

**UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**LEONARDO LOPES DE OLIVEIRA**

**REDE DE ANÁLISE PARACONSISTENTE (RAP) APLICADA EM SISTEMAS DE  
RASTREAMENTO DE *SET POINT* DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT) EM  
CONVERSORES DE ENERGIA ELÉTRICA FOTOVOLTAICA**

**SANTOS/SP**

**2026**

**LEONARDO LOPES DE OLIVEIRA**

**REDE DE ANÁLISE PARACONSISTENTE (RAP) APLICADA EM SISTEMAS DE  
RASTREAMENTO DE *SET POINT* DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT) EM  
CONVERSORES DE ENERGIA ELÉTRICA FOTOVOLTAICA**

Dissertação apresentada a Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr. João Inácio da Silva filho.

**SANTOS/SP  
2026**

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

621.31244  
O48r

Oliveira, Leonardo Lopes de.

Rede de análise paraconsistente (RAP) aplicada em sistemas de rastreamento de set point de máxima potência (MPPT) em conversores de energia elétrica fotovoltaica / Leonardo Lopes de Oliveira.

2026.

75 f.

Orientador: Dr. João Inácio da Silva Filho.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Santa Cecília, Programa de pós-graduação em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2026.

1. Energia solar. 2. Células fotovoltaicas. 3. MPPT. 4. Lógica Paraconsistente anotada. 5. Redes de análise Paraconsistente I. Silva Filho, João Inácio da. II. Rede de análise paraconsistente (RAP) aplicada em sistemas de rastreamento de set point de máxima potência (MPPT) em conversores de energia elétrica fotovoltaica.

Elaborada via formulário eletrônico, desenvolvido pelo SIBi Unisanta, com dados informados pelo autor(a). Bibliotecário responsável: Rafael de Micco Junior - CRB/8 - 7318

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho à minha mãe e a meu pai pelo grande exemplo de honestidade, agradeço a minha esposa que está sempre ao meu lado a meu filho Samuel e a Deus a quem deposito toda a minha fé e confiança.*

## **AGRADECIMENTOS**

Um agradecimento muito especial a minha esposa Stefany Lopes de Souza que eu amo muito e que está comigo em todos os momentos, que participou de toda a minha carreira acadêmica e na construção da minha carreira profissional.

Agradeço ao meu filho Samuel Lopes de Souza que eu amo muito.

A minha mãe, Marlene Juliana de Oliveira, que sempre esteve comigo e que seu exemplo de honestidade e fé me inspiram.

Em memória de meu pai, Waldemar Lopes de Oliveira, quem me deu o maior exemplo de honestidade e dedicação ao trabalho.

Aos meus professores da Faculdade Senai de Santos que sempre me deram muito suporte e apoio, em especial os professores Sérgio Luiz da Conceição, Roberto Blanco Lorenzo, Humberto de Souza Megda, Dr. Fabricio Ramos da Fonseca, e estender os agradecimentos a todos profissionais da instituição.

Ao meu professor orientador Dr. João Inácio da Silva Filho pela paciência e pelos grandes ensinamentos e orientações fundamentais para o desenvolvimento desse projeto, e mais que orientação uma grande inspiração.

Gostaria de agradecer aos professores Dr. Carlos José de Lima e Dr. Maurício Conceição Mário, Prof. Dr. Cláudio Rodrigo Torres e estender os meus agradecimentos a todos o corpo docente do mestrado.

Agradeço a Dona Sandra Helena Aparecida de Araújo pelo apoio e suporte administrativo que me foi dado durante o curso, e estender esse agradecimento a todos os profissionais da infraestrutura do UNISANTA que sem eles nada seria possível.

Agradeço ao Grupo Cesari pelo imenso apoio aos meus estudos e pelas oportunidades profissionais através da confiança em mim depositada, agradecer também a meus amigos e grandes profissionais Jamerson Cleiton Mota Barbosa, Luiz Alberto Veras Macchi, Jairo Alvarenga de Azevedo e Marco Aurélio Pereira Lemes.

E por fim, agradeço a Deus por ter aberto os caminhos e me permitido lutar pelos meus objetivos. Ele que sempre esteve comigo onde ninguém mais poderia, que abre as portas que ninguém pode fechar, e que colocou em minha vida a fé e a esperança para vencer mais este desafio. Agradeço também por ter colocado ao meu lado as pessoas certas, à minha frente minhas maiores inspirações.

## RESUMO

Os sistemas de rastreamento de ponto de máxima potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*) são fundamentais para otimizar a conversão de energia em sistemas fotovoltaicos, ajustando continuamente a tensão do conversor para manter a relação ideal entre corrente e tensão maximizando drasticamente a eficiência do sistema fotovoltaico. Neste trabalho, apresenta-se o desenvolvimento de um novo algoritmo MPPT InC-LPA2v, baseado na Lógica Paraconsistente anotada com anotação de dois valores, que pertence à família das lógicas não clássicas, e se destaca por realizar o tratamento de sinais contraditórios. O algoritmo foi estruturado em uma nova arquitetura computacional, implementada por meio de uma Rede de Análise Paraconsistente (RAP). Essa estrutura fundamentada na LPA2v foi concebida a partir dos métodos MPPT convencionais Perturba e Observa (P&O) e Condutância Incremental (InC). Os testes foram realizados por meio de simulações com configurações de 1 a 6 painéis fotovoltaicos de 320 W em 1000 W/m<sup>2</sup> STC, incluindo cenários com sombreamento parcial e os resultados demonstraram a superioridade do MPPT InC-LPA2v em relação aos métodos convencionais, alcançando uma eficiência global média de 27,509%. O algoritmo MPPT InC-LPA2v apresentou ganhos de 0,486% em relação ao método Condutância Incremental e 0,104% sobre o Perturba e Observa, além de uma vantagem significativa de 22,716% comparado ao sistema sem MPPT. Esses resultados indicam que o MPPT InC-LPA2v é uma estrutura computacional promissora para o aprimoramento do desempenho e da eficiência de sistemas fotovoltaicos, contribuindo para o avanço das técnicas de otimização da geração de energia elétrica solar com a qualidade de ser limpa e renovável.

**Palavras-chave:** energia solar, células fotovoltaicas, MPPT, lógica Paraconsistente anotada, redes de análise Paraconsistente

## ABSTRACT

Maximum Power Point Tracking (MPPT) systems are essential for optimizing energy conversion in photovoltaic systems. They continuously adjust the converter's voltage to maintain the ideal current-voltage relationship, thereby drastically maximizing the photovoltaic system's efficiency. This work presents the development of a new MPPT algorithm, the InC-PAL2v, based on Paraconsistent Annotated Logic with annotation of two values, which belongs to the family of non-classical logics and stands out for its ability to handle contradictory signals. The algorithm was structured within a new computational architecture, implemented through a Paraconsistent Analysis Network (PANnet). This structure, based in PAL2v, was conceived from the conventional Perturb and Observe (P&O) and Incremental Conductance (InC) MPPT methods. Tests were conducted via simulations with configurations of 1 to 6 photovoltaic panels of 320 W under 1000 W/m<sup>2</sup> STC, including scenarios with partial shading. The results demonstrated the superiority of the MPPT InC-PAL2v over conventional methods, achieving an overall average efficiency of 27.509%. The MPPT InC-PAL2v algorithm showed gains of 0.486% compared to the Incremental Conductance method and 0.104% over the Perturb and observe method, in addition to a significant advantage of 22.716% compared to the system without MPPT. These results indicate that the MPPT InC-PAL2v is a promising computational structure for enhancing the performance and efficiency of photovoltaic systems, contributing to the advancement of optimization techniques for solar power generation, which has the quality of being clean and renewable.

**Keywords:** solar energy, photovoltaic cells, MPPT, Paraconsistent Annotated Logic, Paraconsistent Analysis Networks.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica, incluindo fonte de corrente, diodo, resistência série $R_{series}$ e resistência <i>shunt</i> $R_{shunt}$ .....	20
Figura 2 - Configuração de diodos de bloqueio e bypass em arranjo fotovoltaico, com fluxo de corrente ( $I_{pv}$ ) e tensão ( $V_{pv}$ ) em diferentes padrões de sombreamento parcial. ....	25
Figura 3 - Deposição intensa de poeira em módulos .....	25
Figura 4 - Representação do sistema fotovoltaico com controle MPPT .....	27
Figura 5 - Fluxograma do algoritmo perturba e observa (P&O).....	30
Figura 6 - Os 5 estados lógicos do algoritmo perturba e observa em relação a curva P-V.....	31
Figura 7 - Fluxograma do algoritmo condutância incremental (InC).....	33
Figura 8 - Os 5 estados lógicos do algoritmo condutância incremental em relação a curva P-V.....	33
Figura 9 - Reticulado de Hasse.....	39
Figura 10 - Determinação do Grau de Certeza de valor resultante real - GC <sub>r</sub> no reticulado da LPA2v. ....	41
Figura 11 - NAP nó de análise paraconsistente .....	43
Figura 12 - Transformação de Grau de Certeza GC em Grau de Evidência resultante $\mu E$ .....	44
Figura 13 - RAP rede de análise paraconsistente.....	44
Figura 14 - estratégia de otimização das entradas do algoritmo MPPT InC-LPA2v.....	51
Figura 15 - Estratégia de otimização do RAP InC-LPA2v .....	51
Figura 16 - Polaridade padrão do eixo X do reticulado LPA2v .....	52
Figura 17 - Inversão de polaridade do eixo X do reticulado LPA2v.....	53
Figura 18 - Representação da inversão de polaridade do eixo X do reticulado em relação ao MPP na curva P-V. ....	56
Figura 19 - Representação da inversão de polaridade do eixo X do reticulado em relação ao duty cycle (ciclo de trabalho do conversor CC/CC do tipo boost). ....	57
Figura 20 - Representação gráfica do algoritmo MPPT InC-LPA2v .....	57
Figura 21 - Fluxograma do algoritmo MPPT InC-LPA2v .....	58
Figura 22 - Projeto do algoritmo MPPT InC-LPA2v no matlab .....	59

Figura 24 - Comparação da geração de energia de cada algoritmo sistema com 1 painel 320W em 1000W/m <sup>2</sup> STC.....	61
Figura 25 - Comparação da curva de geração de energia de cada algoritmo sistema com 1 painel 320W em 1000W/m <sup>2</sup> STC. ....	62
Figura 26 - Comparação da potência de pico na curva de geração de energia de cada algoritmo sistema com 1 painel 320W em 1000W/m <sup>2</sup> STC. ....	63
Figura 27 - Gráfico de comparação da potência de pico na curva de geração de energia de cada algoritmo sistema com 1 painel 320W em 1000W/m <sup>2</sup> STC. ....	63
Figura 28 - comparação do ciclo de trabalho dos conversores de cada algoritmo em regime permanente com 1 painel de 320W em 1000W/m <sup>2</sup> STC .....	65
Figura 29 - Amplitude das ondulações (ripples) do ciclo de trabalho do conversor CC/CC para os três algoritmos de MPPT .....	65
Figura 30 - Comparação do rastreamento do ponto de máxima potência em 200W/m <sup>2</sup> a esquerda o algoritmo P&O à direita o algoritmo MPPT InC-LPA2v.....	67
Figura 31 - Comparação do rastreamento do ponto de máxima potência em 400W/m <sup>2</sup> a esquerda o algoritmo P&O à direita o algoritmo MPPT InC-LPA2v.....	67
Figura 32 - Comparação do rastreamento do ponto de máxima potência em 600W/m <sup>2</sup> a esquerda o algoritmo P&O à direita o algoritmo P&O InC-LPA2v. ....	68
Figura 33 - Comparação do rastreamento do ponto de máxima potência em 800W/m <sup>2</sup> a esquerda o algoritmo P&O à direita o algoritmo MPPT InC-LPA2v.....	68
Figura 34 - Comparação do rastreamento do ponto de máxima potência em 1000W/m <sup>2</sup> a esquerda o algoritmo P&O à direita o algoritmo P&O InC-LPA2v. ....	69
Figura 35 - Comparação do rastreamento do ponto de máxima potência em 1200W/m <sup>2</sup> a esquerda o algoritmo P&O à direita o algoritmo MPPT InC-LPA2v.....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Algoritmo Perturba e Observa: processo geral de decisão sendo $\Delta V_n$ a variação da tensão sendo a tensão atual medida menos a tensão anterior medida ( $V_{(n)} - V_{(n-1)}$ ), o $\Delta P_{PV,n}$ a variação da potência do painel fotovoltaico sendo ( $P_{PV,n} - P_{PV,(n-1)}$ ), e $V_{out,n}$ a tensão atual de saída do conversor CC/CC.....	30
Tabela 2 - Condutância incremental: processo geral de decisão sendo $\Delta V_n$ a variação da tensão sendo ( $V_n - V_{(n-1)}$ ) $G_{PV,n}$ a condutância atual do painel fotovoltaico $\Delta G_{PV,n}$ a variação da condutância sendo ( $G_{PV,n} - G_{PV,(n-1)}$ ) e $\Delta I_{PV,n}$ a variação da corrente elétrica do painel fotovoltaico sendo ( $I_n - I_{(n-1)}$ ). .....	32
Tabela 3 - Dados do painel fotovoltaico utilizado nos experimentos do algoritmo P&O InC-LPA2v.....	59
Tabela 4 - Ganho do Algoritmo MPPT InC-LPA2v em relação aos demais algoritmos.	64
Tabela 5 - Eficiência Global dos algoritmos em testes avançados.....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ACS – *Automatic Control System* (Sistema de Controle Automático)
- AIE – Agência Internacional de Energia
- ANN – *Artificial Neural Network* (Rede Neural Artificial)
- CA – Corrente Alternada (*Alternating Current – AC*)
- CC – Corrente Contínua (*Direct Current – DC*)
- c-Si – *Crystalline Silicon* (Silício Cristalino)
- DC–DC – *Direct Current to Direct Current Converter* (Conversor CC–CC))
- FLC – *Fuzzy Logic Control* (Controle por Lógica Fuzzy)
- FOV – *Fractional Open Circuit Voltage* (Fração da Tensão de Circuito Aberto)
- FSC – *Fractional Short-Circuit Current* (Fração da Corrente de Curto-Circuito)
- GA – *Genetic Algorithm* (Algoritmo Genético)
- Gc – Grau de Certeza
- Gcr – Grau de Certeza Real
- GPS – *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global)
- HC – *Hill Climbing* (Escalada de Colina)
- IEC – *International Electrotechnical Commission* (Comissão Eletrotécnica Internacional)
- InC – *Incremental Conductance* (Condutância Incremental)
- InC-LPA2v – *Incremental Conductance* baseado em LPA2v
- LPA2v – Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de Dois Valores
- MATLAB – *Matrix Laboratory* (Ambiente de simulação e programação matemática)
- MOSFET – *Metal–Oxide–Semiconductor Field–Effect Transistor* (Transistor de Efeito de Campo de Metal–Óxido–Semicondutor)
- MPP – *Maximum Power Point* (Ponto de Máxima Potência)
- MPPT – *Maximum Power Point Tracking* (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência)
- NAP – Nó de Análise Paraconsistente
- P&O – *Perturb and Observe* (Perturba e Observa)
- PV – *Photovoltaic* (Fotovoltaico)
- RAP – Rede de Análise Paraconsistente
- STC – *Standard Test Conditions* (Condições Padrão )

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\alpha$ – Fator de idealidade do diodo
- $d$ – Distância geométrica entre os graus de certeza e contradição
- $D$ – Duty cycle (razão cíclica do conversor CC–CC)
- $\Delta I$ – Variação de corrente
- $\Delta t$ – Intervalo de tempo considerado (s)
- $\Delta V$ – Variação de tensão
- $E_1, E_2$ – Funções auxiliares do algoritmo InC-LPA2v
- $E_{pvtotal}$ – Energia total gerada no período (Wh)
- $E_{total}$ – Energia total gerada (Wh)
- $e$ – Constante de Euler
- $F$ – Estado falso
- $G_c$ – Grau de certeza
- $G_{cr}$ – Grau de certeza real
- $G_{ct}$ – Grau de contradição
- $I$ – Corrente elétrica
- $I_D$ – Corrente do diodo
- $I_{PV}$ – Corrente de saída do arranjo fotovoltaico
- $I_S$ – Corrente gerada pela absorção de fótons pela célula fotovoltaica
- $I_{shunt}$ – Corrente no resistor de derivação
- $I_0$ – Corrente de saturação reversa do diodo
- $K_T$ – Coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito
- $k$ – Constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K)
- $\lambda$ – Grau de evidência desfavorável
- $\mu$ – Grau de evidência favorável
- $\mu_{ER}$ – Grau de evidência resultante real
- $\mu_{er}$ – Grau de evidência resultante
- $n_p$ – Número de módulos conectados em paralelo
- $n_s$ – Número de módulos conectados em série
- $n_{pv}$ – Eficiência global fator de capacidade do sistema fotovoltaico
- $P_{max}$ – Potência máxima nominal do sistema (W)

$P_{PV,avg}$ – Potência média de saída do sistema fotovoltaico (W)  
 $P_{PV,max}$ – Potência máxima alcançável (W)  
 $q$ – Carga elementar do elétron ( $1,602 \times 10^{-19}$  C)  
 $R_{Serie}$ – Resistência série da célula fotovoltaica ( $\Omega$ )  
 $R_{Shunt}$ – Resistência shunt (paralela) da célula fotovoltaica ( $\Omega$ )  
 $S$ – Irradiância solar incidente ( $W/m^2$ )  
 $S_{STC}$ – Irradiância em condições padrão de teste ( $W/m^2$ )  
 $T$ – Temperatura absoluta (K)  
 $T_{STC}$ – Temperatura em condições padrão de teste (K)  
 $T$ – Estado inconsistente (–)  
 $\tau$ – Conjunto das constantes de anotação da LPA2v  
 $V$ – Tensão elétrica (V)  
 $V_{PV}$ – Tensão de saída da célula fotovoltaica (V)  
 $\perp$ (ou  $\perp$ ) – Estado paracompleto (indeterminado)  
 $\eta$ – Eficiência global do sistema fotovoltaico (%)

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 A importância da energia renovável.....	16
1.2 Eficiência em sistemas fotovoltaicos.....	17
1.3 Principais componentes do sistema Fotovoltaico .....	18
1.3.1 Célula Solar fotovoltaica .....	19
1.3.1.1 Análise básica do circuito da célula fotovoltaica .....	20
1.3.1.2 módulos e arranjos fotovoltaicos.....	22
1.3.2 Conversor CC-CC .....	23
1.4 Condição de sombreamento parcial .....	23
1.5 Maximum Power Point Tracking (MPPT) .....	26
1.5.1 Métodos de rastreamento de ponto de máxima potência mais utilizados .....	29
1.5.1.1 Algoritmo Perturba e observa (MPPT P&O).....	29
1.5.1.2 Algoritmo condutância incremental (MPPT InC) .....	31
1.6 Lógica Paraconsistente Anotada .....	34
1.6.1 O conceito filosófico da lógica Clássica.....	34
1.6.2 Lógicas não clássicas.....	35
1.6.3 Lógica Paraconsistente .....	36
1.6.3.1 Lógica Paraconsistente Anotada .....	37
1.6.3.2 Representação da Lógica Paraconsistente Anotada .....	38
1.6.3.3 NAP nó de análise paraconsistente .....	42
1.6.3.4 RAP rede de análise paraconsistente .....	44
1.7 Objetivos .....	45
1.7.1 Objetivo Geral .....	45
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>47</b>
2.1 Modelagem do Algoritmo MPPT InC-LPA2v .....	47
2.2 Princípio de funcionamento do algoritmo MPPT LPA2v .....	49
2.2.1 Estratégia de otimização das entradas do InC-LPA2v .....	50

2.2.2 Estratégia de inversão de polaridade do eixo X do reticulado do MPPT InC-LPA2v.....	52
2.3 Experimento de desenvolvimento do algoritmo MPPT InC-LPA2v.....	58
2.3.1 Principais fórmulas utilizadas .....	60
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>61</b>
3.1 Algoritmo InC-LPA2v.....	61
3.2 Teste de funcionamento no ambiente de desenvolvimento.....	61
3.2.1 Ciclo de trabalho do conversor CC/CC (Duty Cycle).....	64
3.2.2 Demonstração do rastreamento do ponto de máxima potência .....	66
3.3 Eficiência Global dos algoritmos em testes avançados.....	69
<b>4 CONCLUSÕES .....</b>	<b>72</b>
4.1 Trabalhos futuros .....	72
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>73</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 A importância da energia renovável

O desenvolvimento de energias limpas e renováveis é uma excelente alternativa à geração convencional, como os combustíveis fósseis, diretamente associados à poluição ambiental e ao aquecimento global (SHITTU et al., 2019 APUD LI et al., 2020).

