

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**BRUNO BORELLI**

**ANÁLISE DE ALGORITMOS MPPT APLICADOS A SISTEMAS FOTOVOLTAICOS  
COM PERTURBAÇÕES DE IRRADIAÇÃO**

**PATO BRANCO**

**2023**

**BRUNO BORELLI**

**ANÁLISE DE ALGORITMOS MPPT APLICADOS A SISTEMAS FOTOVOLTAICOS  
COM PERTURBAÇÕES DE IRRADIAÇÃO**

**Analysis of Mppt Algorithms Applied to Photovoltaic Systems with Irradiation  
Disturbances**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Prof. Dr. Emerson Giovani Carati.

**PATO BRANCO**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**BRUNO BORELLI**

**ANÁLISE DE ALGORITMOS MPPT APLICADOS A SISTEMAS FOTOVOLTAICOS  
COM PERTURBAÇÕES DE IRRADIAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 28/Junho/2023

---

Prof. Dr. Emerson Giovani Carati  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Dr. Carlos Marcelo de Oliveira Stein  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Dr. César Rafael Claire Torrico  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PATO BRANCO**

**2023**

Dedico este trabalho aos meus pais, Helio e Damaris, por todo o incentivo, apoio e auxílio prestados até aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

Acima de tudo, agradeço a Deus pela vida, pela oportunidade de estar aqui me aperfeiçoando e buscando contribuir com o desenvolvimento da humanidade.

Agradeço também ao grande Mestre Gabriel por seus sábios ensinamentos e pelo fortalecimento que me foi dado sempre que necessário.

Sou grato aos meus pais e à minha família pelo apoio, auxílio e incentivo que sempre prestaram a mim.

Agradeço a todos os amigos que fiz durante a graduação. Guardo a memória de todos com alegria.

Agradeço à UTFPR, à coordenação do curso de engenharia elétrica e aos meus professores por todo o conhecimento que me foi transmitido, conhecimento este que me possibilitou realizar este trabalho.

Por fim, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Emerson Giovani Carati, pela gentileza em me aceitar como seu orientando, pelos seus conselhos e dedicação sem medida.

## RESUMO

Este trabalho traz uma análise de diferentes abordagens utilizadas no rastreamento do ponto de máxima potência (no inglês, *Maximum Power Point Tracking* - MPPT) em sistemas fotovoltaicos sujeitos a diferentes condições de sombreamento parcial (situação onde a curva P-V do arranjo apresenta mais de um ponto de máximo), com o objetivo de determinar, dentre as abordagens analisadas, quais possuem o melhor desempenho. Para tanto, são realizadas simulações computacionais no software Simulink para avaliar o desempenho dos seguintes algoritmos: *Perturb and Observe* (PO), *Incremental Conductance* (IC), *Hill Climbing* (HC), *Particle Swarm Optimization* (PSO) e *Cuckoo Search* (CS). Primeiramente são realizadas simulações com irradiância constante de 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura de 25°C para avaliar se os algoritmos são capazes de rastrear o MPP em uma situação onde só há um ponto de máximo da curva P-V. Na sequência são realizadas simulações onde o arranjo está sujeito a três condições distintas de sombreamento parcial. Analisando os resultados, observa-se que todos os algoritmos foram capazes de rastrear o MPP sob irradiância constante, apesar de necessitarem de diferentes tempos para tanto. Contudo, sob sombreamento parcial, apenas os algoritmos PO e IC conseguiram rastrear o MPP nas três situações, sendo que as abordagens HC e CS apenas rastrearam o ponto de máxima potência em uma situação, e o PSO não foi capaz de rastrear o MPP em nenhuma das situações. Desta forma, conclui-se que o algoritmo *perturb and observe* obteve o melhor desempenho dentre os demais e possui uma estrutura simples, fato que contribui para que seja a abordagem mais utilizada nos sistemas inversores atuais.

Palavras-chave: MPPT; sistemas fotovoltaicos; sombreamento parcial; *perturb and observe*.

## ABSTRACT

This work brings an analysis of different approaches used in tracking the maximum power point (MPPT) in photovoltaic systems subject to different conditions of partial shading (situation where the P-V curve of the array presents more than one maximum point), with the objective of determining, among the analyzed approaches, which ones have the best performance. Therefore, computational simulations are performed in Simulink software to evaluate the performance of the following algorithms: Perturb and Observe (PO), Incremental Conductance (IC), Hill Climbing (HC), Particle Swarm Optimization (PSO) and Cuckoo Search (CS). First, simulations are performed with a constant irradiance of  $1000 \text{ W/m}^2$  and a temperature of  $25^\circ\text{C}$  to assess whether the algorithms are capable of tracking the MPP in a situation where there is only one maximum point on the P-V curve. Next, simulations are carried out where the array is subject to three different conditions of partial shading. Analyzing the results, it is observed that all algorithms were able to track the MPP under constant irradiance, although they needed different times to do so. However, under partial shading, only the PO and IC algorithms were able to track the MPP in the three situations, with the HC and CS approaches only tracking the maximum power point in one situation, and the PSO was not able to track the MPP in any situation. In this way, it is concluded that the perturb and observe algorithm obtained the best performance among the others and has a simple structure, a fact that contributes to its being the most used approach in current inverter systems.

Keywords: MPPT; photovoltaic systems; partial shading; perturb and observe.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Declínio nos custos dos sistemas fotovoltaicos ao longo dos anos	14
Figura 2 - Estimativa de expansão da Micro e Minigeração Distribuída no Brasil	15
Figura 3 - Ilustração de um sistema fotovoltaico	15
Figura 4 - Curvas I-V e P-V de um módulo de 120 W sob irradiância constante	17
Figura 5 - Curvas I-V e P-V de um módulo de 120 W sob sombreamento parcial	18
Figura 6 - Fluxograma do algoritmo <i>Perturb &amp; Observe</i>	22
Figura 7 - Fluxograma do algoritmo <i>Incremental Conductance</i>	24
Figura 8 - Fluxograma do algoritmo <i>Hill Climbing</i>	25
Figura 9 - Fluxograma do algoritmo PSO	27
Figura 10 - Fluxograma do algoritmo <i>Cuckoo Search</i>	30
Figura 11 - Modelo em <i>Simulink</i> utilizado nas simulações	31
Figura 12 - Bloco com os módulos fotovoltaicos usados na simulação	32
Figura 13 - Curvas I-V e P-V do módulo CS3U-330P utilizado na simulação	33
Figura 14 - Irradiâncias nos módulos ao longo do tempo	34
Figura 15 - Curvas P-V e I-V dos módulos na primeira situação	34
Figura 16 - Curvas P-V e I-V dos módulos na segunda situação	35
Figura 17 - Curvas P-V e I-V dos módulos na terceira situação	35
Figura 18 - Curvas P-V e I-V do arranjo em condições normais	36
Figura 19 - Resultado da simulação com o algoritmo PO em uma situação normal	37
Figura 20 - Resultado da simulação com o algoritmo PO sob sombreamento parcial	38
Figura 21 - Resultado da simulação com o algoritmo IC em uma situação normal	40
Figura 22 - Resultado da simulação com o algoritmo IC sob sombreamento parcial	40
Figura 23 - Resultado da simulação com o algoritmo HC em uma situação normal	42
Figura 24 - Resultado da simulação com o algoritmo HC sob sombreamento parcial	42
Figura 25 - Resultado da simulação com o algoritmo PSO em uma situação normal	46
Figura 26 - Resultado da simulação com o algoritmo PSO sob sombreamento parcial	46
Figura 27 - Resultado da simulação com o algoritmo CS em uma situação normal	50
Figura 28 - Resultado da simulação com o algoritmo CS sob sombreamento parcial	50



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 – Parâmetros do modelo utilizado nas simulações .....</b>	<b>32</b>
<b>Tabela 2 - Parâmetros dos módulos utilizados nas simulações .....</b>	<b>32</b>
<b>Tabela 3 - Comparativo entre os algoritmos sob condições normais .....</b>	<b>51</b>
<b>Tabela 4 - Comparativo entre os algoritmos sob sombreamento parcial .....</b>	<b>52</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CS	<i>Cuckoo Search</i> - Busca Cuco
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GMPP	<i>Global Maximum Power Point</i> - Ponto de Máxima Potência Global
HC	<i>Hill Climbing</i> - Escalada
IC	<i>Incremental Conductance</i> - Condutância Incremental
LMPP	<i>Local Maximum Power Point</i> - Ponto de Máxima Potência Local
MME	Ministério de Minas e Energia
MMGD	Micro e Minigeração Distribuída
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> - Transistor de Efeito de Campo Semicondutor de Óxido Metálico
MPP	<i>Maximum Power Point</i> – Ponto de Máxima Potência
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> – Rastreamento do Ponto de Máxima Potência
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i> - Laboratório Nacional de Energias Renováveis
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PO	<i>Perturb and Observe</i> – Perturbe e Observe
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i> - Otimização de Enxame de Partículas
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> - Modulação por Largura de Pulso
QPSO	<i>Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization</i> - Otimização de Enxame de Partículas com Comportamento Quântico

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_{REF}$	Tensão de referência
$V_{MPP}$	Tensão no ponto de máxima potência
$D$	Razão cíclica
$W$	Inércia inicial
$C1$	Coefficiente de aceleração 1
$C2$	Coefficiente de aceleração 2
$p$	Posição da partícula
$v$	Velocidade da partícula
$P_{best}$	Melhor solução encontrada pela partícula
$G_{best}$	Melhor solução global encontrada pelas partículas
$V_j$	Tensão da j-ésima partícula
$V_{best}$	Melhor tensão encontrada pela partícula
$K$	Coefficiente de passo
$\Gamma$	Função gama integral
$L$	Indutância do conversor boost
$C$	Capacitância do conversor boost
$R_{FET}$	Resistência do MOSFET
$R_{DFET}$	Resistência do diodo interno do MOSFET
$R_D$	Resistência do diodo
$V_D$	Queda de tensão no diodo
$R_{Load}$	Resistência da carga
$P_{Máx}$	Máxima potência do módulo fotovoltaico
$N_{Cel}$	Número de células por módulo
$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto
$I_{sc}$	Corrente de curto-circuito
$V_{mp}$	Tensão no MPP
$I_{mp}$	Corrente no MPP
$C_{Voc}$	Coefficiente de temperatura de $V_{oc}$
$C_{Isc}$	Coefficiente de temperatura de $I_{sc}$

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>18</b>
1.1.1	Objetivos específicos.....	18
<b>1.2</b>	<b>Organização do trabalho</b> .....	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>GERAÇÃO FOTOVOLTAICA SOB SOMBREAMENTO PARCIAL</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Sombreamento parcial</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>PWM</b> .....	<b>21</b>
<b>2.3</b>	<b>Algoritmos MPPT</b> .....	<b>21</b>
2.3.1	<i>Perturb &amp; Observe (PO)</i> .....	21
2.3.2	<i>Incremental Conductance (IC)</i> .....	23
2.3.3	<i>Hill Climbing (HC)</i> .....	24
2.3.4	<i>Particle Swarm Optimization (PSO)</i> .....	26
2.3.5	<i>Cuckoo Search (CS)</i> .....	28
<b>3</b>	<b>ANÁLISE NUMÉRICA DOS ALGORITMOS MPPT</b> .....	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>Simulações</b> .....	<b>36</b>
3.1.1	Algoritmo <i>Perturb &amp; Observe (PO)</i> .....	36
3.1.2	Algoritmo <i>Incremental Conductance (IC)</i> .....	38
3.1.3	Algoritmo <i>Hill Climbing (HC)</i> .....	41
3.1.4	Algoritmo <i>Particle Swarm Optimization (PSO)</i> .....	43
3.1.5	Algoritmo <i>Cuckoo Search (CS)</i> .....	47
<b>3.2</b>	<b>Comparação entre os algoritmos</b> .....	<b>51</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>54</b>
<b>4.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros</b> .....	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

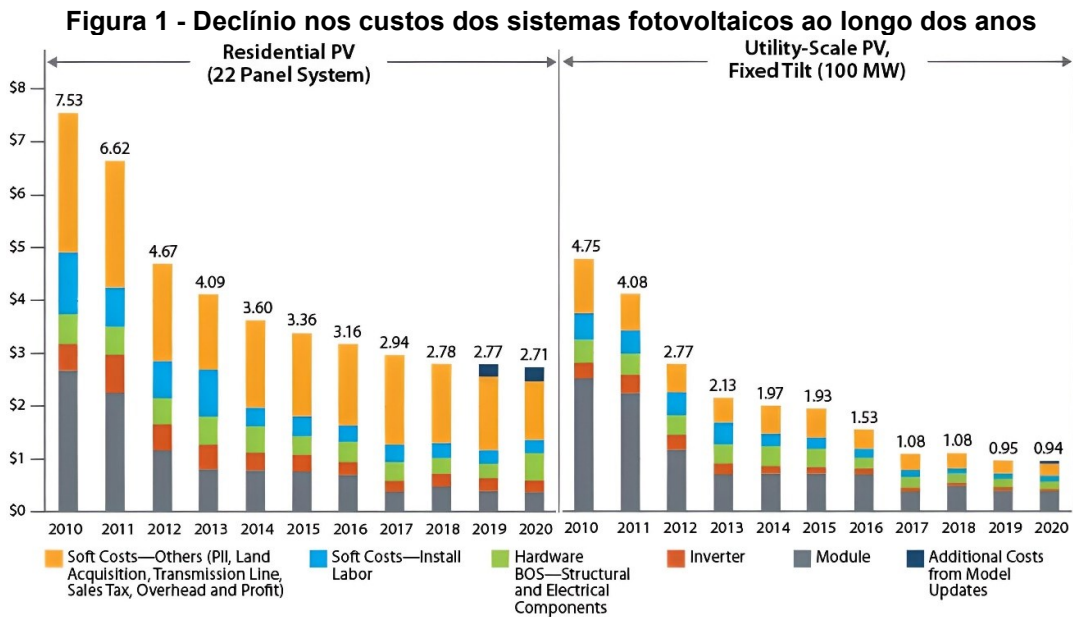
A energia elétrica é de grande importância para a sociedade moderna. A eletricidade é utilizada para proporcionar o funcionamento de eletrodomésticos nas residências, para o uso em carros elétricos, para o acionamento de motores e caldeiras nas indústrias, dentre diversos outros usos. Desta forma, pode-se dizer que a energia elétrica proporciona conforto, geração de empregos e riquezas, e propicia uma maior capacidade de sobrevivência para a humanidade (EPE, 2018).

No mundo todo, fontes de energia não renováveis tais como carvão mineral, gás natural e petróleo são consideravelmente mais utilizadas do que as fontes renováveis, tais quais solar, eólica, geotérmica, hidráulica e biomassa. No Brasil, apesar da utilização das fontes não renováveis ser superior às fontes renováveis, quase metade de sua matriz energética é composta por fontes renováveis, com destaque para derivados da cana de açúcar e energia hidráulica (EPE, 2021).

O grande problema das fontes não renováveis é que sua utilização majoritariamente depende da queima dessas substâncias, ou seja, são combustíveis e emitem grande quantidade de gases de efeito estufa, fortemente responsáveis pelas mudanças climáticas no planeta (ELAVARASAN *et al*, 2020).

Visto que os combustíveis fósseis vêm sendo amplamente utilizados há mais de 200 anos para a produção de energia, o mundo enfrenta dificuldade em reduzir seu consumo e a consequente emissão de gases poluentes. Neste contexto, as fontes renováveis de energia são de grande valia para o desenvolvimento sustentável da sociedade. Além disso, o uso de tais fontes desempenha um importante papel na proteção ambiental e na geração de emprego em diferentes países ao redor do globo (PAUL *et al*, 2021).

No contexto das energias renováveis, uma que está em destaque atualmente é a fotovoltaica. Isso se deve ao fato de ser uma fonte de energia limpa, abundante e ter seu custo reduzido significativamente na última década (WEN *et al*, 2019). De acordo com o *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) (Laboratório Nacional de Energias Renováveis, em tradução literal), de 2010 a 2020 houve uma redução de 64% e 82% nos custos dos sistemas fotovoltaicos residenciais e de larga escala, respectivamente (NREL, 2021). A figura 1 apresenta o declínio nos custos destes sistemas ao longo dos anos. Os valores são dados em dólar por Watt.

