



SEI-SICITE 2021

Pesquisa e Extensão para um mundo em transformação

Estudo de técnicas heurísticas e meta-heurísticas de MPPT aplicados em sistemas fotovoltaicos

Study of heuristic and meta-heuristic techniques of MPPT applied in photovoltaic systems

Rhayssa Yukari Seino*, Sergio Augusto Oliveira da Silva†, Rafaela Dizaró Silveira‡

RESUMO

Tendo em vista o elevado crescimento populacional e consequente aumento de demanda por energia aliado com a preservação do meio ambiente, a necessidade de incentivar o uso de fontes alternativas de energia, como a energia solar fotovoltaica (FV), vem ganhando cada vez mais espaço na matriz energética mundial. Isso ocorre uma vez que energia solar é considerada uma fonte inesgotável, livre e limpa. No entanto, existem fatores meteorológicos que influenciam diretamente na potência gerada, como a irradiação solar e a temperatura. Dessa forma, a eficiência de conversão energética é baixa comparada com outras fontes de energia já utilizadas. Além disso, o custo para implementar um sistema fotovoltaico ainda é elevado. Portanto, torna-se necessária a aplicação de técnicas para extração do ponto de máxima potência (MPPT-*Maximum Power Point Tracking*). Neste trabalho, são estudadas três técnicas de MPPT, sendo elas: Perturbação e Observação, Condutância Incremental e Arrefecimento Simulado. A partir de simulações computacionais, é realizada uma análise quantitativa dos algoritmos com o objetivo de avaliar seus respectivos desempenhos em aspectos de tempo de convergência, eficiência de rastreamento e acurácia, além de avaliar quando estão sob condições de sombreamento parcial.

Palavras-chave: Energia Fotovoltaica, Rastreamento do Ponto de Máxima Potência, Perturbação e Observação, Condutância Incremental, Arrefecimento Simulado.

ABSTRACT

In view of the high population growth and the consequent increase in demand for energy allied with the preservation of the environment, the need to encourage the use of alternative energy sources, such as photovoltaic solar energy (PV), has been gaining more space in the world's energy matrix. This is because it is considered an inexhaustible, free and clean source. However, there are meteorological factors that influence directly the power generated, such as solar irradiation and temperature. Thus, the energy conversion efficiency is low compared to other energy sources already used. Besides that, the cost to implement the photovoltaic system is still high. Therefore, it becomes necessary to apply maximum power point tracking techniques (MPPT). In this paper, three MPPT techniques are studied: Perturb and Observe, Incremental Conductance and Simulated Annealing. Finally, a quantitative analysis of the algorithms will be performed in order to evaluate their respective performances in aspects of convergence time, tracking efficiency and accuracy, as well as when they are under partial shading conditions.

Keywords: Photovoltaic Energy, Maximum Power Point Tracking, Perturb and Observe, Incremental Conductance, Simulated Annealing.

* Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil; rhayssaseino@alunos.utfpr.edu.br

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio; augus@utfpr.edu.br

‡ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil; rafaeladsilveira@hotmail.com

1 INTRODUÇÃO

Em virtude do acelerado crescimento populacional e do modo de vida da sociedade moderna, houve um aumento da demanda por energia elétrica nos últimos anos. Dessa forma, surgiu a necessidade de adequar o setor energético de tal forma a gerar energia suficiente para suprir tal demanda. No entanto, os impactos socioambientais decorrentes das usinas elétricas de grande porte e da utilização de combustíveis fósseis têm impulsionado pesquisas e desenvolvimento de fontes alternativas de energia (SILVEIRA, 2019, p.23).

A energia elétrica proveniente de sistemas de geração distribuída (GD), dos quais se destacam os sistemas baseados em módulos fotovoltaicos, é atualmente considerada como sendo a fonte de energia natural mais útil e sustentável, uma vez que é livre, abundante e não poluente (BRITO et al., 2010, p.1). Entretanto, deve-se atentar a alguns fatores relacionados às células fotovoltaicas que influenciam no rendimento das mesmas como, por exemplo, as condições climáticas e de instalação dos módulos. Em geral, as células fotovoltaicas são fabricadas de silício monocristalino, policristalino ou amorfo, sendo que as monocristalinas comerciais têm eficiência em torno de 18% (CASARO; MARTINS, 2008, p.141).

