

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
CAMPUS TIMÓTEO**

Rodrigo Silva Roque Bezerra

**ANÁLISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS DE RASTREAMENTO DO  
PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

**Timóteo**

**2019**

**Rodrigo Silva Roque Bezerra**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS DE RASTREAMENTO DO  
PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Monografia apresentada à Coordenação de Engenharia de Computação do Campus Timóteo do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Rodrigo Gaiba de Oliveira

Timóteo

2019

Rodrigo Silva Roque Bezerra

**ANÁLISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS DE RASTREAMENTO DO  
PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia de  
Computação do Centro Federal de Educação  
Tecnológica de Minas Gerais, campus Timóteo,  
como requisito parcial para obtenção do título de  
Engenheiro de Computação.

Trabalho aprovado. Timóteo, 12 de dezembro de 2019:



---

Prof. Rodrigo Gaiba de Oliveira  
Orientador



---

Prof. Elder de Oliveira Rodrigues  
Convidado



---

Profa. Viviane Cota Silva  
Convidada

Timóteo  
2019

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus por tudo que acontece em minha vida. Aos meus pais pelo apoio e esforço contribuindo de maneira significativa para este momento. Ao meu irmão e à minha namorada pelo incentivo, companheirismo e compreensão durante todo este tempo.

Gostaria de agradecer ao professor Rodrigo Gaiba de Oliveira pela disponibilidade, paciência e comprometimento durante todo o processo de orientação, sanando dúvidas e auxiliando nas dificuldades encontradas no desenvolvimento do trabalho. Muito obrigado ao CEFET-MG, aos professores e aos amigos que fazem parte da minha vida, por terem contribuído para o meu crescimento profissional e pessoal.

Não poderia deixar de agradecer à professora Deisymar por uma conversa no início do curso. Um diálogo esclarecedor que me auxiliou em um dos momentos mais difíceis que passei. Muito obrigado pela paciência e boa vontade. Enquanto educadores, a sabedoria para ensinar vai muito além da sala de aula.

# Resumo

A energia elétrica possui grande influência no mundo moderno, seja facilitando o cotidiano das pessoas, ou contribuindo nos avanços tecnológicos. Destacada a importância ímpar da eletricidade, são realizados vários estudos sobre a forma de produção da mesma. A energia advinda de combustíveis fósseis está perdendo espaço a cada dia, visto que os recursos se tornam cada vez mais escassos e a preocupação com os impactos ambientais está cada vez maior. Desta forma a energia solar surgiu como alternativa, e já é utilizada em vários países como China e Alemanha. No Brasil a incidência solar é alta, o que faz o nosso país apresentar um grande potencial para este tipo de tecnologia. Apesar do incentivo governamental através de resoluções normativas como a resolução normativa 482/12 da ANEEL pela qual é permitido a qualquer consumidor ser um produtor de energia elétrica, desde que seja por meios renováveis, tais como energia solar e eólica, além de várias pesquisas nesta área. O custo de alguns componentes dos sistemas fotovoltaicos é alto, como é o caso dos sensores. Assim sendo, a utilização desta tecnologia em larga escala não é tão viável. Neste cenário o presente trabalho realiza uma análise comportamental de alguns dos principais algoritmos MPPT através de simulação, buscando características que possam auxiliar na redução do custo com sensores. Foi utilizada a ferramenta Simulink do MATLAB para realizar simulações computacionais de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Após a simulação houve a comparação de dois dos algoritmos MPPT mais utilizados, o Perturba & Observa e o Condutância Incremental. Para os testes realizados o algoritmo da Condutância Incremental apresentou melhor resposta, visto que após o algoritmo encontrar o ponto de máxima potência não houve oscilação, já o Perturba & Observa apresentou oscilações mesmo após o ponto de máxima potência ser encontrado.

**Palavras-chave:** energia solar, custo de sensores, simulação computacional, algoritmos MPPT, ponto de máxima potência, sistema fotovoltaico.

# Abstract

Electric energy has great influence in the modern world, whether it facilitates people's daily lives, or contributes to technological advances. Highlighting the unique importance of electricity, several studies are carried out on the way it is produced. The energy from fossil fuels is losing space everyday, as resources are becoming increasingly scarce and concern about environmental impacts is growing. Thus, solar energy emerged as an alternative, and is already used in several countries such as China and Germany. In Brazil, solar incidence is high, which makes our country have great potential for this type of technology. Despite the government incentive through normative resolutions such as ANEEL's 482/12 normative resolution whereby any consumer is allowed to be an electric energy producer, provided it is by renewable means, such as solar and wind energy, in addition to several researches in this field. area. The cost of some components of photovoltaic systems is high, as is the case with sensors. Therefore, the use of this technology on a large scale is not so viable. In this scenario, the present work performs a behavioral analysis of some of the main MPPT algorithms through simulation, looking for characteristics that can help in reducing the cost of sensors. MATLAB's Simulink tool was used to perform computer simulations of a photovoltaic system connected to the grid. After the simulation, two of the most used MPPT algorithms were compared, Perturba Observa and Incremental Conductance. For the tests carried out, the Incremental Conductance algorithm presented a better response, since after the algorithm found the point of maximum power there was no oscillation, Perturba Observa presented oscillations even after the point of maximum power was found.

**Keywords:** solar energy, high cost sensors, MPPT algorithms, photovoltaic system.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplos de sistemas fotovoltaicos que utilizam MPPT . . . . .	12
Figura 2 – Sazonalidade das taxas de irradiação . . . . .	15
Figura 3 – Sistema fotovoltaico simulado . . . . .	23
Figura 4 – Fluxograma do algoritmo P&O . . . . .	24
Figura 5 – Fluxograma do algoritmo Condutância Incremental . . . . .	25
Figura 6 – Fluxograma do algoritmo Tensão Constante . . . . .	26
Figura 7 – Método P&O - Etapas . . . . .	27
Figura 8 – Método CI - Etapas . . . . .	28
Figura 9 – Comportamento Padrão da curva I-V do módulo KC200GT . . . . .	29
Figura 10 – Comportamento Padrão da curva P-V do módulo KC200GT . . . . .	30
Figura 11 – Valores da curva padrão P-V do módulo KC200GT . . . . .	30
Figura 12 – Potência Ideal . . . . .	31
Figura 13 – Busca pelo PMP - P&O . . . . .	32
Figura 14 – Potência Ativa - P&O . . . . .	32
Figura 15 – Variações em torno do PMP - CI . . . . .	33
Figura 16 – Potência Ativa - CI . . . . .	33
Figura 17 – Variações de Temperatura . . . . .	34
Figura 18 – Potência x Tensão para Variações de Temperatura . . . . .	35
Figura 19 – Visão Geral da Potência sob Variações de Temperatura - P&O . . . . .	36
Figura 20 – Potência Ativa sob Variações de Temperatura - P&O . . . . .	36
Figura 21 – Visão Geral da Potência sob Variações de Temperatura - CI . . . . .	37
Figura 22 – Potência Ativa sob Variações de Temperatura - CI . . . . .	37
Figura 23 – Variações de Irradiância . . . . .	38
Figura 24 – Potência x Tensão para Variações de Irradiância . . . . .	39
Figura 25 – Potência sob variações de Irradiância - P&O . . . . .	39
Figura 26 – Potência Ativa sob variações de Irradiância - P&O . . . . .	40
Figura 27 – Potência sob variações de Irradiância - CI . . . . .	40
Figura 28 – Potência Ativa sob variações de Irradiância - CI . . . . .	41

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Variações de Temperatura . . . . .	34
Tabela 2 – Variações de Irradiância . . . . .	38

# Lista de abreviaturas e siglas

MPP	Ponto de Máxima Potência
DSP	Processador Digital de Sinais
MPPT	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência
CMPPT	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência sintetizado por Corrente
VMPPT	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência sintetizado por Tensão
P&O	Perturba e Observa
CI	Condutância Incremental

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1	Justificativa	13
1.2	Problema	13
1.3	Objetivos	13
1.4	Estrutura do trabalho	13
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS HISTÓRICOS E TEÓRICOS</b>	<b>15</b>
2.1	Sistema Fotovoltaico	15
2.2	Algoritmos MPPT	18
2.3	Algoritmo Perturba & Observa	19
2.4	Algoritmo Condutância Incremental	20
2.5	Algoritmo Tensão Constante	21
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b>	<b>22</b>
3.1	Desenvolvimento	22
3.2	Estudo histórico e teórico	22
3.3	Implementação dos métodos	22
3.4	Análise comportamental	23
<b>4</b>	<b>ALGORITMOS MPPT</b>	<b>24</b>
4.1	Funcionamento dos algoritmos	24
4.1.1	Perturba & Observa	24
4.1.2	Condutância Incremental	25
4.1.3	Tensão Constante	26
4.2	Implementação dos algoritmos	27
4.2.1	Perturba & Observa	27
4.2.2	Condutância Incremental	28
4.2.3	Tensão Constante	28
<b>5</b>	<b>ANÁLISE COMPORTAMENTAL MPPT</b>	<b>29</b>
5.1	Análise de comportamento dos métodos	29
5.2	Testes iniciais	29
5.2.1	Módulo Fotovoltaico	29
5.2.2	Painel Fotovoltaico	30
5.3	Testes com Radiação e Temperatura Homogêneas	31
5.3.1	Perturba & Observa	32
5.3.2	Condutância Incremental	33
5.4	Testes com Temperatura Variável	34
5.4.1	Perturba & Observa	35

5.4.2	Condutância Incremental . . . . .	37
<b>5.5</b>	<b>Testes com Irradiância Variável . . . . .</b>	<b>38</b>
5.5.1	Perturba & Observa . . . . .	39
5.5.2	Condutância Incremental . . . . .	40
<b>5.6</b>	<b>Conclusões sobre os Testes . . . . .</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>42</b>
<b>6.1</b>	<b>Trabalhos Futuros . . . . .</b>	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>44</b>

# 1 Introdução

*“A resposta certa, não importa nada:  
o essencial é que as perguntas estejam certas”.*  
Mário Quintana

O primeiro aparato fotovoltaico advindo dos estudos da física do estado sólido foi concebido em 1876. Apesar disso, a produção industrial se desenvolveu apenas em 1956 acompanhando o crescimento da área de eletrônica. Em um primeiro momento a busca por essa tecnologia foi realizada por empresas de telecomunicações para sistemas instalados em localidades remotas. Posteriormente a corrida espacial impulsionou esse setor, visto que a célula fotovoltaica era e continua sendo a forma mais adequada (menor custo, peso e segurança) de fornecer a quantidade de energia necessária dos equipamentos eletroeletrônicos no espaço durante longos períodos (PINHO; GALDINO, 2014).

As crescentes demandas energéticas do mundo no início do século XXI fizeram com que durante muito tempo, as energias provenientes de combustíveis fósseis fossem as mais utilizadas. Mas como esse tipo de combustível além de gerar bastante poluição um dia vai se esgotar, o interesse em energias renováveis está cada dia maior.

A matéria recente publicada na revista EXAME aponta uma análise realizada pela *Bloomberg New Energy Finance* (BNEF), indicando a perda de espaço do carvão e do gás em relação à investimentos. Isto se deve a grande redução nos custos conquistadas pelas tecnologias de geração eólica e solar, além da expansão do mercado de baterias para armazenamento de energia. Segundo os analistas da BNEF apesar de algumas usinas a carvão e gás continuarem exercendo papel importante na matriz energética mundial, os fatores econômicos para criação de novas matrizes de carvão e gás estão perdendo espaço (EXAME, 2018).

Desta maneira segundo Seguel (2009), em países como o Brasil surgiu a necessidade da utilização de fontes energéticas renováveis como eólica e fotovoltaica. Além dessas o Brasil já possui como sua principal fonte de energia as usinas hidrelétricas, visto que o país é rico em recursos hídricos. Para incentivar o uso de energias renováveis, no Brasil existem diversos programas como Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM), o Luz para Todos e o Programa de Incentivo a Fontes Alternativas (PROINFA).

Em matéria da revista *Época* são apontados alguns dos fatores que tornaram a Alemanha referência em energia solar, uma vez que a Alemanha é maior produtor de energia solar *per capita* e o segundo maior do mundo em números gerais, atrás apenas da China. O principal fator é o incentivo governamental, primeiramente adotando uma sobretaxa na conta de luz, subsequentemente através da permissão de acesso à rede a qualquer empresa que queira comercializar energia, além da preferência para entrar na rede concedida às energias renováveis. Desta forma o governo permitiu a competição com tecnologias já dominantes no mercado, o surgimento de empresas de pequeno e médio porte; e o consumo de energia

renovável de maneira preferencial, ou seja, as energias convencionais (não-renováveis) são utilizadas de maneira a suprir apenas a demanda que as fontes renováveis não conseguem atender (ÉPOCA, 2017).

Como foi citado por Maraffon (2018) além do contexto ecológico, a diversificação das fontes de energia renováveis é necessária para complementação da matriz energética. Assim sendo, os sistemas baseados na geração centralizada e distante do centro de consumo, muitas vezes a partir de fonte primária fóssil, tem cedido lugar a geração distribuída e renovável. A complementação que Maraffon se refere é importante, pois como foi destacado por Muniz (2017), em uma crise de recursos de determinada fonte renovável tem-se outras fontes para diminuir o efeito desta carência.

A crise hídrica do ano de 2015 revelou, mais uma vez, para sociedade brasileira o grave problema de confiar apenas no baixo custo da geração hidroelétrica. Neste ano, as usinas elétricas com fonte energética derivadas de carvão mineral foram acionadas para suprir parte da demanda do país, causando elevação dos custos de produção de energia (MUNIZ, 2017, p.28).