A energia solar, como forma de geração limpa, tem baixo impacto no meio ambiente, ausência de resíduos poluentes, operação silenciosa, baixo custo de manutenção e alta confiabilidade (SHITTU ET AL., 2019B APUD LI et al., 2020).

Devido ao grande potencial de geração do sistema fotovoltaico, grandes produtores investem em seu desenvolvimento, o que gera intensa competição no setor e estende a competitividade para o campo da pesquisa científica (DU PLESSIS; STRAUSS; RIX, 2020).

A obtenção de energia fotovoltaica destaca-se entre as alternativas renováveis mais promissoras para substituir os combustíveis fósseis no contexto da crise energética (WEI et al., 2022).

Sistemas com fontes renováveis nas indústrias podem reduzir expressivamente as emissões de gases de efeito estufa. Portanto, é essencial que o modelo tradicional de fornecimento de energia migre para alternativas sustentáveis, acompanhado pelo desenvolvimento e adoção de novas tecnologias industriais (MEKHILEF, SAIDUR & SAFARI, 2011).

A desvantagem do sistema fotovoltaico em relação a outros sistemas de geração de energia é sua baixa eficiência de conversão, o que leva pesquisadores a buscarem desenvolver métodos para aumentar o desempenho do sistema por meio de investigações que possam resultar em novas tecnologias (ZHANG et al., 2012 APUD LI et al., 2020).

Segundo Li et al. (2020) esses estudos envolvem, por exemplo, pesquisas para o desenvolvimento de algoritmos de leitura do sistema, controladores mais eficientes e concentradores de luz.

Dessa forma, o sistema fotovoltaico é uma das grandes esperanças da humanidade quando se trata de energia limpa e renovável, e vem recebendo investimentos constantes para seu desenvolvimento. Cada pequeno passo de evolução é fundamental para trazer grandes benefícios à humanidade, ainda que os resultados não sejam de alta expressividade. Cada ganho energético, por menor que seja, é um passo para alcançar grandes resultados.

Aproximadamente 1,7% da demanda global por eletricidade é atualmente atendida pela energia gerada por sistemas fotovoltaicos (WEI et al., 2022).

Um levantamento comparativo sobre o consumo global de energia, divulgado pela Agência Internacional de Energia (AIE), indica que, até 2050, a instalação de painéis solares será responsável por suprir cerca de 45% da demanda energética mundial (AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, 2011 APUD MEKHILEF, SAIDUR & SAFARI, 2011).

## 1.2 Eficiência em sistemas fotovoltaicos

O desempenho de um sistema fotovoltaico depende diretamente de fatores internos e externos. Na construção interna, fatores como modelos matemáticos eficientes para tratar a relação entre tensão e corrente do sistema são fundamentais. Já os fatores externos, relacionados ao meio ambiente, também são críticos para o sistema e podem afetar rapidamente sua eficiência, com destaque para o sombreamento (ÇIRAK & ÇALIK, 2023).

O sistema fotovoltaico não é um dos sistemas geradores de energia mais eficientes, aproveitando em média apenas 15% da potência gerada. Essa energia possui um ponto de máxima potência, que é uma relação entre corrente e tensão, conhecido pela sigla MPP (*Maximum Power Point*). Embora esse conceito já fosse conhecido desde a invenção do sistema fotovoltaico, na década de 1950, não há uma citação específica do termo naquela época que permita atribuir o início dos estudos sobre o MPP.

Os fatores que afetam o sistema fotovoltaico influenciam diretamente as grandezas elétricas de tensão e corrente, afetando conseqüentemente a potência gerada.

Essas variações são causadas principalmente pela temperatura e pela irradiância.

A temperatura afeta diretamente a tensão do sistema, deslocando o ponto de máxima potência. A corrente elétrica é pouco influenciada pela variação de temperatura, enquanto a tensão, por outro lado, é significativamente impactada, fazendo com que o MPP (ponto de máxima potência) se desloque. Portanto, quanto maior a temperatura, menor é a tensão e ligeiramente maior é a corrente; quanto menor a temperatura, maior é a tensão e ligeiramente menor é a corrente.

A irradiância, medida em  $W/m^2$ , afeta de forma mais significativa a corrente elétrica, enquanto a tensão elétrica sofre menor variação. O ponto de melhor relação entre corrente e tensão sofre apenas uma leve alteração com a variação da irradiância. Apesar disso, o valor da potência máxima gerada pelo sistema é significativamente afetado. Independentemente dessa variação na potência, o ponto de máxima potência permanece aproximadamente na mesma região com relação à tensão.

### 1.3 Principais componentes do sistema Fotovoltaico

Os sistemas de geração de energia elétrica atuais trabalham transformando um tipo de energia já existente na natureza em energia elétrica. Alguns sistemas, como por exemplo o sistema hidrelétrico, transformam a energia potencial gravitacional em cinética, que, ao passar pelas turbinas do gerador, transforma-se em energia mecânica e depois, através dos geradores, transforma a energia mecânica em elétrica. Para isso, existem componentes essenciais para realizar esse processo.

De acordo com Mekhilef, Saidur e Safari (2011), os sistemas fotovoltaicos se dividem basicamente em dois tipos: autônomos e conectados à rede. Os autônomos funcionam de forma independente, sem ligação com o sistema elétrico público e a energia que produzem geralmente é usada para suprir diretamente o consumo do local e garantir o fornecimento contínuo.

Assim como todos os sistemas geradores de energia, o sistema fotovoltaico é formado por componentes essenciais para o seu funcionamento na transformação da energia luminosa do Sol em energia elétrica.

Os principais componentes do sistema fotovoltaico são: célula solar fotovoltaica, conversor CC/CC, controlador, inversor (caso a carga seja em corrente alternada), além de cabos, conexões, dispositivos de proteção e baterias para armazenamento de energia.

Atualmente, existem inversores conectados diretamente aos módulos fotovoltaicos, reduzindo o número de componentes físicos do sistema. Esses inversores incorporam as tecnologias dos componentes fundamentais que serão discutidos ao longo deste estudo.

Conforme apontam Mekhilef, Saidur e Safari (2011), a energia solar vem sendo amplamente usada em aplicações industriais localizadas em áreas remotas ou isoladas, como semáforos, equipamentos de telecomunicação e sistemas de posicionamento geográfico (*GPS*). A maior parte dessas instalações utiliza sistemas autônomos ou híbridos.

Os sistemas autônomos funcionam de forma independente da rede elétrica, gerando toda a energia necessária a partir da radiação solar. Já os sistemas híbridos fotovoltaico-*diesel* combinam painéis solares com baterias de armazenamento ou um gerador a *diesel*, garantindo o fornecimento mesmo em períodos de baixa insolação.

### 1.3.1 Célula Solar fotovoltaica

As células solares são formadas por materiais semicondutores que são elementos dopados quimicamente. De acordo com Wei et al. (2022), o processo de dopagem do silício, que compõe a maioria das células solares fotovoltaicas, é realizado pela adição de impurezas para modificar as propriedades elétricas do elemento.

Um polo é dopado com uma substância positiva (falta de elétrons) e o outro com substâncias negativas (excesso de elétrons), gerando uma diferença de potencial. Quando atingido por energia fotônica suficiente para sua excitação, o elétron vence a resistência entre os polos e se movimenta, gerando energia elétrica.

A dopagem eletrônica forma junções p–n, blocos fundamentais das células solares, baseadas em substratos semicondutores dos tipos p e n (Wei et al., 2022).

Quando os fótons atingem as células fotovoltaicas, transferem energia para os elétrons, que começam a se movimentar (ÇIRAK & ÇALIK, 2023).

A primeira aplicação destacada de uma célula solar de silício cristalino (*c-Si*) ocorreu em 1958, quando foi instalada no satélite *Vanguard*, lançado pelos Estados Unidos durante a corrida espacial com a União Soviética (WEI et al., 2022).

Segundo Basyoni, Zekry e Shaker (2021), as células solares de silício representam 90% do mercado fotovoltaico.

### 1.3.1.1 Análise básica do circuito da célula fotovoltaica

Um modelo genérico de uma célula fotovoltaica pode ser representado conforme a figura 01, onde uma fonte de corrente está em paralelo com um diodo e com um resistor *shunt* que é um resistor de resistência muito baixa. Essa ligação de componentes em paralelo fica em série com mais um resistor sendo ( $I_s$ ) a corrente gerada pela absorção de elétrons, ( $I_D$ ) a corrente no diodo, ( $I_{shunt}$ ) a corrente no resistor *Shunt*, ( $I_{PV}$ ) é a corrente de saída da célula (ÇIRAK & ÇALIK, 2023).

Resumindo a célula fotovoltaica é uma estrutura especificada como transdutor que faz a conversão de energia fotônica em energia elétrica.

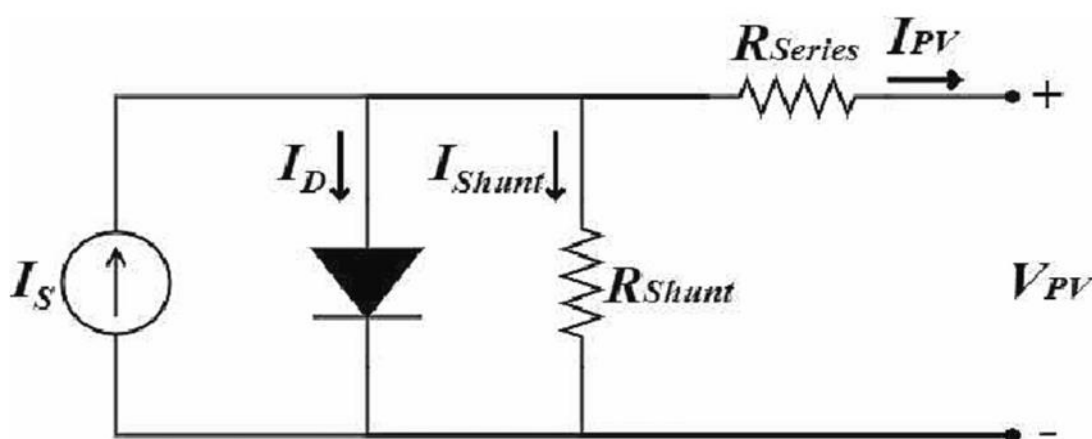


Figura 1 - Modelo elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica, incluindo fonte de corrente, diodo, resistência série  $R_{series}$  e resistência *shunt*  $R_{shunt}$ .

Fonte: ÇIRAK & ÇALIK (2023).

Segundo Çirak; Çalik (2023) a equação para o cálculo da corrente de Saída no modelo da figura 01 é mostrado na fórmula 1

$$I_{PV} = I_S - I_D - I_{Shunt} \quad (1)$$

A equação 2 é utilizada para calcular a corrente no diodo conforme ilustrado na figura 1 :

$$I_D = I_0 \left[ e^{\frac{qV_{PV} + R_{Serie} I_{PV}}{akT}} - 1 \right] \quad (2)$$

Sendo ( $I_D$ ) corrente do diodo, ( $I_0$ ) a corrente de saturação do diodo, ( $e$ ) a constante de Euler, ( $q$ ) é a carga elementar (menor carga possível que uma partícula pode ter de forma isolada),  $e$  a carga do elétron  $1,602 \times 10^{-19}$  C (*coulombs*), ( $V_{PP}$ ) é a tensão de saída da célula fotovoltaica, ( $R_{series}$ ) é a resistência do resistor em série, ( $I_{PV}$ ) é a corrente de saída, ( $\alpha$ ) é o fator de idealidade do Diodo, ( $k$ ) é a constante de Boltzmann  $1,38 \times 10^{-23}$  J/K(joule/Kelvin) e  $T$  é a temperatura absoluta em Kelvin  $T^\circ\text{C}+237,15$ .

De acordo com Çirak; Çalik (2023) a equação 3 é utilizada para calcular a corrente do resistor shunt ( $I_{shunt}$ ), conforme mostrado na figura 1:

$$I_{Shunt} = \frac{V_{PV} + R_{serie} I_{PV}}{R_{Shunt}} \quad (3)$$

De acordo com Çirak; Çalik (2023) a equação 4 é utilizada para definir ( $I_S$ ), que é a corrente gerada pela absorção de fótons pelas células fotovoltaicas ao serem expostas pela Luz solar. ( $S$ ) é a irradiância e ( $T$ ), a Temperatura:

$$I_S = \frac{S}{S_{STC}} (I_{S,STC} + K_T (T - T_{STC})) \quad (4)$$

Na equação 4 também aparece a sigla (STC - *Standard test conditions*) que significa os mesmos parâmetros mais em condições de teste padrão, portanto sendo  $S_{stc} = 1000\text{w/m}^2$ ,  $T_{stc}=298\text{K}$ , e a massa de ar em AM1.5 e (KT) representa o coeficiente de temperatura para a corrente de curto-circuito da célula fotovoltaica.

Na equação 4 verifica-se que, do cálculo de  $I_s$  (figura 1), o aumento da irradiância, causa o aumento da corrente de curto-circuito da célula fotovoltaica e, conseqüentemente, provoca um aumento da potência máxima de saída (ÇIRAK & ÇALIK, 2023).

### 1.3.1.2 Módulos e arranjos fotovoltaicos

Módulos fotovoltaicos é a ligação das células fotovoltaicas em série ou em paralelo. A montagem dos módulos depende da necessidade da saída, onde a ligação das células em paralelo aumenta a corrente de saída e a ligação dos módulos em série aumenta a tensão de saída.

Segundo Çirak; Çalik, 2023 os módulos em paralelo e em série podem ser conectados para formar o arranjo fotovoltaico.

A fórmula para representar as características da tensão e corrente em um arranjo fotovoltaico e é representada pela equação 5.

$$I_{PV} = n_p \left( I_s - I_0 \left[ e^{\frac{q(V_{PV} + \frac{n_s R_{Serie} I_{PV}}{n_p})}{n_s \alpha k T}} \right] \right) - \frac{\frac{n_p}{n_s} V_{PV} + R_{Serie} I_{PV}}{R_{Shunt}} \quad (5)$$

Na equação 5 ( $n_s$ ) é a quantidade de módulos em série e ( $n_p$ ) é a quantidade de módulos em paralelo (ÇIRAK; ÇALIK, 2023). Através da rquação 5 pode-se calacular a corrente do arranjo fotovoltaico (IPV) em função da configuração do sistema ( $n_s$ ) módulos em série e ( $n_p$ ) módulos em paralelo, considerando: corrente gerada pela luz ( $I_s$ ), corrente de saturação reversa ( $I_0$ ), resistência em série ( $R_{Serie}$ ), resistência do shunt ( $R_{Shunt}$ ), carga do elétron ( $q$ ), fator de idealidade ( $n$ ), constante de Boltzmann ( $k$ ) e temperatura ( $T$ ).

### 1.3.2 Conversor CC-CC

O Conversor CC-CC é um equipamento utilizado no sistema fotovoltaico para conectar o arranjo à carga.

O Conversor CC-CC permite alterar a carga CC do sistema mediante alterações no seu ciclo de trabalho (*duty cycle D*) que é definido como a proporção de tempo em que o interruptor interno do conversor é acionado em relação ao tempo total de um ciclo. Por exemplo, se o interruptor interno (*switch*) ficar ligado por 40% do tempo de um ciclo, o ciclo de trabalho é  $D=0,4$ .

Existem três tipos de Conversor CC/CC: tipo *Buck* (reduzidor de tensão), tipo *Boost* (aumentador de tensão) e tipo *Buck-Boost* (misto). Além desses, outros tipos mais sofisticados, como *SEPIC* e *Cuk*, estão sendo introduzidos.

### 1.4 Condição de sombreamento parcial

O sombreamento parcial em placas fotovoltaicas é causado pela falta, ou menor intensidade da incidência de luz solar. Essa condição pode ocorrer devido a nuvens que bloqueia o sol ou, dependendo da posição e altura onde as células fotovoltaicas estão instaladas, a luz solar pode ser bloqueada por edifícios ou estruturas próximas. Além disso, folhas provenientes de árvores também podem causar esse sombreamento (ÇIRAK & ÇALIK, 2023).

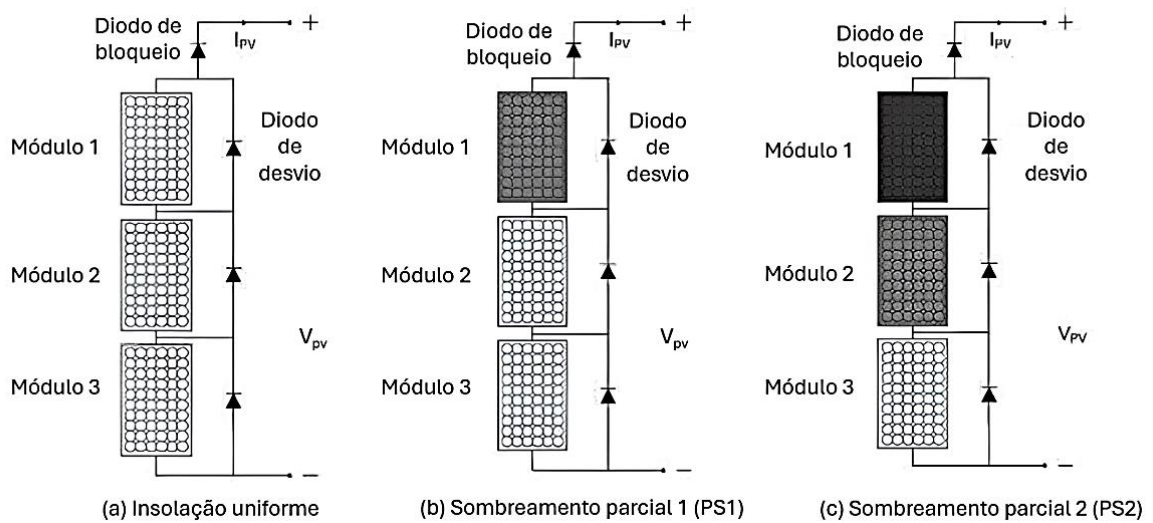
Conforme pode ser visto na Figura 2, para diminuir parcialmente os efeitos do sombreamento, utilizam-se duas estratégias de diodos. Diodos *Zener* (Diodo de Desvio) são instalados em paralelo nas células fotovoltaicas, e um diodo de avalanche (Diodo de Bloqueio) é instalado em série com o painel composto por células fotovoltaicas.