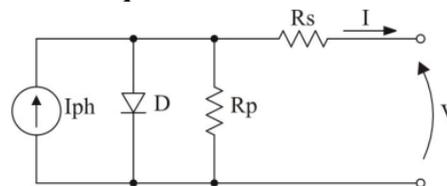
Nesse contexto, torna-se necessária a aplicação de técnicas para rastrear o ponto de máxima potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*), uma vez que a eficiência da conversão de energia ainda é muito baixa. Pode-se destacar algumas técnicas de MPPT: Razão Cíclica Fixa, Tensão Constante, Perturbação e Observação (P&O), Condutância Incremental (IC), Método Beta, Oscilação do Sistema, Arrefecimento Simulado (SA), Evolução Diferencial, além de outros métodos baseados em inteligência artificial.

Portanto, este trabalho apresenta o modelo de duas técnicas heurísticas (P&O e IC) e uma técnica meta-heurística (SA), implementadas no software MATLAB/Simulink.

2 MÉTODOS

De acordo com Casaro; Martins (2008, p.142), um arranjo fotovoltaico é uma estrutura composta por módulos FV que, por sua vez, são constituídos por células FV interconectadas. Para compreender o comportamento de uma célula, utiliza-se o circuito equivalente a seguir, o qual é formado por uma fonte de corrente em paralelo com um diodo, além de resistências série e paralela para representar as não idealidades do sistema.

Figura 1 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Casaro; Martins, 2008, p.2.

A corrente I gerada pela célula é calculada por meio da equação 1.

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

Onde V e I são a tensão e a corrente, respectivamente, nos terminais de saída da célula, I_{ph} é a fotocorrente, I_r é a corrente de saturação reversa da célula, R_s e R_p são as resistências série e paralela, respectivamente, q é

a carga do elétron, η é o fator de qualidade da junção p-n, k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura ambiente.

A tabela 1 mostra as especificações do módulo FV utilizado nas simulações deste trabalho.

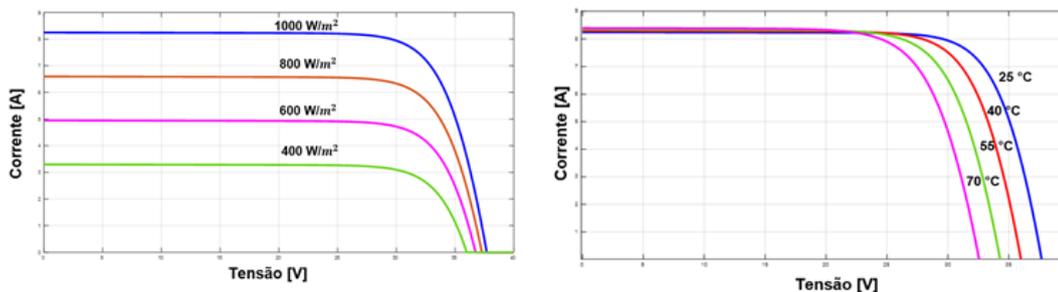
Tabela 1 – Especificações do módulo FV (Modelo Sunmodule SW 245 Solar World).

Especificações do Módulo FV (Sunmodule SW 245 Solar World)	
Potência máxima [Wp]	245
Tensão de circuito aberto [V]	37,7
Corrente de curto-circuito [A]	8,25
Tensão de máxima potência [V]	30,8
Corrente de máxima potência [A]	7,96

Fonte: Autoria própria (2021).

A solução da equação 1 permite determinar a curva característica I-V. De acordo com Brito (2013, p.28), a curva de tensão versus corrente apresenta relações não lineares e varia conforme a temperatura e o nível de radiação solar, o que dificulta a extração da máxima potência.

