



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RAFAEL MACÊDO MARQUES GOUVEIA

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

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

JOÃO PESSOA - PB
2018

RAFAEL MACÊDO MARQUES GOUVEIA

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

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à coordenação do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Kleber Carneiro de Oliveira

JOÃO PESSOA - PB
2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

G719a Gouveia, Rafael Macêdo Marques.

Análise de Técnicas de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência em Sistemas Fotovoltaicos Isolados / Rafael Macêdo Marques Gouveia. - João Pessoa, 2018.
67 f.

Orientação: Kleber de Oliveira.
TCC (Especialização) - UFPB/CEAR.

1. Sistemas Fotovoltaicos. 2. Rastreamento do Ponto de Máxima Potência. 3. MATLAB®. 4. Simulink®. 5. Conversor Boost. I. de Oliveira, Kleber. II. Título.

UFPB/BC

RAFAEL MACÊDO MARQUES GOUVEIA

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

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Data de Aprovação: ___/___/___

Banca Examinadora

Prof. Dr. Kleber Carneiro de Oliveira (Orientador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Darlan Alexandria Fernandes (Avaliador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. João Marcelo Dias Ferreira (Avaliador)
Universidade Federal da Paraíba

JOÃO PESSOA – PB
2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e por tudo que Ele tem me proporcionado durante essa longa caminhada. Sou extremamente grato pela sua proteção e por sempre estar iluminando meus passos.

A minha esposa Isabella, por seu infinito amor e carinho. Agradeço também pela sua compreensão, por entender os momentos de ausência e, principalmente, por ter me apoiado e encorajado em absolutamente todas as decisões que tomei durante toda essa jornada da graduação, jornada essa que também nos transformou de namorados a casados.

Aos meus pais Severino e Ilsaia, guerreiros que Deus me deu o privilégio de tê-los como pais. Agradeço por todo o amor, dedicação e apoio incondicional para que esta etapa da minha vida fosse concluída com êxito. Sem vocês eu nada seria. Agradeço também aos meus irmãos, Roberta e Bruno, por todo o amor e ajuda durante nossa caminhada juntos.

Ao meu professor orientador Dr. Kléber Carneiro de Oliveira, pela orientação deste trabalho de conclusão de curso e por toda ajuda e disponibilidade durante o tempo de elaboração do trabalho. Agradecer também pelas inúmeras dúvidas sanadas a respeito do projeto.

Aos professores Dr. Darlan Alexandria Fernandes e Dr. João Marcelo Dias Ferreira que se dispuseram a fazer parte da banca examinadora do meu trabalho e contribuíram com suas valiosas dicas e correções.

Agradeço também aos professores Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva e Dr. Francisco Antônio Belo pela oportunidade dada a mim de trabalhar como aluno de iniciação científica. Sou grato por todos os ensinamentos passados e pela amizade.

Agradeço a todos os amigos que fiz durante a graduação. Foram tempos de muito aprendizado, companheirismo e, para aliviar um pouco a tensão com o curso, de diversão.

Por fim, agradeço a todos aqueles que de certa forma contribuíram para a construção da minha formação pessoal e acadêmica.

Obrigado!

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso visa analisar e implementar algumas técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT, do inglês *Maximum Power Point Tracking*) para o caso de irradiâncias uniformes. Os métodos escolhidos foram alguns já difundidos pela literatura e pela indústria, que são: o Perturba & Observa (P&O), Condutância Incremental (IC), Perturba & Observa com Perturbação do Passo Variável (P&O_VS) e Condutância Incremental com Perturbação do Passo Variável (IC_VS). Para cada um desses métodos realizou-se um estudo em que foram obtidas as respostas em regime permanente e transitória, o comportamento do sistema fotovoltaico para diferentes situações de irradiância e temperatura e, finalmente, um estudo acerca da eficiência de cada método. Após todas essas considerações, foi possível definir a melhor técnica de rastreamento do ponto de máxima potência. Para este trabalho, implementou-se um painel fotovoltaico *Kyocera KC 200GT*, um conversor *Boost* que funciona como elevador de tensão e uma carga resistiva de 5Ω . O *software* escolhido para simulação e obtenção dos resultados foi o MATLAB®/Simulink®.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos. Rastreamento do Ponto de Máxima Potência. MATLAB®. Simulink®. Conversor *Boost*.

ABSTRACT

This undergraduate thesis aims to analyze and implement some Maximum Power Point Tracking (MPPT) techniques for uniform irradiance. Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductance (IC), Perturb and Observe with Variable Step Disturbance (P&O_VS), and Incremental Conductance with Variable Step Disturbance (IC_VS). For each of these methods a study was carried out in which the responses were obtained in a permanent and transient regime, the behavior of the photovoltaic system for different irradiance and temperature situations and, finally, a study about the efficiency of each method. After all these considerations, it was possible to define the best technique of the maximum power point tracking. For this work, a Kyocera KC 200GT photovoltaic panel, a Boost converter that acts as a voltage elevator and a resistive load of 5 Ω was implemented. The software chosen for simulation and obtaining results was MATLAB®/Simulink®.