Sendo o Brasil um país de clima tropical, naturalmente sua taxa de incidência solar durante grande parte do ano é alta. Desta forma a utilização desta fonte de energia é muito interessante. Porém a energia proveniente de fonte solar compreende apenas 0,01 por cento da matriz elétrica brasileira segundo o Balanço Energético Nacional de 2016 (BEN2016).

Em relação ao mercado mundial de geração de energia renovável, Maraffon (2018) comenta que os sistemas de energia eólica dominaram o mercado de grande porte, já os sistemas fotovoltaicos dominaram o mercado de micro e mini-geração distribuída. Também foi destacado por Maraffon em relação a geração distribuída, que o avanço da tecnologia e o investimento em escala diminuiriam consideravelmente o custo da energia fotovoltaica.

Apesar do desenvolvimento tecnológico estar auxiliando na redução dos custos dos sistemas fotovoltaicos, Cabral e Vieira (2012) citam o alto investimento tecnológico como uma das principais barreiras que inviabilizam a utilização desta tecnologia.

Um dos fatores principais que fazem a energia solar fotovoltaica ser inviável, é o alto investimento tecnológico necessário ao sistema que realiza a produção da mesma (CABRAL; VIEIRA, 2012).

O princípio da geração de energia elétrica fotovoltaica se baseia no fato de que se houver a exposição de uma junção pn de um semicondutor à incidência de fótons, estes proverão a energia necessária para deslocar os elétrons da camada de valência para a banda de condução. Desta forma os elétrons presentes no cristal tipo n serão acelerados em direção ao cristal tipo p provocando uma diferença de potencial. A isto se denomina efeito fotovoltaico (GUILMARÃES et al., 2004 apud STANKIEWICZ et al., 2013).

Um conjunto série-paralelo de células fotovoltaicas forma o que é chamado de módulo fotovoltaico, com a finalidade de adequar os valores de tensão e corrente fornecidos por estas células. As características de tensão, corrente e potência dos módulos fotovoltaicos são dependentes de fatores externos como temperatura e irradiação (STANKIEWICZ et al., 2013).

Visto que os fatores citados anteriormente fazem o sistema ter uma baixa eficiência e que o aumento na eficiência do sistema está intimamente ligado ao ponto de máxima potência. É necessária a busca contínua do ponto de máxima potência para garantir o funcionamento do sistema diante das variações a que está sujeito (SEGUEL, 2009, p.6).

A atuação do Maximum Power Point Tracking (MPPT) tanto em sistemas fotovoltaicos isolados (SFI) quanto em sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) pode ser observada através do diagrama abaixo.

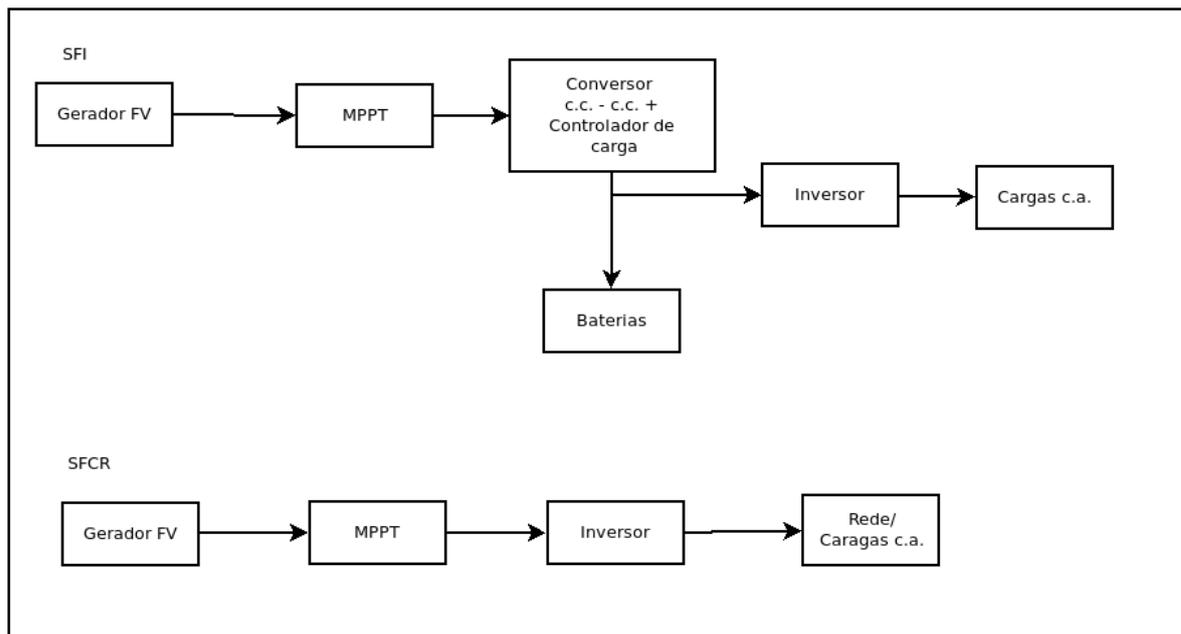


Figura 1 – Exemplos de sistemas fotovoltaicos que utilizam MPPT

Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014)

Segundo Pinho e Galdino (2014) a localização do algoritmo *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) em um sistema fotovoltaico depende de como a carga é alimentada, através de CC ou CA. Ou seja, o MPPT pode atuar integrado a um conversor CC-CC ou a um inversor. A importância dessas técnicas é destacada por Oliveira (2007), entre outros como é citado a seguir:

Devido a não linearidade da relação entre os parâmetros de saída das células fotovoltaicas causadas por variações climáticas (irradiação solar e temperatura) é necessária a utilização de técnicas de extração da máxima potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*) para maximizar a produção de energia elétrica por um sistema fotovoltaico e aumentar a eficiência global do sistema (CAR-RIJO et al., 2010 apud SPADUTO; FREITAS, 2013, p.3).

## 1.1 Justificativa

Lobato (2015) afirma que uma das maneiras de aumentar a eficiência do sistema fotovoltaico é fazer com que o mesmo opere o mais próximo do ponto de máxima transferência de potência, e apesar de haver diversos algoritmos que realizam o MPPT atualmente, não há um consenso sobre qual técnica apresenta um melhor desempenho.

Este trabalho justifica-se pela necessidade de estudar e comparar o comportamento das diferentes técnicas MPPT, considerando-se a importância dessas técnicas em sistemas de produção de energia fotovoltaica.

## 1.2 Problema

Visto que os sistemas fotovoltaicos existentes necessitam de operar próximo ao ponto de máxima potência, é necessário utilizar algoritmos para rastreamento desse ponto. Desta forma devemos investigar quais são os algoritmos mais eficientes e de menor custo. A maioria dos algoritmos utilizam sensores, o que aumenta significativamente o investimento financeiro necessário. Ou seja, o problema relacionado a este trabalho é o alto investimento em sensores.

## 1.3 Objetivos

Este trabalho possui como objetivo geral a redução do custo com sensores, além do estudo de comportamento de alguns dos principais algoritmos MPPT.

Para responder as questões propostas e aos objetivos apresentados, pretende-se realizar uma análise comportamental dos principais algoritmos MPPT, e a partir desta análise, avaliar como o custo com sensores e a simplicidade dos algoritmos podem ser simplificados. Posteriormente implementar e avaliar os algoritmos a nível de simulação em um sistema fotovoltaico de produção de energia elétrica. Os procedimentos metodológicos seguidos são apresentados no capítulo 3.

## 1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos que são definidos a seguir: as bases teóricas são apresentadas em seguida, no capítulo 2, o que inclui conceitos importantes no contexto de sistemas fotovoltaicos, algoritmos MPPT, e características específicas de cada algoritmo, para a organização do conhecimento e realização deste trabalho.

O capítulo 3 apresenta os procedimentos metodológicos através dos quais este trabalho se desenvolve, explicando a implementação na ferramenta Simulink do software MATLAB em que foram realizadas as simulações. O capítulo 4 inclui a explicação sobre o funcionamento dos algoritmos MPPT estudados e suas características.

Uma análise comportamental dos algoritmos é descrita no capítulo 5. Dois dos principais algoritmos são investigados para identificar as características que permitam reduzir o custo dos sensores. Análise esta que foi realizada através dos resultados apresentados pelas

simulações feitas em MATLAB. Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões, considerações finais, principais contribuições, limitações e indicadas algumas direções para trabalhos futuros.

## 2 Fundamentos históricos e teóricos

*“O período de maior ganho em conhecimento e experiência é o período mais difícil da vida”.*

*Dalai Lama*

O principal objetivo deste capítulo é apresentar os fundamentos históricos, teóricos e metodológicos sobre os quais este trabalho é realizado, além de mapear os principais e mais recentes trabalhos sobre técnicas MPPT. As seções seguintes reúnem os principais e mais recentes trabalhos que versam sobre sistemas fotovoltaicos e algoritmos MPPT.

### 2.1 Sistema Fotovoltaico

O cenário brasileiro de energia solar apresenta grande potencial, mas para que esse potencial possa ser explorado o custo desta tecnologia deve ser reduzido. O que pode acontecer nos próximos anos com os avanços tecnológicos que naturalmente estão ocorrendo, além de incentivo governamental (ALVES et al., 2015). Alguns dos incentivos vêm sendo criados desde a publicação da resolução normativa nº482/2012 visando a microgeração e minigeração distribuída (ANEEL, 2012).

A figura abaixo mostra o potencial que o Brasil possui em relação a energia solar fotovoltaica, este potencial foi destacado por Muniz (2017), juntamente com comentários sobre algumas das dificuldades para o desenvolvimento desta tecnologia.

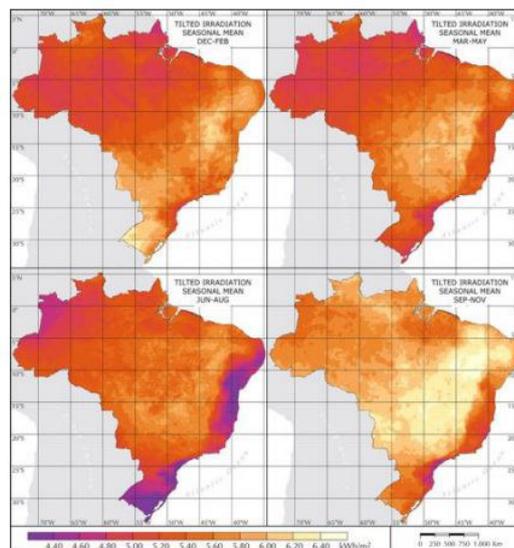


Figura 2 – Sazonalidade das taxas de irradiação

Fonte:(PEREIRA et al., 2006)

De acordo com Sampaio (2010), a incidência solar é muito superior à verificada no restante do mundo, tendo em vista a sua localização no globo terrestre, fator este que privilegia o país em relação aos países hemisféricos e industrializados. Entretanto, o alto custo dos impostos para importação de equipamentos e o irrelevante fomento à pesquisa e desenvolvimento de tecnologias desafiam a implantação da produção de energia solar no Brasil. Ao contrário do Brasil, essa tecnologia é amplamente difundida em países europeus e asiáticos a mais de uma década (MUNIZ, 2017, p.28).

O desenvolvimento da energia fotovoltaica além dos aspectos citados anteriormente pode influenciar na redução do preço da energia elétrica, visto que hoje a dependência em relação às hidroelétricas é grande, e quando os reservatórios estão em baixa, as bandeiras tarifárias o elevam muito (SILVA et al., 2015).

Em matéria publicada pelo jornal O Globo, foi citado um crescimento da energia solar em 70% nos dois anos anteriores. Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) há expectativa que de 2015 até 2030 a participação da energia solar na matriz energética saia de 0,02% e ultrapasse os 10% (O GLOBO, 2017).

Alguns dos estudos que vem sendo realizados tem como objetivo auxiliar pesquisas futuras na área de sistemas fotovoltaicos, como é o caso de Souza (2013). Foi projetado um simulador de gerador fotovoltaico. Desta forma o simulador auxilia aplicações realizadas em laboratório, reproduzindo curvas de um módulo fotovoltaico independente das condições climáticas reais. Sendo que essas curvas simulam o comportamento do módulo fotovoltaico através de equações. Apesar da necessidade de melhorias na interface, para facilitar a implantação de novas curvas, os resultados comprovaram a viabilidade do simulador.

Segundo Villalva et al. (2010) citado por MAGOSSI (2016) os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em sistemas conectados à rede e sistemas isolados. Nos sistemas conectados à rede o dispositivo fotovoltaico atua como uma fonte complementar de energia. Já nos sistemas isolados os dispositivos fotovoltaicos são a única fonte de energia, juntamente com o banco de baterias que é utilizado para armazenar a energia produzida pelos painéis.

Um outro aspecto importante a ser observado é o tipo de organização dos sistemas atuais. Para Pinho e Galdino (2014) os sistemas são organizados em blocos, cada bloco possui componentes para determinada função como é citado abaixo.

Um sistema fotovoltaico é constituído por um bloco gerador, um bloco de condicionamento de potência e, opcionalmente, um bloco de armazenamento. O bloco gerador contém os arranjos fotovoltaicos, constituídos por módulos fotovoltaicos em diferentes associações, o cabeamento elétrico que os interliga e a estrutura de suporte. O bloco de condicionamento de potência pode ter conversores c.c.-c.c., seguidor de ponto de potência máxima (SPPM1), inversores, controladores de carga (se houver armazenamento) e outros dispositivos de proteção, supervisão e controle. Finalmente, o bloco de armazenamento é constituído por acumuladores elétricos (baterias) e/ou outras formas de armazenamento (PINHO; GALDINO, 2014).