Figura 2 – Curvas I-V variando o nível de radiação solar (lado esquerdo) e variando a temperatura (lado direito).



Fonte: Autoria própria (2021).

Assim como está descrito em Silveira (2019, p.28), pode-se notar que à medida que aumenta a irradiação solar, a corrente também aumenta de forma praticamente linear, enquanto que a tensão é pouco alterada. Já quando se altera a temperatura, a tensão apresenta uma variação significativa, enquanto que a corrente se mantém praticamente inalterada.

Além das características não lineares da curva, os módulos fotovoltaicos podem estar sujeitos ao sombreamento parcial. Isso significa que a curva característica potência versus tensão pode apresentar mais de um ponto de máximo local e um ponto de máximo global. De acordo com Tortelli (2016, p.27), o efeito do sombreamento parcial pode reduzir a eficiência dos módulos FV, já que uma menor incidência de radiação solar modifica a corrente e, conseqüentemente, a potência de operação. A figura 3 mostra um gráfico PV (Potência versus Tensão) sem sombreamento parcial e outro sob condições de sombreamento parcial.

2.1 Método Perturbação e Observação (P&O)

Por meio de pequenas perturbações no sistema, observa-se o comportamento da potência gerada até chegar ao ponto em que a transferência de potência seja máxima. O princípio de funcionamento do algoritmo se baseia na leitura dos valores de tensão e corrente do módulo FV e, posteriormente, na comparação com o valor de potência da iteração anterior. Dessa forma, à medida que a tensão varia, se a potência aumentar, o sistema de

controle continua operando na mesma direção. Entretanto, se a potência diminuir, o sistema opera na direção oposta (BRITO et al., 2010, p.3).

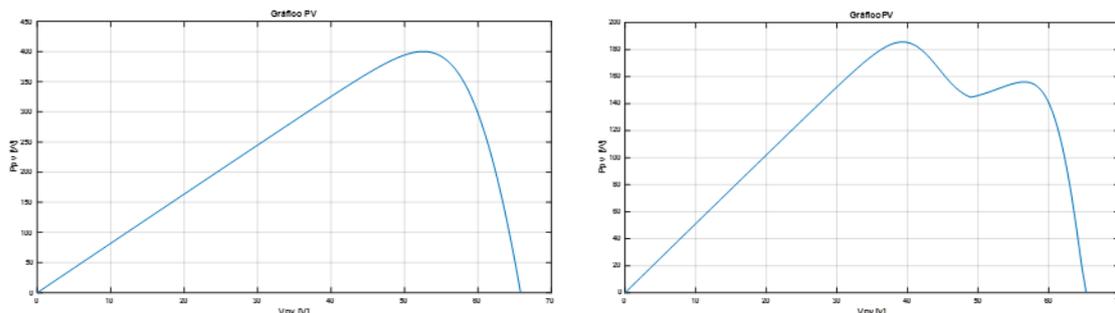
2.2 Método Condutância Incremental (IC)

De acordo com Brito et al. (2010, p.3), esse método se baseia na inclinação da curva de potência. Quando $dP/dV = 0$, significa que o sistema está operando no ponto de máxima potência (MPP). Se for positiva, encontra-se à esquerda do MPP e, se for negativa, à direita.

2.3 Método Arrefecimento Simulado (SA)

Os dois métodos apresentados anteriormente são classificados como métodos heurísticos, os quais possuem o rendimento afetado quando estão submetidos às condições de sombreamento parcial. Nesse contexto, comumente, são empregados métodos meta-heurísticos (SA, por exemplo), para atuar na busca do ponto de máxima potência (PREVIERO et al., 2020, p.1). O arrefecimento simulado é baseado em um fenômeno de resfriamento gradual. Dessa forma, são definidos alguns parâmetros para esse algoritmo: temperaturas inicial (T_k) e final (T_{k-1}) e o coeficiente β que ajusta a velocidade (α) em que o sistema é resfriado.