Keywords: Photovoltaic Systems. Maximum Power Point Tracking. MATLAB®. Simulink®. *Boost* converter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Produção mundial de eletricidade por fontes de energia.....	14
Figura 2. Capacidade solar fotovoltaica global.	16
Figura 3. Diagrama do sistema implementado.....	18
Figura 4. Célula fotovoltaica real.....	22
Figura 5. Circuito equivalente de um dispositivo fotovoltaico prático com um único diodo.....	23
Figura 6. Curva típica I-V. (Irradiância = 1000 W/m ² / Temperatura = 25°C).....	27
Figura 7. Curva típica P-V. (Irradiância = 1000 W/m ² / Temperatura = 25°C).	27
Figura 8. Curva I-V para diferentes irradiâncias com temperatura de 25°C.	28
Figura 9. Curva P-V para diferentes irradiâncias e temperatura de 25°C.....	28
Figura 10. Curva I-V para diferentes temperaturas com irradiâncias de 1000 W/m ² .29	
Figura 11. Curva P-V para diferentes temperaturas com irradiância de 1000 W/m ² . 29	
Figura 12. Exemplo do funcionamento do método P&O.	31
Figura 13. Fluxograma do método P&O (tensão de referência como saída).....	33
Figura 14. Fluxograma do método P&O (razão cíclica como saída).....	33
Figura 15. Ilustração da Curva P-V para Condutância Incremental.....	34
Figura 16. Fluxograma do algoritmo MPPT Condutância Incremental.	36
Figura 17. Fluxograma do método Perturba & Observa com tamanho da perturbação do passo variável (P&O_VS).....	38
Figura 18. Método da realimentação por tensão ou corrente com tensão de referência.	39
Figura 19. Fluxograma do método condutância incremental com tamanho da perturbação do passo variável (IC_VS).	40
Figura 20. Curva I-V para temperaturas variáveis e irradiação constante.	42
Figura 21. Curva I-V para irradiação variável e temperatura constante.....	43
Figura 22. Conversor <i>Boost</i> suprido por um arranjo fotovoltaico.	45
Figura 23. Conversor c.c.-c.c. <i>Boost</i> . (a) Chave aberta, S=0. (b) Chave fechada, S=1.	45
Figura 24. Esquema de um Conversor c.c.-c.c. <i>Boost</i> elaborado no Simulink®.....	47
Figura 25. Sistema fotovoltaico implementado utilizando MATLAB®/Simulink®.	48
Figura 26. Resultado de simulação da técnica P&O com mudanças de irradiância (700 W/m ² e 1000 W/m ²).....	50

Figura 27. Resultado de simulação da técnica IC com mudanças de irradiância (700 W/m ² e 1000 W/m ²).	51
Figura 28. Resultado de simulação para o método P&O com passo de perturbação variável e mudanças de irradiância (700 W/m ² e 1000 W/m ²).	52
Figura 29. Resultados de simulação para o P&O com passo fixo e variável e mudanças de irradiância (700 W/m ² e 1000 W/m ²).	53
Figura 30. Resultados de simulação para o método IC com passo de perturbação variável e mudanças de irradiância (700 W/m ² e 1000 W/m ²).	54
Figura 31. Resultados de simulação para o método IC com passos de perturbação fixo e variável com mudanças de irradiância (700 W/m ² e 1000 W/m ²).	54
Figura 32. Método P&O com $\Delta D=0,004$ e irradiância de 1000 W/m ²	55
Figura 33. Método IC com $\Delta D=0,004$ e irradiância de 1000 W/m ²	56
Figura 34. Método P&O com passo de perturbação variável e irradiância de 1000 W/m ²	56
Figura 35. Método IC com passo de perturbação variável e irradiância de 1000 W/m ²	57
Figura 36. Método IC com passo de perturbação variável e irradiância crescente (800/900/1000 W/m ²).	58
Figura 37. Método IC com passo de perturbação variável e irradiância decrescente (1000/900/800 W/m ²).	59
Figura 38. Método IC com passo de perturbação variável, temperatura fixa em 25°C e irradiância aleatória (900/1000/800 W/m ²).	59
Figura 39. Método IC com passo de perturbação variável, irradiância fixa em 1000 W/m ² e temperatura crescente (15°C/25°C/35°C)	60
Figura 40. Método IC com passo de perturbação variável, irradiância fixa em 1000 W/m ² e temperatura decrescente (35°C/25°C/15°C)	60
Figura 41. Método IC com passo de perturbação variável, irradiância fixa em 1000 W/m ² e temperatura aleatória (25°C/15°C/35°C).	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros do painel fotovoltaico <i>Kyocera KC200GT</i>	26
Tabela 2. Resumo do método P&O.	32
Tabela 3. Resumo da ideia geral do método IC.....	35
Tabela 4. Especificações do Conversor c.c.-c.c. <i>Boost</i>	46
Tabela 5. Comparação entre as técnicas MPPT (regime transitório e regime permanente).	49
Tabela 6. Eficiência dos métodos MPPT.	57