Alguns dos principais fatores relacionados aos sistemas fotovoltaicos, que vem sendo estudados são: os algoritmos MPPT, conversores e o carregamento do banco de baterias. A seguir são citadas algumas pesquisas sobre estes fatores.

Os resultados obtidos por Moçambique (2012) mostraram que a tensão do painel fotovoltaico deve ser controlada, pois a tensão de referência varia em relação ao MPPT e às condições ambientais. Ou seja, a tensão varia constantemente. Além da tensão o sistema de controle proposto possibilitou aumento na eficiência da geração, inclusive em situações de sombreamento parcial.

Pinho e Galdino (2014) explicam que o bloco de controle do MPPT é responsável por ajustar a tensão de polarização do gerador fotovoltaico. Os algoritmos MPPT recebem como entrada valores de tensão e corrente de maneira contínua, e atuam sobre o conversor c.c.-c.c. e/ou inversor. Sua implementação é feita comumente através de microprocessadores ou *Digital Signal Processor* (DSP).

Outra abordagem mais sucinta sobre MPPT feita por Costa (2010) explica que o MPPT consiste em um conversor CC/CC juntamente com um algoritmo de controle que, analisa a temperatura e irradiância além das condições impostas pela carga, e a partir dessas informações ajusta a tensão de saída do módulo de modo que o ponto de operação ocorra no ponto correspondente à máxima potência.

Outro fator importante é o carregamento de baterias, que foi analisado por Seguel (2009). Visando otimizar o processo de carga das baterias sem desrespeitar os limites de operação das mesmas (prolongando a vida útil das baterias), Seguel propôs um controle de carga diferenciado. Com a atuação do MPPT ele maximizou o aproveitamento da energia solar disponível. E através do controle de tensão respeitou os limites de operação das baterias. Os objetivos citados anteriormente foram alcançados com essa estratégia.

Seguindo o ponto de vista de Pinho e Galdino (2014), há dois fatores que influenciam diretamente a operação do painel: a irradiância solar e a temperatura. A irradiância solar é diretamente proporcional à corrente elétrica gerada pelo módulo, ou seja, quanto maior a irradiância maior a corrente gerada. Já a temperatura, quando aumenta ocasiona uma queda de tensão importante e a corrente apresenta baixa elevação o que não compensa a perda causada pela diminuição da tensão.

Além dos fatores citados anteriormente o estudo e comparação dos algoritmos MPPT vem sendo realizados devido a inexistência de um consenso sobre qual técnica é a mais adequada. Dentre as mais estudadas e implementadas estão a Perturba e Observa (P&O), além da Condutância Incremental (CI), por serem de fácil implementação e boa eficiência.

No bloco de condicionamento de potência é necessário tratar as variações ocorridas como as citadas anteriormente, para otimizar a operação do sistema, aumentando assim a quantidade de energia produzida pelo mesmo. Nesse contexto são utilizados os algoritmos MPPT, para garantir uma operação mais próxima do ponto de máxima potência. Destacada sua importância e necessidade, a seção subsequente apresenta informações sobre estes algoritmos.

## 2.2 Algoritmos MPPT

Pinho e Galdino (2014) categorizam os métodos MPPT em: métodos diretos e métodos indiretos. Sendo os métodos diretos aqueles que utilizam medições em tempo real da corrente e da tensão disponíveis na entrada do inversor, para encontrar o ponto de potência máxima do gerador fotovoltaico. Exemplos de métodos diretos: P&O e CI.

Os métodos indiretos são aqueles que utilizam um sinal de referência (irradiância, temperatura dos módulos, corrente ou tensão) para estimar o ponto de máxima potência. Essa informação é confrontada com uma base de dados ou algum modelo matemático com as características previamente determinadas do gerador fotovoltaico específico. Por serem imprecisos em algumas situações, como quando está sob os efeitos de sombreamentos parciais, envelhecimento e acúmulo de sujeira sobre os módulos, os métodos indiretos são pouco utilizados (PINHO; GALDINO, 2014). Abaixo é citada a explicação de Muniz (2017) sobre técnicas MPPT e o quanto esses algoritmos podem influenciar nos sistemas fotovoltaicos.

O procedimento da busca de máxima potência, ou como conhecida Maximum Power Point Tracking (MPPT), é realizada através do emprego de algoritmos de controle no conversor que drena a energia dos módulos fotovoltaicos e consiste no rastreamento do ponto de operação em que a potência extraída do módulo é máxima, qual seja, o ponto da curva I-V para o qual o produto  $I \times V$  é máximo, independentemente das condições climáticas. Existem diversas formas de emprego e variações desta técnica, que podem incrementar a energia produzida pelo módulo de 15 a 30% (MUNIZ, 2017, p.38).

Vários trabalhos da literatura como Silva et al. (2014) mencionam que apesar das vantagens da geração fotovoltaica, a eficiência desse tipo de sistemas é relativamente baixa pois a mesma é fortemente dependente das condições climáticas. Sendo assim, as técnicas de rastreamento MPPT são necessárias para a obtenção da máxima potência possível desses painéis.

Segundo o estudo feito por Cabral e Vieira (2012) a energia solar é viável no que diz respeito as demandas energéticas residenciais no Brasil, mas sob o ponto de vista econômico não é viável devido ao alto investimento tecnológico necessário. O objetivo deste trabalho é a redução do custo com sensores visando gerar maior viabilidade, além da análise de comportamento de alguns dos principais algoritmos MPPT. Ou seja, o objetivo é a descoberta de características dos algoritmos MPPT que permitam a redução do custo com sensores.

Algoritmos de MPPT são de extrema importância para a utilização otimizada da energia solar disponível. O algoritmo de MPPT objetiva determinar o ponto de operação de maior geração de energia elétrica da célula, módulo ou painel fotovoltaico em particular, ou do sistema fotovoltaico em geral, para as variações instantâneas de irradiação e temperatura (MOÇAMBIQUE, 2012, p.46).

Segundo Teodorescu, Liserre e Rodriguez (2011) citado por Lobato (2015) não há um consenso sobre qual o melhor método de sintetização para algoritmos MPPT, em relação a sintetização por tensão (VMPPT) ou por corrente (CMPPT). Normalmente o método relacionado a tensão é o escolhido, pois a potência produzida pelo painel apresenta menor sensibilidade em relação a tensão quando comparada à corrente. Já Júnior et al. (2011), realizaram

simulações computacionais apresentando resultados similares e satisfatórios para ambos os métodos. Embora o CMPPT possa ter algumas desvantagens se o passo de perturbação do algoritmo não for adequadamente escolhido.

Alguns dos algoritmos MPPT mais citados pelos autores referenciados neste trabalho são os algoritmos: Perturba e Observa (P&O), Condutância Incremental (CI). Desta forma segue abaixo características destas técnicas além do método Tensão Constante.

### 2.3 Algoritmo Perturba & Observa

São dois os parâmetros necessários nesta técnica. O primeiro é o tempo de amostragem ( $T_a$ ) que corresponde ao intervalo em que é amostrada a tensão e a corrente do arranjo fotovoltaico. O segundo é o tamanho da perturbação aplicada à tensão de referência, ou também conhecido como tamanho do passo (SEGUEL, 2009).

Segundo AZEVEDO (2007) citado por Seguel (2009) o  $T_a$  tem uma limitação quanto ao seu valor mínimo. O  $T_a$  deve ser maior que o tempo de estabilização da tensão de saída do conversor para evitar a instabilidade da técnica.

Em seu trabalho Muniz (2017) explica que o método do perturba e observa (P&O) necessita da medição de corrente e de tensão na saída do arranjo para indicar a potência fornecida pelos módulos. Além de destacar a relevância do passo de incremento do ciclo de trabalho. Pois o tamanho do passo influencia a velocidade do rastreamento do MPP e a amplitude da oscilação nos arredores do mesmo. Quanto maior o incremento, maior será a velocidade de aproximação do MPP, porém maior será a amplitude da oscilação.

A seguir são citados outros trabalhos que apresentaram essa dificuldade em relação a definição do tamanho do passo e suas propostas de soluções. Analisando mais detalhadamente o algoritmo P&O é citada uma deficiência relacionada a variações rápidas na irradiação. Durante uma perturbação provocada pelo MPPT, a potência pode aumentar mesmo com o ponto de operação do sistema, sendo direcionado no sentido contrário ao MPP (STANKIEWICZ et al., 2013).

Segundo Xiao e Dunford (2004) citado por Stankiewicz et al. (2013) várias propostas foram experimentadas no sentido de minimizar esta deficiência, em uma delas são analisadas três medidas consecutivas antes de alterar o sentido da perturbação. Para Stankiewicz apesar de ser eficiente na redução desse efeito, essa solução torna o rastreamento mais lento e aumenta a necessidade de capacidade de processamento, além da oscilação em torno do MPP, quando o sistema é estabilizado. A respeito dessa oscilação Moçambique (2012) cita uma possível solução:

A oscilação pode ser minimizada ao reduzindo-se o tamanho do passo. Por outro lado, quanto menor for o passo, mais lento será o algoritmo, comprometendo a eficiência para rápidas mudanças atmosféricas, como acontece em dias nublados (FEMIA et al., 2005). Para solucionar este problema, são utilizados passos de tamanho variável, cujo tamanho diminui à medida que se aproxima do MPP (ESRAM; CHAPMAN, 2007).

Além das características citadas anteriormente outra desvantagem foi citada por Muniz (2017), sendo esta uma leve perda de potência da perturbação do ciclo de trabalho se o ponto afastar do MPP. Esta perda de energia é necessária para que a perturbação identifique se aumenta ou diminui o ciclo de trabalho para encontrar o MPP.

## 2.4 Algoritmo Condutância Incremental

Muniz (2017) descreve o funcionamento do algoritmo de Condutância Incremental da seguinte forma: primeiramente é feita análise sobre qual lado do MPP o sistema está operando, através do sinal da derivada. Observando que a derivada é positiva à esquerda do MPP, e negativa à direita do MPP. Em seguida incrementa-se o ciclo de trabalho do conversor para deslocar o ponto de operação em direção ao pico da curva P<sub>x</sub>V. Quanto mais distante do MPP maior será o valor da derivada. Desta forma a tensão é alterada com o objetivo de alcançar o ponto em que a derivada da potência em relação à tensão é nula. Quando a potência extraída é a máxima, a derivada de potência em relação a tensão será igual a zero. Desta forma não é mais necessário alterar a tensão do sistema.

No algoritmo de condutância incremental evita-se o problema relacionado a oscilação quando o sistema está operando no MPP, pois nesta condição a tensão de referência deve ser mantida (SEGUEL, 2009). Os algoritmos P&O e Condutância Incremental, são bastante semelhantes, sendo que o Condutância Incremental tem vantagem quanto a estabilidade, já que no ponto de máxima potência o valor da referência é mantido, enquanto que o P&O oscila em torno deste (OLIVEIRA et al., 2014).

Em relação a oscilação em torno do MPP, Muniz (2017) descreve uma adaptação no algoritmo de forma a manter um pequeno intervalo no qual a condição de MPP é considerada satisfeita e o estado é mantido. Porém, dependendo do tamanho do intervalo há características de erro em estado permanente e/ou oscilação em torno do MPP. Além disso, Muniz destaca que o método de Condutância Incremental (CI) possui a vantagem de responder rapidamente às mudanças das condições ambientais. Em contrapartida sua desvantagem é a susceptibilidade a ruídos.

Durante a implementação do método de Condutância Incremental, Alves et al. (2015) realizaram algumas alterações em relação ao método original para chegar ao MPP de forma mais rápida. Essas alterações foram feitas no passo, pois, ao se aumentar muito o valor da passo, o MPP foi alcançado rapidamente mas sem precisão. Dito isso, o primeiro passo foi igual a 30, e depois a cada 7 ciclos o tamanho do passo foi reduzido em 2.

Outro aspecto importante descoberto pelo trabalho citado anteriormente foi a descoberta de um erro entre o MPP ideal e o MPP obtido. Erro este que pode ser minimizado limitando o algoritmo para que o ponto randômico achado fosse sempre próximo ao MPP. Desta forma o passo inicial seria pequeno e a busca do MPP realizada ponto a ponto.

## 2.5 Algoritmo Tensão Constante

O algoritmo de tensão de circuito aberto é o método de controle MPPT mais simples, essa técnica também é conhecida como método de tensão constante. VOC (Voltage Open Circuit) é a tensão de circuito aberto do painel fotovoltaico. VOC depende das propriedades das células fotovoltaicas. Um valor  $V_{MPP}/V_{oc}$  comumente usado é de 76%.

Segundo Stankiewicz et al. (2013) o método da Tensão Constante é um método simples que consiste na manutenção da tensão do painel fotovoltaico em um valor de referência que corresponde ao ponto de máxima potência obtido do gráfico P×V do módulo. Utiliza apenas um sensor de tensão. Visto que este é um fator importante a ser observado no presente trabalho, o algoritmo para este método é apresentado no próximo capítulo.

Stankiewicz et al. (2013) explica que a atuação do método se dá monitorando a tensão do painel e alterando a razão cíclica que irá impor esta tensão de referência como ponto de operação. Em sua análise foi observado que o MPP apresenta uma pequena alteração para mudanças significativas de irradiação. No entanto, alterações na temperatura provocam mudanças consideráveis na tensão de máxima potência. Neste caso, o controle por tensão constante não se mostra efetivo fazendo com que o sistema opere fora do MPP.