Portanto, na Figura 2 observa-se que a ligação dos diodos *Zener* feita em paralelo faz com que tenha a função de atuar na proteção da célula fotovoltaica, que nessa condição de sombreamento, funciona como carga. Sendo este em paralelo, detecta o aumento da temperatura é curta-circuita a célula sombreada. Isto faz com que a corrente que passaria pela célula é desviada pelo Diodo Zener impedindo-a de ser danificada. Além do diodo zener instalado em paralelo, um diodo de bloqueio é inserido no final de cada ramo em série do arranjo fotovoltaico.

Sua finalidade é prevenir a inversão da polaridade da corrente, causada pelo desbalanceamento dos níveis de tensão nos ramos em paralelo (ÇIRAK & ÇALIK, 2023).

Conforme foi visto, estes dois tipos de diodos funcionam em conjunto e assim atuam desviando a corrente elétrica gerada. De forma geral, quando ocorre o sombreamento, a absorção de elétrons pelas células fotovoltaicas diminui, causando variações da corrente no circuito, o que reduz a corrente total ( $I_s$ ) proveniente do painel. Sob sombreamento, em cada conjunto afetado pode acontecer várias células afetadas que passam a funcionar como uma resistência elétrica ( $R_L$  de carga), drenando internamente a corrente do sistema. As proteções efetuadas pelo diodos ocorrem nos painéis porque as células ligadas em série compensam a corrente das células sombreadas, fazendo com que os diodos *Zener* (ou diodos de desvio) atuem em modo de ruptura (efeito avalanche). Quando os diodos *Zener* em paralelo com a células atingem esse limite, eles estando inversamente polarizado realizam desvios das células fotovoltaicas permitindo a passagem da corrente nos painéis. Desse modo, a corrente contorna as células comprometidas pelo sombreamento, e estas células sombreadas, que não geram corrente, deixam de ser um obstáculo no caminho da corrente em série.

Assim como os diodos *Zener* (diodo de desvio), o diodo de avalanche (diodo de bloqueio) também possui uma tensão de ruptura para conduzir corrente no sentido reverso. A diferença reside no mecanismo de ruptura: no diodo *Zener*, a ruptura é causada no campo elétrico; já no diodo de avalanche, ela é feita por colisões de elétrons. O diodo de avalanche possui uma tensão de ruptura maior que a do *Zener* (aproximadamente 6 V), sendo por isso ideal para o processo de geração de energia.



**Figura 2 - Configuração de diodos de bloqueio e bypass em arranjo fotovoltaico, com fluxo de corrente ( $I_{pv}$ ) e tensão ( $V_{pv}$ ) em diferentes padrões de sombreamento parcial.**

Fonte: ÇIRAK e ÇALIK (2023).

Segundo du Plessis, Strauss e Rix (2020), o acúmulo de poeira nos módulos é um dos fatores ambientais mais impactantes e significativos que afeta negativamente o desempenho de sistemas fotovoltaicos. Esta condição é classificada pela maioria dos pesquisadores como uma grande influência. Essa condição, que é mais provável de acontecer em regiões mais secas (*dust soiling*), pode ser observada na Figura 3,



**Figura 3 - Deposição intensa de poeira sobre a superfície da placa fotovoltaica**

Fonte: du Plessis, A. A.; Strauss, J. M.; Rix, A. J. (2020).

## 1.5 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Para obter a máxima potência do sistema, é necessário realizar o rastreamento e encontrar o ponto de máxima potência na curva de relação entre tensão e corrente elétrica. Dependendo da complexidade tecnológica, pode-se incluir sensores em diversas variáveis para aumentar a precisão do controle. Dessa forma, para monitorar sistemas fotovoltaicos e medir a irradiância e condições climáticas, recomenda-se utilizar instrumentos em conformidade com a norma IEC6172 (DU PLESSIS; STRAUSS; RIX, 2020).

A eficiência global do sistema fotovoltaico, representada pela letra ( $\eta$ ), é definida pela relação entre a média da potência de saída ( $PPV_{avg}$ ) e a máxima potência alcançável. A potência global considera a média real de saída de potência ao longo de um determinado tempo, e este dado leva em consideração todas as perdas do sistema.

Segundo Çirak e Çalik (2023), para calcular a eficiência global do sistema fotovoltaico ( $\eta$ ) em função da potência média de saída ( $PPV_{avg}$ ) e da potência máxima alcançável ( $PPV_{max}$ ), utiliza-se a equação 6:

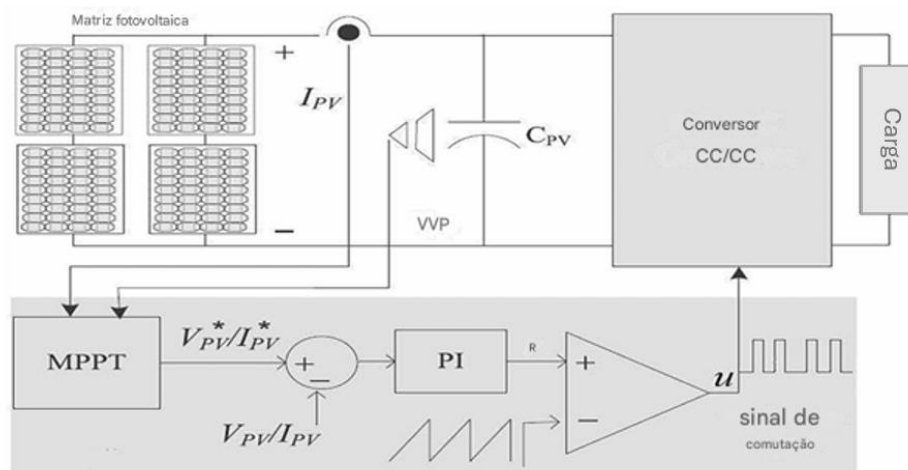
$$n = 100 \frac{P_{PV,avg}}{P_{PV,max}} \% \quad (6)$$

O ponto de operação do sistema fotovoltaico varia devido às condições atmosféricas, como irradiância e temperatura, bem como por mudanças na curva de inclinação da carga. Essas alterações são geradas por variações na impedância da carga ou por modificações introduzidas pelo conversor.

Dessa forma, como as condições atmosféricas não podem ser alteradas e também mudar a característica das cargas não é funcional, um conversor CC-CC é usado para conectar o módulo fotovoltaico a carga. O conversor permite mudar a resistência do sistema alterando o seu ciclo de trabalho.

A alteração do ponto de operação do sistema fotovoltaico é possível mediante a mudança da resistência da carga, visando o melhor ponto de operação de máxima potência MPP a cada instante. Para otimizar a geração de energia elétrica por meio das células fotovoltaicas, essas alterações podem ser realizadas de forma computacional através de algoritmos dedicados.

O sistema de geração de energia solar, que utiliza este processo, está ilustrado na Figura 4.



**Figura 4 - Representação do sistema fotovoltaico com controle *MPPT***

Fonte: (ÇIRAK; ÇALIK, 2023).

### 1.5 Algoritmos para o Controle de Máxima Potência

O conhecimento de algoritmo tem um papel central na ciência da computação, matemática e engenharia, sendo essencial para o desenvolvimento de métodos e sistemas de resolução de problemas. A definição clássica apresentada por Donald Knuth destaca os aspectos fundamentais que tornam um processo passível de ser considerado algorítmico: finitude, clareza, entrada definida, saída esperada e eficácia. Esse conceito tem servido como base para a formulação e análise de algoritmos em diversas áreas do conhecimento, permitindo não apenas a implementação computacional, mas também a formação teórica de processos complexos.

“Um algoritmo é um conjunto finito de regras bem definidas que, quando aplicadas a dados de entrada, produzem uma saída e terminam em um tempo finito” (KNUTH, 1997, p. 5)

Tendo em vista que o MPP pode variar constantemente, o seu rastreamento requer uma alteração dinâmica do ciclo de trabalho. Para tanto, é necessário um algoritmo que promova o rastreamento dinâmico do *MPPT* (ÇIRAK; ÇALIK, 2023).

O algoritmo MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) calcula o erro de rastreamento do ponto de máxima potência e transmite a informação para o controlador. Este, por sua vez, gera um sinal *PWM (Pulse Width Modulation)*, com ciclo de trabalho (D), que é enviado ao conversor CC-CC para o processamento da tensão de saída do módulo fotovoltaico.

Os algoritmos MPPT dividem-se em dois grupos principais: os métodos convencionais e os métodos modernos (ÇIRAK; ÇALIK, 2023).

Os métodos Convencionais são:

*Perturb and observe(P&O)* - Perturba e observa

*Incremental conductance (InC)* - Condutância incremental.

*Hill Climbing (HC)* - escalada de colina

*Fractional Open circuit Voltage (FOV)* - Fração da tensão de circuito aberto

*Fractional Short-circuit Current (FSC)* - Fração de corrente de curto-circuito

Os métodos modernos são:

*Fuzzy Logic Control(FLC)* - Lógica fuzzy

*Automatic Control System (ACS)* - Sistema de controle automático

*Artificial Neural Network (ANN)* - Lógicas neurais e artificiais

*Genetic Algorithm (GA)* - Algoritmo genético

Atualmente, incluem-se as categorias inteligentes, como os métodos baseados em Inteligência de Enxame (*Swarm Intelligence – SI*), que serão detalhados a seguir:

*Ant Colony Optimization (ACO)* - otimização de colônia de formigas

*Particle Swarm Optimization (PSO)* - otimização de enxame de partículas

*Artificial Bee Colony (ABC)* - colônia artificial de abelhas

*FireflyAlgorithm (FA)* - Algoritmo vagalume

Além desses citados existem outros algoritmos metaheurística que recentemente foram desenvolvidos (ÇIRAK & ÇALIK, 2023).

### 1.5.1 Métodos de rastreamento de ponto de máxima potência mais utilizados

Nas últimas duas décadas, os algoritmos convencionais de MPPT baseados em técnicas de perturbação vêm sendo amplamente estudados, aprimorados e aplicados em sistemas fotovoltaicos. Dentre eles, os métodos de Perturba e Observa (*P&O*) e Condutância Incremental (*InC*) são os mais utilizados (ÇIRAK; ÇALIK, 2023).

Estes dois algoritmos possuem um efeito expressivo na capacidade de geração de energia do sistema fotovoltaico em comparação com sistemas que não utilizam o rastreamento *MPPT*. Observa-se que, mesmo em condições de simulação mais estáveis, o grande benefício da utilização do algoritmo *MPPT* para o funcionamento do sistema é evidente.

#### 1.5.1.1 Algoritmo Perturba e observa (*MPPT P&O*)

O Algoritmo mais comum para *MPPT* é o algoritmo perturba e observa, nesse sistema uma perturbação é causada na tensão de saída do painel fotovoltaico do lado da carga do conversor CC-CC

Quando o algoritmo provoca essa perturbação na tensão de saída a potência instantânea de saída do arranjo fotovoltaico é calculada multiplicando a corrente medida pelo valor da tensão do arranjo fotovoltaico.

Dessa forma o algoritmo calcula se a perturbação da tensão aumentou ou diminuiu a potência do sistema e assim determina a direção do próximo passo, seja ele aumentando ou diminuindo a tensão de saída do módulo na próxima perturbação.

Na tabela 1 pode-se observar um resumo de como o algoritmo perturba e observa calcula a direção dos passos.

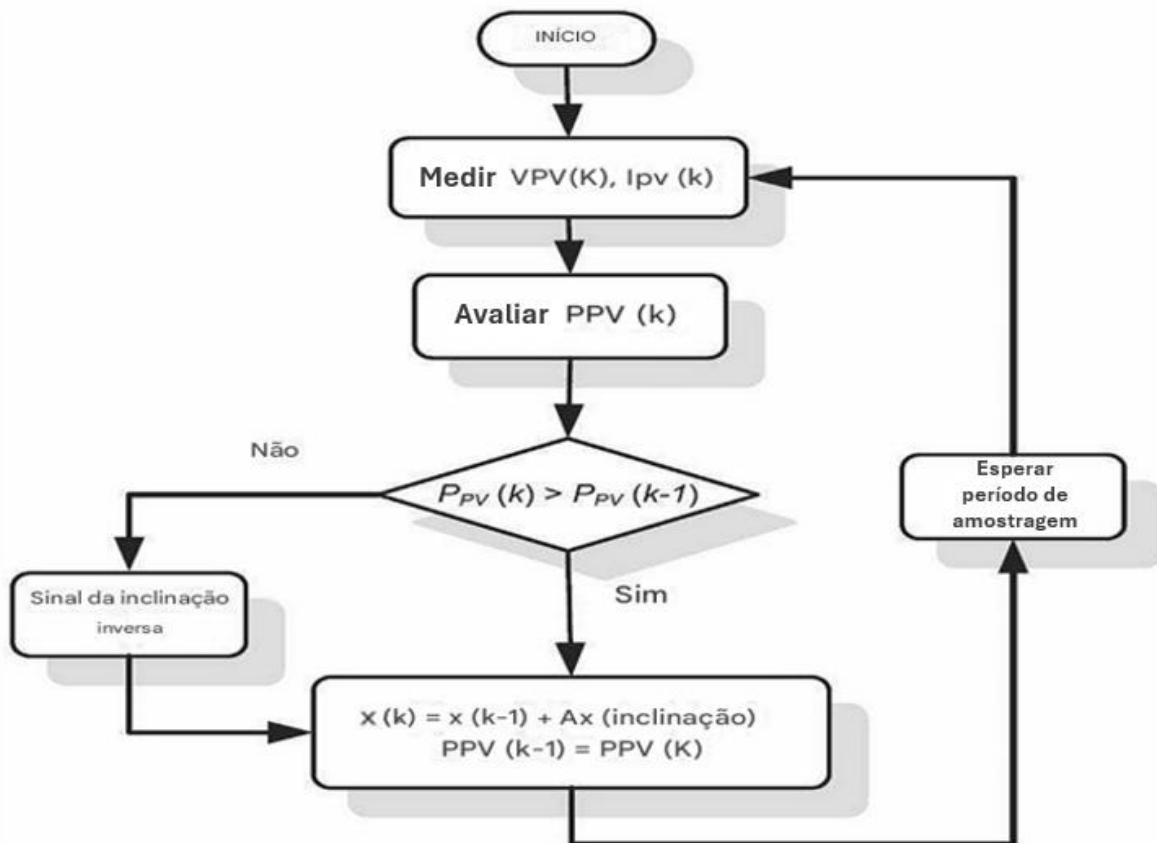
**Tabela 1 - Algoritmo Perturba e Observa: processo geral de decisão sendo  $\Delta V_n$  a variação da tensão sendo a tensão atual medida menos a tensão anterior medida ( $V_{(n)} - V_{(n-1)}$ ), o  $\Delta P_{PV,n}$  a variação da potência do painel fotovoltaico sendo ( $P_{PV,n} - P_{PV,(n-1)}$ ), e  $V_{out,n}$  a tensão atual de saída do conversor CC/CC.**

Fonte: ÇIRAK e ÇALIK (2023).

Processo de decisão geral da P&O.

$\Delta V_n$	$\Delta P_{PV,n}$	$V_{out,n}$
$V_A > 0$	$VPA.n > 0$	Aumento em $AV_{n+1}$
$V_A > 0$	$APPV. < 0$	Diminuir em $AV_{n+1}$
$\Delta V_n < 0$	$VPA.n > 0$	Diminuir em $AV_{n+1}$
$\Delta V_n < 0$	$\Delta P_{PV,n} < 0$	Aumento em $AV_{n+1}$

A Figura 05 mostra o fluxograma do algoritmo padrão perturba e observa (P&O).



**Figura 5 - Fluxograma do algoritmo perturba e observa (P&O).**

Fonte: ÇIRAK e ÇALIK (2023).

A figura 06 mostra os 5 estados lógicos de tomada de decisão do algoritmo perturba e observa em relação a curva P-V.

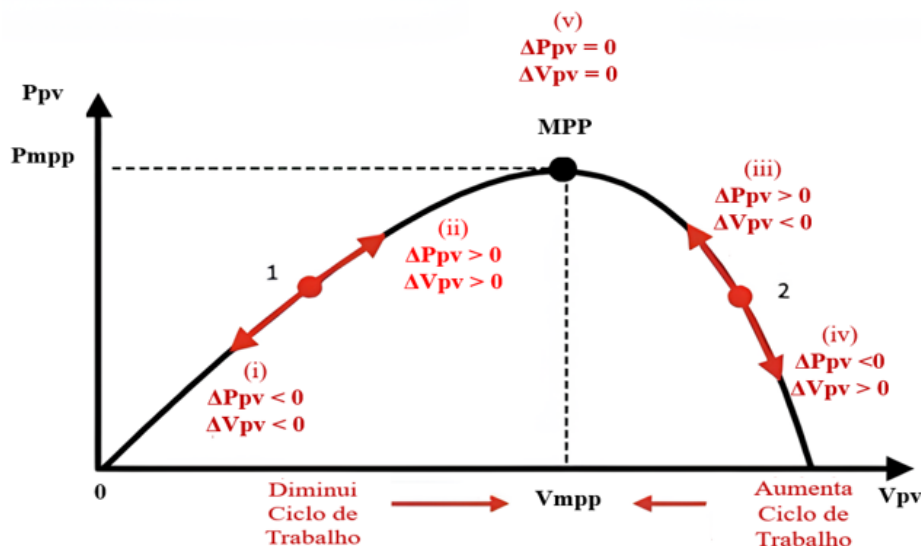


Figura 6 - Os 5 estados lógicos do algoritmo perturba e observa em relação a curva P-V.

#### 1.5.1.2 Algoritmo condutância incremental (MPPT InC)

O algoritmo de Condutância Incremental também é baseado em perturbação. A perturbação é aplicada na saída do conversor CC-CC, enquanto os valores instantâneos de tensão e corrente do painel fotovoltaico são medidos e as suas variações são calculadas.

Para encontrar o ponto de máxima potência, o sistema soma o valor atual da condutância com a sua taxa de variação. Com base no resultado dessa soma, ele decide se deve aumentar ou diminuir a tensão para se aproximar do ponto de funcionamento ideal.

Quando a derivada é igual a zero, significa que a inclinação da reta tangente a curva é nula, indicando que o ponto de máxima potência (MPP) foi atingido, o que corresponde ao topo da curva.

Segundo Çirak; Çalik (2023), fórmula para o cálculo da derivada do algoritmo InC se dá pela equação 7 e 8:

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(V_{pv}I_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad (7)$$

Onde, após a simplificação a fórmula fica:

$$\frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = G_{pv} + dG_{pv} \quad (8)$$

Sendo  $G_{pv}$  a condutância instantânea e  $dG_{pv}$  a diferença da condutância instantânea  $G_{(k)}$  menos a condutância anterior  $G_{(k-1)}$ .

Na tabela 02 está mostrado o processo geral de decisão do algoritmo condutância incremental.

