

DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMOS DE MPPT SOB CONDIÇÕES DE SOMBREAMENTO PARCIAL

Thiago Kenji Shitara Shinkae¹, Estelio da Silva Amorim¹, Luciano de Souza da Costa e Silva¹, Edson Italo Mainardi Junior¹,
Diogo Ramalho de Oliveira¹

¹Instituto Federal de Mato Grosso do Sul – Três Lagoas – MS

thiago.shinkae@estudante.ifms.edu.br, estelio.amorim@ifms.edu.br, luciano.souza@ifms.edu.br,
edson.mainardi@ifms.edu.br, diogo.ramalho@ifms.edu.br

Resumo

Visto que a eficiência e o apreço pela qualidade de energia são essenciais para a manutenção do desenvolvimento humano e preservação do meio ambiente, formas de se implementar fontes de energias renováveis, fazendo com que se tornem cada vez mais eficientes e limpas são estudadas pelo mundo afora ao longo dos últimos séculos. Sendo assim, a energia fotovoltaica tornou-se um marco para a história, visto que sua geração totalmente limpa agrega positivamente à sustentabilidade. Conforme avançou a tecnologia, diversos pesquisadores estudam novas formas de se melhorar a eficiência da geração solar devido ao seu baixo rendimento quando comparado a gerações energéticas corriqueiras. Desta forma, este trabalho tem como objetivo analisar e estudar uma possível melhora em algoritmos usuais de Extração de Máxima potência (MPPT) sob condições de sombreamento parcial, afim de agregar positivamente os estudos de energias renováveis.

Palavras-chave: Renovável, Geração, Fotovoltaica, MPPT, Algoritmo.

Introdução

Com a aceleração do crescimento populacional nas últimas décadas, além dos avanços tecnológicos em que a humanidade vem prostrando em sua evolução, é notório que o âmbito da geração e eficiência energética tornaram-se aspectos relevantes no atual cenário socioeconômico mundial. A utilização de recursos naturais para sua geração, como o carvão e combustíveis fósseis, tornam-se cada vez mais escassos e sua manutenção mais cara e menos eficiente. Cerca de 90% do abastecimento elétrico no Sistema Interligado Nacional (SIN) é composto por fontes renováveis, nas quais destacam-se a hídrica, a eólica e a solar (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS, 2023). Nota-se que a presença e o peso da geração fotovoltaica se prostra no cenário internacional como uma das mais crescentes, sustentáveis e economicamente viáveis. Apesar das vantagens inerentes à sua implementação, a baixa eficiência dos módulos fotovoltaicos, não ultrapassando 20%, exige um esforço de pesquisa constante para o desenvolvimento de sistemas de conversão mais inteligentes, dinâmicos e eficazes.

Neste contexto, algoritmos de controle digital, embutidos nos inversores solares, responsáveis pelo Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (*Maximum Power Point Tracking - MPPT*) de conjuntos fotovoltaicos tem sido desenvolvidos por pesquisadores. Atualmente, existem diversos algoritmos de *MPPT* propostos, nos quais são variados em sua complexidade, sensores requeridos, cálculo computacional, custeio e afins (EITAWIL; ZHAO, 2013), onde os usuais são conhecidos como *Incremental Conductance (IC)*, *Perturb and Observe (P&O)*, Aproximações Geométricas, Redes Neurais e entre diversos outros.

A eficiência de geração em Condições de Irradiação Uniforme (*Uniform Irradiance Condition - UIC*) representa o melhor cenário possível para conversão de energia elétrica em um sistema fotovoltaico; contudo, devido à expansão de áreas urbanas, os sistemas fotovoltaicos (*PV Systems*) são instalados em locais com prédios em volta, nuvens mais baixas e regiões propensas a diversos outros aspectos que possam causar um sombreamento não uniforme (*Partial Shading Condition - PSC*) em placas solares (WANG; HSU, 2011; GHASEMI *et al*, 2016). Tais sombreamentos acabam causando diversos problemas, como a não totalidade de potência gerada ou até mesmo problemas de pontos quentes nas superfícies do equipamento (*hotspots*) nos quais podem danificar o mesmo. A presença de mudanças climáticas, padrões de sombreamento e diferentes níveis de irradiação e temperatura fazem com que a representação gráfica de tensão por potência gerada ($P \times V$) apresente múltiplos pontos de máxima potência (*Maximum Power Point - MPP*) (PATEL; AGARWAL, 2008). Desta forma, algoritmos de *MPPT* usuais são capazes de identificar apenas 1 *MPP* e acabam não extraíndo a potência máxima global disponibilizada pelo sistema fotovoltaico.