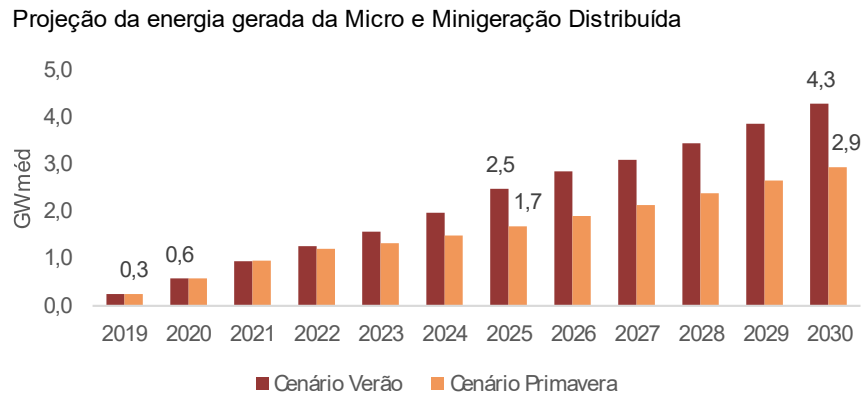


Fonte: NREL, 2021

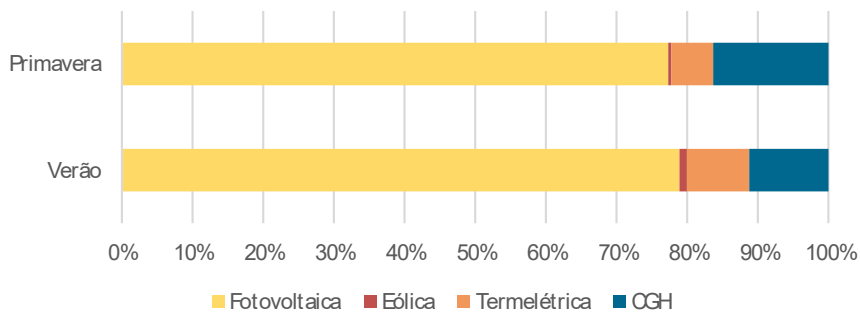
No Brasil, desde 2012, quando entrou em vigor a resolução normativa ANEEL nº 482/2012 que permite ao consumidor utilizar sistemas de geração de energia elétrica renováveis em sua própria residência e ainda despachar o excedente de energia para a rede de distribuição, o número de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída aumentou exponencialmente (DA ROSA; GASPARIN, 2017).

De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 (PDE), do Ministério de Minas e Energia (MME) em conjunto com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em relação à Micro e Minigeração Distribuída (MMGD), em 2020 a fotovoltaica superou todas as outras tecnologias em capacidade instalada, com 2,5 GW instalados. Este expressivo número se deve, entre outros fatores, ao aumento da tarifa de energia naquele ano e à compensação de crédito, que estimulou os consumidores a utilizarem sistemas para gerar sua própria energia.

Segundo o PDE 2030, a Micro e Minigeração Distribuída de energia solar fotovoltaica deve chegar na marca de 4,3 GW<sub>méd</sub> no verão e 2,9 GW<sub>méd</sub> na primavera, conforme ilustrado na figura 2, que mostra a projeção da energia gerada da MMGD. A figura 2 ainda ilustra a projeção da energia gerada por fonte em 2030, com grande destaque para a fotovoltaica, que alcançará a marca de quase 80% do total da energia gerada por MMGD.

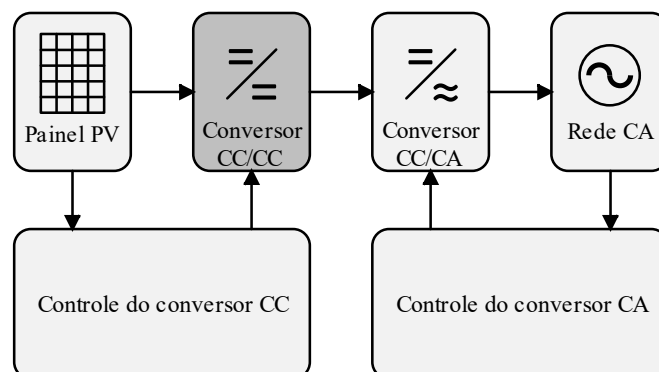
**Figura 2 - Estimativa de expansão da Micro e Minigeração Distribuída no Brasil**

Projeção da energia gerada por fonte em 2030



Fonte: Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 (EPE)

Um sistema de geração fotovoltaico é formado basicamente pelos módulos fotovoltaicos, conversor CC-CC, conversor CC-CA, filtro passa-baixas e sistemas de controle. O controle de tensão do barramento CC normalmente é realizado através da utilização de filtros, como o filtro L, LC e LCL (PIVETA, 2021). Com exceção dos módulos, todos os componentes supracitados estão inclusos no que é chamado comercialmente de inversor fotovoltaico. A figura 3 ilustra um sistema fotovoltaico.

**Figura 3 - Ilustração de um sistema fotovoltaico**

Fonte: Autoria própria

Apesar de ser uma tecnologia promissora, os sistemas fotovoltaicos atuais possuem dois problemas principais: baixa eficiência dos módulos e o fato de a produção de energia variar continuamente dependendo das condições climáticas (DEGLA *et al*, 2021). Os principais fatores que influenciam na quantidade de energia elétrica gerada pelo sistema é a irradiância solar e a temperatura dos módulos. Para cada valor de irradiância e temperatura existe um ponto de operação onde se atinge a máxima potência (em inglês, *Maximum Power Point* – MPP) (SANTOS, 2020). Deste modo, é de suma importância que o sistema seja otimizado para extrair a máxima potência dos painéis. Para tanto, são utilizados algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência (em inglês, *Maximum Power Point Tracking* – MPPT) que fazem uma varredura na curva PV no sistema para determinar em tempo real tal ponto (ALRUBAIE *et al*, 2022).

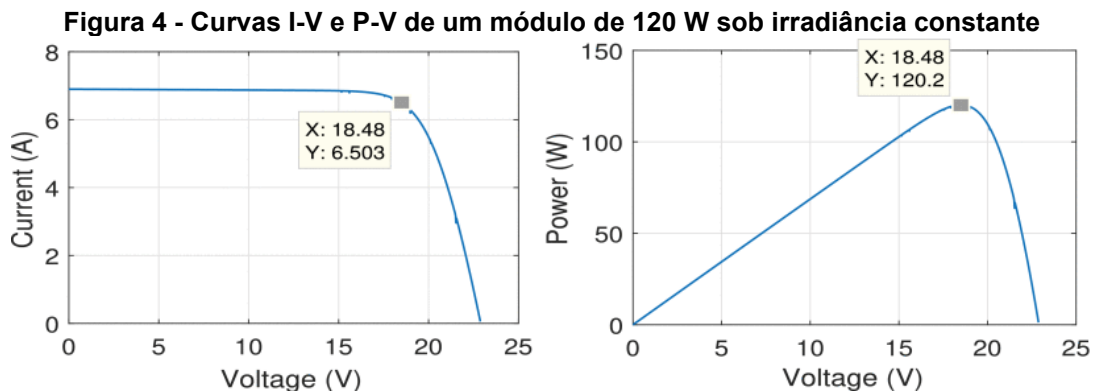
Na literatura são encontrados diversos métodos de rastreamento do ponto de máxima potência, cada um com características específicas. O método mais conhecido e utilizado é chamado de *Perturb and Observe* (PO) (Perturbe e Observe, em português) devido ao fato de possuir uma estrutura simples e efetiva. De acordo com REZK e ELTAMALY (2015), o algoritmo PO tem por objetivo perturbar a tensão de operação dos módulos e verificar o comportamento da potência do sistema. Caso haja um incremento na potência, o sistema de controle continua a alterar a tensão dos módulos neste sentido. Caso contrário, o controle altera a tensão no sentido contrário. O problema deste algoritmo é que mesmo quando o MPP é encontrado, o sistema de controle continua alterando a tensão dos módulos e, conseqüentemente, a potência também varia, ocasionando perdas no sistema.

Diversas modificações foram feitas no método citado anteriormente. O algoritmo PO diferencial (ou Método Diferencial de Primeira Ordem) consiste em medir a corrente e a tensão dos módulos e calcular  $(dP/dV)$ . Quando  $dP/dV = 0$ , o ponto de máxima potência foi alcançado (SOUALMIA; CHENNI, 2019). Quanto maior o passo da razão cíclica, maior é a variação na potência do sistema, contudo, há muita flutuação em torno do ponto de máxima potência. Para uma razão cíclica com passo menor, a resposta é mais lenta, porém há menos oscilação no MPP. Desta forma, JUSOH (2015) propõe o método *Variable Step Size PO* (PO com Tamanho Variável de Passo, em tradução literal) que utiliza passos variáveis da razão cíclica dependendo se a perturbação está aumentando ou diminuindo a potência extraída dos módulos.



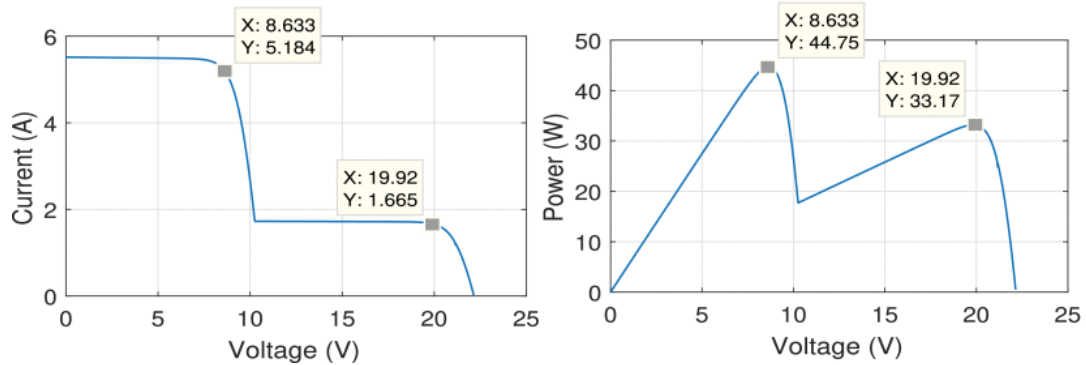
Ainda, há outros métodos como o *Incremental Conductance* (IC) (Condutância Incremental, em português). GUPTA e SAXENA (2016) descrevem este método como sendo baseado no fato de a derivada da potência em relação à tensão ser igual a 0 no MPP, ser maior que 0 à esquerda do MPP e ser menor que 0 à direita do MPP. O algoritmo faz uma comparação entre a condutância instantânea ( $I/V$ ) e a condutância incremental ( $\Delta I/\Delta V$ ). Assim, quando é alcançado o ponto de máxima potência, a tensão de referência na qual o sistema opera ( $V_{REF}$ ) deve ser igual a  $V_{MPP}$ . Uma vez que isto acontece, o algoritmo mantém o sistema no MPP até que ocorra uma mudança em  $\Delta I$  ou uma mudança climática.

Tanto o método *Perturb & Observe* quanto o *Incremental Conductance* possuem uma convergência rápida para rastrear o MPP. Contudo, não são muito efetivos em situações onde ocorrem múltiplos picos de potência na saída do sistema sob condições de sombreamento parcial (SHAMS *et al*, 2021). Quando os módulos estão sujeitos a sombreamento parcial, há mais de um pico tanto na curva P-V quanto na curva I-V do sistema. A figura 4 e a figura 5 ilustram a curva I-V e P-V de um módulo de 120 W sob condições de irradiância constante e sombreamento parcial, respectivamente.



Fonte: RAZIYA *et al*, 2019.

**Figura 5 - Curvas I-V e P-V de um módulo de 120 W sob sombreamento parcial**



Fonte: RAZIYA *et al*, 2019.

Para tentar resolver tal problema, Li *et al* (2017) propõe um algoritmo MPPT chamado *Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization* (QPSO) (Otimização de Enxame de Partículas com Comportamento Quântico, em tradução literal) que é uma adaptação do algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) Otimização de Enxame de Partículas, em português). A vantagem do QPSO é que este possui um número reduzido de parâmetros e possui maior habilidade de otimização global do que o PSO. Além disso, os resultados sugerem que o QPSO possui menor flutuação de potência no estado estacionário e uma maior adaptabilidade à curva complexa.

Este trabalho se propõe a investigar na literatura diferentes algoritmos MPPT atuando em situações diversas sombreamento parcial nos módulos de uma planta fotovoltaica. Com isto, pretende-se determinar qual algoritmo faz com que a planta possua um melhor desempenho para determinada situação, possibilitando o desenvolvimento de sistemas inversores mais otimizados.

## 1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é realizar uma investigação na literatura de diferentes algoritmos MPPT e verificar a eficiência de tais algoritmos para condições diversas de sombreamento parcial visando uma melhoria dos sistemas fotovoltaicos atuais.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- Realizar uma revisão da literatura sobre métodos de rastreamento do ponto de máxima potência para sistemas fotovoltaicos.
- Simular um sistema fotovoltaico em diferentes situações de sombreamento

parcial dos módulos com distintos métodos de MPPT.

- Fazer um comparativo entre os diferentes algoritmos e determinar quais se comportam melhor em cada situação simulada.

## 1.2 Organização do trabalho

Este trabalho é estruturado em 4 capítulos além deste, sendo eles:

- Capítulo 2 – Geração fotovoltaica sob sombreamento parcial. Neste capítulo é feita uma discussão acerca da estrutura de um módulo fotovoltaico, como o sombreamento de parte do painel modifica a curva P-V e afeta a produção de energia. Ainda, são apresentadas algumas abordagens utilizadas para rastrear o ponto de máxima potência do sistema, com fluxogramas detalhando seu funcionamento.
- Capítulo 3 – Análise numérica dos algoritmos MPPT. Aqui são apresentados os códigos dos algoritmos utilizados nas simulações via Simulink. Na sequência, são feitas as análises de desempenho de cada abordagem, seguida por uma comparação para a determinação dos melhores algoritmos em condições de sombreamento parcial do arranjo fotovoltaico.
- Capítulo 4 – Conclusão. Finalmente, são discutidas as conclusões a respeito dos resultados obtidos nas simulações. Os principais pontos de avaliação do desempenho dos algoritmos são destacados aqui, além de sugestões para trabalhos futuros.

## 2 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA SOB SOMBREAMENTO PARCIAL

### 2.1 Sombreamento parcial

Um módulo fotovoltaico é constituído por um conjunto de células fotovoltaicas que, sozinhas, produzem uma quantidade pequena de energia. Assim, tais células são ligadas em série/paralelo para aumentar a tensão, a corrente e, conseqüentemente, a potência do módulo. A corrente gerada depende da área da célula fotovoltaica e da irradiação nas células. Desta forma, quando uma célula se encontra sombreada, isto resulta em incompatibilidade com a corrente gerada pelas células próximas que estão totalmente iluminadas. Sob tais condições, as células sombreadas podem sofrer polarização reversa e atuar como carga, o que leva à perda de energia. Assim, ocorre um aquecimento na célula conhecido como *hot-spot* (ponto quente, em português), e o sistema pode ser danificado de forma irreversível se não for protegido adequadamente (ABDULMAWJOOD *et al*, 2022).

As técnicas utilizadas para reduzir os efeitos do sombreamento parcial podem ser classificadas como passivas ou ativas. As técnicas passivas usam elementos passivos, como diodos de *bypass*, enquanto as técnicas ativas usam elementos ativos, como interruptores de estado sólido (CHINYOKA *et al*, 2020). Os diodos de *bypass* podem isolar a célula solar afetada e, portanto, é uma maneira eficaz de limitar as perdas induzidas pelo sombreamento parcial, evitando possíveis danos, e são constituintes padrão de módulos e sistemas fotovoltaicos industriais (PERA *et al*, 2017).

Visto que um sistema fotovoltaico está localizado ao ar livre durante todo o ano, o sombreamento parcial é facilmente produzido a partir de árvores, edifícios, nuvens, excrementos de pássaros ou outros painéis fotovoltaicos (YIN *et al*, 2019).

Sob condições de irradiância uniforme, as características elétricas dos módulos, tais quais as curvas I-V e P-V, possuem apenas um único ponto de máxima potência no qual a potência máxima pode ser extraída empregando um algoritmo MPPT adequado, observando o fato de que, devido a um módulo não ser exatamente igual ao outro, cada módulo está sujeito a . No entanto, sob condições de irradiância não uniforme, como sombreamento parcial, a curva P-V gera múltiplos MPP, sendo um ponto de máxima potência global (em inglês, *Global Maximum Power Point* - GMPP) e outros pontos de máxima potência locais (em inglês, *Local Maximum Power Point* - LMPP). Levando isto em consideração, os algoritmos MPPT comumente

usados muitas vezes encontram e mantém a tensão dos módulos no LMPP ao invés do GMPP (MOHANTY; MANGARAJ, 2019).

## 2.2 PWM

Os algoritmos geram a razão cíclica que é então convertida em um sinal PWM (Pulse Width Modulation, em português Modulação por Largura de Pulso). Este sinal PWM controla o chaveamento de um MOSFET que permite realizar o controle da corrente gerada pelos módulos que, através da curva I-V, controla a tensão dos painéis.

## 2.3 Algoritmos MPPT

Normalmente, quando um sistema fotovoltaico é conectado diretamente à carga, o ponto de operação dos módulos raramente está no ponto de máxima potência. Idealmente, um algoritmo MPPT utilizado em conjunto com um conversor CC-CC permite que um sistema fotovoltaico produza a máxima potência possível de forma contínua, independentemente das condições ambientais onde os módulos estão inseridos, como a irradiância solar e a temperatura (BANU *et al*, 2013).