**Tabela 2 - Condutância incremental: processo geral de decisão sendo  $\Delta V_n$  a variação da tensão sendo  $(V_n - V_{(n-1)})$   $G_{PV,n}$  a condutância atual do painel fotovoltaico  $\Delta G_{PV,n}$  a variação da condutância sendo  $(G_{PV,n} - G_{PV,(n-1)})$  e  $\Delta I_{PV,n}$  a variação da corrente elétrica do painel fotovoltaico sendo  $(I_n - I_{(n-1)})$ .**

Fonte: ÇIRAK e ÇALIK (2023).

Processo geral de decisão InC.

Condição 1	Condição 2	$V_{out,n}$
$\Delta V_n \neq 0$	$G_{PV,n} + \Delta G_{PV,n} > 0$	Aumentar em $\Delta V_{n+1}$
	$G_{PV,n} + \Delta G_{PV,n} < 0$	Diminuir em $\Delta V_{n+1}$
	$G_{PV,n} + \Delta G_{PV,n} = 0$	Sem alteração
$\Delta V_n = 0$	$\Delta I_{PV,n} > 0$	Aumentar em $\Delta V_{n+1}$
	$\Delta I_{PV,n} < 0$	Diminuir em $\Delta V_{n+1}$
	$\Delta I_{PV,n} = 0$	Sem alteração

A figura 07 mostra o fluxograma do algoritmo condutância incremental.

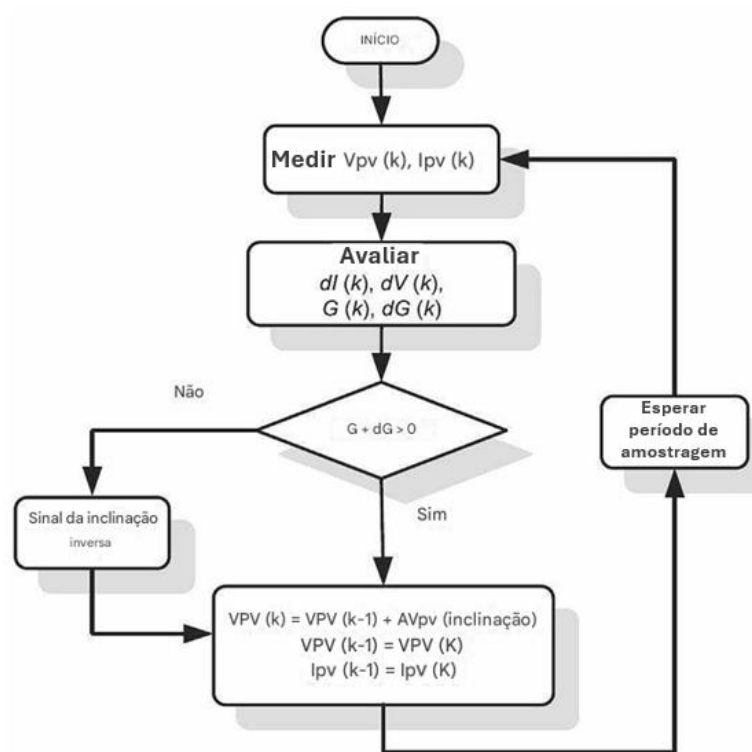


Figura 7 - Fluxograma do algoritmo condutância incremental (Inc).

Fonte: ÇIRAK e ÇALIK (2023).

A Figura 08 mostra os estados lógicos do algoritmo condutância incremental com relação a curva P-V.

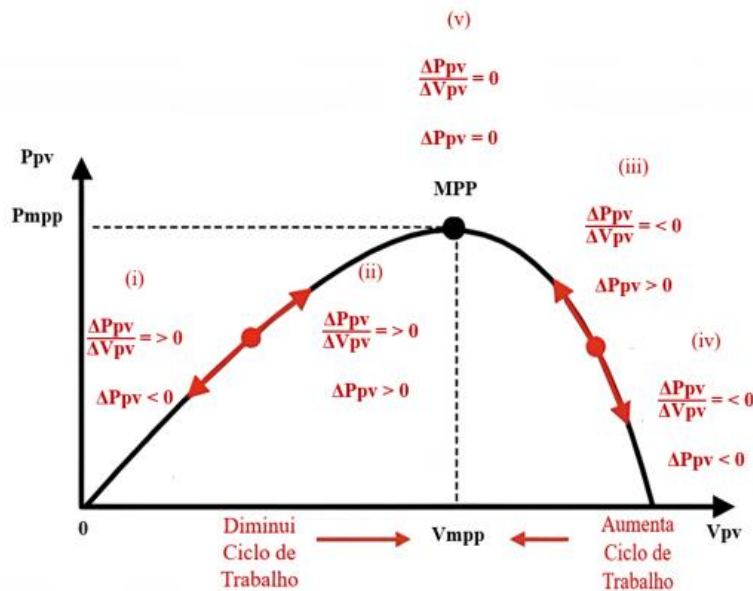


Figura 8 - Os 5 estados lógicos do algoritmo condutância incremental em relação a curva P-V.

## 1.6 Lógica Paraconsistente Anotada

### 1.6.1 O conceito filosófico da lógica Clássica

Algoritmos de controle como o MPPT só são possíveis porque existe a lógica, para usufruir do seu grande potencial em forma de tecnologia moderna, como por exemplo, os computadores e sistemas digitais que facilitam a possibilidade de soluções para as nossas necessidades. Grandes pensadores como Aristóteles, que viveu entre 384 à 322 aC, sentiram a necessidade de desenvolver o raciocínio lógico e assim, com os seus discípulos criaram a Lógica Clássica.

Suas ideias buscavam por certezas, visando desenvolver um método em que as conclusões passem por um processo lógico a ponto de serem consideradas válidas, por meio de sentenças ou proposições que precisam ser consideradas falsas ou verdadeiras (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006).

O raciocínio lógico clássico é fundamentado em quatro princípios que são apresentados por meio de símbolos:

1 – Princípio da identidade  $p = p$

Toda proposição ou objeto é idêntico a si mesmo

2 – Princípio da Identidade Proposicional  $P \rightarrow P$

Toda proposição ou objetos idênticos tem o mesmo valor

3 – Princípio do terceiro excluído  $p \vee \neg p$

Entre duas proposições contraditórias uma é verdadeira e a outra é a negação dessa proposição

4 – O princípio de não contradição  $(p \vee \neg p)$

Uma proposição não pode ser verdadeira e falsa ao mesmo tempo

Resumindo a lógica clássica sendo binária ou uma informação é verdadeira ou é falsa e não há meio termo ou conclusões parciais, e isso foi usado como base para a construção da maioria dos equipamentos tecnológicos que temos (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006).

O transistor desenvolvido em 1947 por John Barden, Walter Brattain e Wiliam Shockley foi o componente fundamental para a reprodução física do conceito lógica clássica, tendo o seu princípio de funcionamento liberar ou bloquear o fluxo de corrente dessa forma funcionamento como uma chave ou amplificador.

Segundo Da Silva Filho, Lambert-Torres e Abe (2006), dispositivos eletrônicos podem ser usados como uma porta lógica para emular os valores de verdadeiro e falso, simplesmente deixando passar ou bloqueando um sinal rapidamente e, dessa forma, pode-se emular os valores de 1 e 0 ou (verdadeiro ou falso) nos circuitos eletrônicos. Também foi possível realizar ligações de transístores de formas variadas sendo em série ou paralelo para gerar os circuitos lógicos que assim, podem ser usados para modulação de sinais elétricos, controle, circuitos integrados e em computadores.

#### 1.6.2 Lógicas não clássicas

Nos estudos a respeito das lógicas não clássicas verifica-se que suas características fundamentais facilitam a criação de diferentes modelagens de configurações algorítmicas, as quais podem trazer benefícios para tomadas de decisão em processos de tratamento de dados que trazem inconsistências. Nestes casos especiais onde as informações são obtidas de banco de dados incompletos e com certos níveis de incerteza, os algoritmos fundamentados em princípios não clássicos mostram-se mais eficazes.

Os resultados indicam que as Lógicas não clássicas exploram condições a lógica clássica não é capaz de alcançar devido a ser sustentada por seus princípios binários onde as respostas somente são permitidas na forma: Verdadeira (V) ou falsa (f) (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006).

Quanto a precisão, segundo a ABNT NBR ISO 5725-1:(1994) "Precisão é a proximidade entre os resultados independentes obtidos sob condições estipuladas."

O que corrobora com a afirmação do (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006).

“Estudos mais aprofundados verificaram que no mundo real nem todas as situações podem ser classificadas simplesmente como verdadeiras ou falsas. Quando queremos precisão para descrever algo, fica difícil estabelecer limites que nos permita tecer afirmativas ou negativas a respeito de qualidade das coisas. Quase sempre os limites entre o falso e verdadeiro são indefinidos, incertos, ambíguos e até mesmo contraditórios. Fica claro que utilizando apenas a Lógica Clássica binária os recursos tecnológicos disponíveis são incapazes de automatizar as atividades relacionadas a problemas que compreendem situações que não foram consideradas na sua fundamentação”.

Dessa forma estudos para desenvolver tecnologias baseadas em algoritmos que buscam se aproximar do raciocínio humano, com o entendimento de que o processo de tomada de decisões de alta precisão depende da qualidade da capacidade de analisar e processar os dados levando em consideração uma grande quantidade de variáveis, que podem ser não lineares, incertas, imprecisas, contraditórias ou inconsistentes (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006).

### 1.6.3 Lógica Paraconsistente

A lógica paraconsistente revoga o princípio do terceiro excluído e admite funcionar com tratamento de sinais contraditórios, dessa forma uma proposição tem graus de contradição para definir o seu estado (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006).

A lógica paraconsistente tem como precursores J. Lukasiewicz e o Filósofo russo N.A Vasilév, que, por volta de 1910, propuseram a ideia de uma lógica que revogasse o princípio do terceiro excluído e a chamaram de lógica imaginária. Logo após o polonês S. Jaskowisk discípulo de Lukasiewicz foi o primeiro a estruturar um cálculo proposicional e fez a sua primeira publicação em 1948 sobre logica e contradição (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006).

Em 1954, o professor Nilton Carneiro Affonso da Costa, matemático, filósofo e cientista brasileiro, desenvolveu sistemas da lógica matemática que tratavam sinais inconsistentes contendo todos os níveis lógicos envolvendo os cálculos proposicionais de predicado e de descrição e a lógica de nível superior.

As primeiras versões algébricas dos sistemas inconsistentes apareceram por volta de 1965 e são conhecidas como álgebras de Curry, em homenagem ao lógico americano H. Curry.

Em 1975, estudos aprimorados do professor Nilton Carneiro Affonso da Costa foram apresentados por ele em um congresso científico onde vieram a ser considerados pela comunidade científica como estruturais de uma Lógica que tratava contradições. A término das discussões estes trabalhos receberam pela primeira vez a denominação de Lógica Paraconsistente.

Os trabalhos que envolviam as semânticas iniciais dos sistemas paraconsistentes, já reconhecidos pela comunidade científica como as estruturas fundamentais de uma Lógica Paraconsistente (LP), foram investigadas por volta de 1976 (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006).

E o termo *contradictione quodlibet* “de uma contradição qualquer coisa segue” declarando que, se existir contradição em um sistema lógico, as conclusões serão triviais”, um sustentáculo da lógica clássica binária, encontrou uma oposição através da lógica paraconsistente, que tem a capacidade de lidar com as contradições sem ocorrências de trivialização, o que a faz capaz de reproduzir uma resposta de maneira mais aprofundada (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006).

#### 1.6.3.1 Lógica Paraconsistente Anotada

As lógicas paraconsistentes anotadas formam uma família de lógicas não-clássicas que começaram a ser utilizadas na programação lógica a partir do trabalho de Subrahmanian, apresentado no artigo “*On the Semantics of Quantitative Logic Programs*” (*IEEE Symposium on Logic Programming*, 1987). Posteriormente, Blair e Subrahmanian ampliaram essa abordagem no artigo “*Paraconsistent Foundations for Logic Programming*” (*Journal of Non-Classical Logic*, 1988), desenvolvendo uma teoria geral da programação lógica anotada, com aplicações práticas em bases de dados que lidam com informações contraditórias (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006).

Os primeiros estudos sobre os fundamentos da lógica paraconsistente anotada foram efetuados por Da Costa, Subrahmanian e Vago (Da Costa, N.C.A. Subrahmanian V.S. e Vago, C. "The Paraconsistent Logic PT " *Zeitschrift fur Mathematische Logik und Grundlagen der Mathematik*, Vol.37, pp.139-148,1991). (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006).

Em 2006, Da Silva Filho, Torres e Abe publicaram o artigo "Robô Móvel Autônomo Emmy: Uma Aplicação Eficiente da Lógica Paraconsistente Anotada", marcando a primeira aplicação prática da lógica paraconsistente em robótica autônoma. O robô Emmy, controlado por um sistema baseado na Lógica Paraconsistente Anotada de dois valores (LPA2v), utilizava sensores ultrassônicos para navegar em ambientes não estruturados, processando ativamente informações contraditórias ou incertas - um desafio intratável pela lógica clássica (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006). Essa primeira aplicação demonstrou a viabilidade de sistemas não clássicos paraconsistentes para tomada de decisão em condições reais, abrindo caminho para novas abordagens da LPA em inteligência artificial e robótica.

#### 1.6.3.2 Representação da Lógica Paraconsistente Anotada

A lógica paraconsistente anotada tem 4 possíveis objetos, que também são denominados constantes de anotação:

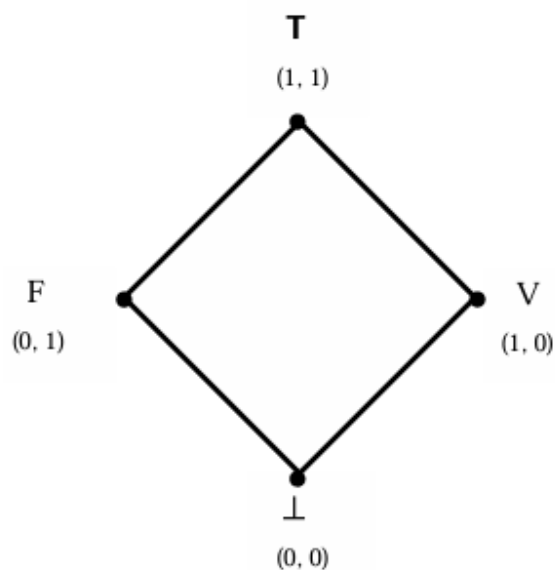
T – Inconsistente

V – Verdadeiro

F – Falso

$\perp$  – Paracompleto ou Indeterminado.

No conjunto desses objetos  $\tau = \{T, V, F, \perp\}$  coloca-se uma estrutura matemática que será um reticulado com operador  $\tau = \langle |\tau|, \leq, \sim \rangle$  que pode ser caracterizado pelo seguinte diagrama de Hasse mostrado na figura 9.



**Figura 9 - Reticulado de Hasse.**

Fonte: (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006).

(1, 0) indicando 'existência de evidência favorável total e evidência desfavorável nula'

(0,1) indicando 'existência de evidência favorável nula e evidência desfavorável total'

(1, 1) indicando 'existência de evidência favorável total e evidência desfavorável total'

(0, 0) indicando 'existência de evidência favorável nula e evidência desfavorável nula'.

Dentro do reticulado é possível ter infinitos estados lógicos mais seus extremos localizados nos vértices e, dessa forma, uma informação pode ser tratada a um nível de detalhe bem mais complexo do que em uma lógica clássica.

Conforme visto na figura 7, um estado lógico paraconsistente pode ser visualizado através do reticulado associado à PAL empregando uma noção de coordenada. Dessa forma para análises e tomadas de decisão, um cálculo algébrico pode ser aplicado revelando a distância em que o estado lógico resultante está do ponto (1,0) em que a proposição P é totalmente favorável e a evidência desfavorável é nula.

Segundo Da Silva Filho, Lambert-Torres e Abe (2006), na LPA2v considera-se  $(\mu, \lambda)$  como anotações de P, sendo os graus de evidência favorável  $\mu$  e desfavorável  $\lambda$ , variáveis no intervalo fechado  $[0,1]$  e pertencentes ao conjunto dos números reais.

Estes graus de evidência são obtidos através de medições de grandezas físicas no mundo real e suas variações são formatadas matematicamente através da equação da reta ou outro tipo de equação, procurando aquela que mais se assemelha ao comportamento da grandeza física de quem o origina.

Uma modelagem inicial é efetuada para definir os seus limites de atuação mínimo, máximo e otimizados que as fontes de informação, na forma de grandezas física, oferecem a análise paraconsistente.

Uma das fontes fornecerá o grau de evidência favorável ( $\mu$ ) e outra variável o segundo grau de evidência favorável que será complementado com seu valor considerado como o grau de evidência desfavorável ( $\lambda$ )

Através dos graus de evidência favorável e desfavorável pode-se então encontrar os valores de ( $G_c$ ) Grau de certeza (equação 9) e ( $G_{ct}$ ) grau de contradição (equação 10).

$$G_c = \mu - \lambda \quad (9)$$

$$G_{ct} = \mu + \lambda - 1 \quad (10)$$

Obtidos os graus de certeza e contradição pode-se então calcular a distância D,  $G_c$  e  $G_{ct}$ . Conforme visto na figura 7, no reticulado tem-se GC sendo o cateto no eixo X,  $G_{ct}$  o cateto no eixo Y, a distância D é a hipotenusa. Portanto, a partir da equação 11:

$$D = \sqrt{(1 - |G_c|)^2 + G_{ct}^2} \quad (11)$$

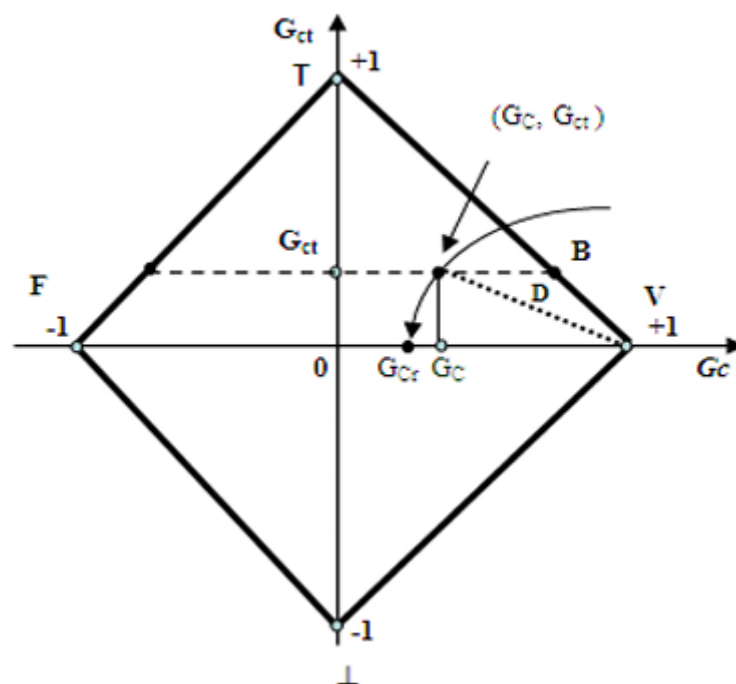
Com a distância D pode-se calcular o Grau de certeza real ( $G_{cr}$ ) pelas equações 12 e 13:

Para  $G_c > 0$   $G_{cr} = (1 - D)$  (12)

Para  $G_c < 0$   $G_{cr} = (D - 1)$  (13)

A influência do grau de contradição ( $G_{ct}$ ) no grau de certeza real é fundamental para definir o estado lógico paraconsistente como confiável ou não para tomada de decisão. Nota-se que se o grau de contradição for alto igual ou superior a 0,75, a distância ( $D$ ) será maior ou igual a 1 tornando assim o valor do grau de certeza real ( $G_{cr}$ ) nulo. Dessa forma, o algoritmo deve tomar uma ação de saída compatível com alto nível de inconsistência no processo (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006).