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BIG	Banco de Informações de Geração
c.a.	Corrente Alternada
c.c.	Corrente Contínua
CV	Variável de Controle
D	Razão cíclica (<i>Duty cycle</i>)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GC	Geração centralizada
GD	Geração distribuída
HC	Método <i>Hill Climbing</i>
IC	Condutância Incremental
IC_VS	Condutância Incremental com perturbação do passo variável (<i>Variable Step</i>)
IEA	Agência Internacional de Energia (<i>International Energy Agency</i>)
MPPT	Rastreamento do ponto de máxima potência
P&O	Método Perturba e Observa
P&O_VS	Método Perturba e Observa com perturbação do passo variável (<i>Variable Step</i>)
PI	Proporcional integral
PMP	Ponto de Máxima Potência
PV	Fotovoltaico (<i>Photovoltaic</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação	17
1.2	Objetivos	17
1.3	Estrutura e Organização do Trabalho	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Introdução	19
2.2	Sistemas Fotovoltaicos e seus Componentes	19
2.2.1	Sistemas Fotovoltaicos Isolados da Rede (Off-grid)	19
2.2.2	Sistemas Fotovoltaicos Ligados à Rede (On-grid)	20
2.2.3	Sistemas Híbridos.....	20
2.2.4	Geração Centralizada.....	20
2.2.5	Geração Distribuída	21
2.2.6	O Painel Fotovoltaico.....	21
3	TÉCNICAS DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA...	30
3.1	Introdução	30
3.2	Métodos Diretos	30
3.2.1	Perturba e Observa	30
3.2.2	Condutância Incremental.....	34
3.2.3	Perturba & Observa com Perturbação do Passo Variável.....	35
3.2.4	Condutância Incremental com Perturbação do Passo Variável	37
3.2.5	Realimentação por Tensão ou Corrente.....	39
3.3	Métodos Indiretos	41
3.3.1	Método da Tensão de Circuito Aberto	41
3.3.2	Método da Corrente de Curto-Circuito.....	42
4	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DOS MÉTODOS MPPT	44
4.1	Introdução	44
4.2	Sistema Simulado	44
4.2.1	Conversor c.c.-c.c. <i>Boost</i>	44
4.3	Resultados da Implementação Computacional	47
4.3.1	Comparação entre as técnicas de MPPT	47
4.3.2	Eficiência	55
4.3.3	Comportamento do sistema para situações diversas.....	58
5	CONCLUSÃO	63

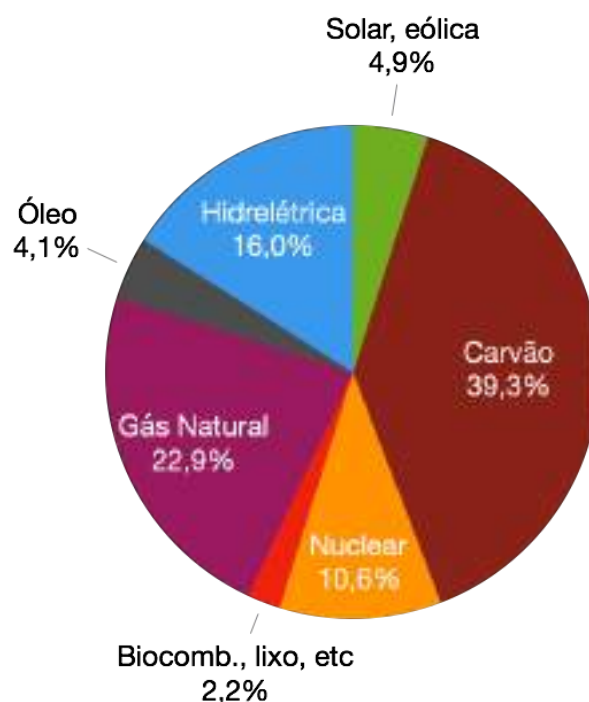
REFERÊNCIAS.....	64
-------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

A primeira crise do petróleo, em 1973, abalou a economia de várias nações do mundo, especialmente devido à grande dependência que elas tinham dos combustíveis fósseis. Essa crise trouxe a conscientização de que esses recursos energéticos são finitos e acendeu o alerta para a necessidade de se buscar novas fontes de energia. Os países desenvolvidos e emergentes têm sofrido com o rápido aumento da demanda por energia elétrica, consumo exacerbado por parte da população mundial e preço do petróleo sempre em alta. Assim, fica evidente que o investimento em fontes de energias alternativas é necessário. Diante disso, o interesse por esses tipos de energia tem aumentado cada vez mais com o passar dos anos e hoje já se tornaram realidade em vários países.

Na matriz energética mundial ainda é predominante o uso das fontes não renováveis como forma de geração de energia elétrica, o que representou aproximadamente 70% no ano de 2015 como ilustrado na Figura 1, segundo relatório da Agência Internacional de Energia (IEA) publicado em setembro de 2017. Muitos países têm a geração de eletricidade como uma das atividades econômicas que mais produz CO₂ (IEA, 2017).

Figura 1. Produção mundial de eletricidade por fontes de energia.