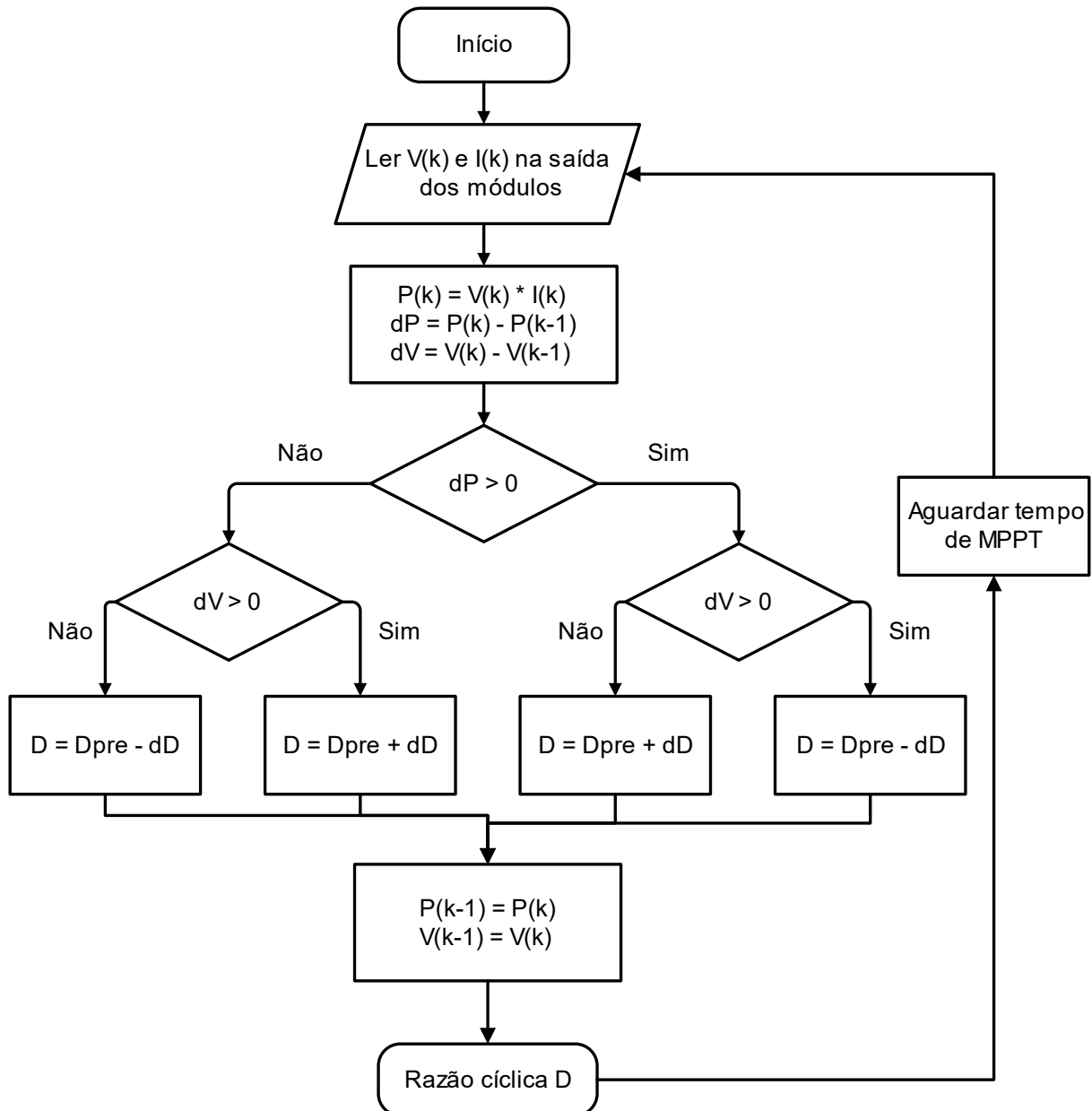
### 2.3.1 *Perturb & Observe* (PO)

O algoritmo *Perturb & Observe* (PO) é amplamente utilizado no controle do MPPT graças a sua estrutura simples e número reduzido de parâmetros medidos necessários. Como o nome indica, o conceito por trás desse método é baseado na perturbação e observação da potência de saída dos módulos através da alteração da corrente ou tensão de operação destes. O algoritmo aumenta ou diminui continuamente a tensão ou corrente de referência com base no valor anterior de potência até atingir o MPP (BANU *et al*, 2013). A figura 6 apresenta o fluxograma de funcionamento deste algoritmo.

Primeiramente são lidos os valores instantâneos de tensão e corrente dos módulos e na sequência é calculado o valor da potência que está sendo gerada no momento. Em seguida, é calculada a diferença entre os valores atuais e da iteração passada da tensão e da potência correspondente. Caso a variação de potência seja positiva, o algoritmo testa se a variação de tensão é positiva. Em caso afirmativo, a razão cíclica é decrementada, e em caso negativo é incrementada. Na situação em

que a variação de potência não é positiva, o algoritmo testa novamente se a variação de tensão é positiva. Caso esta afirmação seja verdadeira, a razão cíclica é incrementada, e caso seja falsa é decrementada. Findado o processo, o algoritmo repete novamente este ciclo.

Figura 6 - Fluxograma do algoritmo *Perturb & Observe*



Fonte: Autoria própria (2023)

### 2.3.2 Incremental Conductance (IC)

Assim como o PO, o método conhecido como *Incremental Conductance* também necessita da medição dos valores instantâneos de tensão e corrente (MOREIRA et al, 2017).

Este método analisa o sinal da derivada da potência em relação à tensão do painel fotovoltaico e compara a condutância incremental com a condutância instantânea. Como a derivada da potência em relação à tensão no MPP deve ser zero, aplicando a regra do produto e a regra da cadeia, podemos escrever a seguinte equação:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d}{dV}(VI) = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (2)$$

Esta é a condição para o MPP. Isso significa que o ponto de operação está no MPP se a condutância incremental for igual à condutância instantânea. Da mesma forma, se a condutância incremental for menor que a condutância instantânea, o ponto de operação está à esquerda do MPP, portanto, a tensão de operação precisa ser aumentada e vice-versa (KIM et al, 2020).

As equações abaixo mostram as três possibilidades citadas anteriormente.

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}; \quad \left(\frac{dP}{dV}\right) = 0; \quad \text{no MPP} \quad (3)$$

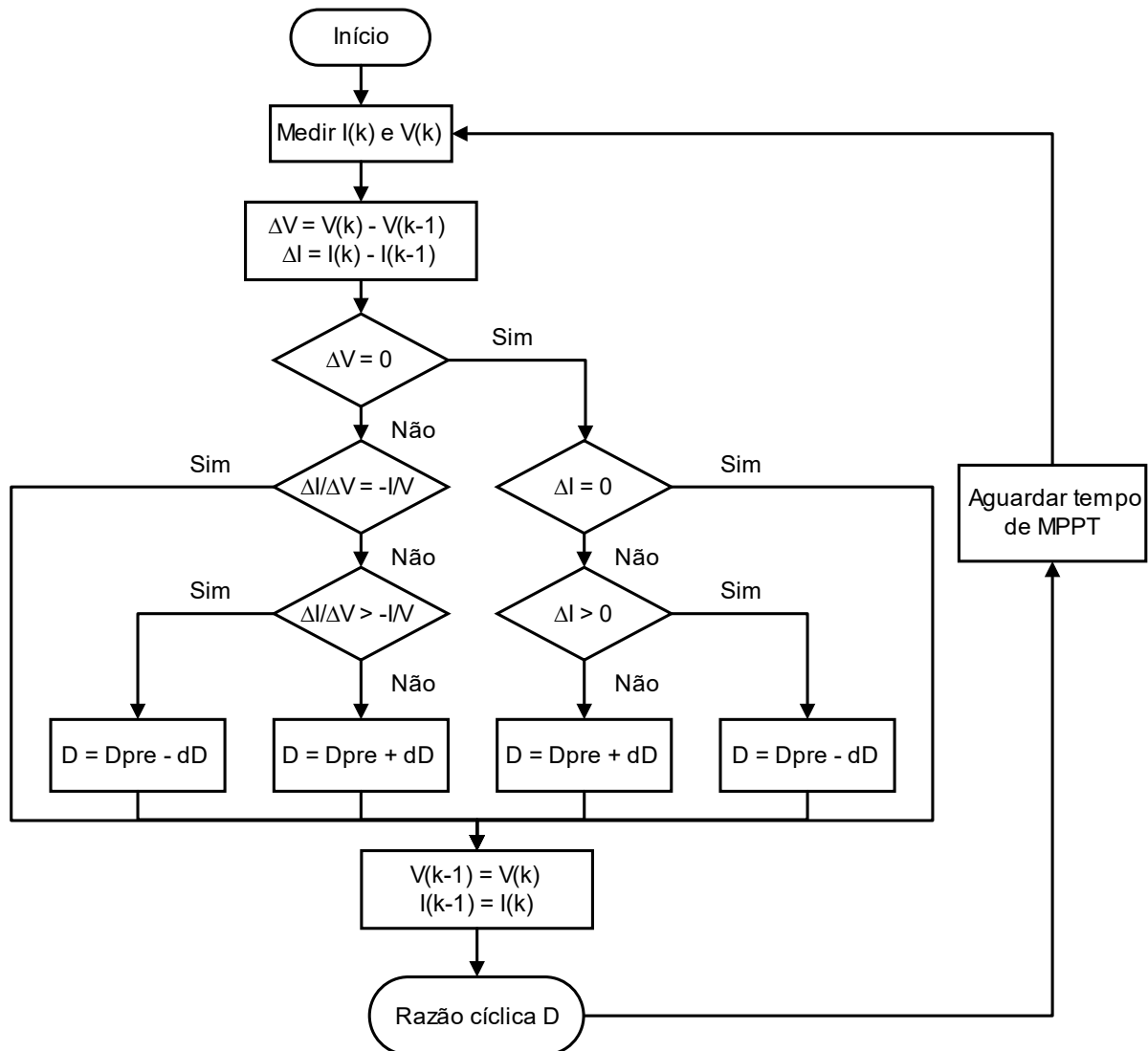
$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}; \quad \left(\frac{dP}{dV}\right) > 0; \quad \text{à esquerda do MPP} \quad (4)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}; \quad \left(\frac{dP}{dV}\right) < 0 \quad \text{à direita do MPP} \quad (5)$$

Supondo uma variação suficientemente pequena de  $I$  e  $V$ , podemos aproximar  $dI/dV$  por  $\Delta I/\Delta V$  e, assim:

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad (6)$$

Figura 7 - Fluxograma do algoritmo *Incremental Conductance*



Fonte: Autoria própria (2023)

### 2.3.3 Hill Climbing (HC)

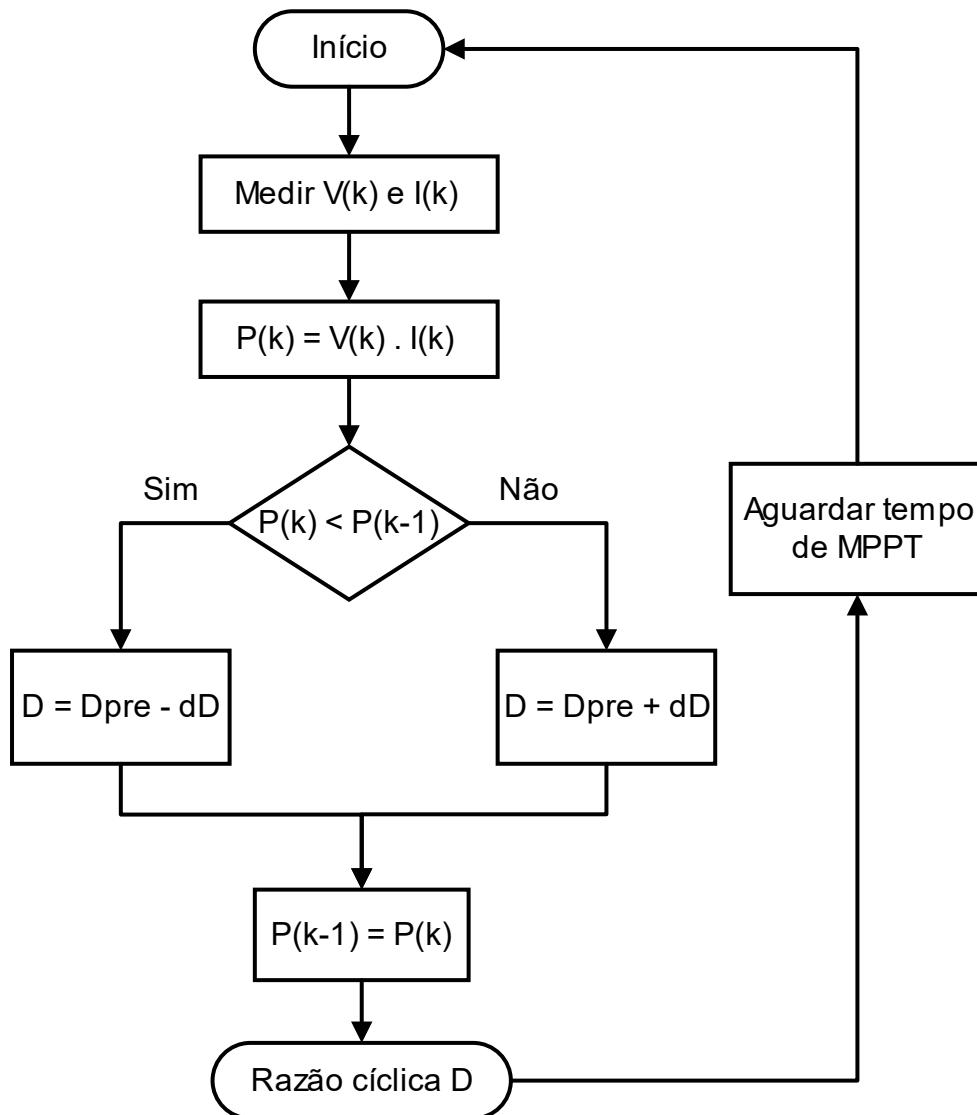
O algoritmo *Hill Climbing* (HC), (Escalada, em tradução literal), é um método muito usado para rastrear o MPP devido ao seu baixo custo e simplicidade de implementação. Contudo, apresenta algumas desvantagens, como menor velocidade de convergência quando um passo pequeno de razão cíclica é usado, e alta oscilação em torno de um ponto de máxima potência quando um passo grande é utilizado (BOUAKKAZ et al, 2020).



O algoritmo HC consiste na perturbação da razão cíclica do conversor CC-CC. A distinção entre os esquemas PO e HC é que no método HC o MPP é rastreado quando  $dP/dD = 0$ , onde  $dP$  é a variação na potência de saída e  $dD$  é a variação na razão cíclica (MOTSOENENG et al, 2019).

O fluxograma que detalha o funcionamento do método é apresentado na figura 8.

Figura 8 - Fluxograma do algoritmo *Hill Climbing*



Fonte: Autoria própria (2023)

Primeiramente o algoritmo faz a leitura dos valores de tensão e corrente dos módulos e calcula a potência através do produto de  $V(k)$  e  $I(k)$ . Na sequência, caso a potência atual seja menor que a potência da iteração passada, a razão cíclica de

comutação do MOSFET é decrementada. Caso contrário, a razão cíclica é incrementada.