A figura 10 mostra a posição de  $G_c$ ,  $G_{ct}$  e distância  $D$  e  $G_{cr}$  no reticulado.



**Figura 10 - Determinação do Grau de Certeza de valor resultante real -  $G_{cr}$  no reticulado da LPA2v.**

Fonte: (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006)

### 1.6.3.3 NAP nó de análise paraconsistente

O NAP Nó de análise paraconsistente, é um algoritmo extrator dos efeitos da contradição e, através dele é possível fazer o tratamento das informações de sinais conforme os fundamentos da lógica paraconsistente (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006).

A descrição do algoritmo do NAP é apresentada a seguir:

#### 1. Entre com os valores de Entrada.

$\mu^*$ /Grau de Evidência favorável, tal que:  $0 \leq \mu \leq 1$

$\lambda^*$ /Grau de Evidência desfavorável, tal que:  $0 \leq \lambda \leq 1$

#### 2. Calcule o Grau de Certeza.

$$Gc = \mu - \lambda$$

#### 3. Calcule o Grau de Contradição.

$$Gct = (\mu + \lambda) - 1$$

#### 4. Calcule a distância d.

$$d = \sqrt{(1 - |Gc|)^2 + Gct^2}$$

#### 5. Determine o sinal da Saída.

Se  $d \geq 1$  Então Faça:

$S1 = 0,5$ : Indefinição e vá para o item 10.

Senão, vá para o próximo item.

#### 6. Determine o Grau de Certeza real.

Se  $Gc > 0$   $G_{CR} = (1-d)$

Se  $Gc < 0$   $G_{CR} = (d-1)$

#### 7. Apresente o estado Lógico Paraconsistente.

$$\varepsilon_{\tau(\mu,\lambda)} = (Gc, Gct)$$

**8. Calcule o Grau de Evidência resultante normalizado.**

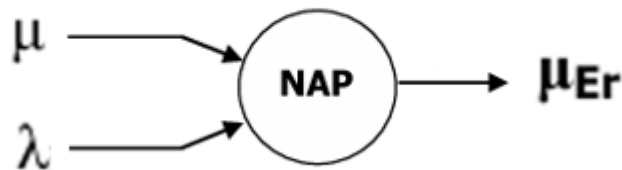
$$\mu_{ER} = \frac{Gc + 1}{2}$$

**9. Apresente os resultados na saída.**

Faça S1:  $\mu_{ER}$

**10. Fim.**

A figura 11 mostra a ilustração do algoritmo NAP.



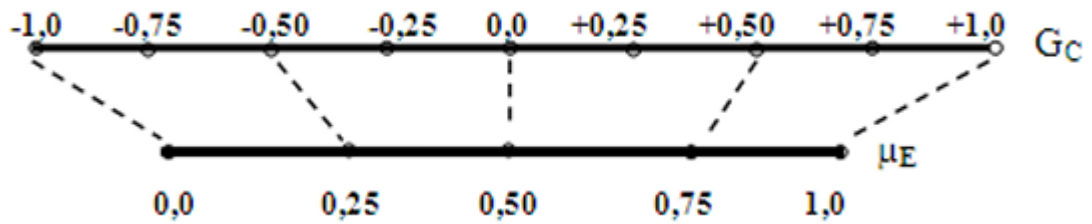
**Figura 11 - NAP nó de análise paraconsistente**

Fonte: (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006)

Dentro do NAP são inseridos todos os cálculos para o tratamento dos efeitos da contradição e o grau de certeza ( $Gc$ ) que será essencial para calcular o grau de evidência resultante ( $\mu_{er}$ ) considerado a saída do NAP. O grau de evidência resultante normalizado pode ser calculado pela equação 14.

$$\mu_{ER} = \frac{Gc+1}{2} \quad (14)$$

Segundo Da Silva Filho, Torres e Abe (2006), o grau de evidência resultante terá um valor entre 0 e 1. Essa equivalência dos valores do grau de certeza e grau de evidência resultante está mostrada na figura 12.



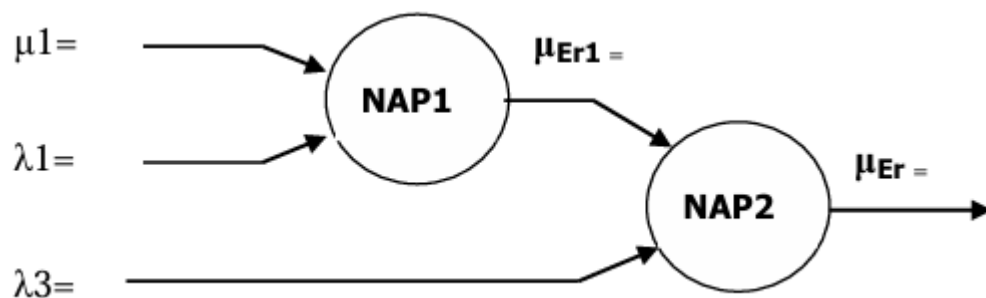
**Figura 12 - Transformação de Grau de Certeza GC em Grau de Evidência resultante  $\mu_E$ .**

Fonte: (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006)

#### 1.6.3.4 RAP - Rede de Análise Paraconsistente

Como as saídas dos NAPs estão entre 0 e 1, esse valor é compatível com os dos graus de evidência favorável e desfavorável ( $\mu$ ,  $\lambda$ ) de entrada do NAP que recebem um tratamento matemático para serem normalizadas através da equação do modelo de extração das fontes de informação. Dessa forma, a saída do NAP pode ser conectada a entrada de outro NAP formando uma rede com número indeterminado de NAPs. Com configurações de NAPs formando uma rede de análise busca-se intensificar ainda mais a retirada dos efeitos da contradição para tomar decisões mais inteligentes e precisas (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006).

A figura 13 mostra a interligação entre os NAPs formando uma Rede de Análise Paraconsistente RAP.



**Figura 13 - RAP rede de análise paraconsistente.**

Fonte: (DA SILVA FILHO; LAMBERT-TORRES; ABE, 2006).

No próximo capítulo serão apresentados os materiais e métodos com as aplicações de NAPs interligados formando uma Rede de Análise Paraconsistente atuando no método MPPT. Este novo algoritmo fundamentado na RAP será denominado MPPT InC-LPA2v.

## 1.7 Objetivos

### 1.7.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver um sistema especialista de rastreamento do ponto de máxima potência (*MPPT*) para sistemas fotovoltaicos, baseado em lógica paraconsistente anotada com anotação de dois valores, visando maximizar a potência de geração de energia.

### 1.7.2 Objetivos específicos

Visando alcançar o objetivo geral do trabalho, teve-se como objetivos específicos:

- a) Analisar a curva P-V de saída e o ganho de eficiência do sistema fotovoltaico com o algoritmo MPPT InC-LPA2v em comparação com o sistema sem rastreamento;
- b) Comparar a curva P-V de saída e o ganho de eficiência do MPPT InC-LPA2v com os resultados obtidos pelo algoritmo MPPT convencional P&O;
- c) Comparar o desempenho de rastreamento do MPPT InC-LPA2v com o P&O convencional em diferentes níveis de irradiância ( $200 \text{ W/m}^2$  a  $1.200 \text{ W/m}^2$ );
- d) Analisar o comportamento do ciclo de trabalho do conversor CC-CC durante a operação do algoritmo MPPT InC-LPA2v;
- e) Demonstrar o ganho de eficiência global do algoritmo InC-LPA2v em relação ao sistema sem MPPT e em comparação com o algoritmo convencional P&O;

Os métodos desenvolvidos nessa pesquisa serão descritos a seguir com a utilização dos principais fundamentos da Lógica Paraconsistente, bem como suas equações e algoritmos mostrados nos itens anteriores. Também serão apresentados os procedimentos para a implementação da Rede de Análise Paraconsistente atuando no Rastreamento e na análise de sinais com tomadas de decisão para ajustar o controle da potência máxima gerada em um sistema gerador de energia elétrica através de Células Fotovoltaicas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Modelagem do Algoritmo MPPT InC-LPA2v

O algoritmo InC-LPA2v é um sistema especialista desenvolvido para aplicação em sistemas fotovoltaicos. Ele foi modelado para receber, como variáveis de entrada, os parâmetros provenientes dos cálculos da condutância incremental, denominados  $E_1$  e  $E_2$ , os quais serão apresentados detalhadamente ao longo deste capítulo.

Para o processamento dessas variáveis, utiliza-se a Rede de Análise Paraconsistente (RAP), que oferece uma estrutura lógica capaz de lidar com incertezas e inconsistências inerentes ao ambiente operacional de sistemas fotovoltaicos. A seguir, descreve-se o processo de modelagem do algoritmo.

---

#### **Algoritmo de Modelagem e Extração do Grau de Evidência das entradas**

Entrada: ( $x$ ) = Valor medido em unidade da grandeza física em análise

Saídas: Variável S1 =  $\mu_1$

Variável S2 =  $\lambda_1$

---

#### **1. Para a Primeira Fonte de Informação (*Fonte1*) que vai gerar o grau de evidência favorável $\mu_1$**

**1.1. Entre com o Valor Limite Máximo para formar o Universo de Discurso de (*Fonte1*).**

Valor Limite Máximo F1 = ..... unidade física

**1.2. Entre com o Valor Máximo Otimizado para formar o Universo de Discurso de (*Fonte1*).**

Valor Máximo Otimizado Fotm = ..... unidade física

**1.3. Entre com o Valor Limite Mínimo para formar o Universo de Discurso de (*Fonte1*).**

Valor Limite Mínimo F1 = ..... unidade física.

**1.4. Apresente o Valor da Grandeza Medida xF1**

Valor Grandeza xF1 = ..... unidade física

**1.5. Determine o Grau de Evidência Favorável  $\mu_1$  da Fonte de Informação 1 conforme as condicionais abaixo:**

$$\mu_1 = \left\{ \begin{array}{l} \left[ \frac{x_{F1} - \text{Valor}_{\text{Limite M\u00ednimoF1}}}{\text{Valor}_{\text{M\u00e1ximo OtimizadoFotm}} - \text{Valor}_{\text{Limite M\u00ednimoF1}}} \right] \\ \quad \text{se } x_{F1} \in [\text{Valor}_{\text{Limite M\u00ednimoF1}}, \text{Valor}_{\text{M\u00e1ximo OtimizadoFotm}}] \\ \\ \left[ \frac{x_{F1} - \text{Valor}_{\text{Limite M\u00e1ximoF1}}}{\text{Valor}_{\text{M\u00e1ximo OtimizadoFotm}} - \text{Valor}_{\text{Limite M\u00e1ximoF1}}} \right] \\ \quad \text{se } x_{F1} \in [\text{Valor}_{\text{M\u00e1ximo OtimizadoFotm}}, \text{Valor}_{\text{Limite M\u00e1ximoF1}}] \\ \\ 0 \quad \text{se } x_{F1} \geq \text{Valor}_{\text{Limite M\u00e1ximoF1}} \\ \\ 0 \quad \text{se } x_{F1} \leq \text{Valor}_{\text{Limite M\u00ednimoF1}} \end{array} \right.$$

**1.6. Apresente a Sa\u00edda S1** como sendo o grau de Evid\u00eancia favor\u00e1vel  $\mu_1$  da fonte de informa\u00e7\u00e3o 1

$$S_1 = \mu_1$$

**2. Para a Segunda Fonte de Informa\u00e7\u00e3o (Fonte2) que vai gerar o grau de evidencia desfavor\u00e1vel  $\lambda_1$**

**2.1. Entre com o Valor Limite M\u00e1ximo para formar o Universo de Discurso de (Fonte2).**

Valor Limite M\u00e1ximo F2 = ..... unidade f\u00edsica

**2.2. Entre com o Valor M\u00e1ximo Otimizado para formar o Universo de Discurso de (Fonte2).**

Valor M\u00e1ximo Otimizado Fotm = ..... unidade f\u00edsica

**2.3. Entre com o Valor Limite M\u00ednimo para formar o Universo de Discurso de (Fonte2).**

Valor Limite M\u00ednimo F2 = ..... unidade f\u00edsica.

**2.4. Apresente o Valor da Grandeza Medida xF2**

Valor Grandeza xF2 = ..... unidade f\u00edsica

**2.5. Determine o Grau de Evid\u00eancia Favor\u00e1vel  $\mu_2$  da Fonte de Informa\u00e7\u00e3o 2 conforme as condicionais abaixo:**

$$\mu_2 = \left\{ \begin{array}{l} \left[ \frac{x_{F2} - \text{Valor}_{\text{Limite M\u00ednimoF2}}}{\text{Valor}_{\text{M\u00e1ximo OtimizadoFotm}} - \text{Valor}_{\text{Limite M\u00ednimoF2}}} \right] \\ \quad \text{se } x_{F2} \in [\text{Valor}_{\text{Limite M\u00ednimoF2}}, \text{Valor}_{\text{M\u00e1ximo OtimizadoFotm}}] \\ \\ \left[ \frac{x_{F2} - \text{Valor}_{\text{Limite M\u00e1ximoF2}}}{\text{Valor}_{\text{M\u00e1ximo OtimizadoFotm}} - \text{Valor}_{\text{Limite M\u00e1ximoF2}}} \right] \\ \quad \text{se } x_{F2} \in [\text{Valor}_{\text{M\u00e1ximo OtimizadoFotm}}, \text{Valor}_{\text{Limite M\u00e1ximoF2}}] \\ \\ 0 \quad \text{se } x_{F2} \geq \text{Valor}_{\text{Limite M\u00e1ximoF2}} \\ \\ 0 \quad \text{se } x_{F2} \leq \text{Valor}_{\text{Limite M\u00ednimoF2}} \end{array} \right.$$

**2.6. Apresente a Sa\u00edda S2 com o complemento do Graus de Evid\u00eancia favor\u00e1vel**

$$\lambda_1 = 1 - \mu_2$$

3. Apresente a Anotação de dois valores gerada pelas duas fontes de informação:

$$A = (\mu_1, \lambda_1)$$

4. Fim

### Algoritmo de Análise Paraconsistente NAP

Entrada: Elementos da Anotação  $\mu_1 e \lambda_1$

Saídas: Grau de Certeza resultante real  $S1 = \mu_{ER}$

1. Entre com os valores de Entrada obtidos por duas Fontes de Informação (Fonte1) (Fonte2)

$\mu_1$  \*/ Grau de Evidência favorável obtido na Fonte F1  $0 \leq \mu_1 \leq 1$

$\lambda_1$  \*/ Grau de Evidência desfavorável obtido na Fonte F2  $0 \leq \lambda_1 \leq 1$

1.2. Calcule o Grau de Certeza

$$G_C = \mu_1 - \lambda_1$$

1.3. Calcule o Grau de Contradição

$$G_{ct} = (\mu_1 + \lambda_1) - 1$$

1.4. Calcule a distância d

$$d = \sqrt{(1 - |G_C|)^2 + G_{ct}^2}$$

1.5. Determine os sinais das Saídas

Se  $d > 1$ , então considere Indefinição: Vá para o passo 2 e faça:  $S1 = 0,0$

Senão vá para o próximo item

1.6. Determine o Grau de Certeza real  $G_{CR}$

Se  $G_C > 0$  faça  $G_{CR} = (1 - d)$

Se  $G_C < 0$  faça  $G_{CR} = (d - 1)$

1.7. Determine o Grau de Evidência resultante real

$$\mu_{ER} = \frac{G_{CR} + 1}{2}$$

2. Apresente o resultado na saída

Faça  $S1 = \mu_{ER}$

3. Fim

## 2.2 Princípio de funcionamento do algoritmo MPPT InC-LPA2v

A versão final do algoritmo baseado em lógica paraconsistente anotada com anotação de dois valores, sintetiza a condutância incremental com a LPA2v, formando o algoritmo InC-LPA2v.

O algoritmo utiliza o cálculo da condutância incremental em sua entrada, sendo denominado de funções E1.

O cálculo das funções E1 é dado pela equação 15:

$$E_1 = \frac{I}{V} + \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (15)$$

Utilizar a equação (15) para gerar o sinal (Sgn = 0) significa inclinação nula na reta tangente a curva ou que o sistema está no MPP, à esquerda do MPP (Sgn = 1) ou direita do MPP (Sgn = -1) onde na LPA2v é feita a seguinte consideração.

A função E1 será responsável por definir a polaridade do eixo X do reticulado da LPA2v pela regra do algoritmo de condutância incremental. Se o resultado da derivada for menor que zero, significa que a tensão está acima do MPP. Dessa forma, o sinal negativo é retirado do resultado da derivada por meio de um bloco *sign* do MATLAB, com o valor de -1 (Ação Not estabelecido pela Matriz de reflexão no eixo Y) GC), e esse valor irá transformar a matriz de identidade na matriz de mudança de polaridade do eixo X, ou matriz de reflexão no eixo Y, substituindo o valor de A1 por -1.

A função E2 definirá o ajuste do passo a ser aplicado, dependendo da distância do estado lógico atual para o estado lógico anterior.

$$E_2 = E1(k) - E1(k - 1) \quad (16)$$

### 2.2.1 Estratégia de otimização das entradas do InC-LPA2v

A Figura 14 demonstra a estratégia de otimização das entradas do algoritmo MPPT InC-LPA2v referentes à função E1.



### 2.2.2 Estratégia de inversão de polaridade do eixo X do reticulado do MPPT InC-LPA2v.

Ao observar o princípio de funcionamento dos algoritmos convencionais, em que a tensão é a variável controlada e o sistema de controle MPPT fica constantemente abaixo ou acima do ponto otimizado, foi desenvolvido um modelo computacional em que o reticulado da LPA2v tem uma frequência de inversão de polaridade do eixo X por meio das matrizes de identidade e da matriz de reflexão do eixo Y, ou de mudança de polaridade do eixo X.

Conforme a Figura 16, a matriz de identidade mantém a polaridade do eixo X quando a função sinal da programação for positiva, ou seja, 1.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

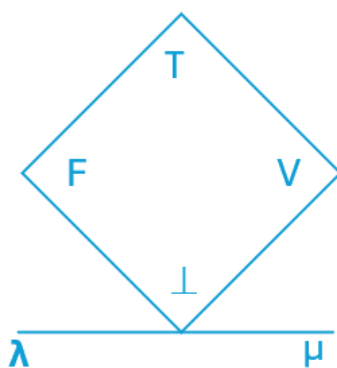


Figura 16 - Polaridade padrão do eixo X do reticulado LPA2v

Conforme a Figura 17, quando a função sinal da programação for negativa, ou seja, -1, então a matriz se tornará uma matriz de reflexão no eixo Y e a polaridade do eixo X será invertida. Dessa forma, tem-se o estado lógico verdadeiro à esquerda do reticulado e o falso à direita.

