-IC; (b) MPPT-SA; (c) Híbrido MPPT-SA-IC.



(a)



(b)



(c)

Fig. 10. Resultados de simulação em condições de sombreamento parcial para os algoritmos: (a) MPPT-IC; (b) MPPT-SA; (c) Híbrido MPPT-SA-IC.

Já na Fig. 11 são demonstrados os pontos de convergência dos algoritmos de MPPT atuando sob as condições de sombreamento parcial descritas na Fig. 6. Esta representação permite observar de forma simplificada o desempenho dos métodos de busca do MPP empregados no trabalho.

Por sua vez, as Tabelas 4, 5 e 6 resumem os principais resultados de simulação obtidos pelos algoritmos de MPPT nas condições SP1, SP2 e SP3, respectivamente.

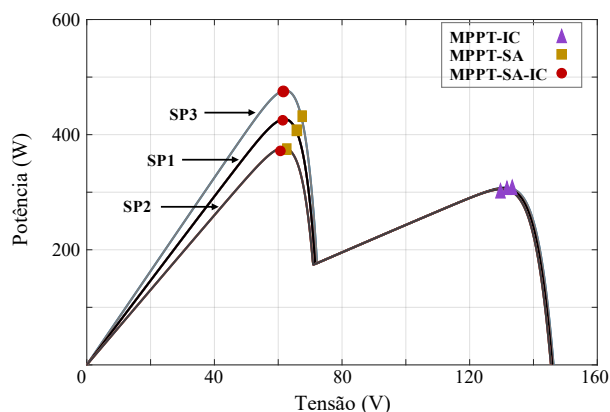


Fig 11. Pontos de convergência dos algoritmos demonstrados nas curvas P-V para cada condição de sombreamento parcial.

Tabela 4 – Resultados de simulação para sombreamento parcial SP1.

Algoritmos de MPPT (SP1)	IC	SA	SA-IC
Potência extraída (W)	307,11	409,55	426,08
Eficiência (%)	71,92	95,91	99,78
Oscilação após convergência (%)	13,87	0,92	15,25

Tabela 5 – Resultados de simulação para sombreamento parcial SP2.

Algoritmos de MPPT (SP2)	IC	SA	SA-IC
Potência extraída (W)	305,46	378,05	377,90
Eficiência (%)	80,60	99,75	99,71
Oscilação após convergência (%)	14,47	0,90	7,04

Tabela 6 – Resultados de simulação para sombreamento parcial SP3.

Algoritmos de MPPT (SP3)	IC	SA	SA-IC
Potência extraída (W)	308,66	430,72	477,01
Eficiência (%)	64,57	90,11	99,79
Oscilação após convergência (%)	14,12	0,91	11,38

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a aplicação de algoritmos de MPPT baseados nos métodos SA e IC para sistemas FV. Tais métodos foram implementados individualmente, resultando nos algoritmos MPPT-IC e MPPT-SA, bem como por meio de um método híbrido proposto MPPT-SA-IC.

Os algoritmos de MPPT foram testados por meio de simulações computacionais e avaliados considerando duas condições de operação para o arranjo FV sendo elas: à irradiação solar uniforme, em STC, e posteriormente, à condição do arranjo FV submetido a sombreamento parcial considerando degraus de irradiação solar, buscando justificar e demonstrar a vantagem de utilização do algoritmo híbrido na busca do GMPP.

Na condição nominal (Caso 1), os algoritmos de MPPT IC, SA, e SA-IC apresentaram desempenhos satisfatórios na busca do GMPP. A eficiência do método híbrido se mostrou superior, devido a capacidade de ajustes finos serem realizados após a convergência do método SA através do algoritmo IC.

Quando submetidos ao sombreamento parcial, o MPPT-IC demonstrou a limitação dos métodos convencionais, rastreando apenas o LMPP e mantendo-se estável neste ponto mesmo com as variações de irradiação solar aplicadas. Enquanto isso, os métodos baseados em otimização meta-heurísticas MPPT-SA e MPPT-SA-IC foram capazes de rastrear o GMPP.