#### 2.3.4 Particle Swarm Optimization (PSO)

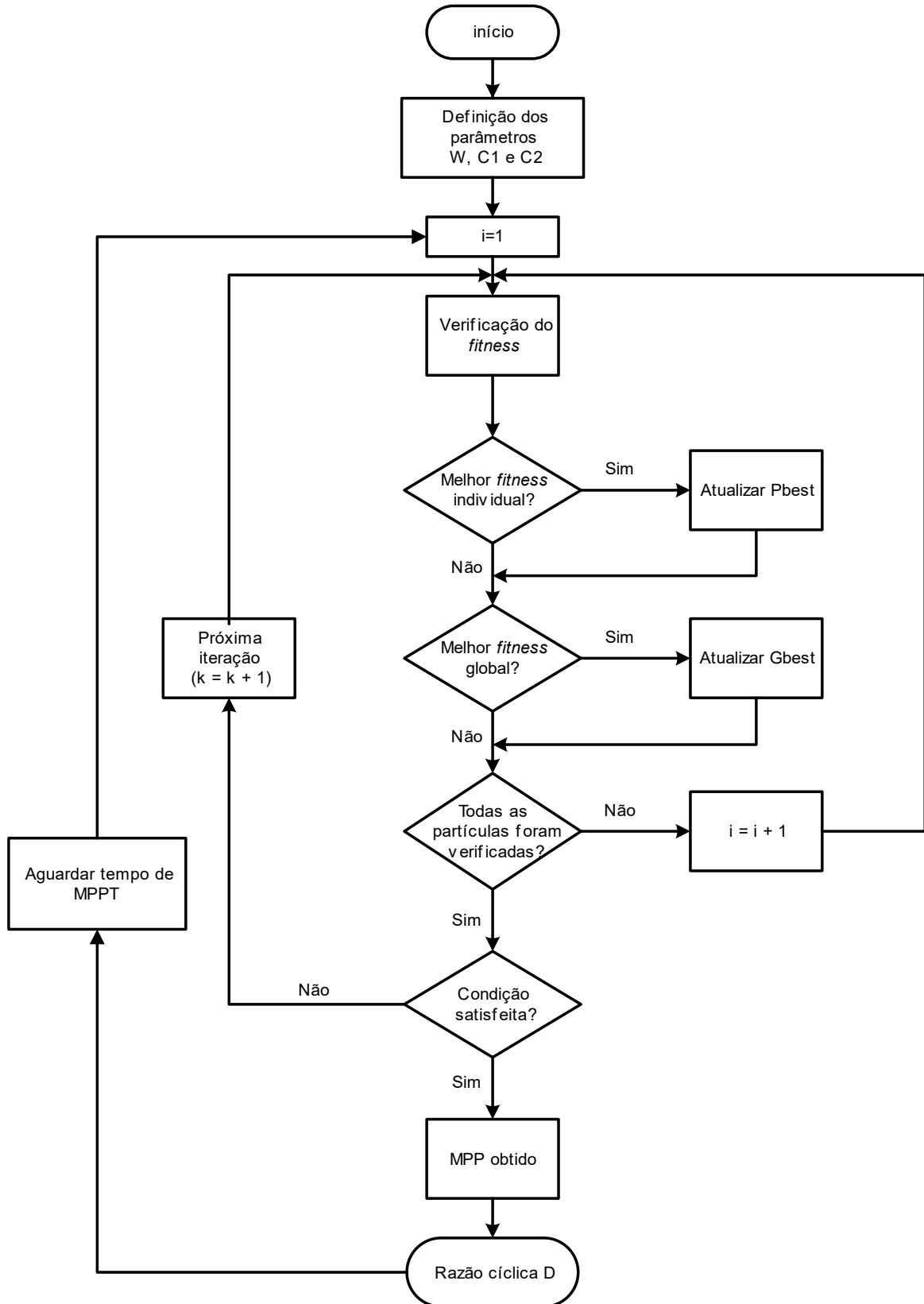
*Particle Swarm Optimization* (PSO) é uma técnica de otimização baseada na mobilidade e inteligência de enxames. Ele integra a teoria da interação social com a resolução de problemas. Emprega um grande número de agentes (partículas) que se movimentam no espaço em busca da melhor resposta. Cada partícula mantém um registro das coordenadas no espaço-solução correspondente à melhor solução (fitness) que a partícula obteve até o momento. Esse valor é chamado de *Personal Best* (Melhor Pessoal, em tradução literal), ou  $P_{best}$ . O melhor valor alcançado por qualquer partícula nas imediações dessa partícula é denominado *Global Best* (Melhor Global, em tradução literal), ou  $G_{best}$  (KHAIRI et al, 2023).

Nos algoritmos PSO, cada partícula replica uma solução para o problema e é distinguida por sua posição  $p$  e velocidade  $v$ . Soluções aleatórias são usadas para iniciar o enxame. Cada partícula otimiza sua rota com base em sua própria experiência de vôo  $P_{best}$  e conhecimento compartilhado da melhor localização obtida por outras partículas  $G_{best}$ . O objetivo é explorar eficientemente o espaço-solução, analisando o desempenho das partículas para determinar a solução ótima.

O Algoritmo PSO começa com a determinação dos seguintes parâmetros: inércia inicial ( $W$ ), coeficiente de aceleração 1 ( $C1$ ) e coeficiente de aceleração 2 ( $C2$ ). Então, o processo continua com a condição  $i=1$  no estágio inicial. O algoritmo enviará a solução candidata para a função objetivo após avaliar o valor de *fitness* (melhor solução) de cada partícula. Depois disso, o algoritmo atualizará o  $P_{best}$  e o  $G_{best}$  comparando o *feedback* (experiência) das partículas. Isso se repete até que todas as partículas sejam avaliadas. Então, será verificado se a saída satisfaz o resultado desejado. Se não satisfizer a condição, o processo será repetido com a próxima iteração. Por fim, o resultado satisfatório terá obtido o MPP (KHAIRI et al, 2023).

O fluxograma explicando o funcionamento deste algoritmo encontra-se na próxima figura.

Figura 9 - Fluxograma do algoritmo PSO



Fonte: Autoria própria (2023)

### 2.3.5 Cuckoo Search (CS)

Segundo FAROOQUI *et al* (2021), ao contrário das abordagens PO e PSO, o método Cuckoo Search (Pesquisa Cuco, em tradução literal) possui um baixo número de transitórios. Em um estado estacionário, há menos flutuações e erros. A abordagem CS é mais eficiente pois possui um nível mais alto de convergência e proficiência. O CS se destaca dentre os demais algoritmos pois pode atingir 0% de oscilação em estado estacionário, economizando uma quantidade significativa de energia. Além disso, quando as condições ambientais mudam rapidamente, esta abordagem pode alcançar com sucesso o MPP, mesmo em situações de sombreamento parcial.

O algoritmo CS é um método inspirado no comportamento de espécies de pássaros “cuco” em seu processo de reprodução. Os cucos são aves parasitas que depositam seus ovos dentro dos ninhos de outras aves, em vez de construir seus próprios ninhos. Os cucos voam aleatoriamente de um ninho para outro, a fim de encontrar um candidato a ninho hospedeiro. Em seguida, ele escolherá o melhor ninho para que seus ovos tenham a melhor chance de eclodir e gerar uma nova geração de cucos. Em algumas condições, o cuco fará alguns esforços para aumentar a chance de eclosão colocando seus ovos estrategicamente em uma boa posição e, às vezes, derrubando os ovos da ave hospedeira para fora do ninho. Algumas espécies de cuco são capazes de produzir ovos semelhantes aos de outras espécies de aves específicas. No entanto, ainda existe a possibilidade de que a ave hospedeira encontre os ovos parasitas e abandone o ninho. Nesse caso, os ovos do cuco não eclodirão (NUGRAHA *et al*, 2019).

Algumas simplificações precisam ser feitas para tornar o algoritmo adequado para problemas de otimização. Desta forma, foram determinadas três regras idealizadas para a implementação deste método (ANAND *et al*, 2020):

- 1) Cada cuco bota somente um ovo por vez em um ninho escolhido aleatoriamente.
- 2) Os ninhos com os melhores ovos (boas soluções) darão origem a uma nova geração de pássaros (boas soluções são mantidas através do tempo).

- 3) Há um número fixo de ninhos hospedeiros no ecossistema e a probabilidade de os ovos de cuco serem descobertos pela ave hospedeira é  $P_a \in [0, 1]$ . Caso a ave hospedeira encontre os ovos da ave parasita, o ninho será destruído ou abandonado. As aves hospedeiras então constroem um novo ninho em outro lugar.

O algoritmo CS utiliza o chamado *Lévy Flight* (Vôo de Lévy, em português) em seu processo de rastreamento. Segundo CHECHKIN *et al* (2008), *Lévy Flights*, também chamados de movimento de Lévy, representam uma classe de processos aleatórios não gaussianos cujos incrementos estacionários são distribuídos de acordo com uma distribuição estável de Lévy, originalmente estudada pelo matemático francês Paul Pierre Lévy.

A maneira mais simples de implementar o *Lévy Flight* é usando as equações abaixo:

$$V_j^{(i+1)} = V_j^{(i)} + \alpha \oplus Lévy = V_j^{(i)} + s \quad (7)$$

$$s \approx K \times \left( \frac{u}{|v|^{\frac{1}{\beta}}} \right) (V_{best} - V_j) \quad (8)$$

onde  $V_j^{(i)}$  representa a tensão da  $j$ -ésima partícula no  $i$ -ésimo ciclo de iteração,  $\beta = 1,5$  e  $K$  é o coeficiente de passo, enquanto  $u$  e  $v$  seguem a distribuição abaixo:

$$u \approx N(0, \sigma_u^2) \quad (9)$$

$$v \approx N(0, \sigma_v^2) \quad (10)$$

$$\sigma_u = \left( \frac{\Gamma(1+\beta) \times \text{sen}\left(\frac{\pi+\beta}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right) \times \beta \times 2 \left(\frac{\beta-1}{2}\right)} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (11)$$

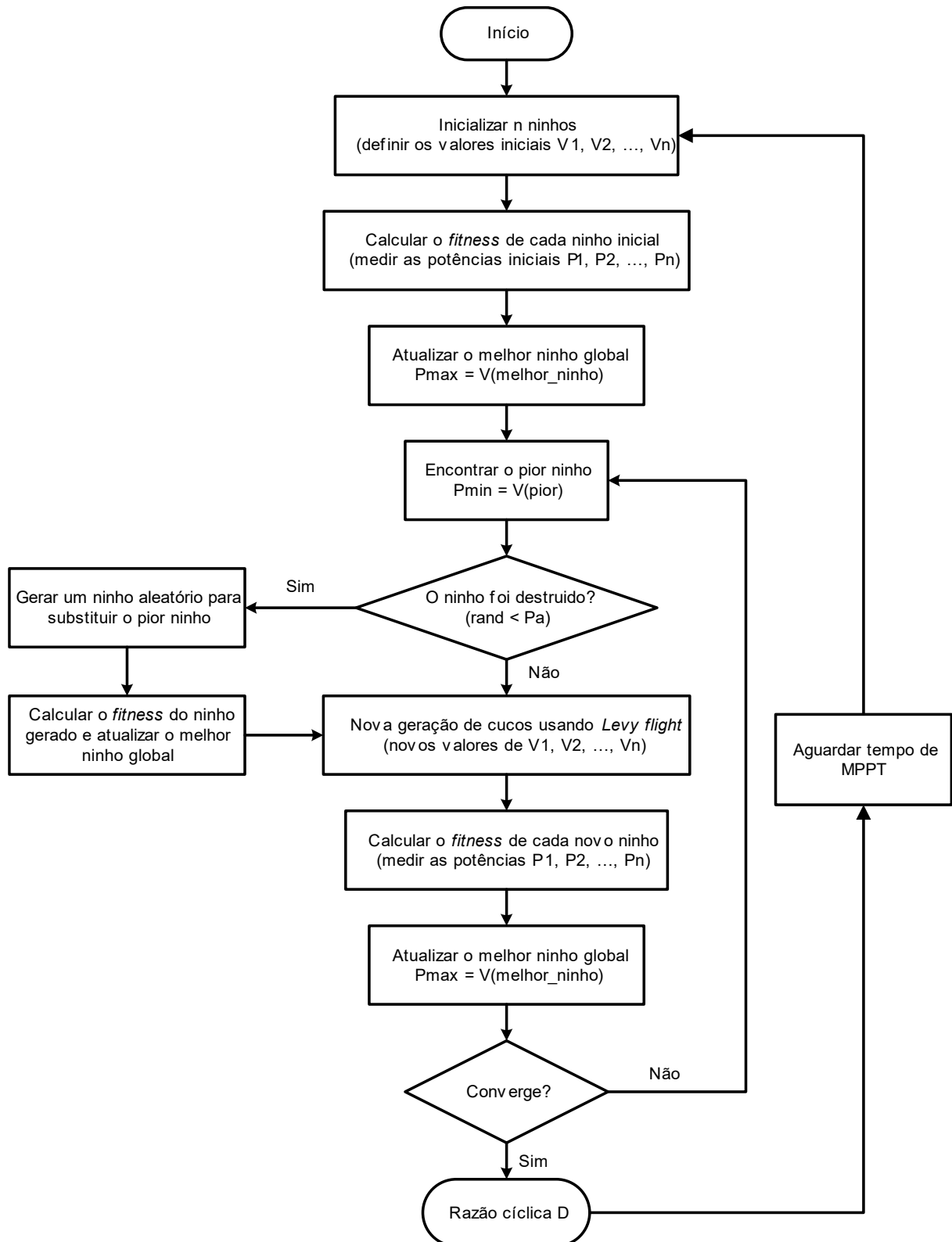
$$\sigma_v = 1 \quad (12)$$

e  $\Gamma$  é a função gama integral.

O *Levy Flight* permite que as partículas façam um “salto longo” e possuam um grande tamanho de passo em relação à posição anterior, o que não apenas diminui a probabilidade de as partículas ficarem presas no ponto de máximo local, mas também aumenta a velocidade de rastreamento (NUGRAHA *et al*, 2019).

O fluxograma do algoritmo CS pode ser visto na figura 10.

Figura 10 - Fluxograma do algoritmo *Cuckoo Search*

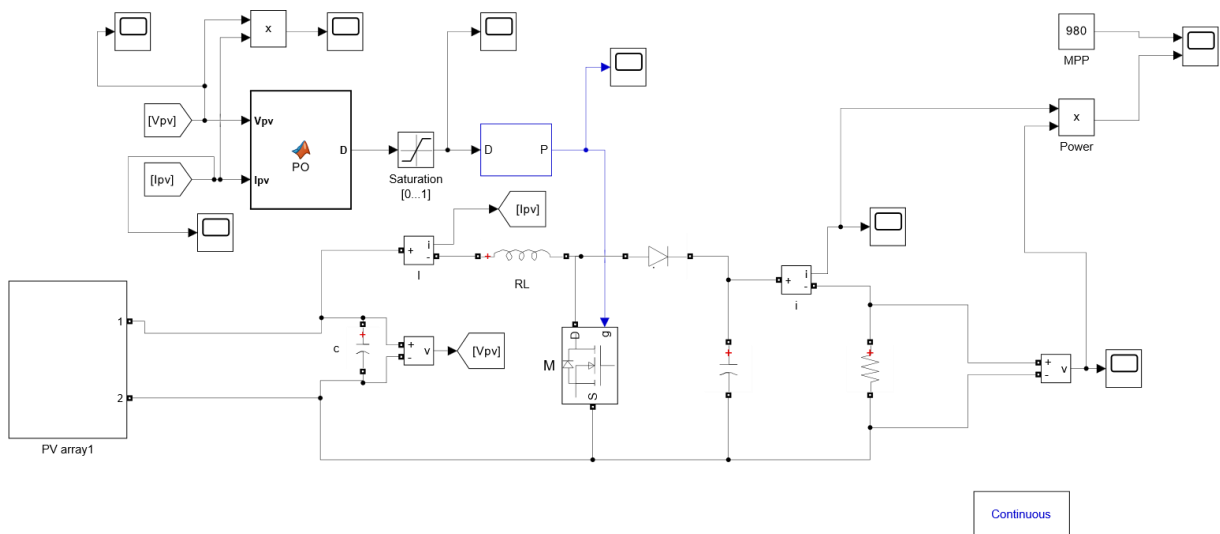


Fonte: Autoria própria (2023)

### 3 ANÁLISE NUMÉRICA DOS ALGORITMOS MPPT

Uma vez que se deseja avaliar o melhor comportamento dos algoritmos MPPT para situações de sombreamento parcial, serão desenvolvidas análises numéricas baseadas em simulações de sistemas fotovoltaicos. As simulações serão realizadas utilizando como base um modelo fotovoltaico desenvolvido por EASWAR (2018) para *Simulink*. Neste modelo, são utilizados três módulos fotovoltaicos idênticos ligados em série e três diodos de *bypass* para que seja possível gerar múltiplos pontos de máxima potência global devido ao sombreamento parcial. Ainda, o modelo conta com um conversor *boost* para elevar a tensão gerada pelos módulos, um bloco de função que emula um DSP onde serão inseridos os algoritmos a serem avaliados e que gerará a razão cíclica, e um timer PWM que transformará esta razão cíclica em um sinal PWM que acionará o MOSFET. A figura 11 abaixo ilustra esse modelo e a figura 12 apresenta o bloco com os módulos fotovoltaicos.