## 3 Procedimentos metodológicos

No presente trabalho é realizado o estudo de algoritmos MPPT, e uma simulação computacional dos mesmos. Neste capítulo são apresentadas informações sobre o desenvolvimento do trabalho, explicando o que foi feito em cada uma das etapas do mesmo.

### 3.1 Desenvolvimento

O trabalho foi desenvolvido através de algumas etapas que serão explicadas nesta seção, sendo elas: estudo histórico e teórico de pesquisas realizadas na área de algoritmos MPPT. Após o estudo e levantamento das características de cada método, houve a implementação de cada um deles na ferramenta Simulink do software MATLAB. Posteriormente à simulação dos métodos, foram realizadas análises de comportamento dos métodos e feita uma comparação entre os resultados.

### 3.2 Estudo histórico e teórico

Durante a etapa de estudos históricos e teóricos houve a busca de informações sobre os sistemas fotovoltaicos e o contexto em que estão inseridos na sociedade atualmente. Além disso, as informações relacionadas ao funcionamento dos algoritmos e suas características.

### 3.3 Implementação dos métodos

A implementação dos métodos foi realizada na ferramenta Simulink do software de modelagem matemática MATLAB. Esta ferramenta que possui funções de simulação e representação de diversos tipos de sistemas, incluindo os sistemas fotovoltaicos. Foi utilizada a função Power PV Array para implementar módulos de matriz fotovoltaica. Através desta função é possível selecionar qual modelo e fabricante do módulo, a quantidade de módulos e a forma como os painéis são ligados: em série ou paralelo. Além desta funcionalidade há simulação dos demais componentes de um sistema fotovoltaico conectado à rede, como inversor, torres de distribuição e algoritmos MPPT, que é o objeto de estudo deste trabalho. Para cada algoritmo foram realizados ajustes e o bloco padrão correspondente ao algoritmo foi substituído por um bloco com o algoritmo MPPT implementado. Abaixo é apresentada uma figura do sistema implementado.

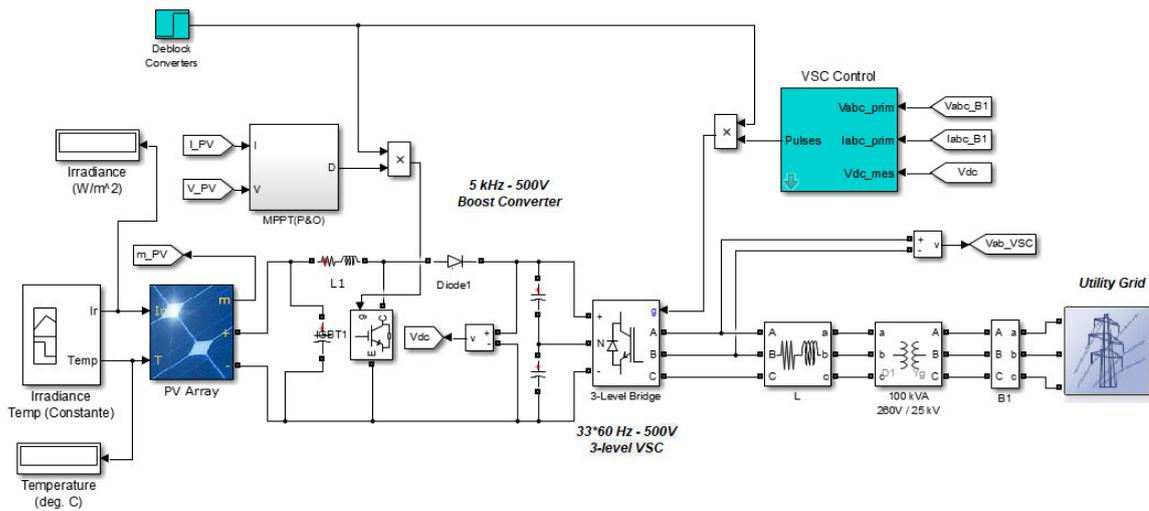


Figura 3 – Sistema fotovoltaico simulado

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.4 Análise comportamental

Utilizando o sistema apresentado anteriormente, foram realizados testes para cada método MPPT de maneira isolada, isto é, cada método foi implementado em um arquivo de simulação. Em relação aos testes, foram realizados testes de funcionamento do painel, testes com temperatura e irradiância homogêneas, posteriormente é feita análise sob as variações de temperatura e posteriormente sob variações de irradiância.

Após as simulações foi realizada uma análise comportamental e comparativa entre os métodos implementados, em que fatores como tempo de resposta às mudanças nas condições climáticas, e estabilidade após encontrar o PMP foram observados. No capítulo seguinte são apresentados os algoritmos e suas características.

## 4 Algoritmos MPPT

Neste capítulo são apresentadas informações de funcionamento e como foram realizadas as implementações dos algoritmos.

### 4.1 Funcionamento dos algoritmos

#### 4.1.1 Perturba & Observa

O algoritmo Perturba e Observa (P&O) é considerado um dos métodos mais simples em relação a compreensão e implementação. A idéia principal deste algoritmo é gerar uma perturbação na corrente ou na tensão, e observar o comportamento da potência fornecida pelo painel solar. Se a potência aumentar, o algoritmo mantém o sentido das perturbações. Se a potência diminuir, o algoritmo inverte o sentido das perturbações (JÚNIOR et al., 2011).

São necessários sensores de corrente e de tensão para obtenção dos valores instantâneos da corrente e da tensão nos terminais do módulo ou arranjo de módulos fotovoltaicos utilizados (SPADUTO; FREITAS, 2013).

Valores estes que são utilizados como referência para realizar as perturbações. A perturbação em questão é realizada através de um incremento ou decremento, sendo que, o mesmo não pode ser muito grande, pois ocasiona grande variação em relação ao PMP e não pode ser muito pequeno, já que o algoritmo demora a encontrar o PMP. O diagrama abaixo descreve as instruções do algoritmo P&O:

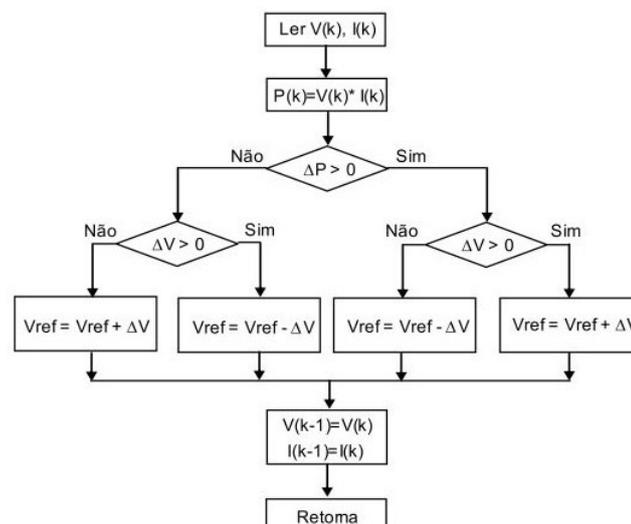


Figura 4 – Fluxograma do algoritmo P&O  
(SEGUEL, 2009)



### 4.1.3 Tensão Constante

No algoritmo da Tensão Constante a atuação se dá monitorando a tensão do painel e alterando a razão cíclica que irá impor esta tensão de referência como ponto de operação (STANKIEWICZ et al., 2013).

Este método utiliza resultados empíricos, indicando que a tensão no PMP ( $V_{PMP}$ ) é da ordem de 70% à 80% da tensão em circuito aberto (VOC) do painel fotovoltaico para a condição atmosférica padrão. Entre os diversos pontos de PMP (variando-se as condições atmosféricas), a tensão nos terminais do módulo varia muito pouco, mesmo quando a intensidade da irradiação solar se altera. Assim, assegurando-se que a tensão no módulo permaneça constante é possível operar próximo do PMP. Isto é realizado com uma malha fechada em tensão conforme diagrama da figura 5. Este método necessita apenas de um sensor de tensão (BRITO et al., 2010).

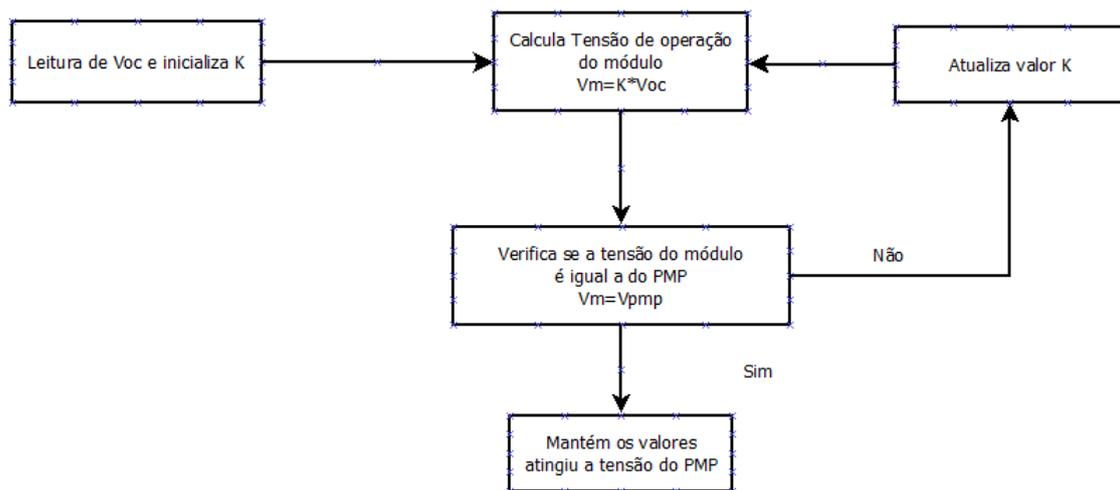


Figura 6 – Fluxograma do algoritmo Tensão Constante

Fonte: Adaptado de (STANKIEWICZ et al., 2013)

## 4.2 Implementação dos algoritmos

A implementação dos algoritmos foi desenvolvida através da ferramenta Simulink do software MATLAB versão 2015. Em que cada um dos métodos foi elaborado seguindo orientação de trabalhos como os citados acima com as devidas adaptações para o presente trabalho.

### 4.2.1 Perturba & Observa

As etapas do método P&O implementado são apresentadas a seguir:

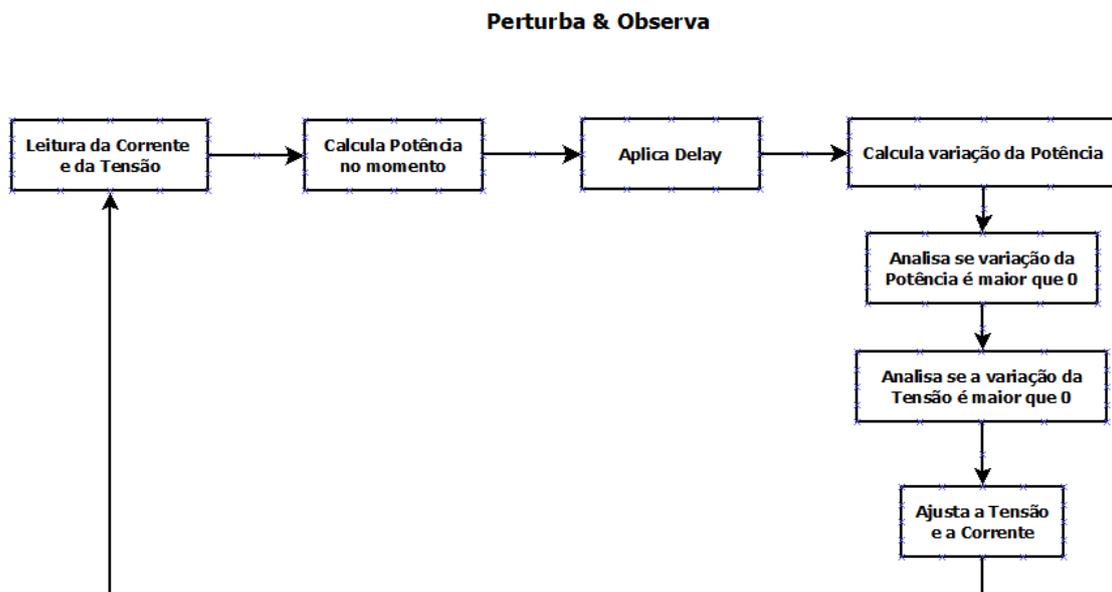


Figura 7 – Método P&O - Etapas

Fonte: Elaborado pelo autor

Abaixo segue a explicação da construção do algoritmo Perturba & Observa:

Na etapa 1 são lidos os valores de corrente e de tensão do painel. Posteriormente a leitura é calculada a potência no momento. Na etapa 2 é aplicado um delay sobre a potência, para calcular a variação em seguida.

Na etapa 3 é feita uma análise a fim de observar se a variação na potência é maior do que zero. Posteriormente a análise da Potência, na etapa 4 é verificado se a variação da tensão é maior que zero.

Finalmente na etapa 5 são realizados os ajustes nos valores da corrente e da tensão, de acordo com as análises feitas, se a variação da Potência foi maior que zero, é mantido o sentido das perturbações. Caso contrário o algoritmo inverte o sentido das perturbações.