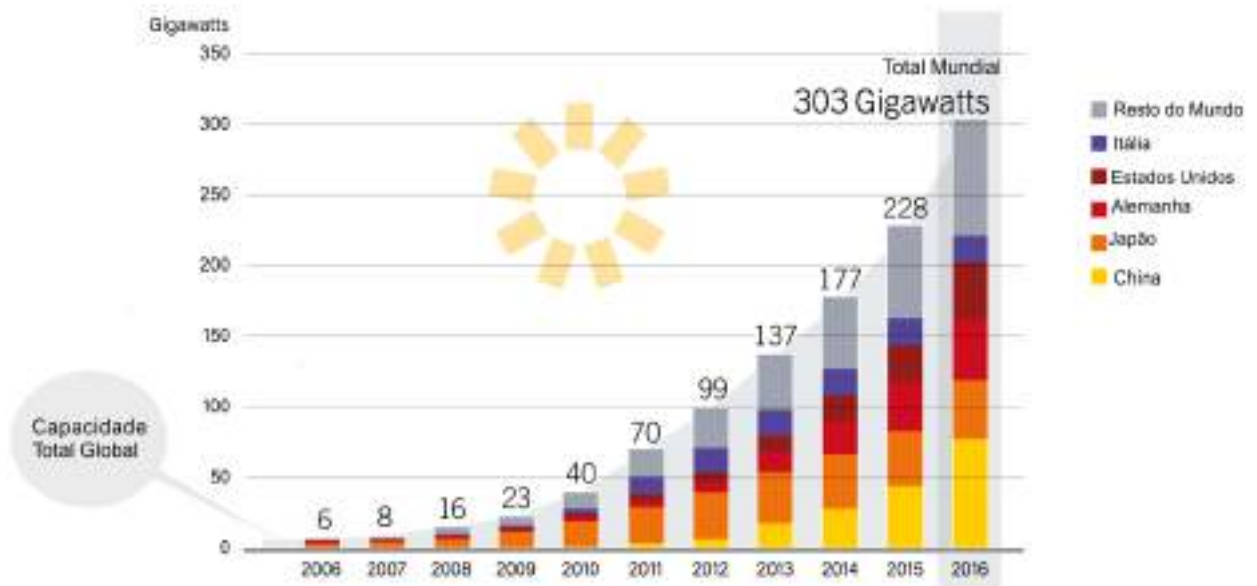
Fonte: Adaptado de IEA (2017)

Por esse motivo, existe um apelo de diversas correntes para a limpeza da matriz energética global, o que traz discussões e acordos internacionais acerca desse tema. Nesse sentido, a tendência é que a participação das energias renováveis, tais como a energia solar e eólica, continue em crescimento e tendo um apoio principal de pesquisadores que buscam desenvolver tecnologias que permitam gerar eletricidade sem agredir o meio ambiente.

A energia solar é uma das mais favoráveis formas de energia renovável, por ser teoricamente inesgotável, com irradiação constante e homogênea e relativamente bem distribuída pela superfície da Terra. O Sol fornece anualmente cerca de $1,5 \times 10^{18}$ kWh ao planeta Terra, sendo esta fonte de energia o principal combustível do Planeta (RÜTHER, 2004). Portanto, na busca de uma fonte de energia renovável mais viável, surge a opção de investimento na energia solar fotovoltaica, que tem como características favoráveis: a necessidade de não ter parte móvel, não produzir ruídos, os painéis podem agrupar-se em diversas configurações para obter diferentes níveis de potência, não há a necessidade de manutenção constante, sendo a limpeza da poeira acumulada a maior das tarefas, também não há a necessidade de um operador humano e sua instalação é simples e rápida (DINÇER, 2011). Além disso, é uma tecnologia estudada há anos por milhares de pesquisadores ao redor do mundo e pauta de programas relacionados ao desenvolvimento sustentável de inúmeros países. No entanto, a conversão em eletricidade dos atuais painéis fotovoltaicos está um pouco distante de atingir sua melhor eficiência, sendo de 24,7% em situação de laboratório e entre 14 e 18% comercialmente (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

O crescimento da energia solar fotovoltaica tem sido grandioso na última década, sobretudo em países da Europa e da Ásia. Em 2016, a China passou a liderar mundialmente a geração de energia solar fotovoltaica e o Japão ultrapassou a Alemanha, como mostra a Figura 2.

Figura 2. Capacidade solar fotovoltaica global.



Fonte: Adaptado de RENEWABLES 2017 GLOBAL STATUS REPORT (2017)

Na China, essa forma de geração de energia cresceu mais rápido do que qualquer outra (IEA, 2017). Mesmo o Brasil possuindo uma insolação diária maior que vários países desenvolvidos, a geração de energia solar fotovoltaica representa apenas 0,2% conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) informa em seu Banco de Informações de Geração (BIG) (ANEEL, 2017). Contudo, a Empresa de Pesquisa Energética – EPE, no seu Balanço Energético Nacional 2017, identificou um aumento de 44,7% na geração de energia elétrica através da fonte fotovoltaica entre os anos de 2015 e 2016, incluindo a geração distribuída (EPE, 2017). Esse resultado se deve à popularização da tecnologia, que se deve ao seu barateamento e incentivos oriundos do poder público com o objetivo de estimular diversos setores a diminuírem os níveis de CO₂ despejados na atmosfera terrestre (EPE, 2014). Além disso, é importante mencionar o avanço na tecnologia e manipulação de materiais semicondutores, especialmente o silício, que teve uma grande colaboração no aumento do rendimento das células fotovoltaicas. Concomitantemente, o desenvolvimento da eletrônica de potência teve grande importância, visto que ela é a ferramenta utilizada para processar a energia gerada pelas fontes fotovoltaicas de energia elétrica.