**Figura 11 - Modelo em *Simulink* utilizado nas simulações**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Os valores dos componentes do conversor *boost*, assim como o valor da carga resistiva utilizada no modelo estão resumidos na tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Parâmetros do modelo utilizado nas simulações

Símbolo	Parâmetro	Valor
$L$	Indutância do conversor	1,1478e-3 H
$C$	Capacitância do conversor	0,4676e-3 F
$R_{FET}$	Resistência do MOSFET	1e-3 $\Omega$
$R_{DFET}$	Resistência do diodo interno do MOSFET	1e-3 $\Omega$
$R_D$	Resistência do diodo	1e-3 $\Omega$
$V_D$	Queda de tensão no diodo	0 V
$R_{Load}$	Resistência da carga	53 $\Omega$

Fonte: EASWAR (2018)

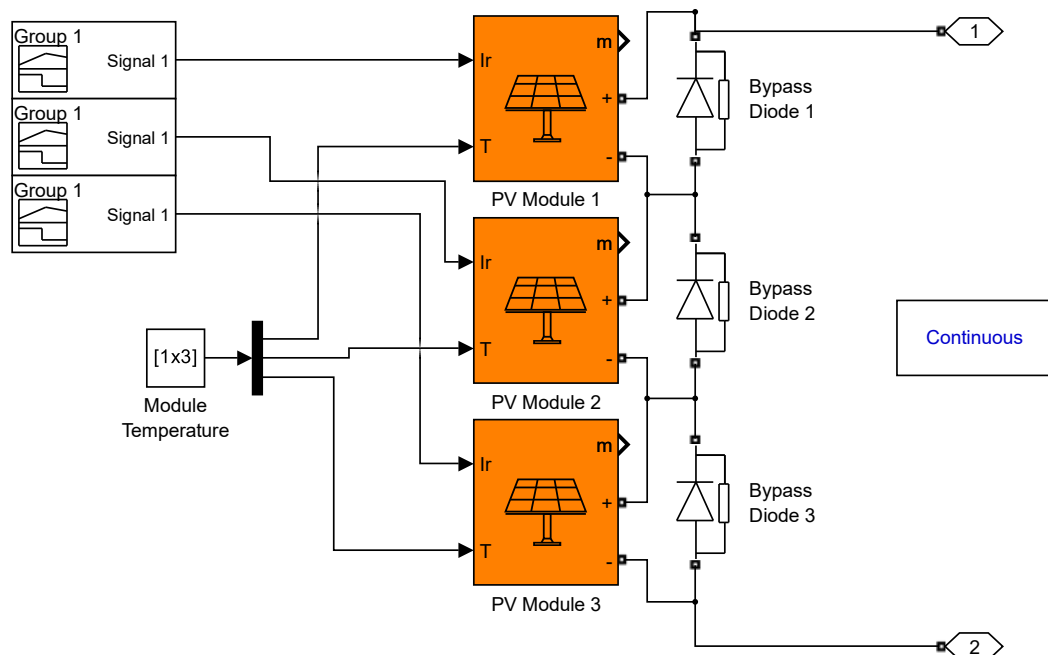
Em todas simulações serão utilizados módulos fotovoltaicos da fabricante Canadian Solar, modelo CS3U-330P de 330,22 W cada, formando uma *string* (arranjo) de 990,66 W. Os dados dos módulos estão resumidos na tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros dos módulos utilizados nas simulações

Símbolo	Parâmetro	Valor
$P_{M\acute{a}x}$	Máxima potência	330,22 W
$N_{Cel}$	Número de células por módulo	72
$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto	45,5 V
$I_{sc}$	Corrente de curto-circuito	9,2 A
$V_{mp}$	Tensão no MPP	38 V
$I_{mp}$	Corrente no MPP	8,69 A
$C_{Voc}$	Coefficiente de temperatura de $V_{oc}$	-0,2924 %/°C
$C_{Isc}$	Coefficiente de temperatura de $I_{sc}$	0,050098 %/°C

Fonte: MathWorks MATLAB (2023)

Figura 12 - Bloco com os módulos fotovoltaicos usados na simulação

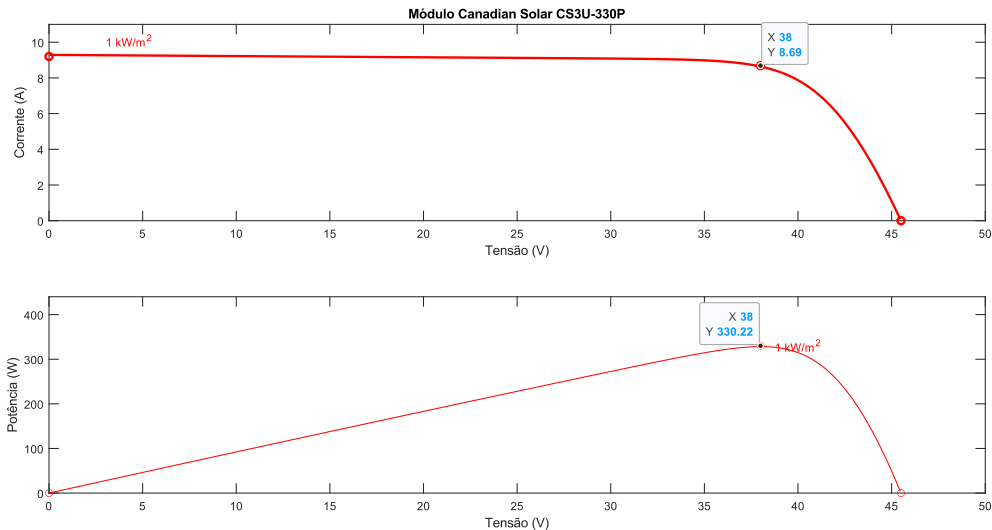


Fonte: Autoria própria (2023)



A figura 13 mostra as curvas I-V e P-V de um destes módulos gerada pelo *Simulink* sob uma temperatura de 25°C e irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>, mostrando os valores de tensão, corrente e potência no ponto de máxima potência.

**Figura 13 - Curvas I-V e P-V do módulo CS3U-330P utilizado na simulação**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

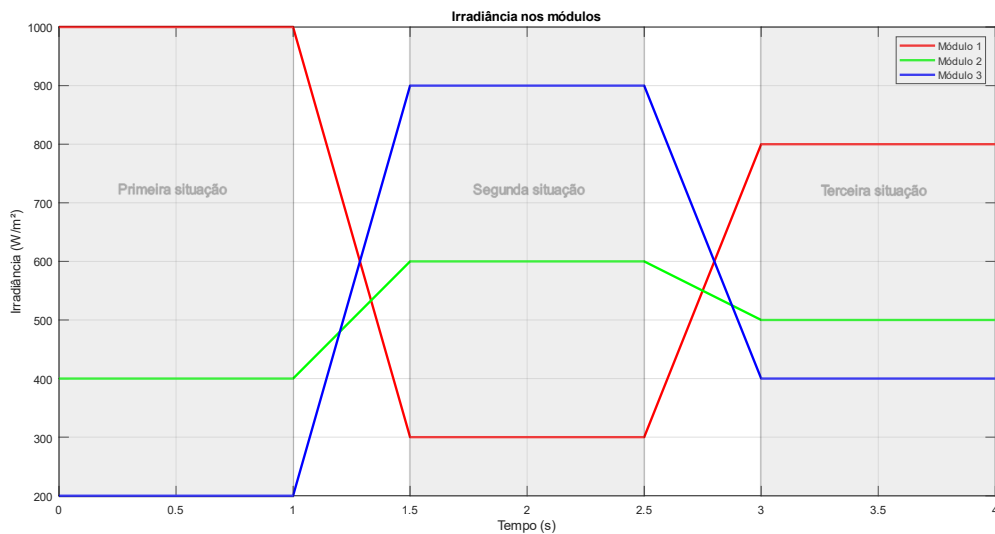
Serão realizadas duas simulações distintas para cada algoritmo avaliado. A primeira simulação será com todos os três módulos numa condição normal de operação, ou seja, sem sombreamento, recebendo uma irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> sob uma temperatura de 25°C. Isto será feito para avaliar o funcionamento dos algoritmos numa condição onde haja apenas um pico na curva P-V.

Na sequência, serão realizadas as simulações sob condições de sombreamento parcial, ou seja, cada módulo estará sob irradiâncias distintas durante um mesmo instante. Haverá três situações de sombreamento parcial, com duração de 1 s cada, sendo que a mudança de uma situação para outra terá a duração de 0,5 s e será em forma de rampa, para que se aproxime mais de uma condição real (uma nuvem passando por cima de um arranjo fotovoltaico, por exemplo), totalizando 4 s de simulação. Como serão utilizados três módulos, cada um com uma irradiância diferente, a curva P-V apresentará três picos, sendo dois pontos de máximo local e um ponto de máximo global. As irradiâncias de cada situação foram escolhidas de tal forma que cada curva P-V seja distinta uma da outra, sendo que na primeira situação

o ponto de máximo global encontra-se à esquerda da curva, na segunda encontra-se no meio e na terceira encontra-se à direita da curva.

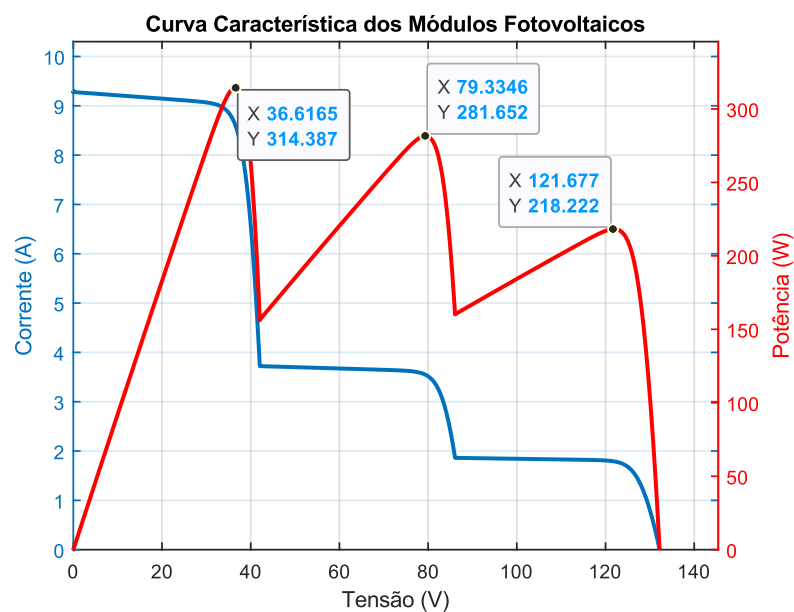
A figura 14 mostra as irradiâncias em cada um dos módulos durante o tempo de simulação e as figuras 15 a 17 ilustram as curvas P-V e I-V em cada situação de sombreamento parcial. Por fim, a figura 18 mostra as curvas características do arranjo em uma situação normal (irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura de  $25^\circ\text{C}$ ).

**Figura 14 - Irradiâncias nos módulos ao longo do tempo**



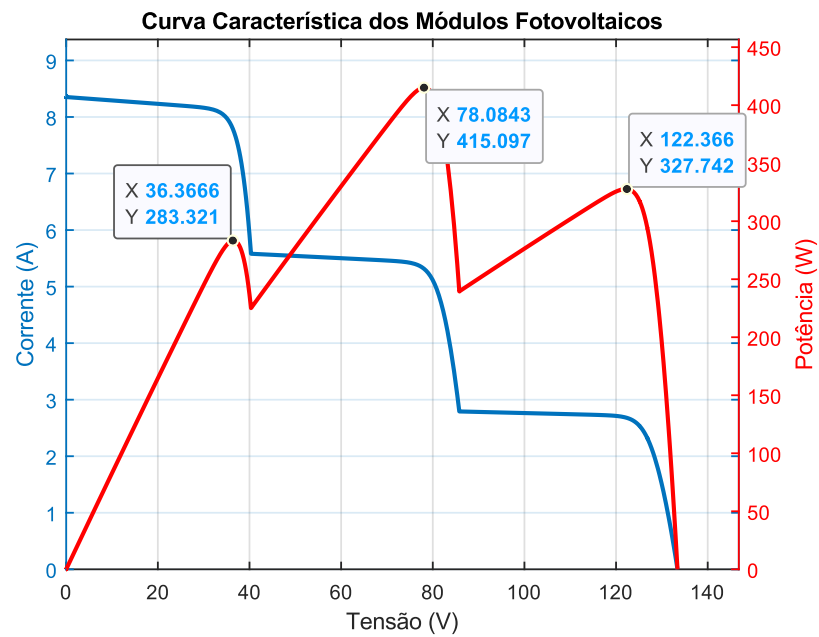
Fonte: Autoria própria (2023)

**Figura 15 - Curvas P-V e I-V dos módulos na primeira situação**



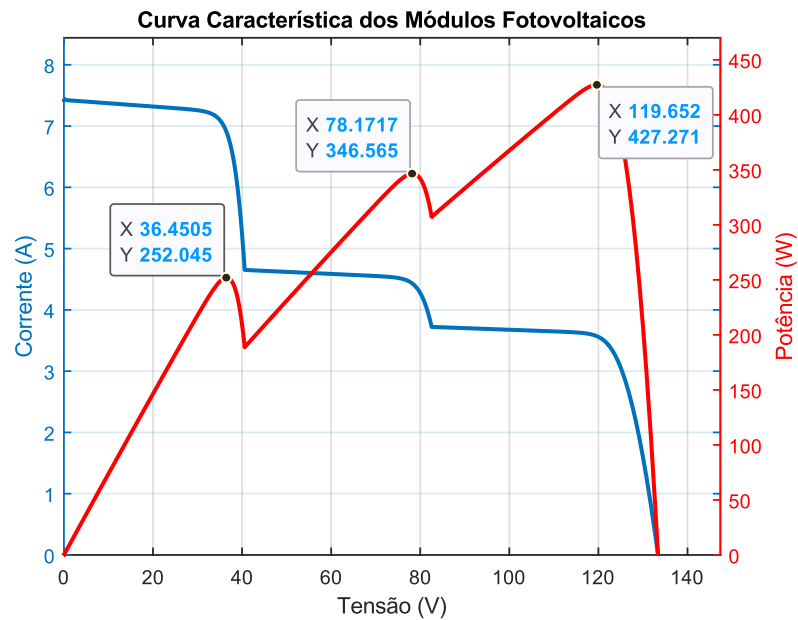
Fonte: Autoria própria (2023)

**Figura 16 - Curvas P-V e I-V dos módulos na segunda situação**



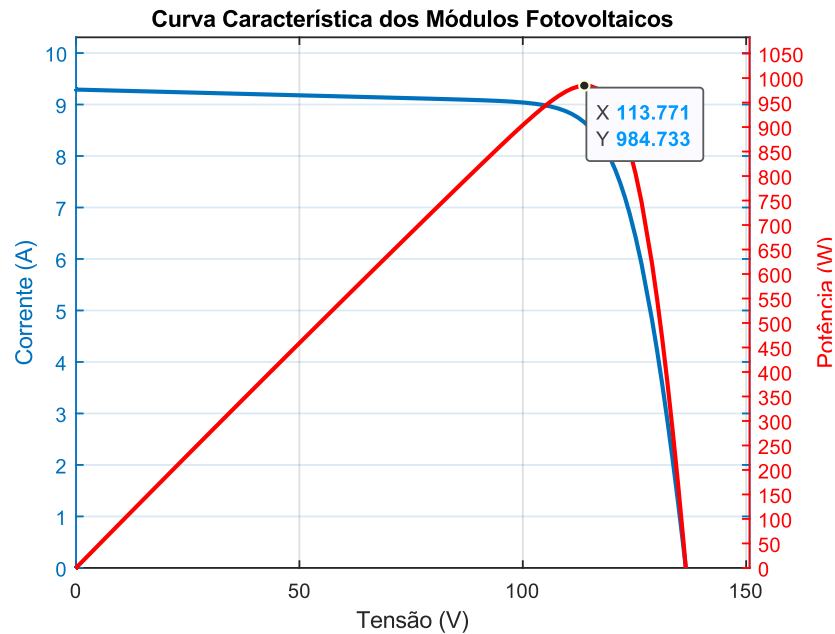
Fonte: Autoria própria (2023)

**Figura 17 - Curvas P-V e I-V dos módulos na terceira situação**



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 18 - Curvas P-V e I-V do arranjo em condições normais



Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.1 Simulações

#### 3.1.1 Algoritmo *Perturb & Observe* (PO)

O algoritmo PO apresentado a seguir foi desenvolvido por ALSHATNAWI (2021) e disponibilizado para acesso público no *MATLAB Central File Exchange* (Troca Central de Arquivos do MATLAB, em tradução literal). Algumas modificações foram feitas para o desenvolvimento das simulações realizadas neste trabalho.

```
function D = PO(Vpv,Ipv)
Dmax=0.9; %valor máximo da razão cíclica
Dmin=0.1; %valor mínimo da razão cíclica
Dinit=0.9; %razão cíclica inicial
deltaD=1e-4; %incremento da razão cíclica
persistent Dpre Ppre Vpre;%valores anteriores de razão cíclica, potência e tensão

%inicialização
if isempty(Dpre)
    Dpre=Dinit;
    Vpre=0;
    Ppre=0;
end
Ppv=Vpv*Ipv; %cálculo da potência a partir dos valores lidos de tensão e corrente
dp=Ppv-Ppre; %variação da potência (potência atual menos a potência anterior)
dv=Vpv-Vpre; %variação da tensão (tensão atual menos a tensão anterior)

if dp~=0 %caso a variação de potência seja diferente de 0
    if(dp>0)
        if(dv<0)
```

```

        D=Dpre+deltaD;
    else
        D=Dpre-deltaD;
    end
else
    if(dv<0)
        D=Dpre-deltaD;
    else
        D=Dpre+deltaD;
    end
end
else
    D=Dpre;
end

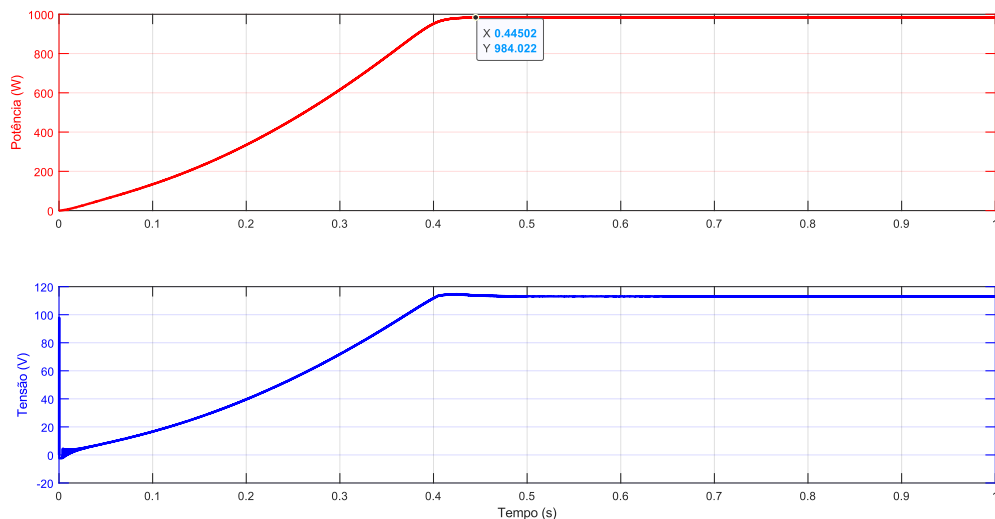
if D>=Dmax || D <= Dmin %esta linha serve para manter a razão cíclica dentro
%dos limites estabelecidos anteriormente
    D=Dpre;
end

Ppre=Ppv;
Vpre=Vpv;
Dpre=D;
end

```

Primeiramente será realizada a simulação em uma situação normal de irradiância e temperatura. A simulação terá a duração de 1 s e o resultado é apresentado na figura abaixo.