Por esta razão, este trabalho tem como foco o estudo e análise da eficiência de conversão energética de sistemas *PV* sob condições de sombreamento parcial, com a implementação de algoritmos usuais de *MPPT* capazes de extrair a máxima potência das placas.

Metodologia

Inicialmente, utilizando ferramentas computacionais como *Matlab* e *Simulink* foi-se implementado o modelo elétrico

correspondente a uma célula fotovoltaica conforme a Figura 1.

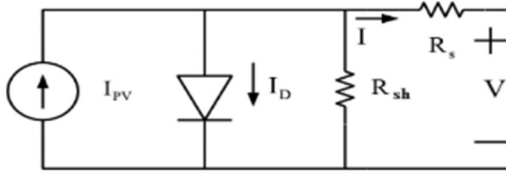


Figura 1. Circuito correspondente de uma célula fotovoltaica. Fonte: Ghasemi et al, 2016.

Nota-se na Figura 1, que a célula pode ser descrita como uma fonte de corrente na qual possui um diodo e uma resistência em paralelo e um resistor em série na saída. Sua equação matemática, levando em consideração um número de células em série (N_s) e em paralelo (N_p), é descrita em (1).

$$I = N_p I_{pv} - N_p I_D \left[e^{\frac{V + \left(\frac{N_s}{N_p}\right) R_s I}{A N_s V_t}} - 1 \right] + \frac{\left(V + \frac{N_s}{N_p} R_s I \right)}{\frac{N_s}{N_p} R_{sh}} \quad (1)$$

Onde:

- A Fator ideal do diodo;
- V_t é a tensão térmica do módulo;
- R_s é a resistência série do módulo;
- R_{sh} é a resistência em derivação do módulo;
- I_D é a corrente de saturação reversa do diodo;
- V é a tensão nos terminais de saída do módulo;
- I é a corrente nos terminais do módulo;

Com base no modelo matemático evidenciado em (1), construiu-se um modelo de simulação no domínio de tempo, via software *Matlab/Simulink*, para previsão de comportamentos simulados do conjunto fotovoltaico sob *UIC* e *PSC*, como indicado na Figura 2.

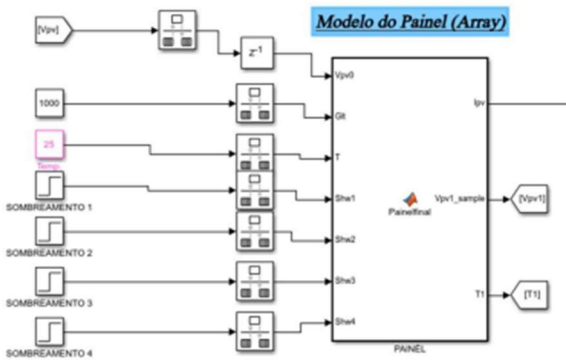


Figura 2. Modelo de simulação. Fonte: Próprio Autor, 2023

O modelo desenvolvido apresenta como entradas, a tensão sensorada nos terminais do arranjo fotovoltaico (V_{pv0}), a irradiância sob *UIC* (G_{lt}), a temperatura (T), e os níveis de sombreamento em cada um dos 4 módulos que compõem a fileira do arranjo fotovoltaico, definidos como Shw_1 , Shw_2 , Shw_3 , e Shw_4 . A saída do modelo é representada pela corrente resultante nos terminais do conjunto fotovoltaico, representada, na Figura 2, pela variável I_{pv} . Para a parametrização do modelo, considerou-se os módulos fotovoltaicos da *Canadian Solar CS6K-270P*, que compõem um arranjo fotovoltaico série com 4 unidades, instalados no IFMS-Três Lagoas para fins de pesquisa e desenvolvimento.