### 4.2.2 Condutância Incremental

As etapas do método CI implementado são apresentadas a seguir:

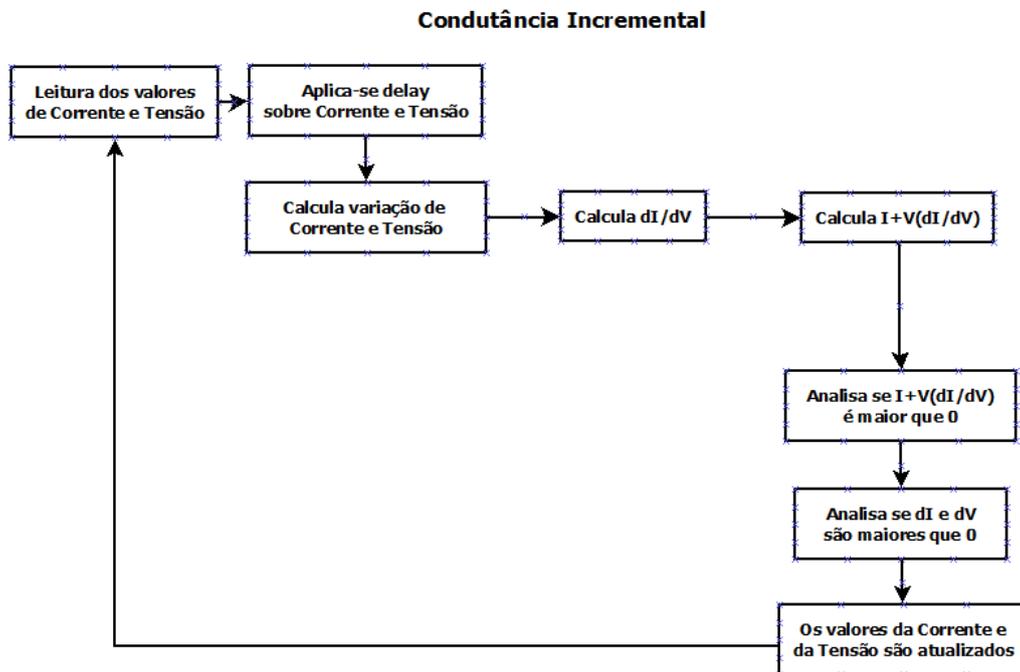


Figura 8 – Método CI - Etapas

Fonte: Elaborado pelo autor

A seguir há uma explicação de algumas etapas do algoritmo: inicialmente são feitas as leituras dos valores de corrente e tensão do painel. Posteriormente são aplicados delays em ambas e calculadas as variações de corrente e tensão do painel,  $dI$  e  $dV$  respectivamente.

Na etapa 2 é calculado  $dI/dV$ . Em seguida multiplica-se a tensão pelo resultado de  $dI/dV$ . E finalizando esta etapa a corrente é somada ao resultado anterior.

Na etapa 3 realiza-se a comparação com finalidade de definir em qual direção está o PMP. Visto que a derivada é igual a zero, no ponto de máxima potência. Nesta etapa comparamos se  $I+V(dI/dV)$  é maior que zero.

Em seguida a análise da derivada da Potência são realizadas as comparações relacionadas à  $dI$  e  $dV$ , se ambas são maiores que zero. Diante dos resultados das comparações os valores de tensão e corrente são atualizados conforme o direcionamento do algoritmo.

### 4.2.3 Tensão Constante

Foi desconsiderada a implementação do método Tensão Constante, pois ao tentar realizar os testes iniciais o mesmo apresentou baixa eficiência e comportamentos incompreendidos.

# 5 Análise Comportamental MPPT

*“Não se possui o que não se compreende”.*

*Johann Goethe*

Este capítulo trata da caracterização dos presentes métodos e objetiva explicitar quais características entre os métodos são comuns e quais suas diferenças. Dessa forma, o capítulo apresenta uma proposta de ilustração de algumas características observadas a partir da análise de simulação utilizando estas técnicas.

## 5.1 Análise de comportamento dos métodos

A análise de comportamento foi desenvolvida com auxílio das simulações realizadas na ferramenta Simulink do *software* MATLAB versão 2015. Com finalidade de organizar melhor os pontos a serem observados dos algoritmos Condutância Incremental e Perturba & Observa, as simulações foram realizadas da seguinte maneira.

Primeiramente foram realizados testes iniciais analisando o funcionamento do sistema com módulos KC200GT. Visto que o comportamento dos módulos na simulação devem ser similares ao de módulos reais. Posterior aos testes dos módulos, foram realizados testes com temperatura e radiação constantes. Em seguida houve testes realizados com a temperatura variável e radiação constante. Concluindo este capítulo foram realizados testes com temperatura constante e radiação variável.

## 5.2 Testes iniciais

### 5.2.1 Módulo Fotovoltaico

O comportamento padrão das curvas I-V e P-V dos módulos atuando em  $1000(W/m^2)$  de irradiância e  $25^{\circ}C$  de temperatura são apresentados nos gráficos abaixo:

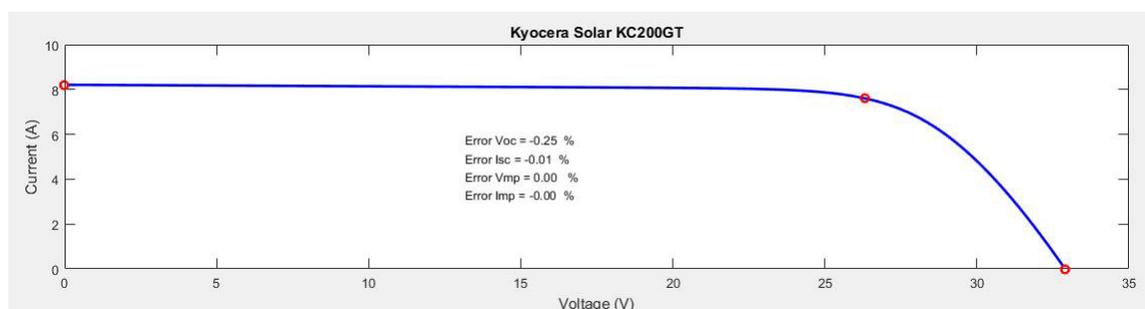


Figura 9 – Comportamento Padrão da curva I-V do módulo KC200GT

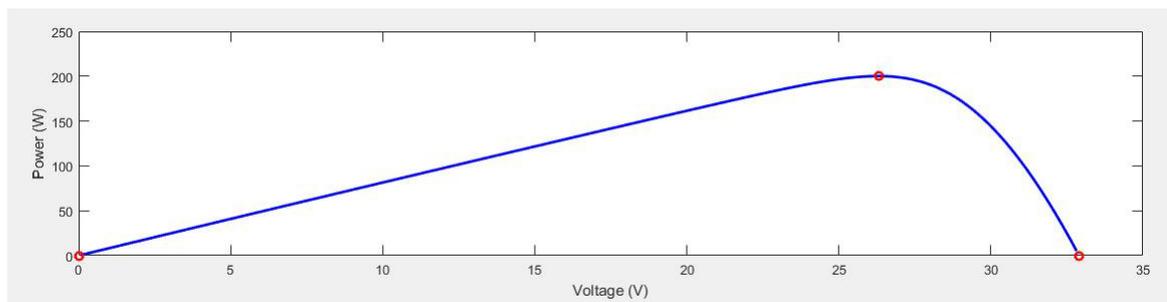


Figura 10 – Comportamento Padrão da curva P-V do módulo KC200GT

Os valores apresentados pela simulação do módulo estão coerentes com os valores determinados pelo fabricante, como mostra a tabela abaixo.

■ Specifications	
■ Electrical Performance under Standard Test Conditions (*STC)	
Maximum Power (Pmax)	200W (+10%/−5%)
Maximum Power Voltage (Vmpp)	26.3V
Maximum Power Current (Impp)	7.61A
Open Circuit Voltage (Voc)	32.9V
Short Circuit Current (Isc)	8.21A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of Voc	$-1.23 \times 10^{-1}$ V/°C
Temperature Coefficient of Isc	$3.18 \times 10^{-3}$ A/°C
<small>*STC : Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, AM1.5 spectrum, module temperature 25°C</small>	
■ Electrical Performance at 800W/m <sup>2</sup> , NOCT, AM1.5	
Maximum Power (Pmax)	142W
Maximum Power Voltage (Vmpp)	23.2V
Maximum Power Current (Impp)	6.13A
Open Circuit Voltage (Voc)	29.9V
Short Circuit Current (Isc)	6.62A
<small>NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) : 47°C</small>	

Figura 11 – Valores da curva padrão P-V do módulo KC200GT

### 5.2.2 Painel Fotovoltaico

Após o teste do módulo, foi realizado o teste de um painel composto por 4 instâncias do módulo ligadas em série. A seguir são apresentados os gráficos das curvas I-V e P-V dos módulos atuando em  $1000(W/m^2)$  de irradiância e  $25^{\circ}C$  de temperatura. Foram realizados testes para o arranjo utilizado na simulação dos algoritmos Condutância Incremental, Perturba & Observa.

O comportamento da curva para o arranjo foi similar ao de um único módulo. Com diferença apenas na proporção da potência e da tensão. Como o arranjo possui 4 módulos em série, a potência e tensão foram elevadas na mesma proporção. Já a corrente se manteve inalterada.

### 5.3 Testes com Radiação e Temperatura Homogêneas

Os testes desta seção foram realizados em Condições Padrão de Teste (STC—standard test conditions), ou seja, com radiação fixa em  $1000W/m^2$  e temperatura fixa em  $25^0$  C. Sabe-se que em condições reais os painéis operam em temperaturas mais elevadas e a irradiância varia ao longo do dia. Para os testes seguintes foram utilizados arranjos com 4 módulos.

A partir dos valores apresentados na tabela do módulo KC200GT e seguindo o princípio da ligação em série pode-se verificar o valor da potência que deve ser gerada através dos módulos ligados em série ou formando o chamado "String serie". Sabendo que no PMP há 7.61 A de corrente e 26.3 V de tensão.

Sendo 4 módulos conectados em série, a corrente é somada.

$$7.61 + 7.61 + 7.61 + 7.61 = 30.44A$$

Após isso multiplica-se a soma das correntes com a tensão.

$$30.44A \cdot 26.3V = 800.572W$$

A Potência ideal gerada é 800.572W.