**Figura 19 - Resultado da simulação com o algoritmo PO em uma situação normal**

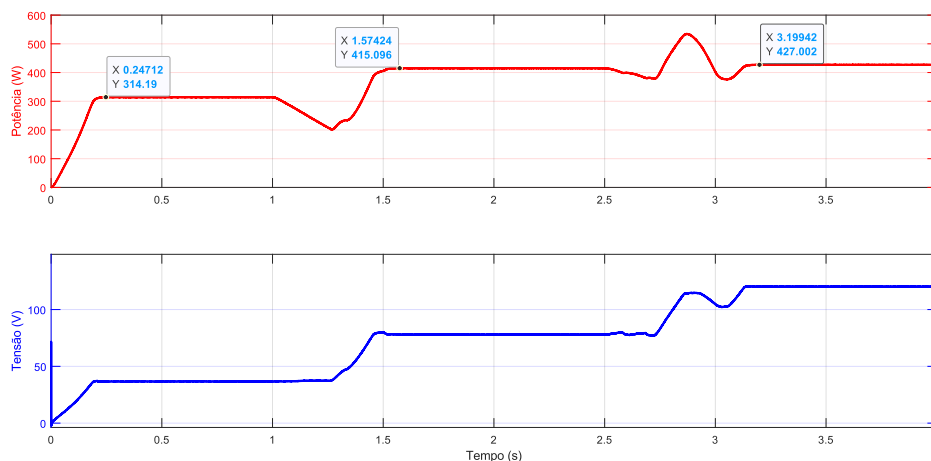


**Fonte: Autoria própria (2023)**

Como pode ser observado na figura 19, o algoritmo PO foi capaz de rastrear o ponto de máxima potência em uma situação normal. Para tanto, o algoritmo levou cerca de 0,445 s para alcançar o valor aproximado do MPP.

Na sequência, será simulada a situação de sombreamento parcial. O resultado pode ser conferido na figura a seguir.

**Figura 20 - Resultado da simulação com o algoritmo PO sob sombreamento parcial**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Conforme observado na curva de potência, o algoritmo PO foi capaz de rastrear todos os pontos de máxima potência global de acordo com as mudanças de irradiância. Na primeira situação de sombreamento parcial, o algoritmo alcançou o GMPP em aproximadamente 0,247 s. Na segunda situação, o GMPP foi alcançado em aproximadamente 0,574 s (0,074 s se formos considerar o momento em que a irradiância termina de variar). Já na terceira situação, o algoritmo levou cerca de 0,699 s para chegar ao GMPP (0,199 s considerando o momento de término da variação de irradiância).

### 3.1.2 Algoritmo *Incremental Conductance* (IC)

A seguir é apresentado o algoritmo IC desenvolvido por LOUZAZNI (2019) com algumas adaptações ao presente trabalho.

```
function D=IC(Vpv, Ipv)

Dmax=0.9; %valor máximo da razão cíclica
Dmin=0.1; %valor mínimo da razão cíclica
Dinit=0.9; %razão cíclica inicial
deltaD=1e-4; %incremento de razão cíclica
```

```

persistent Vpre Ppre Dpre Ipre;

if isempty(Vpre) %testa se as variáveis ainda não foram inicializadas
    Vpre=0;
    Ppre=0;
    Ipre=0;
    Dpre=Dinit;

end

Ppv = Vpv*Ipv;%cálculo da potência a partir dos valores lidos de tensão e corrente
dV = Vpv - Vpre; %variação de tensão
dP = Ppv - Ppre; %variação de potência
dI = Ipv - Ipre; %variação de corrente

    if dV == 0 %se não houver variação de tensão...
        if dI == 0 %se não houver variação de corrente...
            D=Dpre;
        elseif dI>0 %se a variação de corrente for maior que 0...
            D=Dpre - deltaD;
        else %se a variação de corrente for menor que 0...
            D=Dpre + deltaD;
        end
    else
        if dI/dV == -Ipv/Vpv %se a condutância incremental for igual ao negativo
%da condutância instantânea
            D=Dpre;
        elseif dI/dV>-Ipv/Vpv %se a condutância incremental for maior que o
%negativo da condutância instantânea
            D=Dpre - deltaD;
        else %se a condutância incremental for menor que o negativo da condutância
%instantânea
            D=Dpre + deltaD;
        end
    end

end

if D>=Dmax || D <= Dmin %esta linha serve para manter a razão cíclica dentro dos
%limites estabelecidos anteriormente
    D=Dpre;

end

Dpre=D;
Vpre=Vpv;
Ppre=Ppv;
Ipre=Ipv;

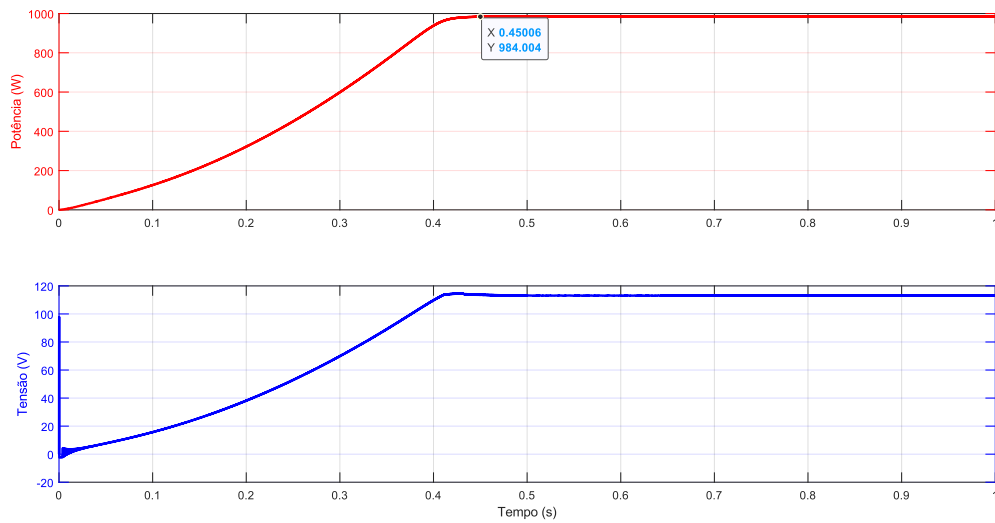
end

```

A primeira simulação será realizada com irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura de 25°C em todos os módulos para averiguação funcionamento do algoritmo em condições normais de temperatura e irradiância solar.

O resultado desta simulação pode ser conferido na figura que se segue.

**Figura 21 - Resultado da simulação com o algoritmo IC em uma situação normal**

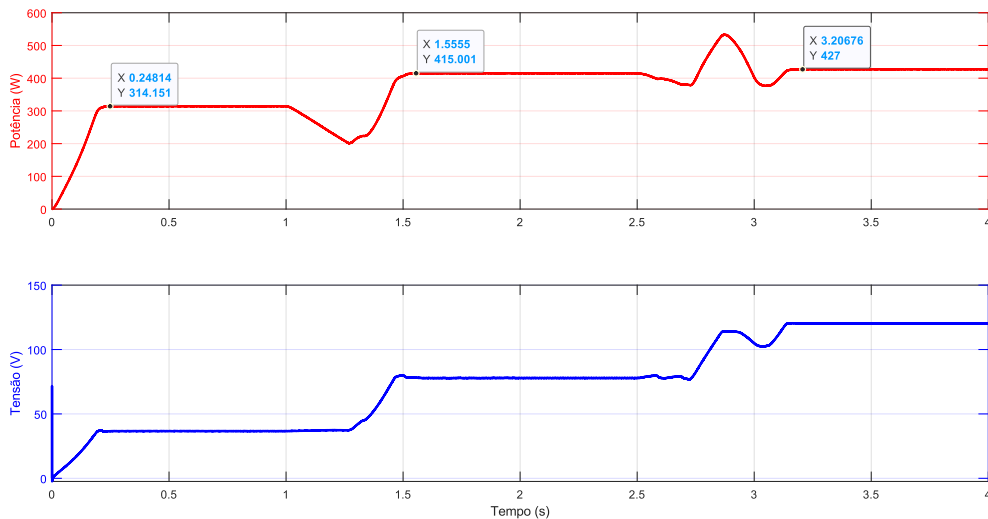


**Fonte: Autoria própria (2023)**

Como pode ser observado na curva acima, o algoritmo IC foi eficaz em rastrear o ponto de máxima potência e levou aproximadamente 0,45 s para alcançar tal ponto.

A próxima simulação foi com os módulos sob sombreamento parcial e o resultado pode ser visto na figura a seguir.

**Figura 22 - Resultado da simulação com o algoritmo IC sob sombreamento parcial**



**Fonte: Autoria própria (2023)**



Sob condições de sombreamento parcial, o algoritmo IC também foi capaz de rastrear o ponto de máxima potência global em todas as situações. No primeiro caso, o algoritmo levou cerca de 0,248 s para alcançar o GMPP. No segundo caso, foi preciso aproximadamente 0,555 s para alcançar este feito (0,055 s se desconsiderarmos o tempo de variação da irradiância). No terceiro caso, o algoritmo precisou de 0,706 s para chegar ao GMPP (0,206 s, considerando a parada de variação da irradiância).

### 3.1.3 Algoritmo *Hill Climbing* (HC)

O algoritmo HC exposto na sequência é uma adaptação do algoritmo PO apresentado anteriormente. Pode-se dizer que é uma versão simplificada daquele algoritmo.

```
function D = HC(Vpv,Ipv)
Dmax=0.9; %valor máximo da razão cíclica
Dmin=0.1; %valor mínimo da razão cíclica
Dinit=0.9; %razão cíclica inicial
deltaD=1e-4; %incremento de razão cíclica
persistent Dpre Ppre Vpre;

%inicialização
if isempty(Dpre) %testa se as variáveis ainda não foram inicializadas
    Dpre=Dinit;
    Vpre=0;
    Ppre=0;
end
Ppv=Vpv*Ipv; %cálculo da potência dos módulos
dp=Ppv-Ppre; %variação da potência dos módulos

if dp~=0 %se a variação de potência for diferente de 0...
    if(Ppv<Ppre) %se a potência atual for menor que a potência anterior
        D=Dpre+deltaD;
    else %se a potência atual for maior que a potência anterior
        D=Dpre-deltaD;
    end

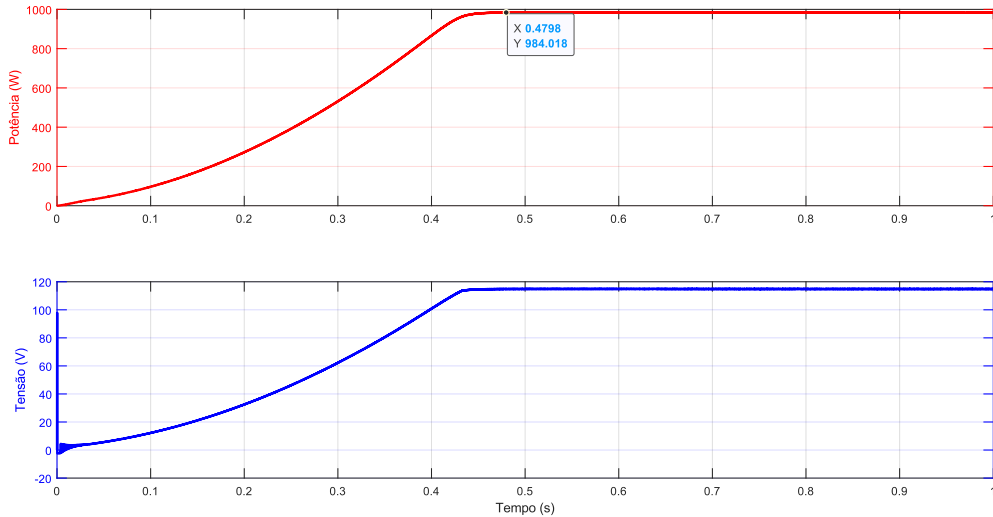
else
    D=Dpre;
end

if D>=Dmax || D <= Dmin %intervalo limite do valor da razão cíclica
    D=Dpre;
end

Ppre=Ppv;
Vpre=Vpv; %atualização dos valores anteriores de potência, tensão e
Dpre=D; %razão cíclica
end
```

O resultado da primeira simulação com os módulos em condições normais é apresentado na figura a seguir.

**Figura 23 - Resultado da simulação com o algoritmo HC em uma situação normal**

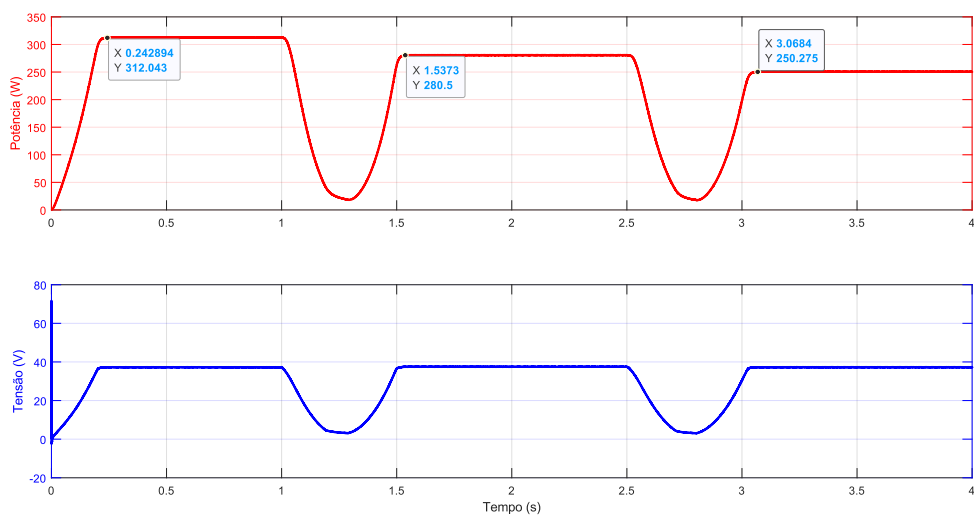


**Fonte: Autoria própria (2023)**

Pode ser observado na figura acima que o algoritmo HC também foi capaz de rastrear o ponto de máxima potência em uma condição normal de irradiância e temperatura. Para tanto, o algoritmo levou cerca de 0,479 s para alcançar este ponto.

Na sequência, foi realizada a simulação com o arranjo sob sombreamento parcial. O resultado pode ser conferido na figura abaixo.

**Figura 24 - Resultado da simulação com o algoritmo HC sob sombreamento parcial**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Na primeira situação, o algoritmo foi capaz de rastrear o ponto de máxima potência global, apesar de ter mantido a potência em um valor um pouco abaixo dos algoritmos anteriores, levando cerca de 0,243 s para alcançar este ponto. Contudo, na segunda situação o algoritmo ficou preso em um ponto de máxima potência local, o pico à esquerda da curva, e também manteve um valor de potência um pouco abaixo do esperado neste pico. Foi necessário 0,537 s para chegar neste ponto (0,037 s desconsiderando o tempo de transição da irradiância). Na terceira situação, o algoritmo também ficou preso em um ponto de máxima potência local (pico à esquerda) e com um valor um pouco abaixo do esperado para este pico, levando aproximadamente 0,568 s para alcançar este ponto (0,068 s considerando a estabilização da variação de irradiância).