O método MPPT-SA-IC se destacou obtendo o melhor desempenho geral, justificando a utilização desse algoritmo, mesmo com maior oscilação após a convergência, a qual pode ser refinada através do passo de incremento do método IC. A vantagem de se aplicar esta técnica de otimização combinada está no fato de este ser capaz de apurar o rastreamento realizado pela busca aleatória aproximando o ponto rastreado do GMPP, elevando assim a eficácia do algoritmo.

Além disso, o algoritmo híbrido é capaz de manter o GMPP rastreado mesmo com pequenas alterações nas condições climáticas, o que não é possível através das técnicas baseadas apenas em otimização meta-heurística uma vez que há uma margem para que a busca aleatória reinicie. Assim as perdas são minimizadas bem como o desempenho do algoritmo se torna superior.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro recebido da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e o apoio do CNPq (Processo 303359/2018-8).

REFERÊNCIAS

Almeida, Eliane; Rosa, Anna Clara; Dias, Fernanda Cristina Lima Sales; Braz, Kathlen Thais Mariotto; Lana, Luana Teixeira Costa; Santo, Olívia Castro do Espírito; Sacramento, Thays Cristina Bajur. (2015). Energia Solar Fotovoltaica: Revisão Bibliográfica, Universidade FUMEC – FEA, 13f.

- Barreto, Rodrigo Lopes. (2014). Contribuições Ao Método De Rastreamento De Máxima Potência Para Sistemas Fotovoltaicos. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 70f
- Brito, M. A. G. d., Junior, L. G., Sampaio, L. P., Canesin, C. A. (2010). Avaliação das principais técnicas para obtenção de MPPT de painéis fotovoltaicos, in *IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, pp. 1-6.
- Casaro, M. M., Martins, D. C. (2008). Modelo de Arranjo Fotovoltaico Destinado a Análises em Eletrônica de Potência via Simulação, *Eletrônica de Potência-SOBRAEP*, vol. 13, no 3, pp. 141-146.
- Chaves, E. N. ; Reis, J. H. ; Coelho, E. A. A. ; Freitas, L. C. G. ; Vieira Junior, J. B. ; L. C. Freitas. (2016). Simulated Annealing MPPT in Partially Shaded PV Systems, *Revista IEEE América Latina*, V. 14, P. 235-241.
- Fan, Y. *et al.* (2016). An Improved Simulated Annealing Maximum Power Point Tracking Technique for PV Array Under Partial Shading Conditions, 18th, *European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, Karlsruhe, pp. 1-8.
- Goldbarg, M. C.; Goldbarg, E. G.; Luna, H. P. L. (2016). *Otimização combinatória e metaheurísticas: algoritmos e aplicações*. GEN, Rio de Janeiro, 416f.
- Rocha, M. V. ; Sampaio, L. P. ; Silva, S. A. O. ; Takami, M. H. F. (2019). Análise Comparativa de Algoritmos de MPPT Bio-inspirados nos Lobos Cinzentos Empregando um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica Trifásica, *Revista Eletrônica de Potência*, 12p.
- Rocha, M.V.; Sampaio, L.P.; Silva, S.A.O. (2018). Maximum Power Point Extraction in PV Array Under Partial Shading Conditions Using GWO-Assisted Beta Method, *Renewable Energy & Power Quality Journal (RE&PQJ)*, v. 1, p. 450-455.
- Silva, S. A. O., Sampaio, L. P., Oliveira, F. M., Durand, F. R. (2016). PSO-based MPPT Technique Applied to A Grid-tied Pv System with Active Power Line Conditioning Using A Feed-forward Dc-bus Control Loop, *Revista Eletrônica de Potência*, v. 21, p. 105-116.
- Sundareswaran, K., Vigneshkumar, V., Sankar, P., Simon, S. P., Nayak, P. Srinivasa Rao, Palani, S. (2016). Development of an Improved P&O Algorithm Assisted Through a Colony of Foraging Ants for MPPT in PV System”, in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no 1, pp. 187-200.
- Tang, L., Xu, W., Mu, C., (2017). Analysis for Step-Size Optimization on MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems, in *IET Power Electronics*, vol. 10, no 13, pp. 1647-1654.