Com um novo cenário de popularização das plantas fotovoltaicas em geral, uma problemática torna-se bastante recorrente: como aproveitar a máxima potência produzida pelos painéis fotovoltaicos, já que sua eficiência da conversão fotovoltaica

em energia elétrica é relativamente baixa? Essa tarefa é realizada por algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência (do inglês, *Maximum Power Point Tracking* – MPPT). Eles objetivam tirar o máximo proveito da energia disponibilizada pelo gerador, que nesse caso são os painéis fotovoltaicos, evitando desperdícios e aumentando a eficiência do sistema. Esse rastreamento faz uma varredura na curva corrente x tensão (curva $I \times V$), quando se torna possível detectar e transferir à carga a máxima potência do sistema, por isso da importância da realização de estudos minuciosos nesta importante área da Engenharia Elétrica.

1.1 Motivação

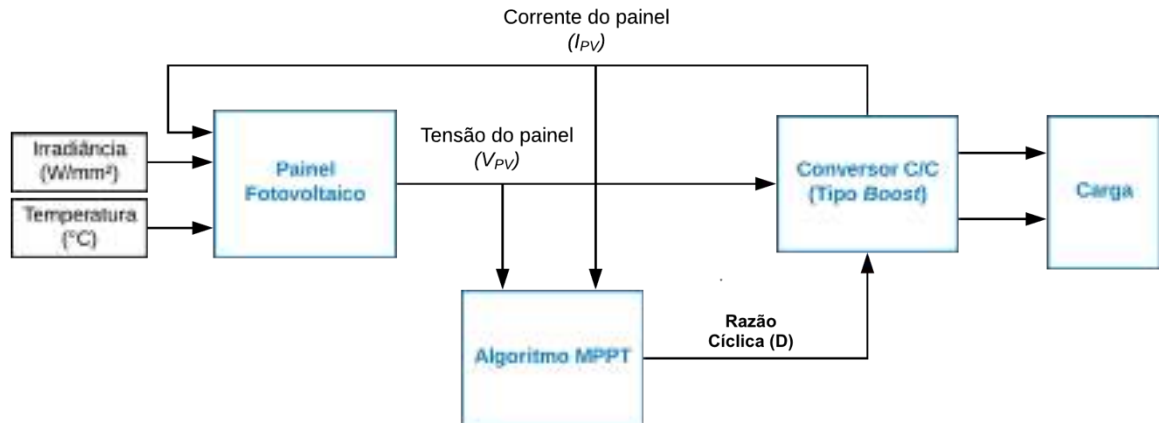
Perante o exposto, é necessário entender como um sistema fotovoltaico se comporta em situações uniformes de incidência da luz solar nos módulos a fim de buscar seu ponto de máxima transferência de potência, já que a curva corrente versus tensão (curva $I \times V$) se comporta de modo não linear de acordo com a variação de temperatura ambiente e de irradiância solar. Essa compreensão da problemática leva a uma posterior aplicação dos algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). Além disso, são necessários o dimensionamento e a implementação em ambiente computacional dos demais componentes do sistema como o painel fotovoltaico, inversor e o algoritmo de rastreamento de máxima potência.

1.2 Objetivos

Este trabalho de conclusão de curso visa implementar, por meio de modelização e simulação computacional, um estudo comparativo entre algumas técnicas de extração do ponto de máxima potência (PMP) em arranjos fotovoltaicos, comparados com dados oriundos da literatura e dos fabricantes de painéis solares. O sistema estudado neste trabalho é composto por painel fotovoltaico (modelo *Kyocera KC 200GT*), conversor *Boost* c.c.-c.c. (elevador de tensão) e técnicas de rastreamento de máxima potência, sendo a razão cíclica (D , do inglês *Duty Cycle*) a saída do algoritmo, o que possibilita o controle da chave do conversor. Assim, objetiva-se finalmente analisar e definir a técnica de maior eficiência, tendo por base o comportamento do sistema fotovoltaico nas devidas condições ambientais

aplicadas. O diagrama contendo todos os blocos do sistema fotovoltaico implementado pode ser conferido na Figura 3.

Figura 3. Diagrama do sistema implementado.



Fonte: Autoria própria

1.3 Estrutura e Organização do Trabalho

Este trabalho organiza-se em cinco capítulos, descritos conforme a seguinte ordem:

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica acerca dos sistemas fotovoltaicos, dos componentes desse sistema, suas modelagens e comportamento para diversas situações de funcionamento.

No capítulo 3, os métodos MPPT a serem estudados na monografia são descritos e explicitados. Seus diagramas, tabelas e fluxogramas ilustram em detalhes o funcionamento de cada técnica.

No capítulo 4, o conversor *Boost* c.c./c.c. é apresentado. Também é mostrado o sistema completo utilizado neste trabalho e todos os resultados de simulação para cada técnica proposta.