#### 3.1.4 Algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO)

O presente algoritmo foi desenvolvido por ALSHAMAA (2020) e disponibilizado para acesso público no *MATLAB Central File Exchange*. Modificações foram feitas no algoritmo para adaptar-se a este trabalho.

```
function D = PSO(Vpv,Ipv)
%definição das variáveis
persistent u; %representa uma partícula
persistent dcurrent; %razão cíclica atual
persistent pbest; %personal best
persistent p; %posição (potência) da partícula
persistent dc; %razão cíclica
persistent v; %velocidade da partícula
persistent counter; %contador
persistent gbest; %global best
if isempty(counter)
    counter=0; %define valor 0 para o contador
end
if isempty(dcurrent)
    dcurrent=0.5; %define o valor 0,5 para a razão cíclica atual
end
if isempty(gbest)
    gbest=0.5; %define o valor 0,5 para o global best
end
if isempty(p)
    p=zeros(4,1);%define um vetor com 4 posições nulas para a posição da partícula
end
if isempty(v)
    v=zeros(4,1); %define um vetor com 4 posições nulas para a velocidade
end
if isempty(pbest)
    pbest=zeros(4,1); %define um vetor com 4 posições nulas para o personal best
end
if isempty(u)
    u=0; %define 0 como o valor inicial de u
```

```

end
if(isempty(dc))
    dc=zeros(4,1);
    dc(1)=0;
    dc(2)=0.3;
    dc(3)=0.5;
    dc(4)=0.9; %define a razão cíclica (solução) inicial de cada partícula
end
if(counter>=1 && counter<300) %realiza 300 contagens
    D=dcurent; %define que a saída é a razão cíclica atual
    counter=counter+1; %incrementa o valor do contador
    return;
end
counter=0;

if(u>=1 && u<=4) %testa todas as partículas
    if((Vpv*Ipv)>p(u)) %se a potência atual for maior que a potência anterior da
%partícula
        p(u)=Vpv*Ipv; %atualiza o valor da potência (posição) da partícula
        pbest(u)=dcurent;
    end
end
u=u+1;
if(u==6)
    u=1;
end
if(u==1) %aqui é definido a saída D de acordo com a partícula analisada
    D=dc(u);
    dcurent=D;
    counter=1;
    return;
elseif(u==2)
    D=dc(u);
    dcurent=D;
    counter=1;
    return;
elseif(u==3)
    D=dc(u);
    dcurent=D;
    counter=1;
    return;
elseif(u==4)
    D=dc(u);
    dcurent=D;
    counter=1;
    return;
elseif(u==5 )
    [m,i]=max(p); %verifica qual partícula possui a melhor posição
    gbest=pbest(i); %atualiza o valor do gbest conforme a melhor posição da
%partícula
    D=gbest;
    dcurent=D;
    counter=1;
    %atualizar velocidade
    v(1)=updatevelocity(v(1),pbest(1),dc(1),gbest)
    v(2)=updatevelocity(v(2),pbest(2),dc(2),gbest)
    v(3)=updatevelocity(v(3),pbest(3),dc(3),gbest)
    v(4)=updatevelocity(v(4),pbest(4),dc(4),gbest)
    %atualizar razão cíclica

```

```

    dc(1)=updateduty(dc(1),v(1))
    dc(2)=updateduty(dc(2),v(2))
    dc(3)=updateduty(dc(3),v(3))
    dc(4)=updateduty(dc(4),v(4))

    return;

else

    D=0.1;

end

end

function vfinal=updatevelocity(velocity,pobest,d,gwbest)

%parâmetros do PSO

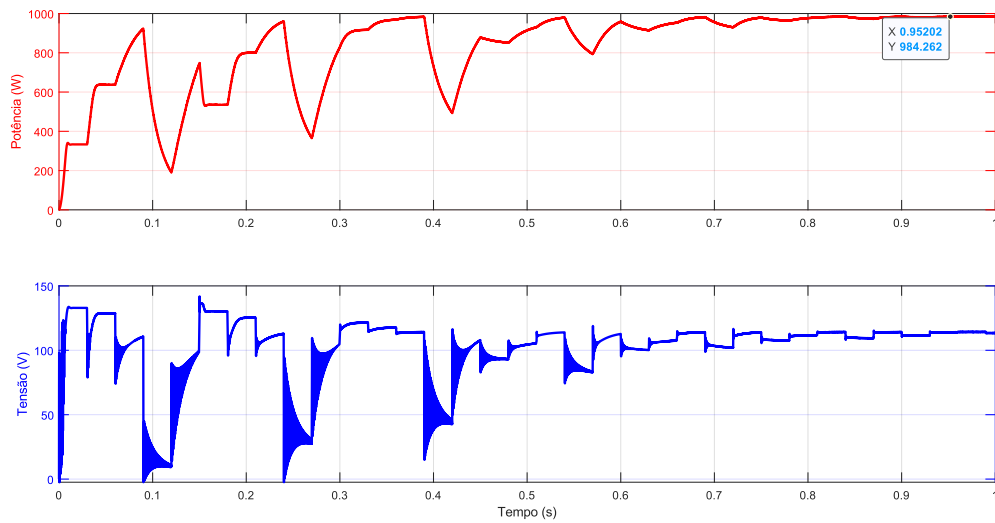
w=0.4;           % inércia inicial
c1=0.5;         % coeficiente de aprendizado pessoal
c2=0.5;         % coeficiente de aprendizado global

%função para atualizar a velocidade da partícula
vfinal = (w*velocity)+(c1*rand(1)*(pobest-d))+(c2*rand(1)*(gwbest-d));
end
%função para atualizar a razão cíclica (solução)
function dfinal=updateduty(d,velocity)
dup=d+velocity;
if(dup>1)
    dfinal=1;
elseif(dup<0)
    dfinal=0;
else
    dfinal=dup;
end
end

```

Seguindo o mesmo padrão, a primeira simulação foi realizada com o arranjo em condições ambientais normais. O resultado encontra-se na figura abaixo.

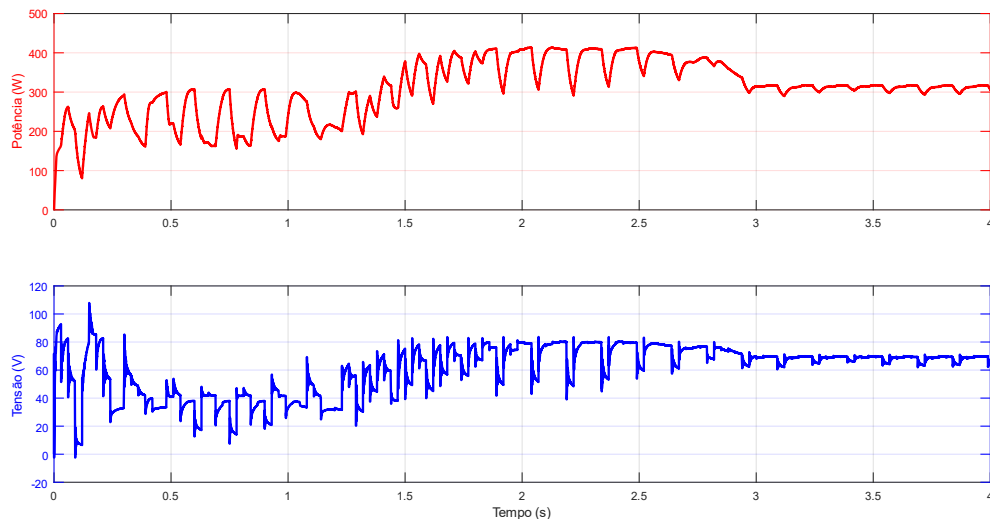
**Figura 25 - Resultado da simulação com o algoritmo PSO em uma situação normal**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Conforme pode ser notado na figura acima, o algoritmo PSO também foi capaz de rastrear o ponto de máxima potência em uma situação normal. Contudo, demandou bem mais tempo do que os algoritmos avaliados anteriormente, necessitando de 0,952 s para alcançar o valor aproximado do MPP. Também é notável a grande variação de potência até que algoritmo se estabilize.

**Figura 26 - Resultado da simulação com o algoritmo PSO sob sombreamento parcial**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Avaliando a curva acima, é nítido que o algoritmo PSO utilizado nesta simulação, além de não conseguir rastrear o ponto de máxima potência global, possui

demasiada oscilação quando submetido a sombreamento parcial. Mesmo modificando alguns parâmetros no algoritmo (c1 e c2), não houveram melhorias na curva de potência, continuando a não rastrear o MPP e apresentando grandes oscilações.

### 3.1.5 Algoritmo *Cuckoo Search* (CS)

O algoritmo CS foi desenvolvido por EASWAR (2018) e disponibilizado para acesso público no *MATLAB Central File Exchange*. Modificações foram feitas no algoritmo para adaptar-se a este trabalho.

```
function D = Cuckoo(Vpv,Ipv)
%definição das variáveis
persistent u;
persistent dcurrent;
persistent p;
persistent dc;
persistent dbest;
persistent counter;
persistent iworst; %usado para determinar o pior ninho
persistent discover;
if isempty(discover)
    discover=0;
end
if isempty(counter)
    counter=0;
end
if isempty(dcurrent)
    dcurrent=0.5;
end
if isempty(iworst)
    iworst=0;
end

if isempty(dbest)
    dbest=0;
end
if isempty(p)
    p=zeros(4,1);
end
if isempty(u)
    u=0;
end
if isempty(dc)
    dc=zeros(4,1);
    dc(1)=0;
    dc(2)=0.3;
    dc(3)=0.5;
    dc(4)=0.9;
end
if(counter>=1 && counter<150)
    D=dcurrent;
```

```

        counter=counter+1;
        return;
end
counter=0;

if(u>=1 && u<=4)
    p(u)=Vpv*Ipv;
end
u=u+1;
if(u==7)
    u=1;
end
if(u==1)
    D=dc(u);
    dcurrent=D;
    counter=1;
    return;
elseif(u==2)
    D=dc(u);
    dcurrent=D;
    counter=1;
    return;
elseif(u==3)
    D=dc(u);
    dcurrent=D;
    counter=1;
    return;
elseif(u==4)
    D=dc(u);
    dcurrent=D;
    counter=1;
    return; %até aqui o algoritmo é semelhante ao PSO
elseif(u==5 || u==6 ) %se u for igual a 5 ou 6...
    if(u==5)
        if(rand(1)>0.25) %se "número aleatório" for maior que 0,25
            discover=1;
            [m,i]=max(p) %verifica qual ninho é melhor (maior potência)
            dbest=dc(i); %atualiza melhor razão cíclica
            %determinar o pior ninho (menor potência)
            [m,iworst]=min(p);
            %construir um novo ninho
            dc(iworst)=levyflight(dbest,dc(iworst)); %cria um novo ninho através
%da função "levy flight"
            D=dc(iworst);
            dcurrent=D;
            counter=1;
            return;
        else
            u=u+1; %se "número aleatório" for menor ou igual a 0,25.
            [m,i]=max(p) %nesse caso o ninho não é destruído
            dbest=dc(i);
            D=dbest;
            dcurrent=D;
            counter=1;
            dc(1)=levyflight(dbest,dc(1)) %atualização da razão cíclica
            dc(2)=levyflight(dbest,dc(2))
            dc(3)=levyflight(dbest,dc(3))
            dc(4)=levyflight(dbest,dc(4))
            return;
        end
    end
end

```



```

        end

    else
        %calcular a nova potência do novo ninho
        p(iworst)=Vpv*Ipv;
        %determinar o melhor ninho
        [m,i]=max(p);
        dbest=dc(i);
        D=dbest;
        dcurrent=D;
        counter=1;
        %atualizar razão cíclica
        dc(1)=levyflight(dbest,dc(1))
        dc(2)=levyflight(dbest,dc(2))
        dc(3)=levyflight(dbest,dc(3))
        dc(4)=levyflight(dbest,dc(4))
        discover=0;
        return;
    end

else
    D=0.1

end

end

end
% definição da função levy flight
function dfinal=levyflight(dbest,d)
beta=3/2;
kcoeff=0.8;
sigmau=(gamma(1+beta)*sin(pi*beta/2)/(gamma((1+beta)/2)*beta*2^((beta-1)/2)))^(1/beta);
sigmav=1;
u=normrnd(0,(sigmau)^2);
v=normrnd(0,(sigmav)^2);
dup=d+(kcoeff*(abs(u)/((abs(v))^(1/beta)))*(dbest-d));

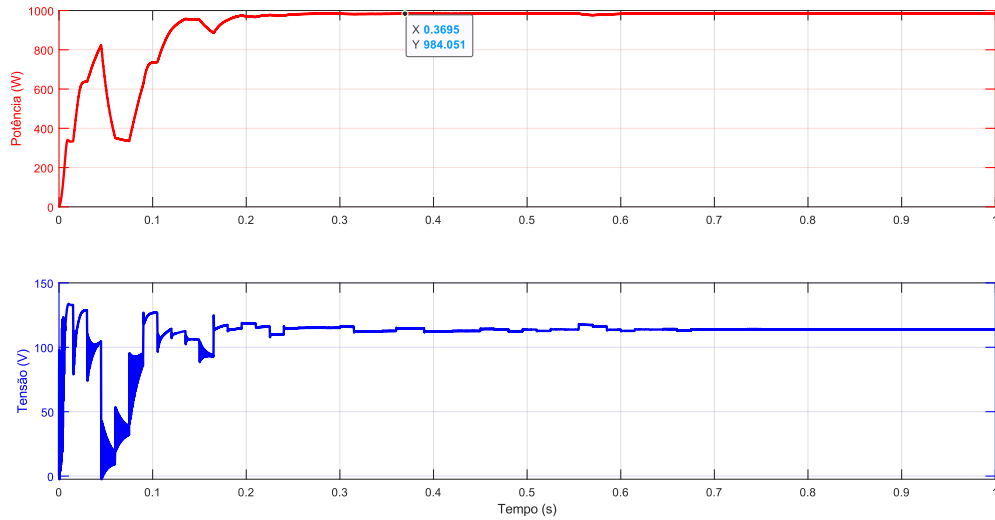
if(dup>1)
    dfinal=1;
elseif(dup<0)
    dfinal=0;
else
    dfinal=dup;
end
end

```

Novamente será primeiro realizada a simulação do algoritmo com o arranjo em condições normais para verificar seu funcionamento.

O resultado da simulação é apresentado na próxima figura.

**Figura 27 - Resultado da simulação com o algoritmo CS em uma situação normal**

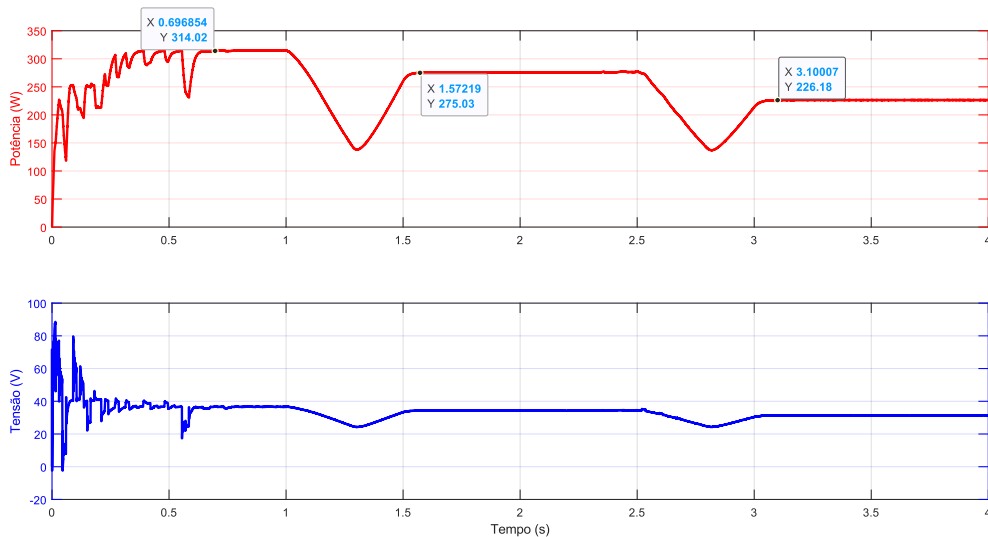


**Fonte: Autoria própria (2023)**

Como pode-se observar na curva acima, o algoritmo CS, assim como os demais, foi plenamente capaz de rastrear o ponto de máxima potência em uma situação onde não há variação de irradiância, levando em torno de 0,369 s para tanto.

Por fim, o algoritmo foi submetido à simulação com o arranjo sob sombreamento parcial. A figura abaixo ilustra o resultado.

**Figura 28 - Resultado da simulação com o algoritmo CS sob sombreamento parcial**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Observando a figura acima, pode-se notar que, para a primeira situação de sombreamento parcial, o algoritmo foi capaz de rastrear o ponto de máxima potência global, levando cerca de 0,696 s para isto. Também é possível ver alguma oscilação até que o algoritmo estabilize neste ponto. Em seguida, na segunda situação, o algoritmo ficou preso em um ponto de máxima potência local (o pico à esquerda) e ainda manteve a potência em um valor um pouco abaixo do valor deste pico, levando aproximadamente 0,572 s para rastrear este ponto (0,072 s considerando o momento em que a irradiância para de variar). Por fim, na terceira situação de sombreamento parcial, o algoritmo também ficou preso em um LMPP (primeiro pico à esquerda) e necessitou de 0,6 s para tanto (0,1 s desconsiderando o tempo de variação da irradiância).

### 3.2 Comparação entre os algoritmos

Primeiramente será feito o comparativo entre os algoritmos na situação em que não há sombreamento parcial, ou seja, a irradiância manteve-se constante em  $1000 \text{ W/m}^2$  durante todo o período de simulação.

Os resultados das simulações estão resumidos na tabela 3 a seguir.