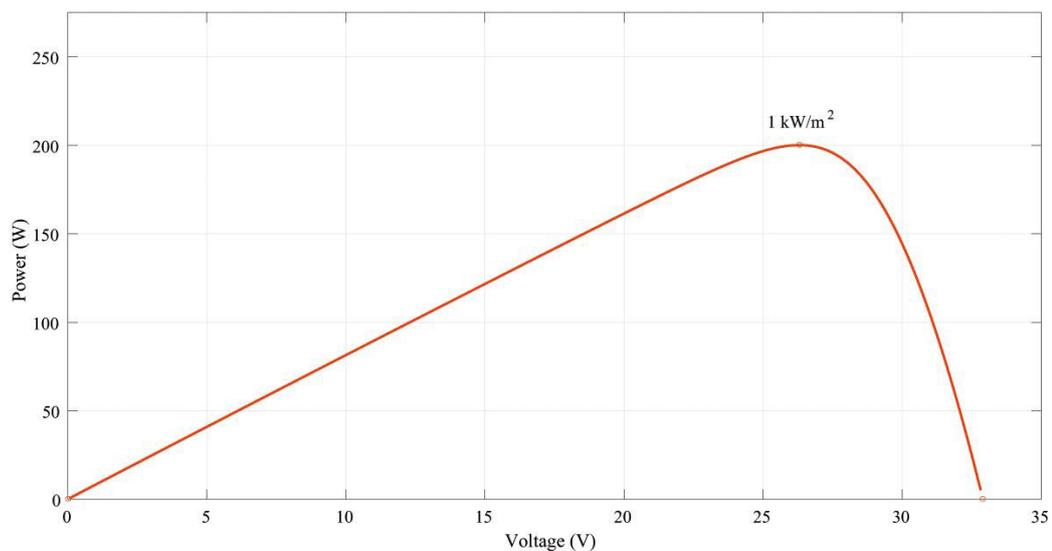


Figura 12 – Potência Ideal

### 5.3.1 Perturba & Observa

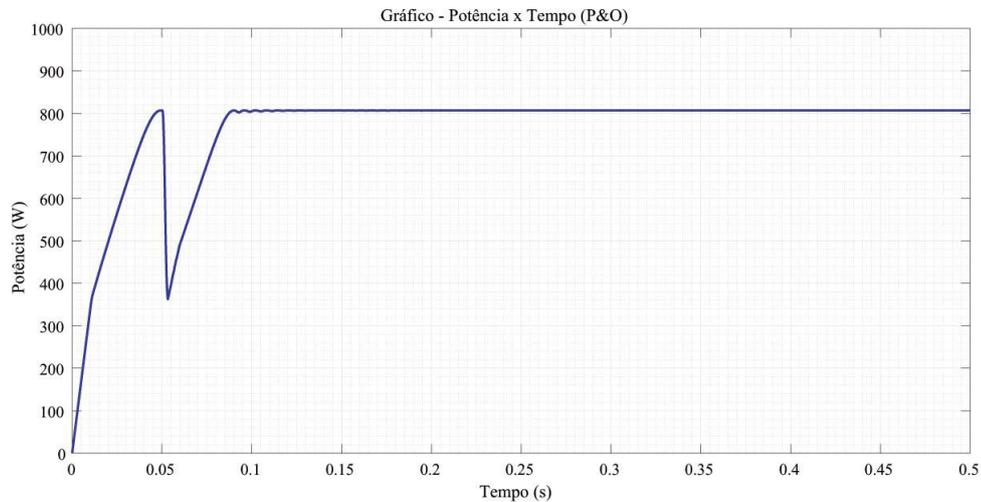


Figura 13 – Busca pelo PMP - P&O

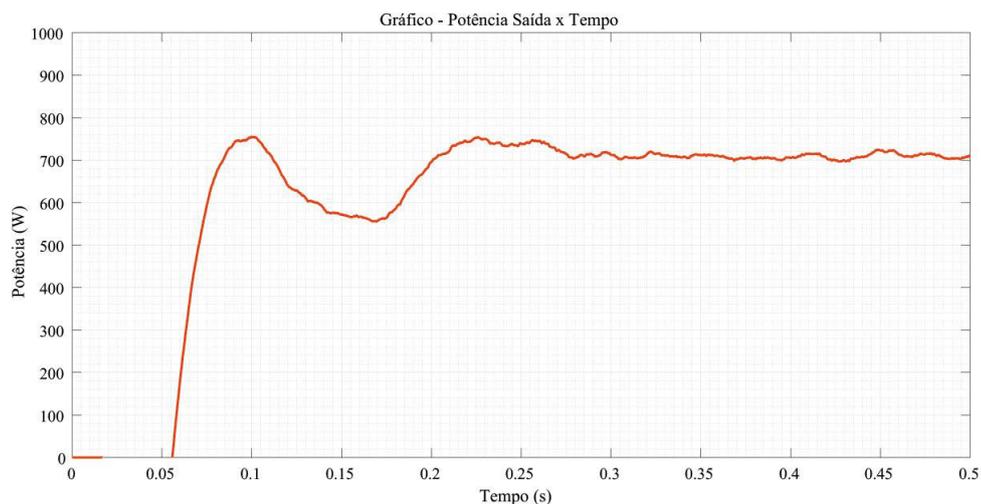


Figura 14 – Potência Ativa - P&O

Analisando a resposta do algoritmo Perturba & Observa, há duas fases de ação do algoritmo, uma buscando o ponto de máxima potência (PMP), e outra mantendo pequenas variações em torno do PMP após este ser alcançado. As variações em torno do PMP ocorrem devido às perturbações aplicadas pelo próprio algoritmo. Como o teste foi realizado sob irradiância e temperatura homogêneas as perturbações em torno do PMP são pequenas. A curva de potência ativa seguiu o PMP encontrado pela potência gerada.

### 5.3.2 Condutância Incremental

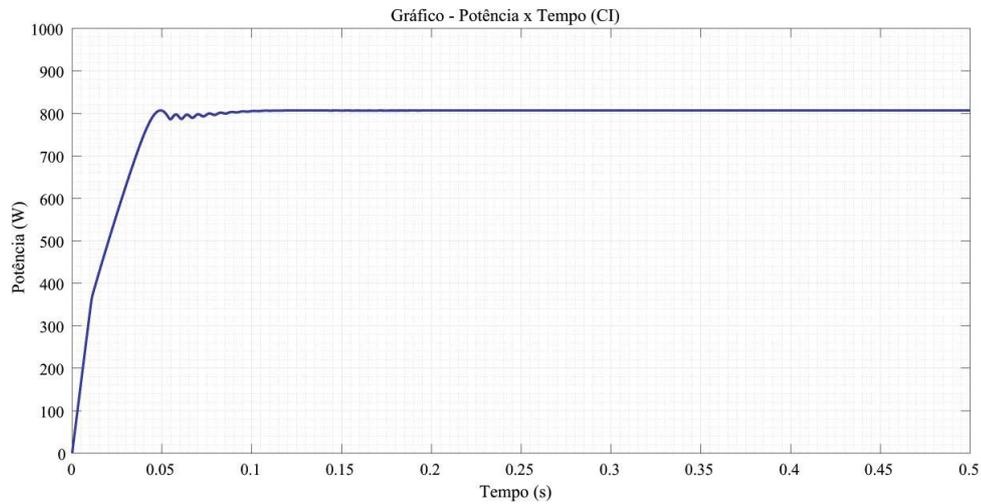


Figura 15 – Variações em torno do PMP - CI



Figura 16 – Potência Ativa - CI

O algoritmo Condutância Incremental atinge o PMP assim como o Perturba & Observa, visto que o PMP neste algoritmo é calculado através da derivada e que não há grandes variações após este ponto de operação ser atracado. Desta forma o rastreamento ocorre de forma eficaz. O rastreamento deste algoritmo também ocorre em duas fases, uma buscando o PMP, e outra atracando o ponto de operação no mesmo.

## 5.4 Testes com Temperatura Variável

A simulação variando a temperatura possui irradiância fixa em  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura do painel variando entre  $25^\circ \text{ C}$ ,  $30^\circ \text{ C}$ ,  $50^\circ \text{ C}$ ,  $37^\circ \text{ C}$  e finalizando em  $18^\circ \text{ C}$ . Variações de temperatura essas baseadas nas variações que ocorrem ao longo de um dia. Começando com temperaturas amenas, aumentando ao longo do dia e abaixando de maneira contínua no fim da tarde e início da noite. Junto ao gráfico segue a tabela com os demais valores utilizados nas variações.

Com finalidade de observação comportamental dos algoritmos MPPT foram realizadas simulações da seguinte maneira: aplicou-se variações de temperatura verificando qual a reação na saída do algoritmo. A simulação variando a temperatura possui irradiância fixa de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura inicial igual a  $25^\circ \text{ C}$ . Junto ao gráfico segue a tabela com os valores de temperatura utilizados nos degraus. A variação de temperatura é aplicada aumentando para  $30^\circ \text{ C}$  e posteriormente para  $50^\circ \text{ C}$ , simulando o aumento da temperatura que ocorre no fim da manhã. Após isso, há uma suave redução para  $37^\circ \text{ C}$  representando o período da tarde e finaliza em  $18^\circ \text{ C}$  demonstrando a queda de temperatura durante a noite.

Tabela 1 – Variações de Temperatura

Temperatura ( $^\circ \text{C}$ )	25	30	50	37	18
-----------------------------------	----	----	----	----	----

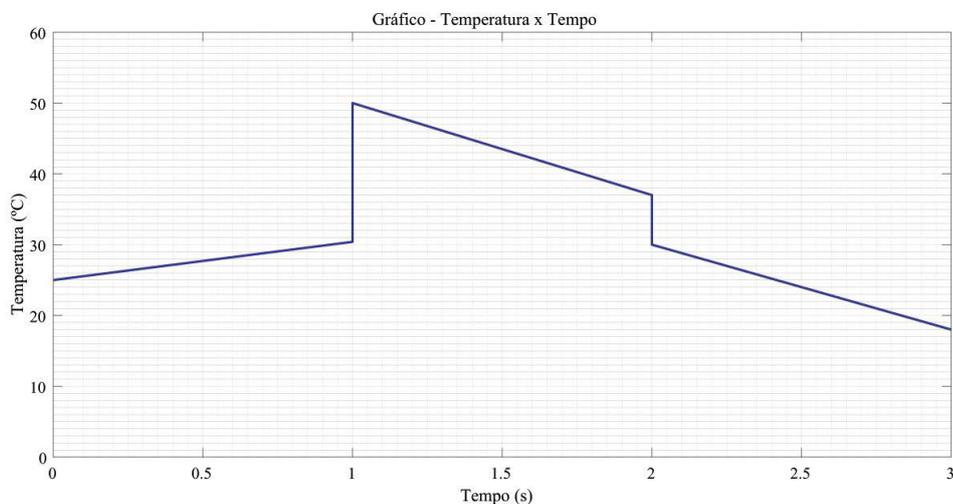


Figura 17 – Variações de Temperatura

A partir dos valores apresentados na tabela acima, e seguindo a tabela do módulo KC200GT pode-se verificar o valor da potência que deve ser gerada através dos módulos ligados em série ou formando o chamado "String serie". Observando os gráficos abaixo temos a potência variando entre 700 W para temperatura igual a 50<sup>o</sup>C e 825 W para temperatura de 18<sup>o</sup>C.

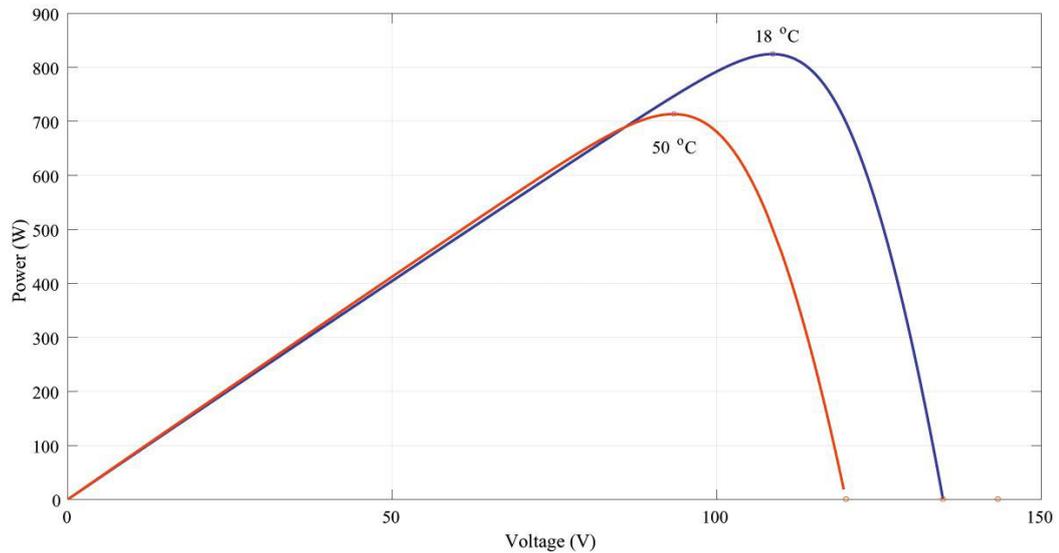


Figura 18 – Potência x Tensão para Variações de Temperatura

#### 5.4.1 Perturba & Observa

A reação das variações de temperatura aplicadas podem ser observadas a partir da análise dos gráficos abaixo. Sendo assim temos o algoritmo P&O apresentando grandes variações em torno do PMP. Isso acontece pois as mudanças bruscas de temperatura fazem com que o algoritmo tenha que realizar a busca pelo novo PMP. Desta forma observa-se que a temperatura exerce influência moderada sobre PMP e o algoritmo P&O consegue realizar seu rastreamento.

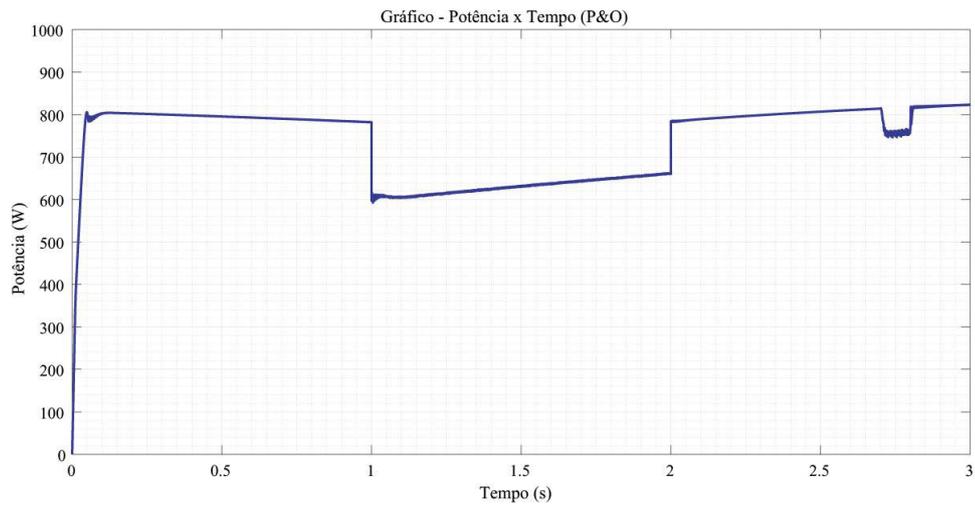


Figura 19 – Visão Geral da Potência sob Variações de Temperatura - P&O

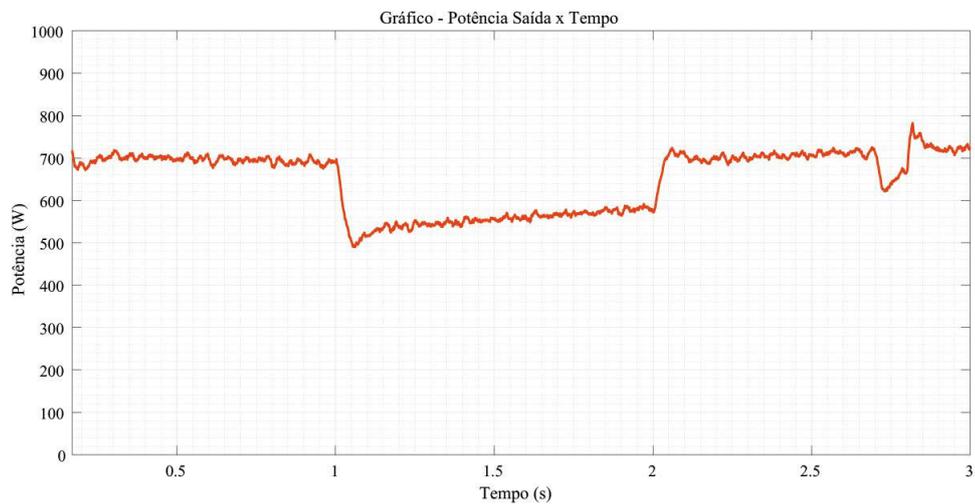


Figura 20 – Potência Ativa sob Variações de Temperatura - P&O

É possível observar que a curva da Potência de Saída do sistema obtém o mesmo comportamento da curva de Potência gerada, o que mostra que o rastreamento está sendo realizado de maneira coerente.