E **o capítulo 5** traz as conclusões sobre os estudos realizados das técnicas de MPPT.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Como o foco deste trabalho de conclusão de curso é a análise e comparação de técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos, este capítulo tem como objetivo descrever e sintetizar os temas relacionados à energia fotovoltaica, o que serviu como embasamento para o desenvolvimento desta monografia.

2.2 Sistemas Fotovoltaicos e seus Componentes

Os sistemas fotovoltaicos, formados por painéis ou módulos constituídos de células fotovoltaicas (PV), são caracterizados por serem capazes de transformar a luz oriunda do sol em corrente elétrica. Esses sistemas trazem muitos benefícios para o consumidor, como a redução do valor pago por eletricidade e a possibilidade de tornar-se autossuficiente na produção de energia elétrica (VILLALVA e GAZOLI, 2012). Os sistemas são classificados em duas categorias principais: isolados e conectados à rede. Há também aqueles que funcionam em combinação com outras fontes de energia, estes são chamados de sistemas híbridos. A escolha pela melhor opção se dá por meio da avaliação dos recursos energéticos em certa localidade (PINHO e GALDINO, 2014).

2.2.1 Sistemas Fotovoltaicos Isolados da Rede (Off-grid)

Neste tipo de sistema, o uso de dispositivos de armazenamento de energia normalmente torna-se necessário. Eles são empregados quando não há rede de distribuição de energia elétrica disponível, como em locais isolados e áreas rurais. Esses sistemas podem ser com ou sem armazenamento de energia, já que eles variam dependendo do tipo da carga a ser alimentada, que pode ser por corrente contínua (c.c.) ou corrente alternada (c.a.) (PINHO e GALDINO, 2014).

Em sistemas que são necessários armazenamento de energia elétrica por intermédio de baterias, existe um dispositivo para controlar sua carga e descarga. Ele tem como objetivo não permitir que haja danos na bateria por sobrecarga ou

descarga profunda e pelo gerenciamento da energia utilizada pelos aparelhos que o sistema fotovoltaico esteja alimentando.

Para alimentação de equipamentos em c.a., torna-se necessário a utilização de um inversor. Normalmente, este dispositivo vem incorporado a um rastreador de ponto de máxima potência, que é usado para otimização da potência final produzida pelo sistema fotovoltaico (CRESESB, 2008).

2.2.2 Sistemas Fotovoltaicos Ligados à Rede (On-grid)

Estes sistemas são geralmente projetados para um grande número de painéis fotovoltaicos. Eles representam uma fonte de energia que complementa àquela disponibilizada pela concessionária de energia ao qual o consumidor está conectado. Devido ao fato de serem sistemas normalmente sem armazenamento de energia, o que é gerado, é injetado na rede elétrica de forma instantânea, por intermédio de inversores que conectam o gerador fotovoltaico à rede de distribuição. Exigências de qualidade e segurança devem ser satisfeitas para que a rede elétrica não seja afetada (CRESESB, 2008).

2.2.3 Sistemas Híbridos

Sistemas fotovoltaicos híbridos são aqueles compostos de diversas fontes de geração de energia como por exemplo: gerador diesel, módulos fotovoltaicos, turbinas eólicas e baterias para armazenamento de energia. Eles são empregados para sistemas de médio e grande porte. Essas fontes combinadas podem tornar complexa a otimização do uso das energias, mas por outro lado, elas promovem um fornecimento de eletricidade mais confiável (ARICHI et al., 2012).

2.2.4 Geração Centralizada

Há muitos anos, o Brasil viveu uma época de grandes investimentos em linhas de transmissão e construção de enormes blocos de geração de energia elétrica. Este tipo de geração tem o nome de geração centralizada, ou GC, que significa a existência de enormes geradores de energia, localizados essencialmente nas proximidades de rios ou fontes de energia, como por exemplo uma hidrelétrica,

fazendo com que linhas de transmissão que percorrem vários quilômetros para alimentar as cidades fossem construídas. Este modelo tornou-se o mais tradicional e predominante no setor elétrico brasileiro. Alguns exemplos de geração centralizada são as usinas hidrelétricas e termelétricas (RODRIGUES, 2007).

2.2.5 Geração Distribuída

Define-se como geração distribuída (GD) a geração de energia elétrica próxima ao consumidor, independentemente da tecnologia utilizada, da fonte de energia ou até mesmo da sua potência, embora as tecnologias de geração distribuída tenham se modernizado e incluído potências cada vez menores (INEE), beneficiando os pequenos consumidores. Exemplos clássicos e atuais de GD são os pequenos sistemas fotovoltaicos, pequenas centrais hidrelétricas (PCH's), geradores de emergência, etc.

A Resolução Normativa nº 482, que entrou em vigor em 17 de abril de 2012, permite que o consumidor brasileiro gere, a partir de fontes renováveis ou cogeração, sua própria energia elétrica. Em novembro de 2015 a resolução normativa nº 482 sofreu uma atualização por meio da Resolução Normativa nº 687 e trouxe algumas novas regras, como por exemplo, a potência instalada sendo menor que 75 kW se define microgeração distribuída, para potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW define-se minigeração distribuída, mudanças no sistema de compensação de energia elétrica para unidades consumidoras com microgeração ou minigeração distribuída, etc. (ANEEL, 2015).