Figura 3 – Gráficos PV sem sombreamento parcial (esquerda) e sob condições de sombreamento parcial (direita).



Fonte: Autoria própria (2021).

3 RESULTADOS

A partir da metodologia descrita anteriormente, a seguir estão os gráficos obtidos por meio das simulações realizadas no software Matlab/Simulink. Considerando que todas foram submetidas às mesmas condições de temperatura e de irradiação solar, as figuras 4 e 5 mostram como cada algoritmo atua na busca do MPP ao longo do tempo.

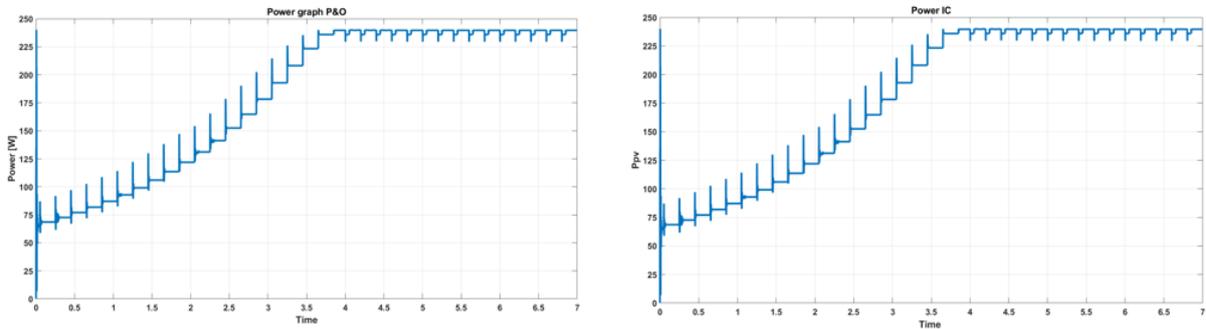
Nota-se que os métodos P&O e IC apresentaram comportamentos semelhantes, já que ambos têm como base o mesmo princípio de busca do MPP. Além disso, percebe-se que o método SA apresenta um comportamento aleatório no início da busca, no entanto, atinge o MPP mais rápido do que os outros dois métodos.

É importante ressaltar que, para uma tensão de saída igual a 102,667 V, o valor teórico de D calculado é igual a 0,7. Dessa forma, a tabela 2 mostra os valores da razão cíclica D e do tempo de convergência em que foi atingido o MPP, para cada um dos métodos.

Já a figura 6 mostra a busca pelo MPP com quatro módulos fotovoltaicos sob condições de sombreamento parcial. Verifica-se que o método SA atingiu uma potência maior, em um tempo menor, do que o método IC.

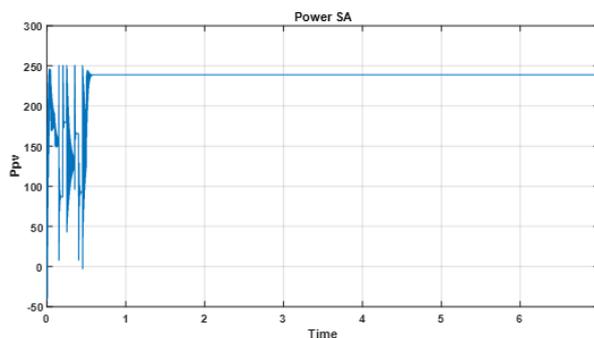


Figura 4 – Gráficos Potência x Tempo (P&O ao lado esquerdo e IC ao lado direito).



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 5 – Gráfico Potência x Tempo (SA).