### 5.4.2 Condutância Incremental

A análise das variações de temperatura aplicadas e os gráficos apresentados a seguir mostram que para as variações de temperatura, o algoritmo CI realiza o rastreamento do PMP, apresentando resposta rápida e se mantém no PMP após o mesmo ser encontrado. Além disso, observa-se que para variações de temperatura o algoritmo CI também apresenta variações moderadas no PMP.

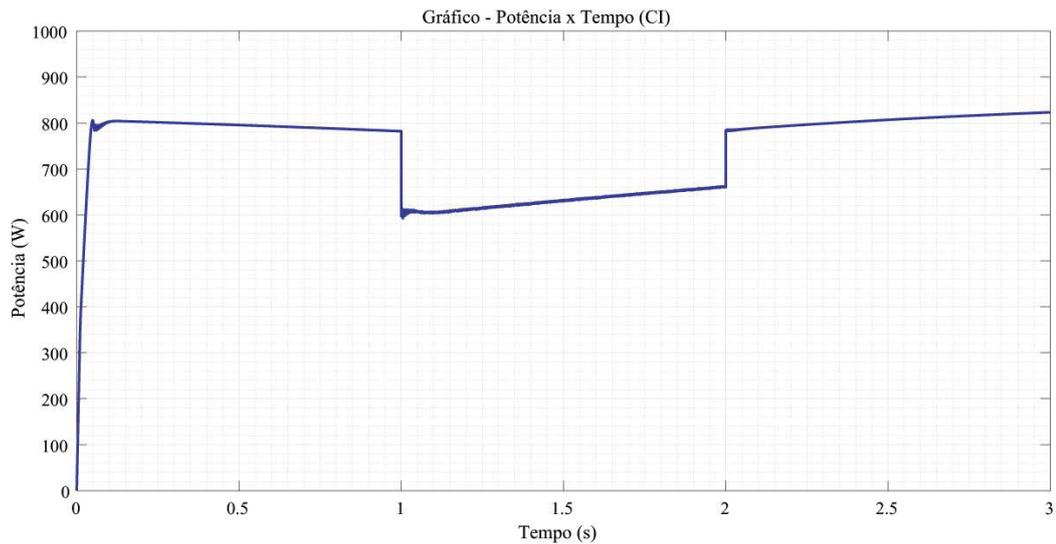


Figura 21 – Visão Geral da Potência sob Variações de Temperatura - CI

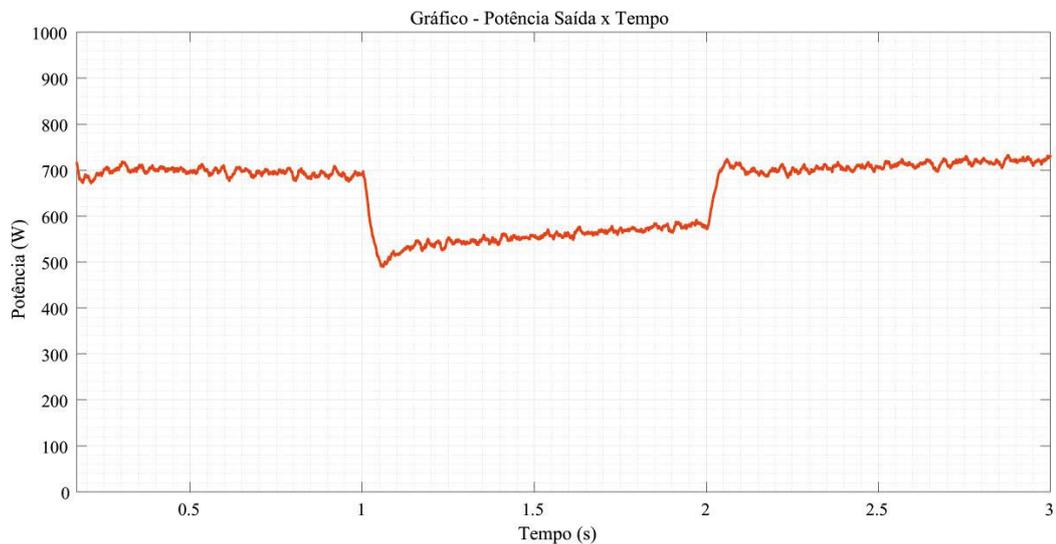


Figura 22 – Potência Ativa sob Variações de Temperatura - CI

Em comparação ao Perturba & Observa podemos observar que o método Condutância Incremental sofreu uma variação ainda menor, além disso há variação após atingir o PMP no Perturba & Observa, o que não ocorre no Condutância Incremental.

A partir dos testes de temperatura pode-se observar que a temperatura dos painéis exerce influência considerável sobre o PMP e para temperaturas mais baixas o painel apresenta melhor rendimento. A resposta de ambos algoritmos em relação às mudanças no ponto de operação ocorreu de maneira eficaz.

## 5.5 Testes com Irradiância Variável

Para os testes desta seção aplicou-se valores variados de irradiância, verificando qual a implicação destas mudanças na saída do algoritmo. A simulação variando a irradiância possui irradiância inicial de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura fixa igual a  $25^\circ \text{ C}$ . Junto ao gráfico segue a tabela com os valores de irradiância utilizados nos degraus. A variação de irradiância é aplicada reduzindo para  $800 \text{ W/m}^2$  e posteriormente para  $600 \text{ W/m}^2$ . Após isso, eleva-se a irradiância para  $800 \text{ W/m}^2$  e posteriormente para  $1000 \text{ W/m}^2$  novamente.

Tabela 2 – Variações de Irradiância

<b>Irradiância (<math>\text{W/m}^2</math>)</b>	1000	800	600	800	1000
--	------	-----	-----	-----	------

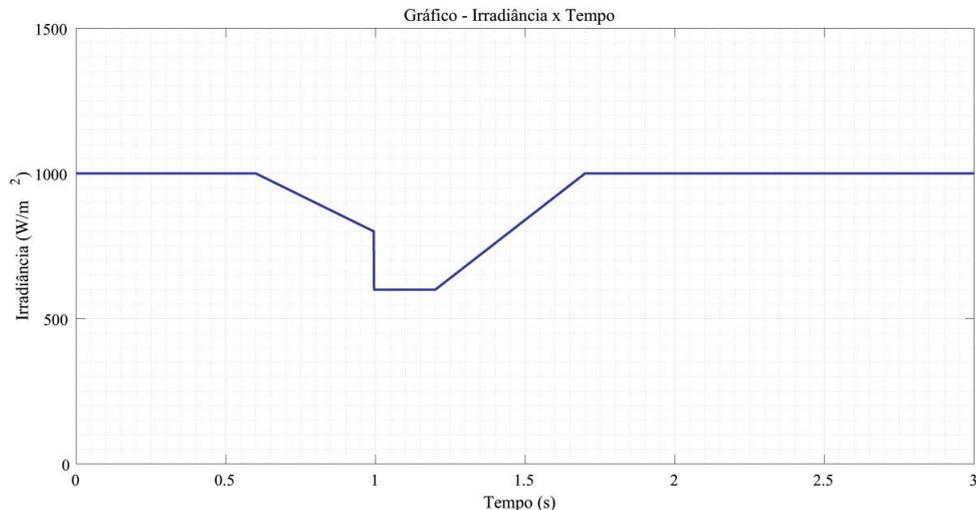


Figura 23 – Variações de Irradiância

O gráfico abaixo mostra o comportamento da curva Potência x Tensão para o nível mais baixo e mais alto de irradiância. Sendo o nível mais baixo  $600W/m^2$  e o mais alto  $1000W/m^2$ .

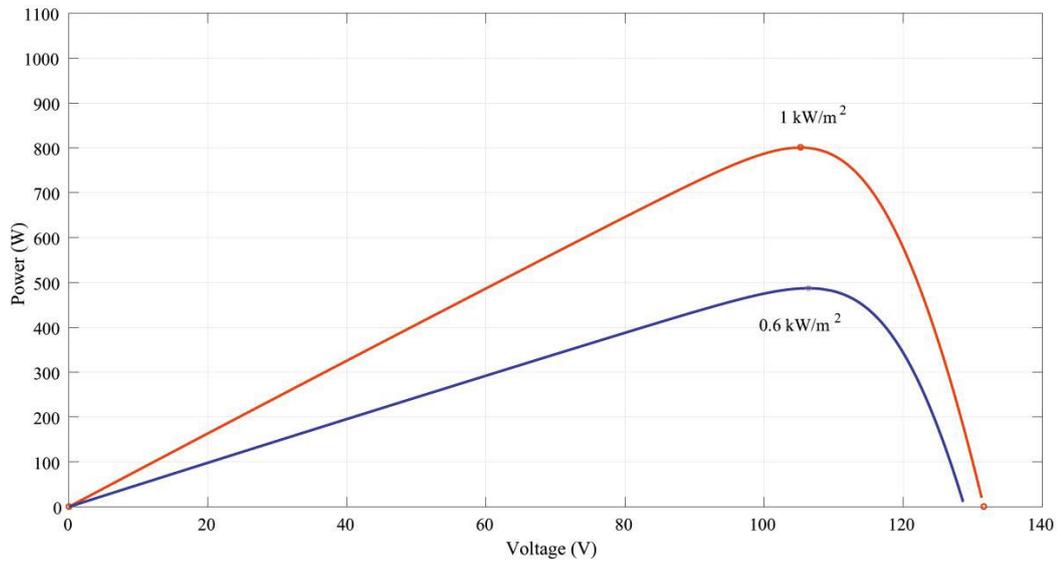


Figura 24 – Potência x Tensão para Variações de Irradiância

### 5.5.1 Perturba & Observa

O algoritmo P&O conseguiu realizar o rastreamento do PMP, mesmo com variações bruscas de irradiância o algoritmo acompanhou as variações no PMP. Sendo assim o algoritmo realiza o rastreamento de maneira eficaz, uma vez que em situações reais as variações de irradiância ocorrem de maneira moderada. A potência ativa apresentou o mesmo comportamento que a potência gerada pelo sistema.

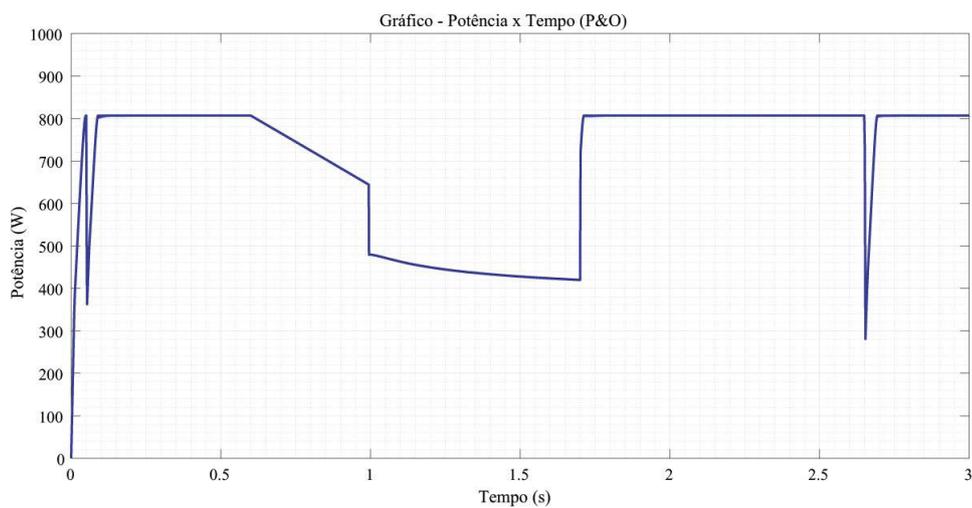


Figura 25 – Potência sob variações de Irradiância - P&O

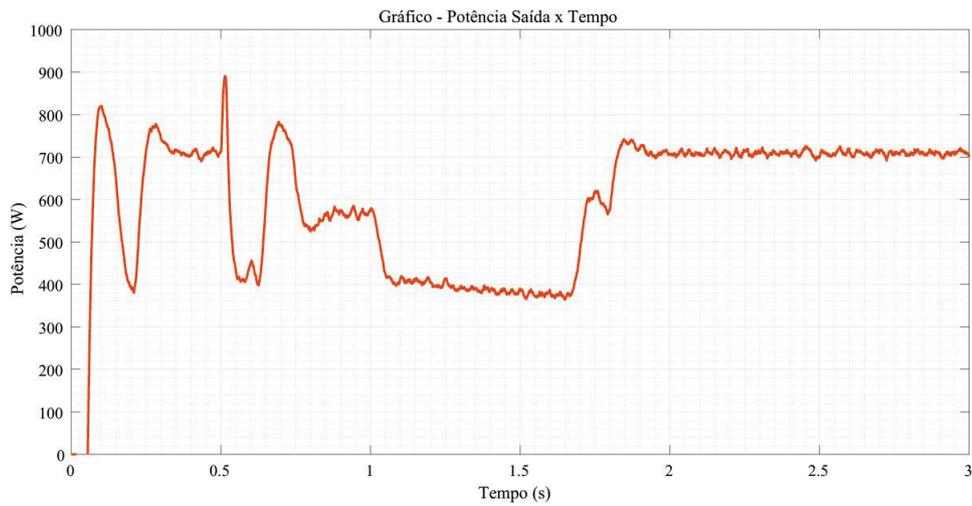


Figura 26 – Potência Ativa sob variações de Irradiância - P&O

### 5.5.2 Condutância Incremental

O algoritmo Condutância Incremental também realizou o rastreamento do PMP de maneira adequada, acompanhando as alterações promovidas pelas variações de irradiância. A Potência de saída seguiu o comportamento da potência gerada pelo painel.