Isso é uma estratégia fundamental para o funcionamento do algoritmo, já que a proposição é “A potência está no MPP”.

E, caso a resposta seja sim e a última ação na variável manipulada (tensão) foi enviá-la da direita para a esquerda, ou seja, diminuí-la, então a verdade precisa estar à esquerda no reticulado.

A ativação da matriz de identidade é realizada multiplicando o valor de A1 da matriz pela função sinal, que pode ser 1 ou -1, pelas regras da programação.

A programação protege a matriz do sinal 0, já que o algoritmo só dá início ao controle caso o sistema não esteja no MPP. Conforme a regra do algoritmo de condutância incremental, quando o resultado da derivada é zero, a inclinação da reta tangente à curva é zero e o sistema está no MPP. Se estiver no MPP, simplesmente o *duty cycle* do conversor CC/CC é mantido estável, ou seja,  $D = Dold$ , e não há alteração na tensão.

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

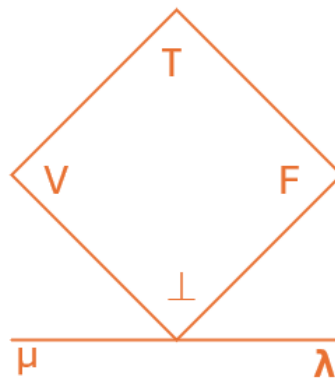


Figura 17 - Inversão de polaridade do eixo X do reticulado LPA2v

A seguir, os cálculos que comprovam as coordenadas do eixo Y do reticulado quando a matriz de reflexão no eixo Y é ativada. O cálculo deve comprovar que não há alterações nesse eixo, como programado.

Coordenada (0,1) – Estado lógico Inconsistente (T)

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$x' = (-1 * 0) + (0 * 1) + (0 * 1) = 0$$

$$y' = (0 * 1) + (1 * 1) + (0 * 1) = 1$$

Resultado: Não houve mudança no eixo X ou Y

Coordenada (0,-1) - Paracompleto ( $\perp$ )

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$x' = (-1 * 0) + (0 * -1) + (0 * 1) = 0$$

$$y' = (0 * 0) + (1 * -1) + (0 * 1) = -1$$

Resultado: Não houve mudança no eixo X ou Y

A seguir, os cálculos que comprovam as coordenadas do eixo X do reticulado da LPA2v quando a matriz de reflexão é ativada. Os cálculos devem comprovar a inversão de polaridade desse eixo.

Coordenada (1,0) – Verdadeiro (V)

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$x' = (-1 * 1) + (0 * 0) + (0 * 1) = -1$$

$$y' = (0 * 1) + (1 * 0) + (0 * 1) = 0$$

Resultado: Inversão de polaridade do Eixo X

Coordenada (-1,0) – Falso (F)

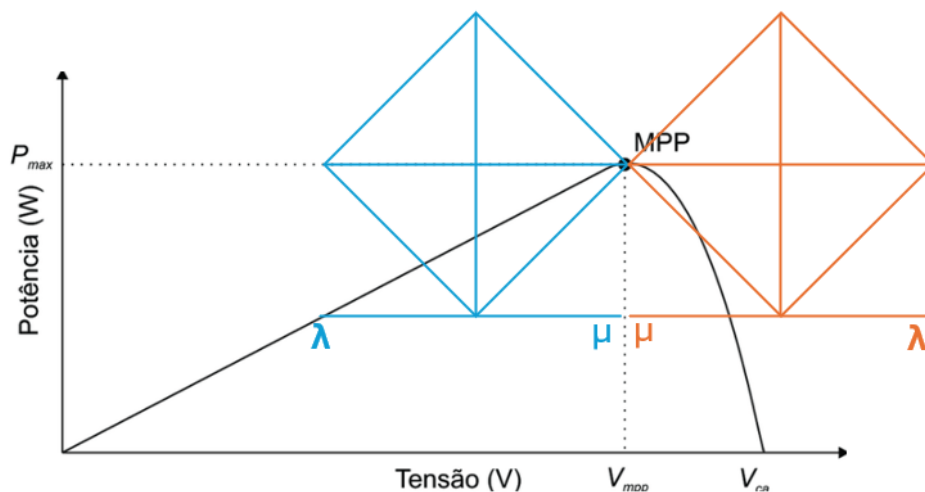
$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$x' = (-1 * -1) + (0 * 0) + (0 * 1) = 1$$

$$y' = (0 * -1) + (1 * 0) + (0 * 1) = 0$$

Resultado: Inversão de polaridade do Eixo X

A Figura 18 mostra a representação do comportamento do reticulado em relação à curva P-V. Quando a tensão está abaixo ou à esquerda do MPP, a função sinal é positiva e a programação trabalha com a matriz de identidade, mantendo as coordenadas padrão do reticulado do algoritmo Inc-LPA2v. Mas quando a tensão está acima ou à direita do MPP, a função sinal é negativa e então o algoritmo começa a trabalhar com a matriz de reflexão, invertendo a polaridade do eixo X. Isso faz com que a verdade da proposição esteja à direita do campo de representação, indo ao encontro do MPP.



**Figura 18 - Representação da inversão de polaridade do eixo X do reticulado em relação ao MPP na curva P-V.**

A Figura 19 mostra o comportamento do reticulado em relação ao *duty cycle* do conversor CC/CC do tipo *boost*. No caso de a tensão estar à esquerda do MPP, e para diminuir o *duty cycle* e aumentar a tensão, o algoritmo utiliza a matriz de identidade para o reticulado. Quando a tensão está acima do MPP, o algoritmo utiliza a matriz de reflexão para inverter a polaridade do reticulado, aumentar o *duty cycle* e reduzir a tensão, indo sempre ao encontro da verdade da proposição, que é “A potência está no MPP”.

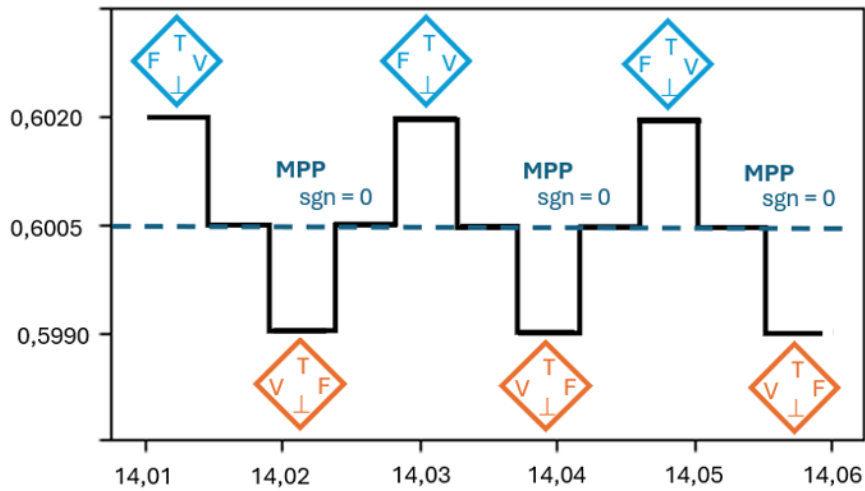


Figura 19 - Representação da inversão de polaridade do eixo X do reticulado em relação ao *duty cycle* (ciclo de trabalho do conversor CC/CC do tipo *boost*).

A figura 20 mostra a representação gráfica do algoritmo MPPT LPA2v.

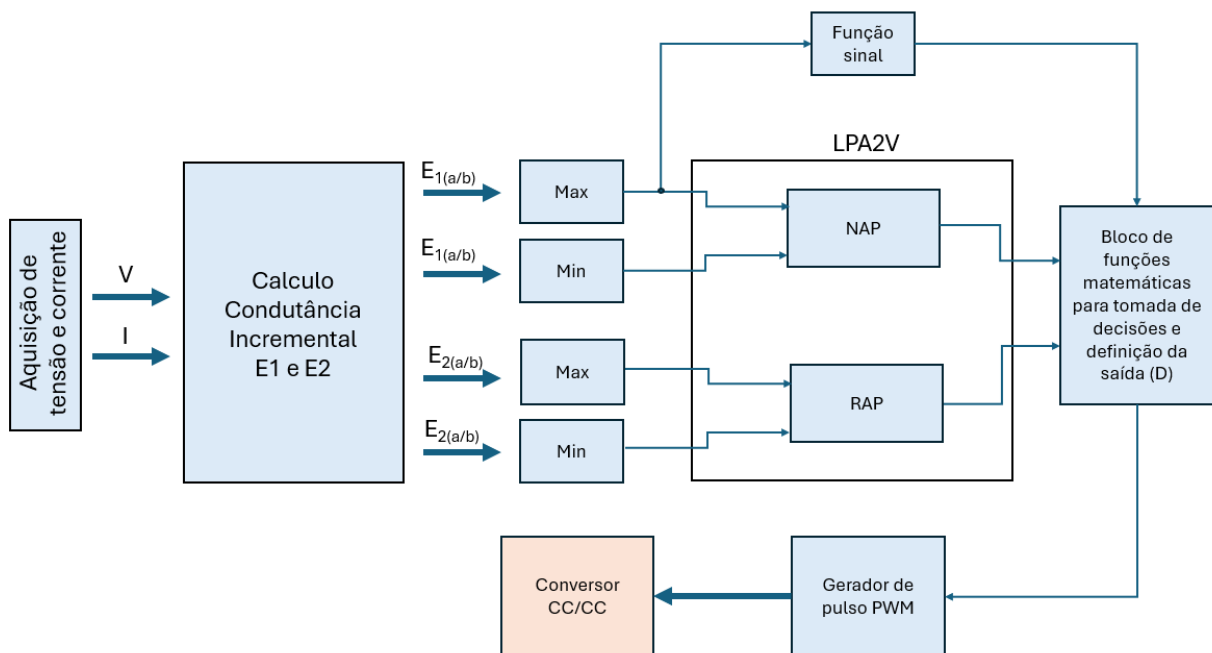


Figura 20 - Representação gráfica do algoritmo MPPT InC-LPA2v

A figura 21 mostra o fluxograma do algoritmo MPPT InC-LPA2v.

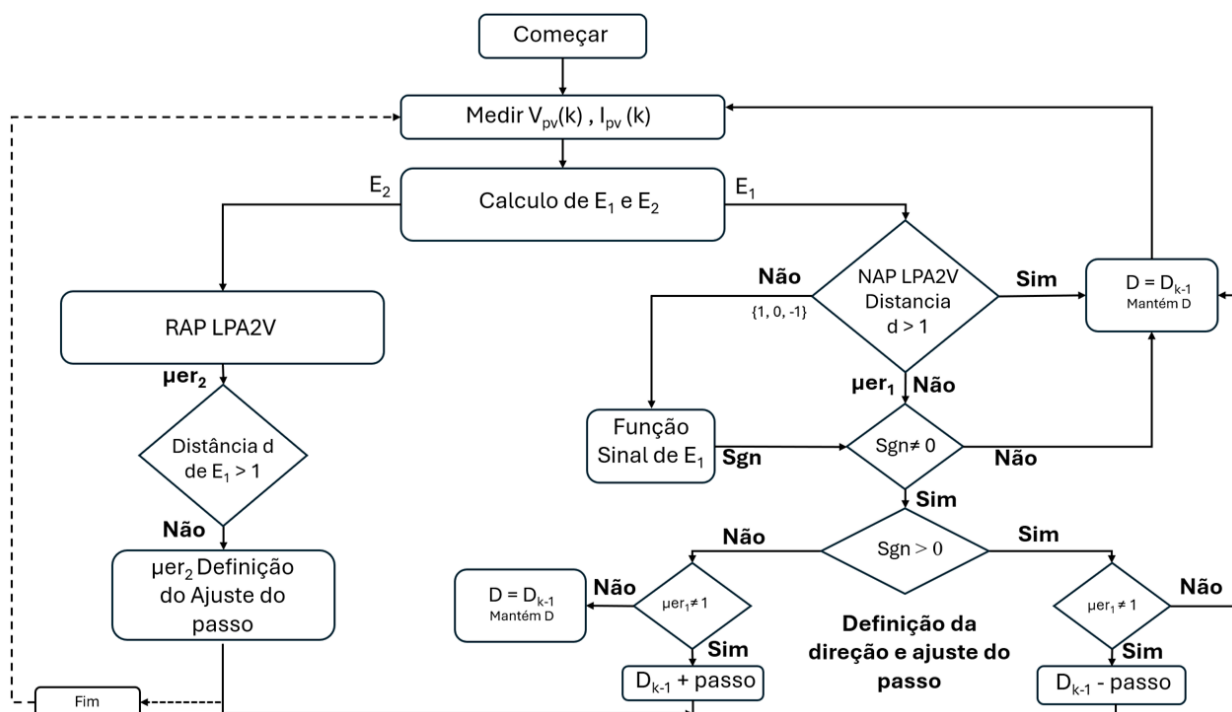


Figura 21 - Fluxograma do algoritmo MPPT InC-LPA2v.

### 2.3 Experimento de desenvolvimento do algoritmo MPPT InC-LPA2v

Os experimentos foram realizados no MATLAB, ferramenta de simulação de sistemas de engenharia. A LPA2v foi projetada no sistema em diagrama de blocos, e as saídas do algoritmo foram inseridas em um bloco de funções matemáticas (*math function block*) que, ao receber os sinais de saída da LPA2v como distância (D) e grau de evidência resultante ( $\mu_{er}$ ), verifica as condições em sua programação e realiza os cálculos e o controle do conversor CC/CC por meio da variável D (*duty cycle*) em sua saída, como mostrado pela Figura 22.

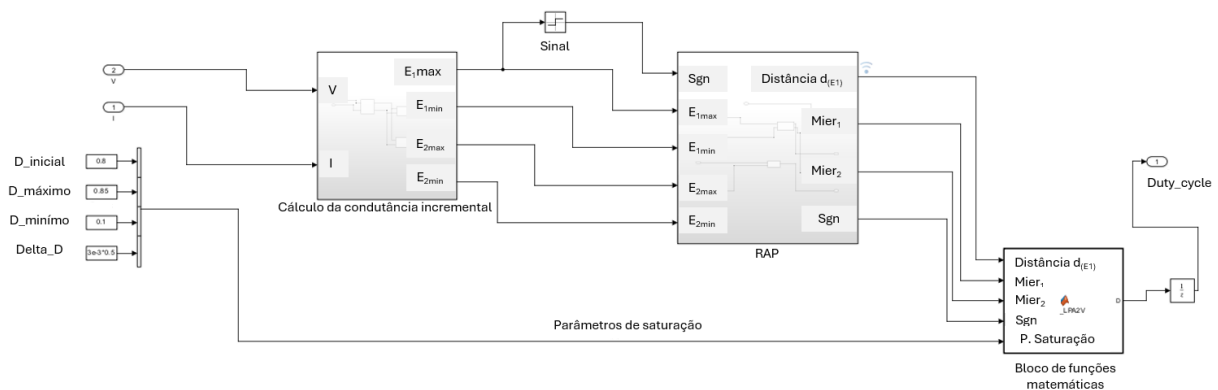


Figura 22 - Projeto do algoritmo MPPT InC-LPA2v no matlab

A tabela 3 mostra dados do painel fotovoltaico utilizado para realizar os experimentos, o Painel é do simulador do sistema matlab simulink com as mesmas especificações do painel físico

Tabela 3 - Dados do painel fotovoltaico do sistema Simulink utilizado nos experimentos

Fonte: matlab (2025).

Parâmetro	Valor
<b>Fabricante</b>	American solar
<b>Modelo / Part Number</b>	AS_6M30_HC_320W
<b>Tipo de Célula</b>	Mono-crystalline Si (Half Cell)
<b>Potência Máxima (Pm)</b>	320 W
<b>Tensão de Circuito Aberto (Voc)</b>	40,20 V
<b>Corrente de Curto-Circuito (Isc)</b>	10,14 A
<b>Tensão no Ponto de Máxima Potência (Vm)</b>	33,40 V
<b>Corrente no Ponto de Máxima Potência (Im)</b>	9,59 A
<b>Número de Células em Série</b>	60
<b>Número de Strings em Paralelo</b>	1
<b>Resistência Série (Rs)</b>	1,9454e-05 $\Omega$
<b>Resistência Paralela (Rp)</b>	682,96 $\Omega$
<b>Coefficiente de Temperatura da Corrente (TIPH1)</b>	0.0004999 1/K
<b>Gap de Energia (Eg)</b>	1,12 eV
<b>Temperatura de Medição</b>	25 °C
<b>Peso</b>	18,5 kg
<b>Dimensões</b>	(1686 x 1002) mm
<b>Fonte dos Dados</b>	Datasheet American solar e Simscape MATLAB

### 2.3.1 Principais fórmulas utilizadas

A energia total gerada ao longo da simulação foi obtida por meio da integração numérica da potência no tempo, utilizando a regra do trapézio, conforme representado pela somatória apresentada na Equação 18.

$$E_{total} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{P_i + P_{i+1}}{2} * \Delta t \quad (18)$$

Para calcular a eficiência dos sistemas, foi utilizada a fórmula da eficiência global de Çirak e Çalık (2023) equação (19).

$$n_{pv} = \frac{E_{pvtotal}}{P_{max} * T} * 100\% \quad (19)$$

Sendo:

$n_{pv}$  eficiência global (ou fator de capacidade) do sistema

$E_{pvtotal}$  energia total gerada no período (em kWh)

$P_{max}$  potência máxima nominal do sistema (em kW)

T tempo total do período de 24h

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Algoritmo InC-LPA2v

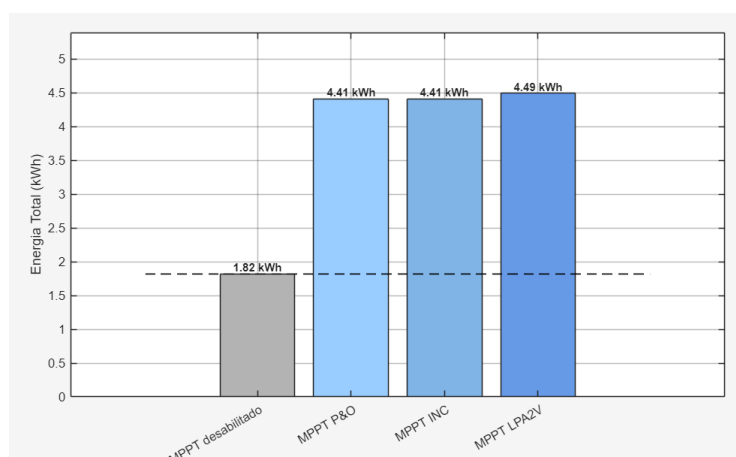
Uma versão definitiva do algoritmo MPPT LPA2v foi criada, sintetizando a condutância incremental com a LPA2v para formar o InC-LPA2v.

Nos testes, foi comparada a eficiência do sistema fotovoltaico em relação a um sistema sem MPPT e a um sistema com os algoritmos de rastreamento Perturba e Observa (P&O) e Condutância Incremental (InC) convencionais.

A escolha dos algoritmos Perturba e Observa (P&O) e Condutância Incremental (InC) para a base comparativa deve-se ao fato de serem as técnicas convencionais mais difundidas em sistemas fotovoltaicos.