2.2.6 O Painel Fotovoltaico

Nesta subseção, o principal componente de um painel fotovoltaico, que é a célula fotovoltaica, é explanado. Também são mostrados os equacionamentos obtidos a partir do circuito equivalente do dispositivo fotovoltaico e seu comportamento quando submetido a variadas situações de irradiância e temperatura.

2.2.6.1 A Célula Fotovoltaica

O menor dispositivo de um sistema fotovoltaico é a célula solar, também chamada de célula fotovoltaica, como ilustrado na Figura 4. Ela é essencialmente um diodo semiconductor em que a junção P-N é exposta à luz e produz corrente e tensão elétricas. Como a célula produz pouca eletricidade, é de fundamental importância que várias delas sejam ligadas em série para formar um módulo ou painel fotovoltaico, esse tipo de ligação proporciona maiores tensões de saída (VILLALVA et al., 2009). Os sistemas de geração fotovoltaica são formados pelos módulos ou painéis agrupados e organizados em vários tipos de arranjo fotovoltaico, que são ligados a conversores de potência, chamados inversores (DINÇER, 2011).

Figura 4. Célula fotovoltaica real.



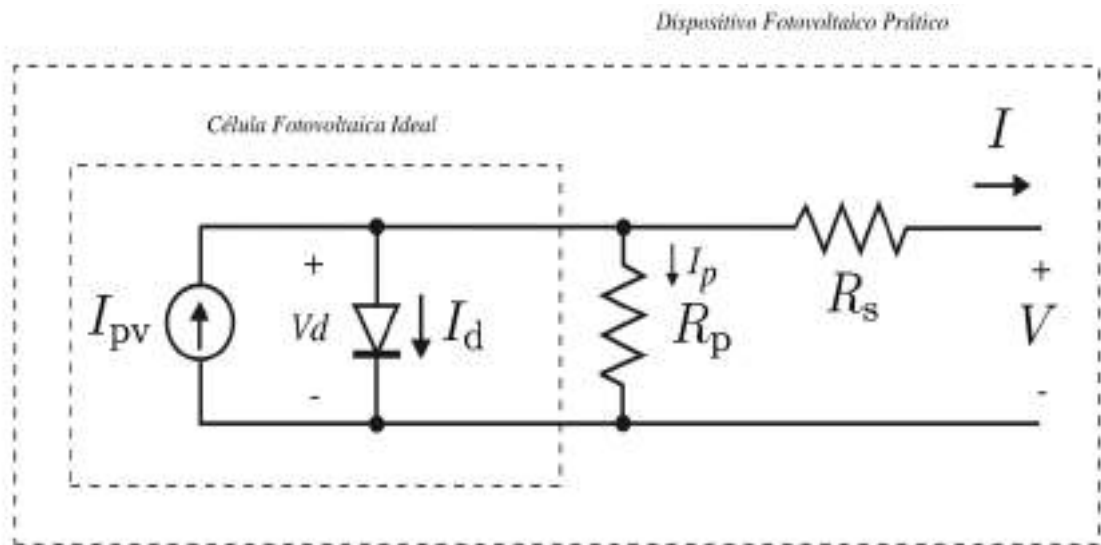
Fonte: (CASTRO, 2007)

2.2.6.2 Circuito Equivalente do Dispositivo Fotovoltaico

Na Figura 5 é representado o circuito equivalente de uma célula fotovoltaica ideal e o circuito equivalente de um dispositivo fotovoltaico prático. Os módulos fotovoltaicos, assumidos como uma associação em série de N_s células fotovoltaicas, foram modelados através de um circuito elétrico de diodo único, muito propagado na literatura por aliar simplicidade e precisão (SILVA, 2015). Pela análise desse circuito, as equações obtidas ilustram o funcionamento elétrico da célula fotovoltaica e permitem sua construção em *softwares*, como o MATLAB®/Simulink®.

O circuito é composto por uma fonte de corrente, que representa a corrente fotogerada a partir da absorção da radiação solar, em paralelo com um diodo, que representa a natureza da junção semicondutora das células solares baseada na equação de Shockley do diodo ideal, e mais duas resistências, em série e em paralelo (SILVA, 2015).

Figura 5. Circuito equivalente de um dispositivo fotovoltaico prático com um único diodo.



Fonte: Adaptado de VILLALVA et al (2009).

Dessa maneira, a equação deste circuito poderá ser escrita da seguinte forma:

$$I = I_{pv} - I_o \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p}, \quad (1)$$

Em que:

$$V_t = \frac{N_s A K T}{q}, \quad (2)$$

- I_{pv} – Corrente fotogerada do módulo fotovoltaico (A);
- I_o – Corrente reversa de saturação do diodo do módulo fotovoltaico (A);
- R_p – Resistência paralela do módulo fotovoltaico (em Ω);
- R_s – Resistência série do módulo fotovoltaico (em Ω);
- N_s – Número de células associadas em série no módulo fotovoltaico;
- A – Fator de idealidade do diodo;
- K – Constante de Boltzmann (em $m^2 kg s^{-2} K^{-1}$);

- T – Temperatura (em Kelvin)
- q – Carga do elétron (em Coulomb);
- V – Tensão de saída do módulo fotovoltaico (em V);
- I – Corrente de saída do módulo fotovoltaico (em A);
- V_t – Potencial térmico com N_s células conectadas em série.