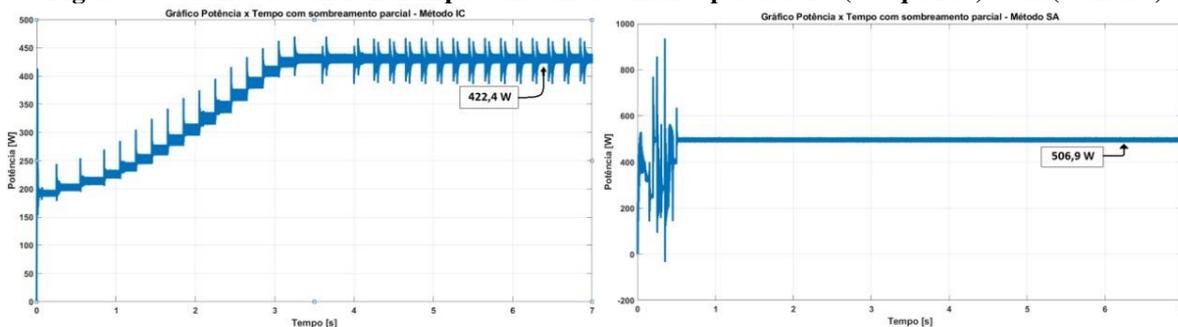
Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 2 – Valores de razão cíclica e tempo de simulação atingidos no MPP.

Método	Razão Cíclica (D)	t [s]
Perturbação e Observação	0,6750	3,866
Condutância Incremental	0,6850	3,854
Arrefecimento Simulado	0,7166	0,506

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 6 – Gráfico Potência x Tempo com sombreamento parcial: IC (à esquerda) e SA (à direita).



Fonte: Autoria própria (2021).



4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram analisados a aplicação de três métodos de MPPT por meio de simulações computacionais, considerando para todos as mesmas condições de temperatura e de irradiação solar. Observou-se que os três métodos apresentaram resultados satisfatórios na busca pelo ponto de máxima potência global (GMPP). Contudo, o método SA apresentou um desempenho melhor, mesmo havendo grandes oscilações no início da busca, uma vez que convergiu para o GMPP em um tempo consideravelmente menor do que nos métodos P&O e IC.

Vale ressaltar que, sob condições de sombreamento parcial, o método SA apresenta melhor desempenho em relação aos métodos heurísticos. Portanto, como sugestão de trabalhos futuros, recomenda-se a implementação de métodos híbridos, os quais serão constituídos por um método meta-heurístico, responsável por rastrear o GMPP, e por um método heurístico que será utilizado após a convergência para que o desempenho não seja comprometido quando houver variações na irradiação solar.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro recebido para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BRITO, Moacyr A. G. **Inversores Integrados Monofásicos e Trifásicos para Aplicações Fotovoltaicas: Técnicas para Obtenção de MPPT, Detecção e Proteção de Ilhamento, Sincronização e Paralelismo com a Rede de Distribuição de Energia Elétrica**. 2013. 220f. Tese – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual de São Paulo, Ilha Solteira, 2013.
- BRITO, M. A. G.; JUNIOR, L. G.; SAMPAIO, L. P.; CANESIN, C. A. **Avaliação das Principais Técnicas para Obtenção de MPPT de Painéis Fotovoltaicos**. International Conference on Industry Applications – INDUSCON 2010, 9ed. 6f. 2010.
- CASARO, M. M.; MARTINS, D. C. **Modelo de Arranjo Fotovoltaico Destinado a Análises em Eletrônica de Potência via Simulação**. Eletrônica de Potência, Florianópolis, v.13, n.3, p.141-146, 2008.
- PREVIERO, G.; SILVEIRA, R.; SAMPAIO, L. **Algoritmo Híbrido de MPPT Baseado em SA-IC para Sistemas Fotovoltaicos Operando sob Sombreamento Parcial**. Eletrônica de Potência, 2020.
- SILVEIRA, R. **Análise comparativa entre sistemas fotovoltaicos multifuncionais de único e duplo estágios de conversão de energia**. 149f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2019.
- TORTELLI, C. **O efeito do sombreamento na eficiência do sistema fotovoltaico do escritório verde da UTFPR**. 58f. Monografia de Especialização – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2016.