#### 3.2 Teste de funcionamento no ambiente de desenvolvimento

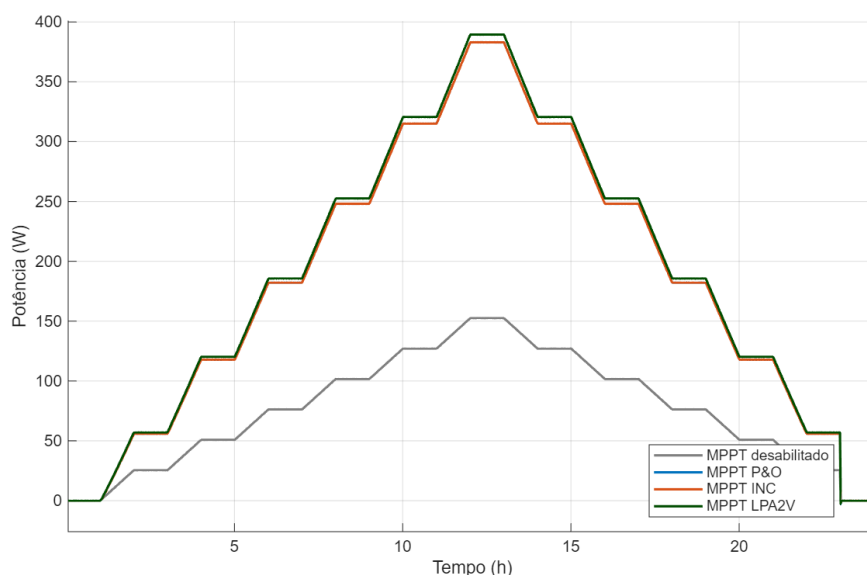
Na primeira etapa, são apresentados todos os resultados da aplicação desenvolvida com 1 painel de 320W em 1000W/m<sup>2</sup> (STC), onde todos os algoritmos foram submetidos a testes de rastreamento do ponto de máxima potência e ao seu comportamento ao longo dos testes. Dessa forma, pode-se observar que os testes nesta fase foram considerados todos promissores, sendo que todos os algoritmos obtiveram um excelente desempenho, mas com destaque para o algoritmo InC-LPA2v, que obteve uma geração de energia superior, como mostrado na Figura 23.



**Figura 23 - Comparação da geração de energia de cada algoritmo sistema com 1 painel 320W em 1000W/m<sup>2</sup> STC.**

A Figura 23 mostra que o algoritmo baseado em lógica paraconsistente obteve um desempenho superior, em torno de 0,08 kWh a mais ao longo da simulação, em comparação aos algoritmos convencionais.

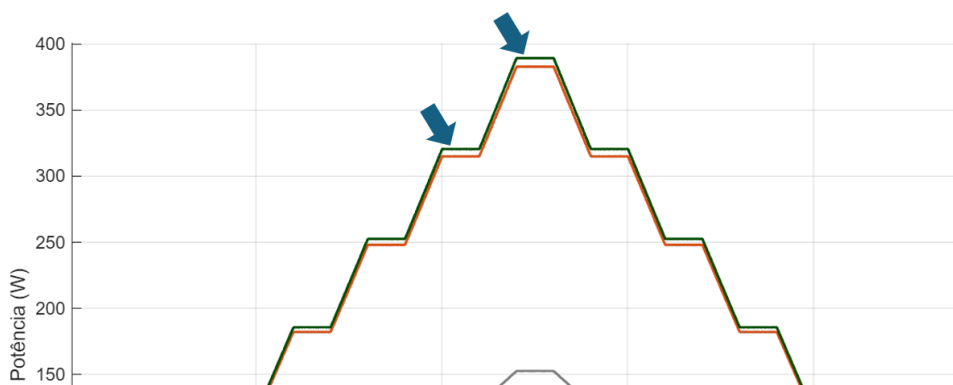
A Figura 24 traz uma comparação da curva de geração de energia de cada algoritmo ao longo da simulação e mostra que a curva do algoritmo MPPT InC-LPA2v está em conformidade com o que se espera de um algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos.



**Figura 24 - Comparação da curva de geração de energia de cada algoritmo sistema com 1 painel 320W em 1000W/m<sup>2</sup> STC.**

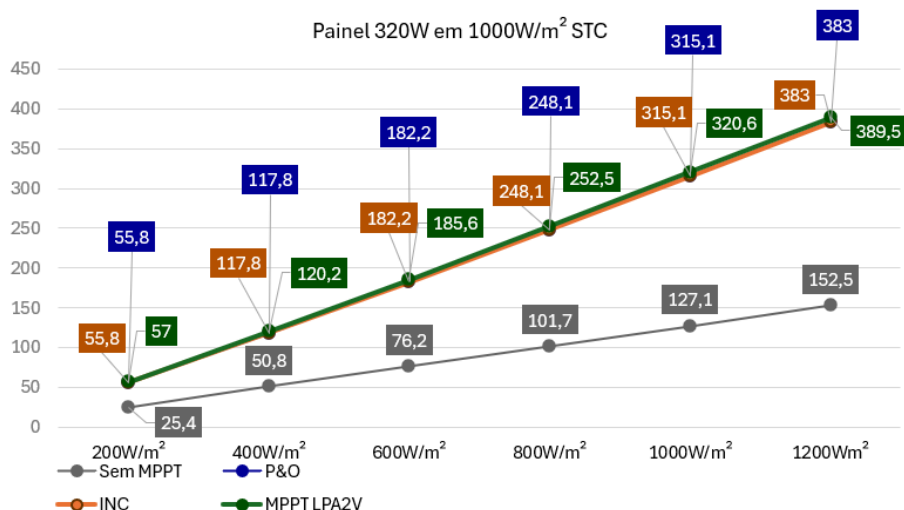
Analisando a curva de geração de potência do gráfico da Figura 24, os resultados mostram que o algoritmo baseado em lógica paraconsistente, representado pela linha verde, obteve potências de pico ao longo da simulação superiores às dos algoritmos convencionais, uma observação relevante do gráfico da Figura 24 é que como os valores de geração de energia entre os algoritmos convencionais P&O e InC foram praticamente iguais as linhas ficaram muito sobrepostas omitindo a linha azul do P&O e aparecendo apenas a linha laranja do InC, por isso foi construído o gráfico da Figura 26 para esclarecer os valores e serão mostrados a diante.

Conforme a Figura 25 onde foi aplicado um recorte específico e uma ampliação na imagem do gráfico da Figura 24 para melhorar a possibilidade da análise.



**Figura 25 - Comparação da potência de pico na curva de geração de energia de cada algoritmo sistema com 1 painel 320W em 1000W/m<sup>2</sup> STC.**

A Figura 26 mostra o gráfico com o resultado que cada algoritmo obteve em cada instante, de acordo com a variação da irradiância. O algoritmo MPPT obteve um desempenho melhor na extração de potência do sistema em todos os pontos.



**Figura 26 - Gráfico de comparação da potência de pico na curva de geração de energia de cada algoritmo sistema com 1 painel 320W em 1000W/m<sup>2</sup> STC.**

A Tabela 4 mostra o ganho real do algoritmo MPPT InC-LPA2v, em watts, nos picos de irradiância. Esse ganho tem uma média de 2%, mostrando que não há disparidade e que a capacidade de funcionamento do algoritmo se mantém constante ao longo da simulação.

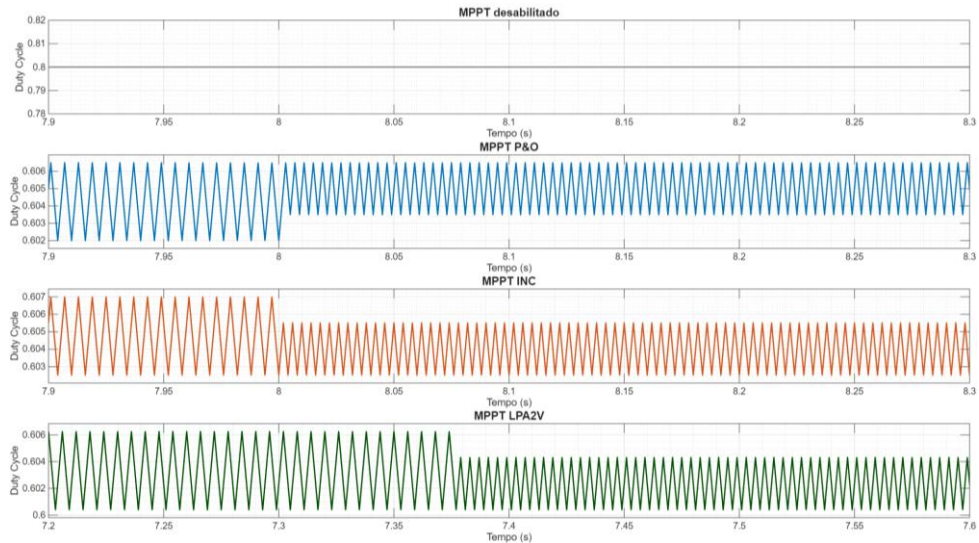
O ganho médio de 2% obtido pelo InC-LPA2v alinha-se aos resultados de Yilmaz et al. (2018), que demonstram que algoritmos baseados em lógicas não clássicas podem atingir precisões de rastreamento superiores a 94% sob variadas condições de irradiância e temperatura

**Tabela 4 - Ganho do Algoritmo MPPT InC-LPA2v em relação aos demais algoritmos.**

Algoritmo	Aplicação com 1 Painél 320W (1000W/m <sup>2</sup> STC)					
	200W/m <sup>2</sup>	400W/m <sup>2</sup>	600W/m <sup>2</sup>	800W/m <sup>2</sup>	1000W/m <sup>2</sup>	1200W/m <sup>2</sup>
Sem MPPT	25,4	50,8	76,2	101,7	127,1	152,5
P&O	55,8	117,8	182,2	248,1	315,1	383
INC	55,8	117,8	182,2	248,1	315,1	383
MPPT LPA2V	57	120,2	185,6	252,5	320,6	389,5
Ganho (W)	1,2	2,4	3,4	4,4	5,5	6,5
Ganho (%)	2%	2%	2%	2%	2%	2%

### 3.2.1 Ciclo de trabalho do conversor CC/CC (*Duty Cycle*).

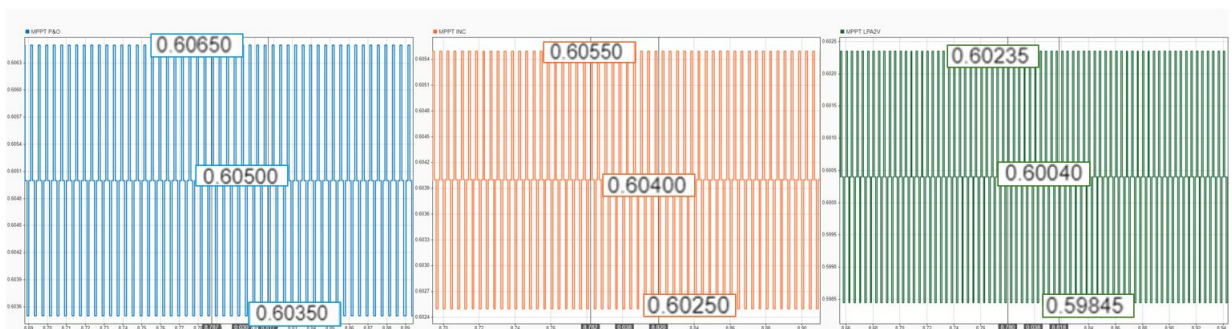
A Figura 27 mostra a comparação do ciclo de trabalho dos conversores de cada algoritmo em regime permanente, na aplicação desenvolvida com 1 painel de 320W em 1000W/m<sup>2</sup> (STC), e demonstra que o ciclo de trabalho do algoritmo MPPT InC-LPA2v obteve o resultado esperado, com ondulações (*ripple*) dentro do comportamento típico, muito similar ao dos algoritmos convencionais.



**Figura 27 - comparação do ciclo de trabalho dos conversores de cada algoritmo em regime permanente com 1 painel de 320W em 1000W/m<sup>2</sup> STC**

A Figura 28 apresenta a amplitude das ondulações (*ripple*) do ciclo de trabalho do conversor CC/CC para os três algoritmos de MPPT avaliados: o Perturba e Observa em azul, a Condutância Incremental em laranja e o InC-LPA2v em verde. O algoritmo P&O oscila entre 0,60650 e 0,60350, resultando em um *ripple* de aproximadamente 0,00300; já a Condutância Incremental apresenta valores entre 0,60550 e 0,60250, também com *ripple* próximo de 0,00300. Em contraste, o InC-LPA2v apresenta a maior faixa de variação, oscilando entre 0,60235 e 0,59845, o que corresponde a um *ripple* de cerca de 0,00390 ou seja, aproximadamente 0,00090 maior do que os demais métodos, representando um aumento de cerca de 30% na amplitude da ondulação.

Esses resultados indicam que o P&O (azul) e o IncCond (laranja) exibem um comportamento mais estável, enquanto o InC-LPA2v (verde) apresenta uma maior intensidade de *ripple* em torno do ponto de operação.



**Figura 28 - Amplitude das ondulações (*ripples*) do ciclo de trabalho do conversor CC/CC para os três algoritmos de MPPT.**

Embora o algoritmo InC-LPA2v apresente a maior amplitude de *ripple* no ciclo de trabalho, com uma variação aproximada de 0,00390 em comparação aos 0,00300 observados nos métodos P&O e Condutância Incremental, essa maior oscilação não compromete seu desempenho energético.

A Tabela 4 mostra que, mesmo com um *ripple* cerca de 30% superior, o InC-LPA2v entrega consistentemente mais potência em todos os níveis de irradiância analisados, apresentando ganhos médios de aproximadamente 2% em relação aos métodos clássicos. Esse comportamento indica que, apesar de oscilar mais ao redor do ponto de máxima potência, o InC-LPA2v consegue estabelecer um ponto médio de operação mais favorável, resultando em uma maior extração de energia sem perda da estabilidade global do sistema.

Segundo Ullah et al. (2023), o controle preciso do duty cycle é crítico para estabilizar flutuações de potência, e métodos baseados em lógica nebulosa ou híbrida buscam justamente mitigar essas perdas para elevar a eficiência global.

Assim, conclui-se que o algoritmo mantém uma boa capacidade de rastreamento, assegurando um desempenho superior ao longo de toda a simulação.

### 3.2.2 Demonstração do rastreamento do ponto de máxima potência

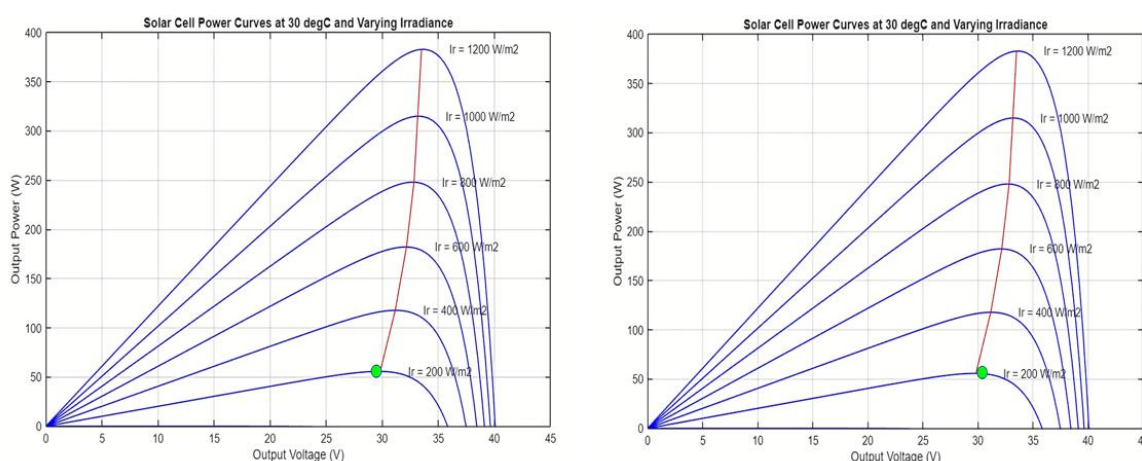
A simulação do rastreamento do ponto de máxima potência foi realizada no MATLAB, assim como a comparação de desempenho entre os algoritmos Perturba e Observa e o InC-LPA2v, que, na aplicação básica desenvolvida, demonstrou ser capaz de realizar o rastreamento de forma eficiente.

A Figura 29 mostra como os algoritmos se comportaram no início da simulação, com a irradiância indo de 0 a 200 W/m<sup>2</sup>. À esquerda, é apresentado o algoritmo Perturba e Observa e, à direita, o algoritmo MPPT InC-LPA2v.

O algoritmo MPPT InC-LPA2v foi capaz de realizar o rastreamento do MPP com alta precisão e desempenho, fazendo com que a tensão fosse conduzida de forma que a relação entre tensão e corrente se mantivesse em um ponto otimizado durante toda a simulação.

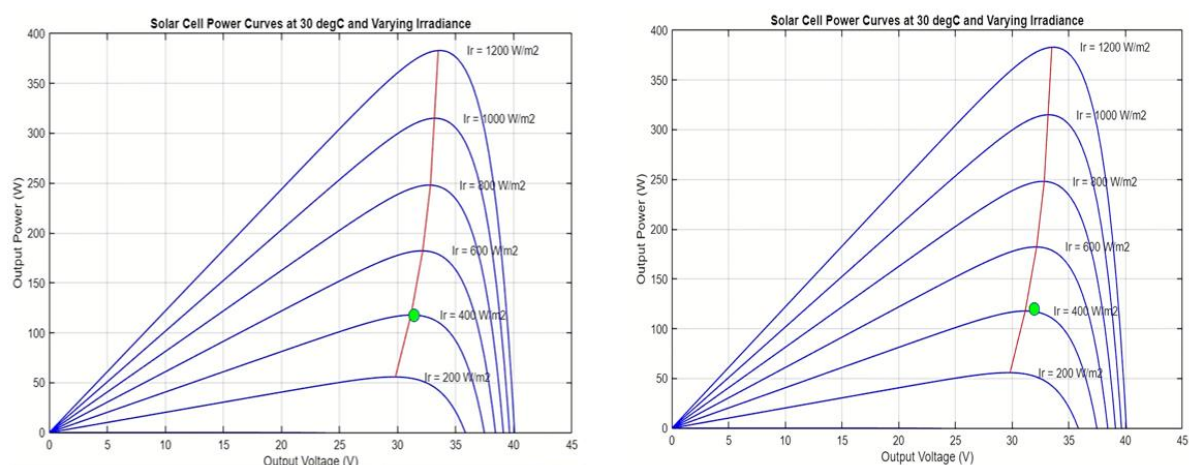
Essa precisão no rastreamento é um fator crítico para o sucesso de sistemas fotovoltaicos modernos, pois a capacidade de estabilizar flutuações de potência sob condições variáveis é o que previne perdas energéticas e garante a estabilidade global da geração, conforme destacado por Ullah et al. (2023).

Além disso, como o MPP se desloca dinamicamente com o meio ambiente, a utilização de algoritmos robustos torna-se uma necessidade técnica para extrair a máxima energia disponível a cada instante, conforme fundamentado por Çırak e Çalık (2023).