Foram implementados os seguintes cenários para simulação via *software* afim de avaliar o comportamento dos 4 módulos sob condições diversas de irradiação em tempos controlados, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Cenários de simulação do modelo implementado via *Simulink*.

Cenário	Tempo aplicado	T (C°)	G_{lt} ($\frac{W}{m^2}$)	Shw_1 (%)	Shw_2 (%)	Shw_3 (%)	Shw_4 (%)
1	0 s - 1,4s	25	1000	0	0	0	0
2/PSC1	1,4s - 2,4s	25	1000	35	0	0	0
3/PSC2	> 2,4s	25	1000	35	50	0	0

Os resultados e apontamentos perante aos cenários apresentados na Tabela 1 serão discutidos nos próximos tópicos.

Por conseguinte, a partir da construção do protótipo de um conversor CC-CC Elevador (*Boost*), foi-se avaliado o funcionamento do algoritmo de *MPPT* atuando sob o microcontrolador (μCU) da *Texas Instruments TMS320F28379D*, responsável pela conversão Analógica/Digital (A/D) dos sinais de tensão e corrente nos terminais do sistema *PV*, e controle da razão cíclica do conversor, a fim de analisar o funcionamento e eficiência do algoritmo para a problemática em questão. Como ilustra a Figura 3, a construção do protótipo do conversor CC-CC elevador dividiu-se no desenvolvimento das seguintes Placas de Circuito Impresso (PCI): PCI do Conversor *Boost*, PCI para Processamento Analógico de Sinais (PAS), PCI para disparo do Semicondutor de Potência.

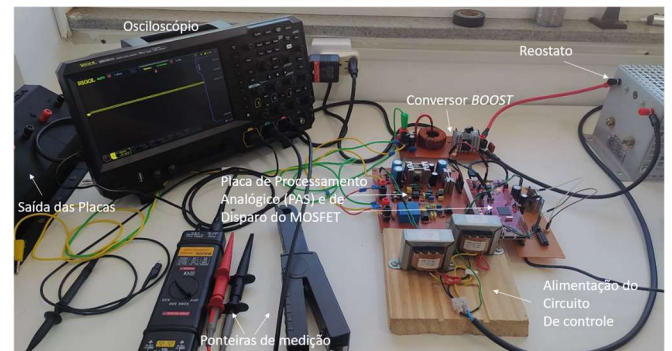


Figura 3. Bancada de testes. Fonte: Próprio Autor, 2023.

Resultados e Discussão

Primeiramente, utilizando os *softwares* de simulação foram obtidos resultados satisfatórios, que comprovam como a condição de sombreamento afeta a conversão energética do sistema *PV*, sendo na Figura 4 em *UIC*, e na Figura 5 em *PSC*.

De acordo com as curvas apresentadas na Figura 4, Figura 5 e Figura 6, quando aplicados os cenários mostrados na Tabela 1, nota-se que o comportamento dos módulos sob diferentes tipos de sombreamento causam perdas severas de potência, caso o sistema não opere no ponto de máxima potência global (*Global Maximum Power Point - GMPP*). Algoritmos usuais de *MPPT*, quando não muito elaborados a fins de economia computacional, não localizam facilmente o *GMPP*, e operam no ponto de máxima local, no qual, não extrai o total potencial elétrico gerado.