**Tabela 3 - Comparativo entre os algoritmos sob condições normais**

<b>Algoritmo</b>	<b>O algoritmo foi capaz de rastrear o MPP?</b>	<b>Tempo para rastrear o MPP</b>
PO	Sim	0,445 s
IC	Sim	0,450 s
HC	Sim	0,479 s
PSO	Sim	0,952 s
CS	Sim	0,369 s

**Fonte: Autoria própria (2023)**

Como pode ser visto, todos os algoritmos foram capazes de rastrear o ponto de máxima potência. Quando comparamos os algoritmos PO, IC e HC, vemos que não há diferença significativa entre os tempos necessários para rastrear tal ponto. Ainda, observando a curva de potência destas três simulações, nota-se que não há oscilações de potência antes de alcançar o MPP e nem depois.

Já quando comparamos os algoritmos PSO e CS, vemos que há certa oscilação na curva de potência de ambos até alcançar o MPP, ficando estável após este ponto ter sido rastreado. Contudo, tal oscilação é bem maior com o algoritmo

PSO. Ainda, esta abordagem foi a que levou mais tempo para chegar ao MPP quando comparado com todos os demais algoritmos, levando quase o dobro de tempo do que o HC.

O algoritmo CS, apesar de apresentar um pouco de oscilação na curva de potência, foi o mais rápido para rastrear o MPP quando observamos as demais abordagens, sendo 17,08% mais veloz do que o algoritmo PO (o segundo mais rápido).

Na tabela 4 estão resumidos os resultados das simulações com o arranjo sob sombreamento parcial. A tabela mostra quais algoritmos foram capazes de rastrear o ponto de máxima potência global e quais os tempos necessários para que cada um rastreasse o MPP, independentemente de ser um ponto de máxima potência local ou global.

**Tabela 4 - Comparativo entre os algoritmos sob sombreamento parcial**

Algoritmo	O algoritmo foi capaz de rastrear o GMPP?			Tempo para rastrear o GMPP/LMPP*		
	1ª situação	2ª situação	3ª situação	1ª sit.	2ª sit.	3ª sit.
PO	Sim	Sim	Sim	0,247 s	0,574 s	0,699 s
IC	Sim	Sim	Sim	0,248 s	0,555 s	0,706 s
HC	Sim	Não	Não	0,243 s	0,537 s	0,568 s
PSO	Não	Não	Não	-	-	-
CS	Sim	Não	Não	0,696 s	0,572 s	0,600 s

\*LMPP na 2ª e 3ª situação dos algoritmos HC e CS.

**Fonte: A autoria própria (2023)**

Observando os algoritmos PO e IC, nota-se que ambos foram eficazes em rastrear o ponto de máxima potência global nas três situações de sombreamento parcial, não havendo diferenças significativas entre os tempos necessários para o rastreamento do GMPP. Além disso, não há oscilações significativas nas suas curvas de potência, ocorrendo uma pequena oscilação somente nos momentos de transição das irradiâncias.

O algoritmo HC conseguiu rastrear o ponto de máxima potência global apenas na primeira situação de sombreamento, tendo ficado preso em pontos de máximo local nas outras duas situações. Além disso, os valores de potência no MPP ficaram um pouco abaixo do que era esperado, mas nada significativo. Por outro lado, os tempos necessários para alcançar o MPP nas três situações foi ligeiramente menor do que nas duas abordagens citadas anteriormente. Também, a potência apenas oscilou durante os momentos de mudança em rampa das irradiâncias.

Já o algoritmo PSO não foi capaz de rastrear o ponto de máxima potência global e nem local. Ainda, apresentou demasiada oscilação de potência durante toda a simulação. Mesmo alterando alguns parâmetros do algoritmo, não houve mudança significativa no resultado da simulação.

Por fim, o algoritmo CS foi eficaz em rastrear o GMPP na primeira situação, apesar de apresentar alguma oscilação no início da simulação. Além disso, o tempo para rastrear o ponto de máxima potência global foi mais do que o dobro quando comparado com os algoritmos PO, IC e HC. Já nas duas situações subsequentes, o algoritmo ficou preso em pontos de máxima potência local e, além disso, manteve os valores de potência abaixo do esperado em ambas as situações.

Os resultados apresentados nas análises realizadas foram obtidos a partir de simulações computacionais em *Simulink*. A configuração de simulação considerou solucionador com passo variável ("solver = variable step") com passo máximo de iteração igual a 100us. O tempo de rastreamento dos algoritmos pode ser afetado pelo passo de iteração escolhido, da mesma forma que pelo parâmetro de alteração da razão cíclica ( $\Delta D$ ). Em situações em que  $\Delta D$  é muito pequeno, são necessárias mais iterações para atingir o MPP. Assim, é possível que ao reduzir ou restringir o número de iterações por segundo destes algoritmos, o tempo de rastreamento se altere significativamente em relação aos resultados aqui apresentados. Desta forma, ao buscar uma implementação experimental é importante definir os valores de tempo de amostragem e passo de iteração do MPPT apropriadamente de modo a permitir um rastreamento em tempo viável para a aplicação.

## 4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram avaliadas diferentes abordagens no rastreamento do ponto de máxima potência em um sistema fotovoltaico sujeito à diferentes situações de sombreamento parcial. O objetivo foi fazer um comparativo entre alguns dos algoritmos citados na literatura a fim de determinar quais são os que possuem os melhores desempenhos nas situações comentadas anteriormente. Para tanto, foram realizadas simulações utilizando o software *Simulink*.

O capítulo 2 fez uma apresentação sobre os módulos fotovoltaicos, a organização das células em série/paralelo, o que ocorre quando uma célula é sombreada e o funcionamento dos diodos de *by-pass*. Além disso, foi explicado o que é o ponto de máxima potência e como o sombreamento parcial afeta a curva P-V do sistema, gerando vários pontos de máximo local. Ainda, foi feita uma explanação a respeito dos algoritmos utilizados na simulação seguido de um fluxograma detalhando o funcionamento de cada um.

No capítulo 3 foi detalhado como foram realizadas as simulações, qual o modelo utilizado, qual tipo de módulo fotovoltaico foi escolhido, as curvas de irradiância às quais os módulos foram submetidos. Também, foram apresentados os códigos dos algoritmos utilizados dentro do *Simulink* para a realização das simulações.

Primeiramente foram realizadas simulações com o arranjo fotovoltaico sob irradiância constante de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura de  $25^\circ\text{C}$  para verificar o funcionamento dos algoritmos. Sob tais condições, todos os algoritmos avaliados foram capazes de rastrear o ponto de máxima potência. Os algoritmos PO, IC e HC tiveram comportamentos bem semelhantes, necessitando de aproximadamente o mesmo tempo para alcançar o MPP e com nenhuma oscilação de potência. O algoritmo PSO foi o que mais demorou para chegar ao MPP e apresentou grande oscilação até rastrear tal ponto. Já o CS foi o mais rápido para chegar ao ponto de máxima potência, ainda que tenha apresentado alguma oscilação nos momentos iniciais, porém bem menos do que o PSO.

Nas condições de sombreamento parcial, apenas as abordagens PO e IC foram capazes de rastrear o ponto de máxima potência global em todas as situações e com tempo semelhante. O HC e o CS apenas rastrearam o GMPP em uma situação (sendo o CS o mais lento), enquanto o algoritmo PSO não foi capaz de rastrear

nenhum ponto de máxima potência e ainda apresentou grandes oscilações na curva P-V. Desta forma, pode-se concluir que os algoritmos PO e IC foram as que tiveram o melhor desempenho dentre as abordagens avaliadas, sendo o PO o algoritmo mais simples e mais rápido entre ambos, verificação que corrobora com o fato de tal abordagem ser tão utilizada nos sistemas inversores atuais.

#### **4.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Como sugestões para possíveis trabalhos seguindo a mesma linha desta pesquisa, algumas possibilidades podem ser consideradas:

- Implementação experimental dos algoritmos;
- Análise detalhada do impacto dos parâmetros de cada algoritmo na velocidade de convergência e estabilidade da solução;
- Uso de algoritmos combinados com técnicas de controle para melhor regulação da tensão.
- Uso de algoritmos combinados com técnicas de passo variável da razão cíclica e/ou lógica fuzzy.

## REFERÊNCIAS

- ABDULMAWJOOD, K.; ALSADI, S.; REFAAT, S. S.; MORSI, W. G. **"Characteristic Study of Solar Photovoltaic Array Under Different Partial Shading Conditions"** in IEEE Access, vol. 10, pp. 6856-6866, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3142168.
- ALRUBAIE, A. J.; AL-KHAYKAN, A.; MALIK, R. Q.; TALIB, S. H.; MOUSA, M. I.; KADHIM, A. M. **"Review on MPPT Techniques in Solar System"** 2022 8th International Engineering Conference on Sustainable Technology and Development (IEC), 2022, pp. 123-128, doi: 10.1109/IEC54822.2022.9807500.
- ALSHAMAA, Mohammad. MATLAB Central File Exchange. **PSO for MPPT PV**. 2020. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/76857-pso-for-mppt-pv>>. Acesso em: 13/05/2023.
- ALSHATNAWI, Mahdi. MATLAB Central File Exchange. **MPPT method based on P&O for PV application under PSC**. 2021. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/93635-mppt-method-based-on-p-o-for-pv-application-under-psc>>. Acesso em: 08/05/2023.
- ANAND, R.; SWAROOP, D.; KUMAR, B. **"Global Maximum Power Point Tracking for PV Array under Partial Shading using Cuckoo Search"** 2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON), Sonapat, India, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PIICON49524.2020.9113004.
- BANU, I. V.; BENIUGĂ, R.; ISTRATE, M. **"Comparative analysis of the perturb-and-observe and incremental conductance MPPT methods"** 2013 8TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING (ATEE), Bucharest, Romania, 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/ATEE.2013.6563483.
- CHECHKIN, A.; METZLER, R.; KLAFTER, J.; GONCHAR, V. **"Introduction to the Theory of Lévy Flights"**. ResearchGate, 2008. 10.1002/9783527622979.ch5.
- CHINYOKA, S.; NCUBE, T.; IROEGBU, M.; ALAREFI, S. M. S. **"Partial Shading Performance Evaluation of Bifacial PV Array Configurations"** 2020 IEEE International Women in Engineering (WIE) Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE), Bhubaneswar, India, 2020, pp. 485-488, doi: 10.1109/WIECON-ECE52138.2020.9397975.
- DA ROSA, A. R. O.; GASPARIN, F. P. **Panorama da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil**. Revista Brasileira de Energia Solar, a. 7, v. 7, n. 2, p. 140 – 147, 2017. ISSN 25262831.
- DEGLA, A.; SAIDJ, S. H.; BOUMECHETA, S.; HAZIL, O.; GHERBI, A.; ARAB, A. H. **"Comparison and analysis of five MPPT techniques for boost converter based PV system under real input deviations"** 2020 6th International Symposium on New and Renewable Energy (SIENR), 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/SIENR50924.2021.9631910.



EASWAR, Aravind. MATLAB Central File Exchange. **MPPT using Cuckoo Search Algorithm (CSA) for partially shaded PV array**. 2018. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/67744-mppt-using-cuckoo-search-algorithm-csa-for-partially-shaded-pv-array>>. Acesso em: 13/05/2023.

ELAVARASAN, R. M. et al. **"A Comprehensive Review on Renewable Energy Development, Challenges, and Policies of Leading Indian States With an International Perspective"** in IEEE Access, vol. 8, pp. 74432-74457, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988011.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 24/08/2022.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **O que é energia?** 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/ABCDEnergia>>. Acesso em: 23/08/2022.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2030>>. Acesso em: 02/09/2022.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>>. Acesso em: 02/09/2022.

FAROOQUI, S. A.; KHAN, R. A.; ISLAM, N.; AHMED, N. **"Cuckoo Search Algorithm and Artificial Neural Network-based MPPT: A Comparative Analysis"** 2021 IEEE 8th Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON), Dehradun, India, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/UPCON52273.2021.9667651.

GUPTA, A. K.; SAXENA, R. **"Review on widely-used MPPT techniques for PV applications"** 2016 International Conference on Innovation and Challenges in Cyber Security (ICICCS-INBUSH), 2016, pp. 270-273, doi: 10.1109/ICICCS.2016.7542321.

JUSOH, A. B. **"Variable Step Size Perturb and Observe MPPT for PV Solar Applications"**, TELKOMNIKA journal, vol. 13, no. 1, pp. 1-12, March 2015.

KHAIRI, M. N. S.; BAKHARI, N. A. B.; SAMAT, A. A. A.; KAMARUDIN, N.; HUSSIN, M. H. MD.; TAJUDIN, A. I. **"MPPT Design Using PSO Technique for Photovoltaic System"** 2023 IEEE 3rd International Conference in Power Engineering Applications (ICPEA), Putrajaya, Malaysia, 2023, pp. 131-136, doi: 10.1109/ICPEA56918.2023.10093161.

KIM, E.; WARNER, M.; BHATTACHARYA, I. **"Adaptive Step Size Incremental Conductance Based Maximum Power Point Tracking (MPPT)"** 2020 47th IEEE

Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Calgary, AB, Canada, 2020, pp. 2335-2339, doi: 10.1109/PVSC45281.2020.9300956.

LI, Y.; JU, D.; WANG, Y.; WU, J. -e.; DONG, Z. "**A global optimization method for multiple peak photovoltaic MPPT**" IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017, pp. 554-559, doi: 10.1109/IECON.2017.8216097.

LOUZAZNI, Mohamed. MATLAB Central File Exchange. **MPPT incremental conductance algorithm under irradiance**. 2019. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/72316-mppt-incremental-conductance-algorithm-under-irradiance>>. Acesso em: 08/05/2023.

MOHANTY, S.; MANGARAJ, M. "**Analytical Modeling and Prediction of Global Peak for Partial Shading of PV Modules for a PV System**" 2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Kanpur, India, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCCNT45670.2019.8944643.

MOREIRA, H. S.; GOMES DOS REIS, M. V.; DE ARAUJO, L. S.; PERPETUO E OLIVEIRA, T.; VILLALVA, M. G. "**An experimental comparative study of perturb and observe and incremental conductance MPPT techniques for two-stage photovoltaic inverter**" 2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), Juiz de Fora, Brazil, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/COBEP.2017.8257370.

National Renewable Energy Laboratory - NREL. **Documenting a Decade of Cost Declines for PV Systems**. 2021. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/news/program/2021/documenting-a-decade-of-cost-declines-for-pv-systems.html>>. Acesso em: 31/08/2022.

NUGRAHA, D. A.; LIAN, K. L.; SUWARNO. "**A Novel MPPT Method Based on Cuckoo Search Algorithm and Golden Section Search Algorithm for Partially Shaded PV System**" in Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 42, no. 3, pp. 173-182, Summer 2019, doi: 10.1109/CJECE.2019.2914723.

PAUL, S.; DEY, T.; SAHA, P.; DEY, S.; SEN, R. "**Review on the development scenario of renewable energy in different country**" 2021 Innovations in Energy Management and Renewable Resources (52042), 2021, pp. 1-2, doi: 10.1109/IEMRE52042.2021.9386748.

PERA, D.; SILVA, J. A.; COSTA, S.; SERRA, J. M. "**Investigating the impact of solar cells partial shading on photovoltaic modules by thermography**" 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Washington, DC, USA, 2017, pp. 1979-1983, doi: 10.1109/PVSC.2017.8366497.

PIVETA, Marcelo. **Investigação de estruturas de controle para inversores monofásicos aplicados em geração distribuída**. 2021. 125 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

RAZIYA, F.; AFNAZ, M.; JESUDASON, S.; RANAWEERA, I.; WALPITA, H. "**MPPT Technique Based on Perturb and Observe Method for PV Systems Under Partial Shading Conditions**" 2019 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCOn), 2019, pp. 474-479, doi: 10.1109/MERCOn.2019.8818684.

REZK, Hegazy; ELTAMALY, Ali M. "**A comprehensive comparison of different MPPT techniques for photovoltaic systems**", Solar energy, vol. 112, pp. 1-11, 2015.

SANTOS, C. C. C. **Algoritmo de Limitação de Potência para Conversores Fotovoltaicos**. 2020. 72 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2020.

SHAMS, I.; MEKHILEF, S.; TEY, K. S. "**Improved Social Ski Driver-Based MPPT for Partial Shading Conditions Hybridized With Constant Voltage Method for Fast Response to Load Variations**," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 12, no. 4, pp. 2255-2267, Oct. 2021, doi: 10.1109/TSTE.2021.3088119.

SOUALMIA, A.; CHENNI, R. "**Comparative Study of Three Algorithms (MPPT) Applied to Photovoltaic Systems**," International Journal of Innovation and Applied Studies, vol. 26, no. 4, pp. 1147–1158, July 2019.

TAN, Rodney. MATLAB Central File Exchange. **PV String Partial Shading Model**. 2023. Disponível em: < <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/62743-pv-string-partial-shading-model>>. Acesso em: 08/05/2023.

WEN, H.; LIN, C.; CHU, G. "**Differential Power Processing based Photovoltaic Power Systems: A Review**" 2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), 2019, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICOON.2019.8934880.

YIN, W.; TONG, Q.; XU, Y.; ZHANG, Y.; ZHOU, Y. "**Partial Shading Impact on PV Array System and the Hard-Shading Location with BP Algorithm**" 2019 7th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid), Newcastle, NSW, Australia, 2019, pp. 21-26, doi: 10.1109/icSmartGrid48354.2019.8990864.