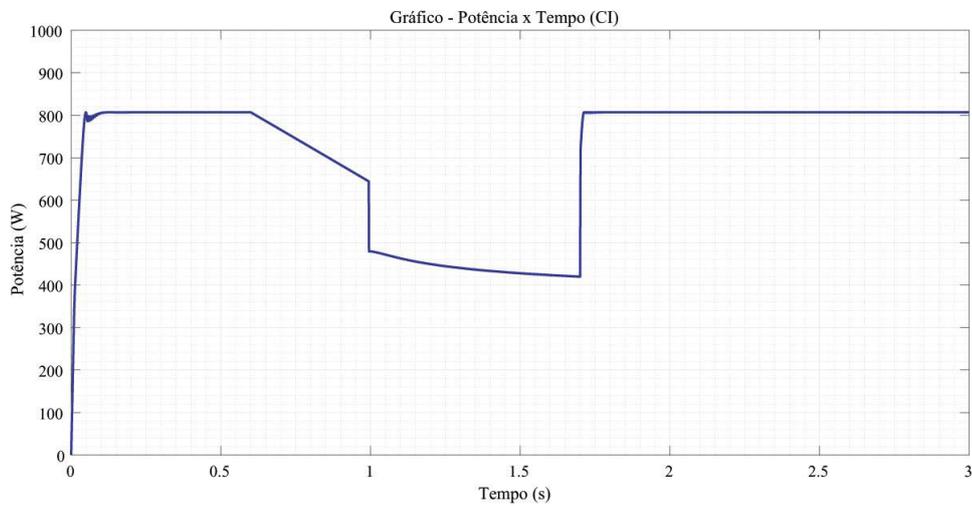


Figura 27 – Potência sob variações de Irradiância - CI

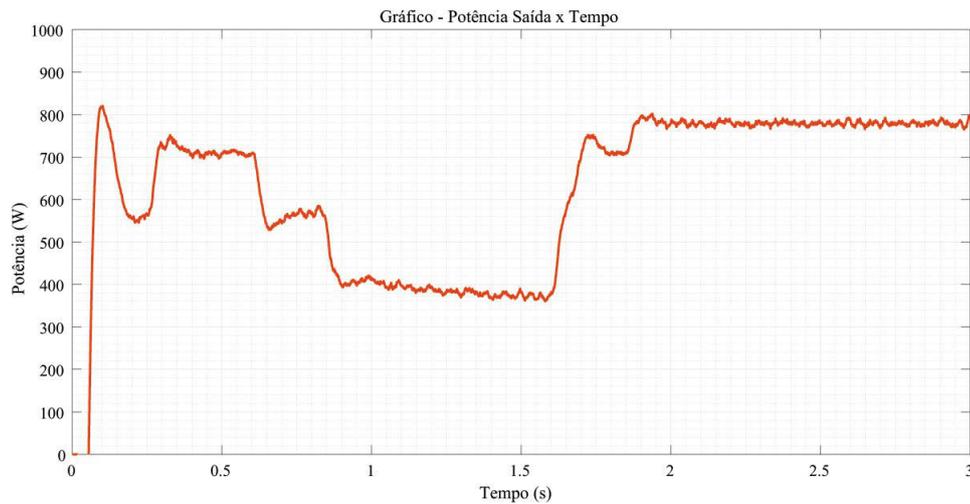


Figura 28 – Potência Ativa sob variações de Irradiância - CI

Após os testes de variação de irradiância foram observados por parte de ambos algoritmos rastreamentos realizados de maneira satisfatória.

## 5.6 Conclusões sobre os Testes

Após as análises dos testes realizados neste capítulo observa-se que o rastreamento é realizado pelos métodos Perturba & Observa, e Condutância Incremental de maneira eficaz e ambos tiveram desempenhos bem próximos. Com a vantagem do Condutância Incremental em apresentar maior estabilidade para as mudanças de temperatura e irradiância.

O algoritmo Perturba & Observa tem como vantagem a baixa complexidade de implementação, mas necessita dos sensores de Corrente e Tensão, além de ter como desvantagens as oscilações em torno do PMP. O algoritmo Condutância Incremental possui como vantagens bom comportamento em estado estacionário e boa resposta sob variações de irradiância, também necessita dos dois sensores, e apresenta uma complexidade maior, visto que suas ações são calculadas através da derivada da curva de potência em relação à tensão.

O Objetivo principal deste trabalho é a busca por um algoritmo MPPT que tenha baixo custo com sensores e apresente desempenho satisfatório. Pelos testes apresentados, os dois algoritmos foram eficientes, e ambos necessitam dos dois sensores (Corrente e Tensão). Desta forma podemos concluir que para o presente trabalho o algoritmo da Condutância Incremental atendeu melhor aos requisitos apresentados devido à sua maior estabilidade após encontrar o PMP.

## 6 Conclusão

*“As palavras fogem quando precisamos delas e sobram quando não pretendemos usá-las.”*  
*Carlos Drummond de Andrade*

Esta pesquisa justifica-se pela necessidade de se reduzir o custo com sensores dos sistemas fotovoltaicos. Para isso, buscou-se uma compreensão de como funcionam alguns dos algoritmos MPPT mais utilizados. Posteriormente foi realizada uma análise comportamental destes algoritmos, com o objetivo de encontrar características que auxiliem a redução do custo com sensores. Efetuou-se uma análise de comportamento de dois dos algoritmos MPPT mais utilizados. Através de simulação foram analisadas características dos dois métodos. Apesar deste trabalho não apresentar nenhuma inovação para este campo de estudo, foi possível observar alguns aspectos importantes de ambos os métodos.

O algoritmo Condutância Incremental apresentou bons resultados para os testes de variação de temperatura e irradiância. O contraponto do mesmo é a necessidade de uso dos sensores de tensão e corrente.

O algoritmo Perturba & Observa por sua vez apresentou resultados bem similares tanto para variações de temperatura quanto para variações de irradiância, com uma estabilidade um pouco menor quando comparado ao Condutância Incremental. O ponto negativo deste método também é a necessidade de utilização dos sensores de tensão e de corrente. Com isso tem-se o custo equivalente de sensores nos dois algoritmos apresentados.

A implementação do algoritmo Tensão Constante seria interessante visto que este necessita apenas do sensor de tensão, ou seja, o sensor de corrente poderia ser eliminado reduzindo o custo final do sistema. A questão que permanece é quanto ao algoritmo apresentar desempenho satisfatório.

### 6.1 Trabalhos Futuros

Analisando os pontos para possíveis aprimoramentos deste trabalho, foram observadas possíveis melhorias dos testes realizados, bem como a implementação de outro método. Estes aprimoramentos são citados a seguir:

- Investigar os algoritmos apresentados através de testes mais elaborados, buscando maior proximidade com situações reais, podendo inserir valores reais de determinada cidade para a temperatura e irradiância, como entradas do painel. Observando o comportamento dos algoritmos para estes valores.

- Através de novos testes como por exemplo representação das situações de sombreamento parcial, observar e analisar a eficiência dos algoritmos para as situações apresentadas. Um teste que auxilia na medição da eficiência dos algoritmos é o fator de rastreamento.
- Implementar o método da Tensão Constante ou outro método que não necessite dos sensores de tensão e corrente. E comparar os resultados deste terceiro método com o Perturba & Observa e o Condutância Incremental, analisando qual algoritmo é mais eficiente nas diversas situações representadas pelos testes.

# Referências

ALVES, A. J. et al. Método mppt para sistema fotovoltaico baseado na técnica da condutância incremental. *Revista CTS IFG Luziânia*, v. 1, n. 1, 2015. Citado nas páginas 15 e 20.

ANEEL, R. N. N. 482. *Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências*, v. 17, 2012. Citado na página 15.

AZEVEDO, G. M. d. S. Sistema de conversão de energia fotovoltaica com compensação baseada em corrente e tensão. Universidade Federal de Pernambuco, 2007. Citado na página 19.

BRITO, M. A. D. et al. Avaliação das principais técnicas para obtenção de mppt de painéis fotovoltaicos. In: IEEE. *2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications-INDUSCON 2010*. [S.l.], 2010. p. 1–6. Citado na página 26.

CABRAL, I.; VIEIRA, R. Viabilidade econômica x viabilidade ambiental do uso de energia fotovoltaica no caso brasileiro: uma abordagem no período recente. In: *III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental*. [S.l.: s.n.], 2012. v. 19. Citado nas páginas 11 e 18.

COSTA, W. T. da. Modelagem, estimação de parâmetros e método mppt para módulos fotovoltaicos. Universidade Federal do Espírito Santo, 2010. Citado na página 17.

EXAME. *Solar, eólica e baterias formam trio imbatível contra combustíveis fósseis*. 2018. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/economia/solar-eolica-e-baterias-formam-trio-imbavel-contra-combustiveis-fosseis/>>. Acesso em: 2 jul. 2018. Citado na página 10.

JÚNIOR, P. d. A. S. et al. Conversor cc-cc boost entrelaçado aplicado no processamento da energia de arranjo solar fotovoltaico. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2011. Citado nas páginas 18 e 24.

LOBATO, S. C. Análise comparativa entre as principais técnicas de mppt com foco experimental. p. 53, 2015. Citado nas páginas 13, 18 e 25.

MAGOSSI, R. F. Q. Algoritmo mppt de um painel fotovoltaico baseado no equivalente de Thévenin obtido por medições. 2016. Citado na página 16.

MARAFFON, C. Estudo do sistema de microgeração de energia eólica. 2018. Citado na página 11.

MOÇAMBIQUE, N. E. M. *Aplicação de Algoritmos de Busca do Ponto de Máxima Potência e controladores lineares e/ou Fuzzy para a regulação da tensão terminal de Painéis Fotovoltaicos*. 2012. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012. Citado nas páginas 17, 18, 19 e 25.

MUNIZ, L. R. A. Implementações de algoritmos de controle e busca de máxima potência aplicados a conversão de energia fotovoltaica. 2017. Citado nas páginas 11, 15, 16, 18, 19 e 20.

O GLOBO. *ENERGIA solar cresceu 70 % em dois anos*. 2017. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/economia/energia-solar-cresceu-70-em-dois-anos-20715504>>. Acesso em: 2 jul. 2018. Citado na página 16.

- OLIVEIRA, J. H. de et al. Comparação de algoritmos de máxima potência em sistemas fotovoltaicos conectados à rede. 2014. Citado na página 20.
- OLIVEIRA, K. C. d. Avaliação da conversão da energia fotovoltaica em sistemas isolados. Universidade Federal de Pernambuco, 2007. Citado na página 12.
- PEREIRA, E. B. et al. *Atlas brasileiro de energia solar*. [S.l.]: Inpe São José dos Campos, 2006. v. 1. Citado na página 15.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. *Rio de Janeiro: CEPEL*, 2014. Citado nas páginas 10, 12, 16, 17 e 18.
- SEGUEL, J. I. L. Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica mppt e controle digital. *Master Degree Dissertation-Research Focus: Power Electronics, PPGEE-UFMG*, 2009. Citado nas páginas 10, 12, 17, 19, 20 e 24.
- SILVA, L. R. C. et al. Análise do software psim por meio da implementação computacional de métodos clássicos de mppt para painéis fotovoltaicos. 2014. Citado na página 18.
- SILVA, L. R. C. et al. Análise de técnicas de rastreamento de máxima potência (mppt) para aplicação em arranjos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Universidade Federal de Uberlândia, 2015. Citado na página 16.
- SOUZA, R. L. de. Estudo e projeto de um simulador de gerador fotovoltaico. 2013. Citado na página 16.
- SPADUTO, R. R.; FREITAS, L. Estudo de técnicas de mppt em sistemas fotovoltaicos. In: *Conferência de Estudo em Engenharia Elétrica, XI. Uberlândia*. [S.l.: s.n.], 2013. Citado nas páginas 12 e 24.
- STANKIEWICZ, A. L. et al. Estudo comparativo de técnicas de rastreamento de máxima potência para geração de energia solar fotovoltaica. *Blumenau: FURB-Universidade Regional de Blumenau*, p. 192, 2013. Citado nas páginas 11, 19, 21 e 26.
- TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRIGUEZ, P. *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. v. 29. Citado na página 18.
- VILLALVA, M. G. et al. Conversor eletrônico de potência trifásico para sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. [sn], 2010. Citado na página 16.
- XIAO, W.; DUNFORD, W. G. A modified adaptive hill climbing mppt method for photovoltaic power systems. In: *IEEE. Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*. [S.l.], 2004. v. 3, p. 1957–1963. Citado na página 19.
- ÉPOCA. *A APOSTA da Alemanha em energia solar*. 2017. Disponível em: <<https://epoca.globo.com/ciencia-e-meio-ambiente/blog-do-planeta/noticia/2017/06/aposta-da-alemanha-em-energia-solar.html>>. Acesso em: 2 jul. 2018. Citado na página 11.