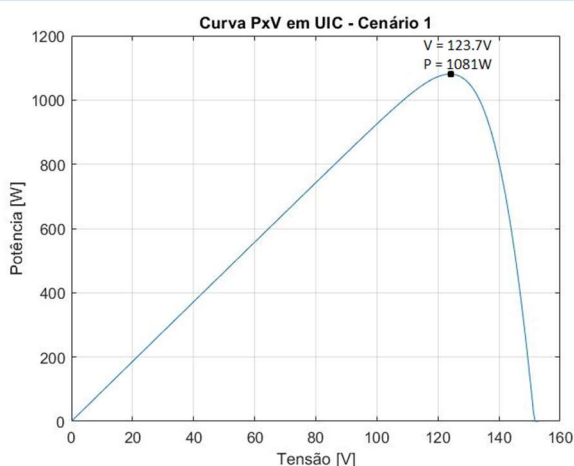


Figura 4. Curvas de Potência por Tensão (PxV) do modelo simulado via *Matlab* - Cenário 1. **Fonte:** Próprio Autor, 2023.

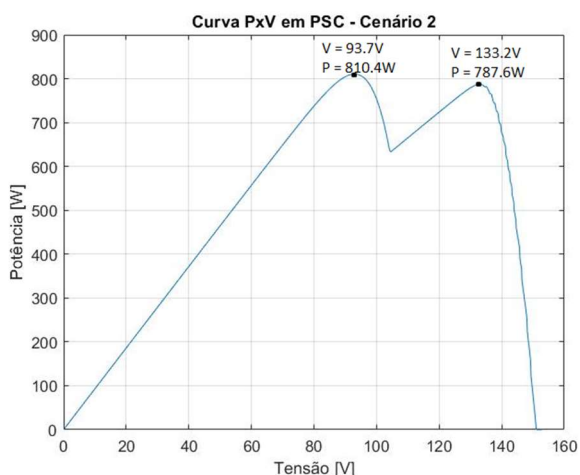


Figura 5. Curvas de Potência por Tensão (PxV) do modelo simulado via *Matlab* - Cenário 2. **Fonte:** Próprio Autor, 2023.

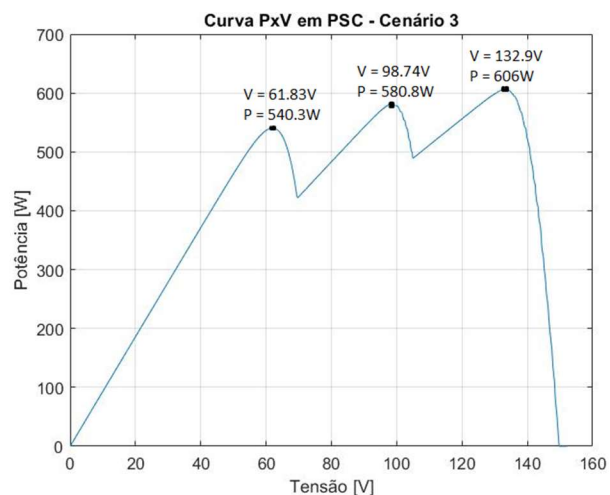


Figura 6. Curvas de Potência por Tensão (PxV) do modelo simulado via *Matlab* - Cenário 3. **Fonte:** Próprio Autor, 2023.

Após a visualização da problemática, foi-se implementado o sistema operando com um conversor *CC-CC Boost* via *Simulink* afins de avaliar o algoritmo de *P&O* clássico e analisar seu funcionamento nos cenários descritos na Tabela 1.

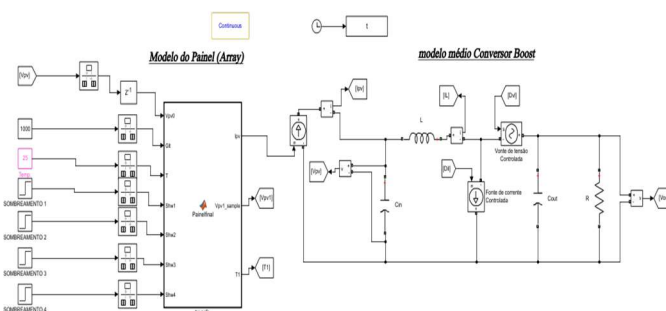


Figura 7. Sistema de simulação do algoritmo de *MPPT*. **Fonte:** Próprio Autor, 2023

Nota-se pela Figura 7 que, associado ao conjunto *PV*, conecta-se o modelo médio do conversor *CC-CC* a fim de se obter maior rapidez no tempo de simulação. Este modelo é implementado utilizando-se, além dos componentes passivos típicos de conversores *CC-CC*, uma Fonte de Corrente Controlada (FCC) para emular o comportamento dinâmico médio do transistor, e uma Fonte de Tensão Controlada (FTC) para emular o comportamento dinâmico médio do diodo de potência.