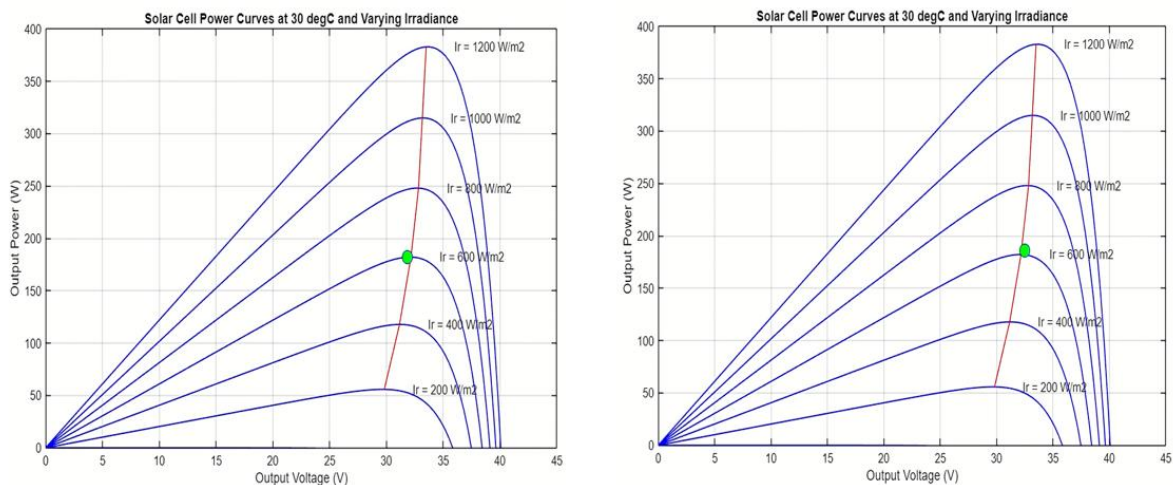
**Figura 29 - Comparação do rastreamento do ponto de máxima potência em 200W/m<sup>2</sup> a esquerda o algoritmo P&O à direita o algoritmo MPPT InC-LPA2v.**

A Figura 30 mostra o comportamento dos algoritmos com a irradiância variando de 200 a 400 W/m<sup>2</sup>.



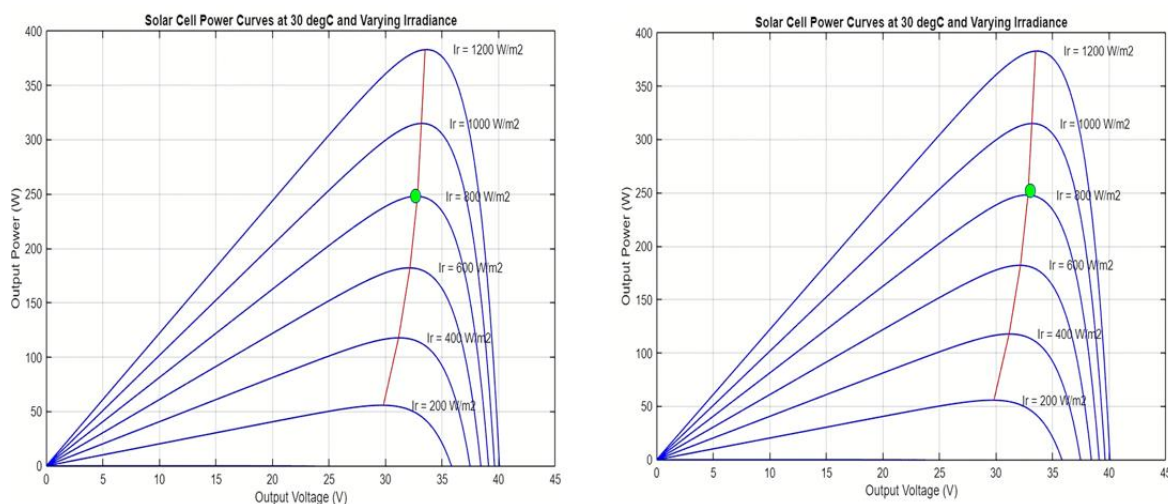
**Figura 30 - Comparação do rastreamento do ponto de máxima potência em 400W/m<sup>2</sup> a esquerda o algoritmo P&O à direita o algoritmo MPPT InC-LPA2v.**

A Figura 31 mostra o comportamento dos algoritmos com a variação da irradiância de 400 a 600 W/m<sup>2</sup>.



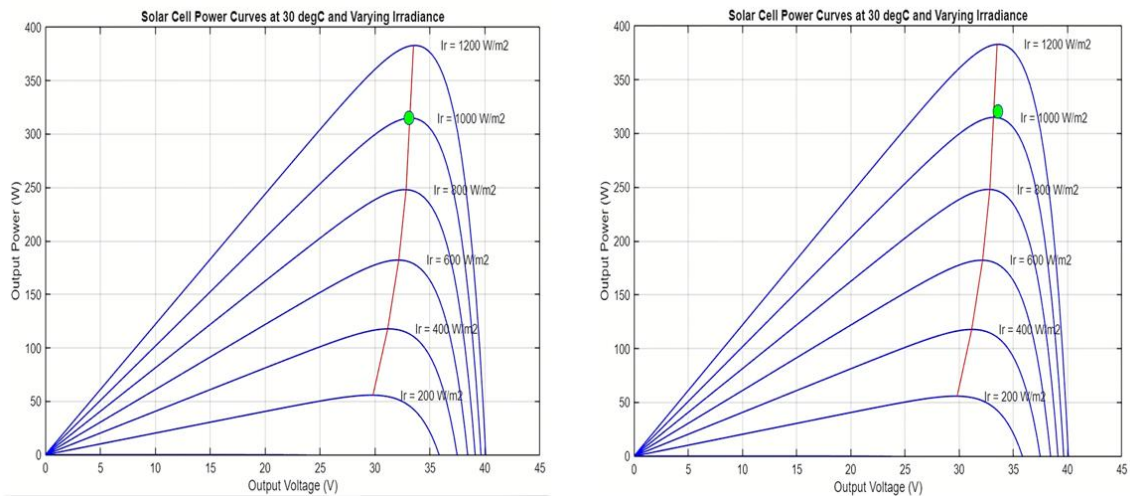
**Figura 31 - Comparação do rastreamento do ponto de máxima potência em 600W/m<sup>2</sup> a esquerda o algoritmo P&O à direita o algoritmo P&O InC-LPA2v.**

A Figura 32 mostra o comportamento dos algoritmos com a irradiância variando de 600 a 800 W/m<sup>2</sup>.



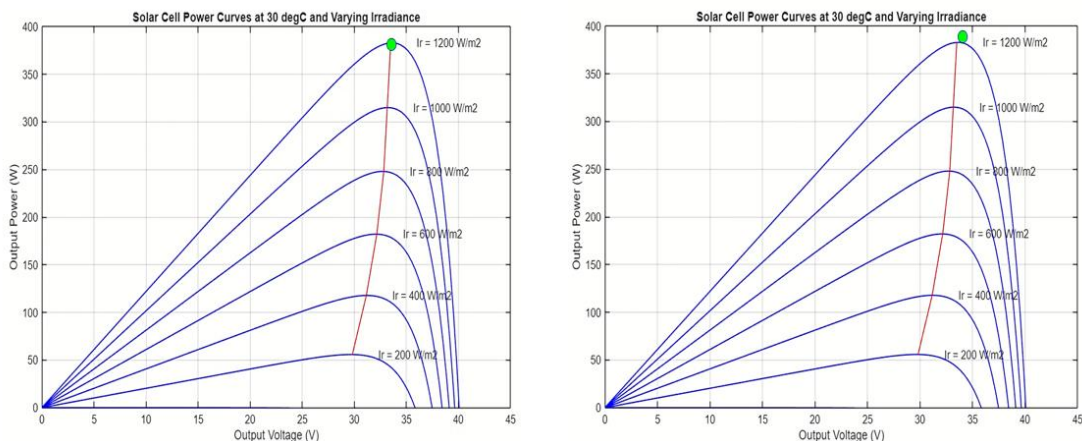
**Figura 32 - Comparação do rastreamento do ponto de máxima potência em 800W/m<sup>2</sup> a esquerda o algoritmo P&O à direita o algoritmo MPPT InC-LPA2v.**

A Figura 33 mostra o comportamento dos algoritmos com a irradiância variando de 800 a 1000 W/m<sup>2</sup>.



**Figura 33 - Comparação do rastreamento do ponto de máxima potência em 1000W/m<sup>2</sup> a esquerda o algoritmo P&O à direita o algoritmo P&O InC-LPA2v.**

A Figura 34 mostra o comportamento dos algoritmos com a irradiância variando de 1000 a 1200 W/m<sup>2</sup>.



**Figura 34 - Comparação do rastreamento do ponto de máxima potência em 1200W/m<sup>2</sup> a esquerda o algoritmo P&O à direita o algoritmo MPPT InC-LPA2v.**

### 3.3 Eficiência Global dos algoritmos em testes avançados

O ambiente de simulação proporciona irradiância por um período simulado de 24 horas, o que faria a eficiência dos sistemas ficar acima do que de fato é possível em uma aplicação real. Por isso, para apresentar os valores reais de eficiência global do sistema, apenas 12 horas de irradiância serão consideradas no cálculo.

Testes avançados foram realizados para verificar a eficiência dos algoritmos. Foram feitas ligações dos painéis em série para aumentar a potência do sistema e também uma aplicação com sombreamento parcial, identificada na tabela 5, com 6 painéis PS (abreviação para *Partial Shading*). Nessa configuração, dos 6 painéis, três tiveram o fornecimento de irradiância comprometido em 50%, fazendo com que o sistema opere com apenas 75% de sua capacidade.

A Tabela 5 apresenta os valores de potência, em kW, extraídos dos sistemas por cada um dos algoritmos, e foi feita uma média da eficiência global de cada sistema. A planilha também mostra um estudo de caso em que os ganhos do algoritmo MPPT InC-LPA2v são demonstrados em relação ao sistema sem MPPT e aos algoritmos convencionais.

A eficiência global do sistema foi calculada seguindo a metodologia de Çırak e Çalık (2023), que define o parâmetro como a relação entre a potência média de saída e a máxima potência alcançável sob condições específicas.

**Tabela 5 - Eficiência Global dos algoritmos em testes avançados**

Algoritmo	Eficiência Global do sistema em KW - Pannel 0,32KW (1000 W/m <sup>2</sup> STC)					Eficiência Global média
	1 Pannel	2 Pannels	4 Pannels	6 Pannels	6 Pannels PS	
	<b>7,68</b>	<b>15,36</b>	<b>30,72</b>	<b>46,08</b>	<b>34,56</b>	
Sem MPPT	0,91	0,905	0,905	0,905	0,455	4,793%
MPPT P&O	2,205	4,49	8,98	13,465	7,13	27,405%
MPPT INC	2,205	4,41	8,82	13,225	7,01	27,023%
MPPT InC-LPA2V	2,245	4,49	8,98	13,465	7,13	27,509%
Ganho em relação a S/MPPT	1,335	3,585	8,075	12,56	6,675	22,716%
Ganho em relação ao P&O	0,04	0	0	0	0	0,104%
Ganho em relação ao INC	0,04	0,08	0,16	0,24	0,12	0,486%

A análise da Tabela 5 evidencia que, embora os algoritmos clássicos P&O e Condutância Incremental apresentem bom desempenho global, o MPPT InC-LPA2v se destaca de forma consistente como a estratégia mais eficiente entre as avaliadas. Em todos os cenários de 1 a 6 painéis em série, incluindo a condição *PS* (*partial shading*) ou sombreamento parcial.

Conforme discutido por Çırak e Çalık (2023), o sombreamento parcial aplicado na simulação denominada 6 painéis (PS) na tabela 05, compromete a fotocorrente das células afetadas, o que exige algoritmos de rastreamento capazes de se adaptar a mudanças bruscas nas características elétricas do arranjo para evitar perdas significativas

O algoritmo InC-LPA2v entrega valores de potência ligeiramente superiores, confirmando uma eficiência global média de 27,509%, a maior obtida no conjunto de testes. Esse desempenho representa um ganho de 0,486% em relação ao InC e uma vantagem de 0,104% sobre o P&O, números que, apesar de modestos em magnitude percentual, são tecnicamente relevantes em sistemas fotovoltaicos, onde pequenas melhorias se traduzem em maior captação de energia ao longo do tempo.

Os resultados mostram que o InC-LPA2v não apenas mantém a robustez e estabilidade esperadas de um bom algoritmo de rastreamento, mas também consegue explorar melhor a curva de potência, evitando aprisionamento em máximos locais e extraíndo potência superior de forma consistente, consolidando-se como a alternativa mais eficiente dentro do conjunto comparado.

O algoritmo InC-LPA2v nasce da integração estratégica entre o cálculo tradicional da condutância incremental e a lógica paraconsistente anotada com anotação de dois valores, combinando o melhor de ambos, precisão na detecção da direção do MPP e robustez na tomada de decisão. Como evidenciado pela Tabela 5, o sistema garante uma leitura extremamente sensível das variações de tensão e corrente, evitando decisões equivocadas nos instantes críticos de transição. Essa combinação é justamente o que explica o desempenho superior observado, o InC fornece a informação diferencial com precisão, enquanto a LPA2v realiza a análise lógica avançada que conduz ao ponto de máxima potência global, mantendo estabilidade e aumentando a eficiência média do sistema. Assim, o algoritmo InC-LPA2v não substitui o InC, mas o potencializa, reforçando sua capacidade de rastreamento sem comprometer a originalidade e os princípios da lógica paraconsistente que caracterizam o algoritmo final.

## 4 CONCLUSÕES

O algoritmo MPPT InC-LPA2v provou ser mais uma solução viável para algoritmos aplicados em sistemas fotovoltaicos. Em todos os testes realizados, obteve alto desempenho, foi capaz de realizar os cálculos corretos e produzir os sinais de forma eficiente para controlar o conversor CC/CC, rastreando o ponto de máxima potência e fazendo o sistema funcionar de forma a maximizar a produção de energia atendendo a todas as demandas traçadas nos objetivos geral e específico. Sendo uma síntese da lógica paraconsistente anotada de dois valores com a condutância incremental, o estudo demonstra que essa combinação foi muito positiva para a técnica, potencializando o sistema e tornando-o muito mais eficiente do que o convencional. Dessa forma, conclui-se que, por meio da lógica paraconsistente anotada de dois valores, foi possível produzir um sistema computacional de alto desempenho para o controle de rastreamento do ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos.

### 4.1 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, propõe-se a integração do algoritmo InC-LPA2v com outras tecnologias da área, como redes neurais ou lógica *fuzzy*, para desenvolver versões híbridas que potencializem seu desempenho. Adicionalmente, é fundamental a validação do algoritmo em bancada de laboratório, por meio de um sistema fotovoltaico real com conversor CC-CC, a fim de verificar seu funcionamento prático e estabilidade. Por fim, sugere-se um estudo dedicado à otimização do *ripple* do sinal de controle, buscando estratégias para reduzir sua amplitude sem comprometer a eficiência energética alcançada.

## REFERÊNCIAS

BASYONI, A. M.; ZEKRY, A.; SHAKER, M. S. Investigation of Base High Doping Impact on the npn Solar Cell Microstructure Performance Using Physically Based Analytical Model. *Journal of Solar Energy Engineering*, v. 143, n. 5, p. 051002-1–051002-6, 2021. DOI: 10.1115/1.4053270.

BASYONI, Marwa Sayed Salem; ZEKRY, Abdelhalim; SHAKER, Ahmed. Investigation of Base High Doping Impact on the npn Solar Cell Microstructure Performance Using Physically Based Analytical Model. *Journal of Electronic Materials*, [S.l.], v. 50, n. 11, p. 6483–6495, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-021-09087-2>.

ÇIRAK, Cem Recai; ÇALIK, Hüseyin. Hotspots in maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems – A comprehensive and comparative review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S.l.], v. 179, p. 114144, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114144>.

DU PLESSIS, A. A.; STRAUSS, J. M.; RIX, Arnold. Application of dust mitigation strategies to single-axis-tracking photovoltaic modules in the semi-arid areas of South Africa. *IET Renewable Power Generation*, [S.l.], v. 14, n. 15, p. 2907–2913, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.1424>.

LI, Guiqiang et al. Performance analysis on a crystalline silicon photovoltaic cell under non-uniform illumination distribution with a high electrical efficiency. *Energy Conversion and Management*, [S.l.], v. 221, p. 113140, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113140>.

LI, Guiqiang; LU, Yashun; XUAN, Qingdong; PEI, Gang; JI, Jie; ZHAO, Xudong. Performance analysis on a crystalline silicon photovoltaic cell under non-uniform illumination distribution with a high electrical efficiency. *Energy Conversion and Management*, v. 210, p. 112707, 2020. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112707>.

LOUKIL, K.; ABBES, H.; ABID, H.; ABID, M.; TOUMI, A. Design and implementation of reconfigurable MPPT fuzzy controller for photovoltaic systems. *Ain Shams Engineering Journal*, [S.l.], v. 11, p. 319–328, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447919303000>. Acesso em: [02/08/2024].

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; SAFARI, A. A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 4, p. 1777–1790, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.018>.

NASA. Vanguard satellite (1958). Disponível em: <https://www.nasa.gov/image-article/vanguard-satellite-1958/>. Acesso em: 9 maio 2025.

DA SILVA FILHO, J. I. Métodos de Aplicações da Lógica Paraconsistente Anotada de anotação com dois valores-LPA2v com construção de Algoritmo e Implementação de Circuitos Eletrônicos. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais. São Paulo, 1999, 250 p.

DA SILVA FILHO, J. I.; ABE, J. M. Introdução à lógica paraconsistente anotada com ilustrações. 1ª. Ed. Santos: Editora Emmy, 2000.

DA SILVA FILHO, J. I. & ABE, J. M., Fundamentos das Redes Neurais Paraconsistentes – Destacando Aplicações em Neurocomputação. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 2001.

DA SILVA FILHO, J. I. Métodos de Aplicações da Lógica Paraconsistente Anotada de anotação com dois valores-LPA2v. *Revista Seleção Documental*, Santos. 2006.

DA SILVA FILHO, J. I.; ABE, J. M.; LAMBERT, T. G. Inteligência Artificial com as Redes de Análises Paraconsistentes. 1ª. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2008.

DA SILVA FILHO, J. I.; OLIVEIRA, D. B.; DE AGUIAR, A. L. L.; FERRARA, L. F. P.; GARCIA, D. V.; MARIO, M. C. Algoritmos fundamentados em Lógica Paraconsistente anotada aplicados em análises de variáveis físicas de um processo industrial. Revista Seleção Documental, Santos. 2012.

WEI, Xueyuan et al. Chemical approaches for electronic doping in photovoltaic materials beyond crystalline silicon. Chemical Society Reviews, Cambridge: Royal Society of Chemistry, v. 51, n. 24, p. 10532–10566, 2022. DOI: 10.1039/d2cs00110a. ISSN 1460-4744.

LOUKIL, K. et al. Design and implementation of reconfigurable MPPT fuzzy controller for photovoltaic systems. Ain Shams Engineering Journal, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 319-328, jun. 2020.

ULLAH, K. et al. Fuzzy-based maximum power point tracking (MPPT) control system for photovoltaic power generation system. Results in Engineering, [s. l.], v. 20, p. 101466, dez. 2023.

YILMAZ, U.; KIRCAY, A.; BOREKCI, S. PV system fuzzy logic MPPT method and PI control as a charge controller. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [s. l.], v. 81, p. 994-1001, maio 2018