Com o funcionamento do modelo implementado juntamente com o conversor, simula-se o funcionamento do algoritmo, que controla a razão cíclica do semicondutor de potência através do algoritmo de *P&O* clássico via *Matlab*. Desta forma, obtém-se os seguintes resultados, apresentados nas Figuras 8, 9 e 10.

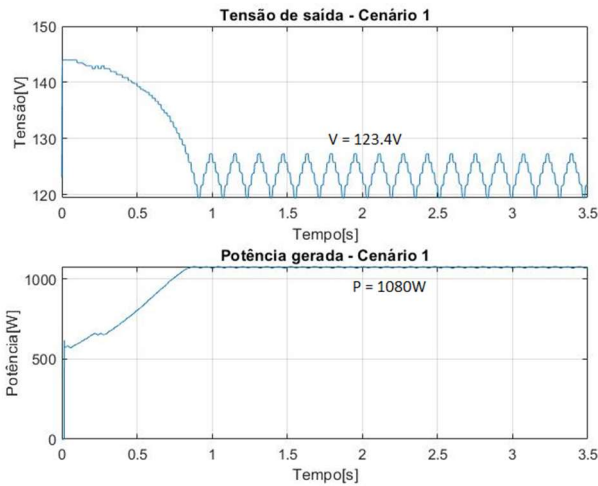


Figura 8. Tensão de saída do Conversor e a potência gerada do cenário 1. **Fonte:** Próprio Autor, 2023.

De acordo com a Figura 8, pode-se notar que, sob condições de irradiação uniforme, o algoritmo se estabiliza em torno de 1 segundo de funcionamento, e seu rastreamento segue o *GMPP* em 1080 W, com uma tensão de saída do conversor em torno de 124 V, que resulta no sucesso do algoritmo em prever as condições indicadas no *datasheet* dos módulos fotovoltaicos utilizados.

Aplicando-se, agora, os sombreamentos temporizados referentes aos cenários apresentados na Tabela 1, levando em consideração o tempo de estabelecimento de 1,4 segundo, tem-se a seguinte resposta do sistema representada pelas Figuras 9 e 10.

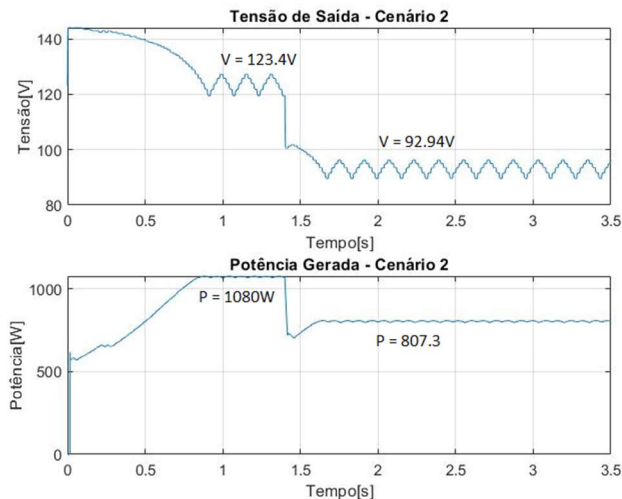


Figura 9. Tensão de saída do Conversor e a potência gerada do cenário 2. **Fonte:** Próprio Autor, 2023.

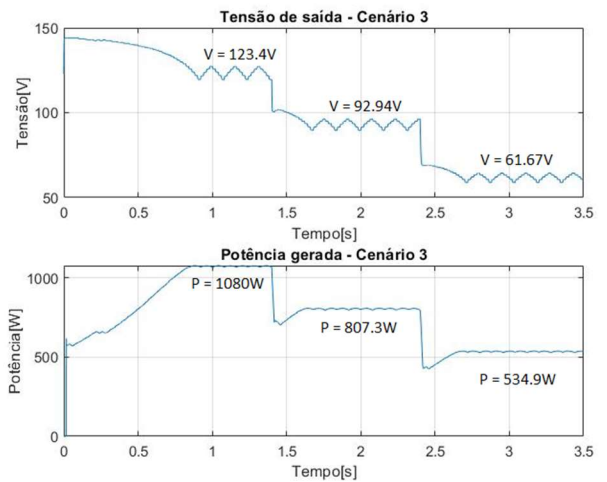


Figura 10. Tensão de saída do Conversor e a potência gerada do cenário 3. **Fonte:** Próprio Autor, 2023.

Conforme explicito nas Figuras 9 e 10, o sistema após uma entrada temporizada de sombreamento, transita para uma próxima tentativa de localizar o *MPP* e quando relaciona-se com as Figuras 5 e 6 percebe-se qual ponto cada cenário atingiu. O cenário 2 atingiu de maneira sucinta o *GMPP* da ocasião, com geração de 807,3 W operando com tensão de saída de 92,94V; contudo, quando as condições do cenário 3 são impostas, o *GMPP*, no caso em 606W, não é atingido, já que o sistema gera em torno de 534W operando com tensão de saída de 61,67V. Quando se compara o resultado apresentado na Figura 10 com a curva *PxV* dos pontos de operação possíveis mostrada na Figura 6, conclui-se que o sistema operou rastreamento o menor *MPP*. Portanto, o algoritmo *P&O* clássico não é totalmente efetivo quando a operação de um conjunto de *PV* ocorre em *PSC*.

Por conseguinte, utilizando a bancada de testes apresentada na Figura 3, realizou-se testes experimentais iniciais a fim de caracterizar o *hardware* do conversor CC-CC elevador, responsável pela extração de potência de um *PV*. No referido ensaio, monitorou-se através de um osciloscópio os níveis de tensão e corrente de entrada e saída da topologia, conforme apresentado nas Figuras 11 e 12.



Figura 11. Tensão e corrente de saída do módulo. **Fonte:** Próprio Autor, 2023

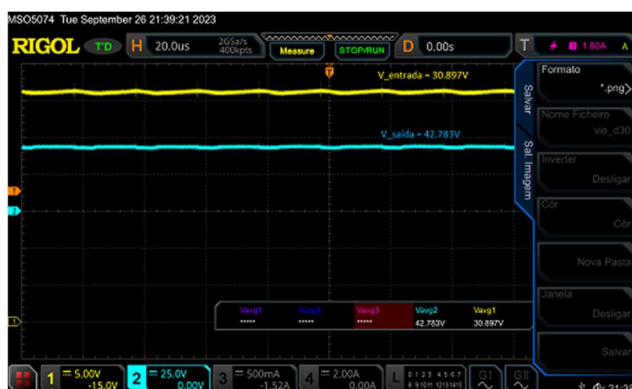


Figura 12. Tensão e corrente de saída do conversor. **Fonte:** Próprio Autor, 2023

O conversor CC-CC operava em malha aberta com razão cíclica de 0,3, resultando em expectativa de um ganho teórico de 1,429 V/V. Na prática, o protótipo operando com a mesma razão cíclica, atingiu ganho de 1,385 V/V. É natural que o ganho de tensão do conversor seja menor, uma vez que as perdas nos componentes da topologia não são consideradas na previsão teórica.

Conforme as Figuras 11 e 12, os níveis de saída do conversor mostram que o estágio de potência utilizado para o rastreamento do ponto de máxima potência está operando adequadamente. Contudo, faz-se necessário realizar ajustes no canal de sensoramento de corrente da placa de Processamento Analógico de Sinais (PAS), cujos *offsets* não estão sendo eliminados corretamente, causando imprecisão nas medidas e saturando a entrada analógica dos canais A/D do microcontrolador, quando a operação do conversor CC-CC é comutada para malha fechada.

Considerações Finais

De acordo com os resultados obtidos na seção anterior, é notório que os algoritmos clássicos de *MPPT* não são totalmente efetivos quando trata-se a problemática do sombreamento em sistemas *PV*, podendo causar a não totalidade de energia convertida e causando perdas na geração de potência. Os testes apresentam que o algoritmo de *P&O* opera de maneira correta, contudo sob as condições de irradiação não uniforme, o rastreamento do *MPP* se torna errôneo e não extrai 100% da máxima potência disponível pela placa.

Dentro da literatura, diversos autores utilizam das mais variadas técnicas e métodos para o rastreamento do verdadeiro ponto de máxima potência. Contudo, sua aplicabilidade torna-se muitas vezes custosa no âmbito computacional e financeiro, com a utilização de sensores de microcontroladores mais precisos e caros. Desta forma, faz-se necessário o maior estudo para o desenvolvimento de um algoritmo capaz de localizar o *GMPP* de maneira menos custosa, pois desta forma, contribui-se para o mercado de energia e possibilita uma maior inserção neste meio.

O trabalho aqui prostrado apresenta a implementação de um algoritmo clássico, no caso o *P&O*, afim de analisar o impacto causado pelo sombreamento parcial, utilizando um conversor CC-CC *Boost* para regular a tensão de saída do painel, além de se desenvolver uma derivação do mesmo método para a resolução da problemática. Nesta fase, o projeto mostrou ser eficaz para análise do comportamento das placas sob *PSC*, tendo, como evolução para trabalhos futuros, a implementação de algoritmos de *MPPT* para operação em condições de irradiação não uniforme. Desta forma, os resultados se mostraram satisfatórios para compreensão dos efeitos causados pelo sombreamento parcial em módulos solares, sendo assim, auxiliando no desenvolvimento do conhecimento da área e possibilitando futuras implementações.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao IFMS pelo apoio financeiro cedido ao projeto, via edital nº 030/2022 - PROPI/IFMS – pesquisa aplicada, desenvolvimento tecnológico e inovação.

Os autores agradecem ao IFMS - Três Lagoas pelo apoio institucional ao desenvolvimento do projeto de pesquisa.

Referências

EITAWIL, M. A.; ZHAO, Z. MPPT techniques for photovoltaic applications. *In: RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*, 25 ed., p. 793-813, 2013.

GHASEMI, M. A.; FOROUSHANI, H. M.; PARNIANI, M. Partial Shading Detection and Smooth Maximum Power Point Tracking of PV Arrays Under PSC. *In: IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, v. 31, n. 9, p. 6281-6292, 2016.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. BRASIL REGISTRA PARTICIPAÇÃO DE MAIS DE 90% DE ENERGIA PROVENIENTE DE FONTES RENOVÁVEIS. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/20230331_Brasil_registra_participacao_de_mais_de_90_de_energia_proveniente_de_fontes_renovaveis-.aspx>. Acesso em: 19 de setembro de 2023.

PATEL, H. AND AGARWAL, V. (2008) MATLAB-Based Modeling to Study the Effects of Partial Shading on PV Array Characteristics. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23, 302-310.

WANG, Y. J.; HSU, P. C. An investigation on partial shading of PV modules with different connection configurations of PV cells. *In: Energy*, vol. 36, p. 3069-3078, 2011.

MPPT ALGORITHM DEVELOPMENT UNDER PARTIAL SHADING CONDITION

Abstract: *Given that efficiency and the appreciation for power quality are essential for the maintenance of human development and the preservation of the environment, ways to implement renewable energy sources, making them increasingly efficient and clean, have been studied worldwide over the past centuries. Thus, photovoltaic energy has become a milestone in history, as its completely clean generation positively contributes to sustainability. As technology has advanced, various researchers have been studying new ways to improve the efficiency of solar generation due to its low yield when compared to conventional energy generation. Therefore, this work aims to analyze and study a possible improvement in common Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms under partial shading conditions, in order to positively contribute to renewable energy studies.*

Keywords: *Renewable, power generation, photovoltaic, MPPT, algorithm.*