Devido a questões de adaptabilidade do projeto, optou-se por encontrar a tensão de saída V do painel fotovoltaico. Para encontrar esta tensão, aplicou-se as leis de Kirchhoff das tensões no circuito ilustrado na Figura 5. Assim tem-se:

$$V = V_d - I \cdot R_s \quad (3)$$

Obtém-se a tensão sobre o diodo, V_d , a partir da seguinte equação:

$$V_d = A \cdot \frac{K \cdot T \cdot N_s}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{pv} + I_o - I - I_p}{I_o} \right) \quad (4)$$

As Equações (3) e (4), quando manipuladas, descrevem a tensão de saída do dispositivo fotovoltaico:

$$V = A \cdot \frac{K \cdot T \cdot N_s}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{pv} + I_o - I - I_p}{I_o} \right) - I \cdot R_s \quad (5)$$

Com os dados informados na folha de dados dos painéis fotovoltaicos, a sua corrente fotogerada e corrente de saturação do diodo podem ser determinadas por meio de equações específicas. Frequentemente os dados fornecidos pelas folhas de dados são aqueles em relação às condições padrão de ensaio, aqui denominados com o índice n .

A corrente fotogerada é obtida por meio da Equação (6) (SERA et. al.), (KOU et al.) e (DRIESSE et al.):

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_I \cdot \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (6)$$

Em que, $I_{pv,n}$ é a corrente fotogerada na condição nominal [A] (25°C e 1000 W/m²), $\Delta T = T - T_n$ (considerando T e T_n as temperaturas atual e nominal, respectivamente, em [K]), G é a radiação na superfície do dispositivo e G_n é a

irradiação nominal [W/m^2] e K_I é o coeficiente de corrente/temperatura de curto-circuito.

A equação a seguir é definida como a corrente de saturação do diodo. Ela visa combinar as tensões de circuito aberto do modelo com os dados experimentais para uma ampla gama de temperaturas. Esta equação simplifica o modelo e cancela o seu erro nas vizinhanças das tensões do circuito aberto e conseqüentemente em outras regiões da curva I-V.

$$I_o = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{oc,n} + K_V \Delta T}{A \cdot V_t}\right) - 1} \quad (7)$$

Em que, $I_{sc,n}$ é a corrente de curto-circuito por célula fornecido pelo fabricante, $V_{oc,n}$ é a tensão de circuito aberto também fornecido pelo fabricante e K_V é o coeficiente de tensão/temperatura de circuito aberto.

O modelo do painel a ser utilizado neste trabalho é o *Kyocera KC200GT*. De acordo com VILLALVA et al. (2009), os valores de R_S e R_P foram obtidos de maneira iterativa, quando foram encontrados $0,221 \Omega$ e $415,405 \Omega$ para cada um deles, respectivamente. Tomando vantagem da solução iterativa dos valores de R_S e R_P , o modelo pode ser melhorado mediante a Equação (8).

$$I_{pv,n} = \frac{R_p + R_s}{R_p} \cdot I_{sc,n} \quad (8)$$

A Equação (8) usa as resistências R_S e R_P para determinar $I_{pv} \neq I_{sc}$. Os valores de R_S e R_P são inicialmente desconhecidos, mas como a solução do algoritmo é refinada ao longo de iterações sucessivas, os valores de R_S e R_P tendem para a melhor solução e a Equação (8) torna-se válida e efetivamente determina a corrente fotogerada I_{pv} levando em conta a influência das resistências em série e paralelo do arranjo (VILLALVA et al., 2009).

Na Tabela 1 são apresentados os dados obtidos por intermédio da folha de dados do painel fotovoltaico *Kyocera KC200GT* em condições padrões (25°C e $1000\text{W}/\text{m}^2$).

2.2.6.3 Efeitos da Temperatura e da Irradiância nas Células Fotovoltaicas

Devido às características não lineares entre a tensão e a corrente de um arranjo fotovoltaico (PV), a curva tensão-corrente tem sua forma influenciada pela temperatura do módulo e pela irradiância solar (XIAO e DUNFORD, 2004). Com isso, também é possível concluir que o comportamento tensão-potência possui uma relação não linear. Para circunstâncias em que todos os módulos estão sob uma mesma irradiância solar, ou seja, sob condições padrão, internacionalmente estabelecidas, isto é, 1000 W/m^2 , existem diversos algoritmos já estudados e validados de rastreamento de ponto de máxima potência (MPPT). Os métodos mais difundidos são o Perturba & Observa (P&O) (HUA et al., 1998), Hill Climbing (HC) (KOUTROULIS et al., 2001) e o Condutância Incremental (HUSSEIN et al., 1995). Para o caso de irradiância uniforme, a curva P-V apresenta apenas um único ponto de máxima potência.

Tabela 1. Parâmetros do painel fotovoltaico *Kyocera KC200GT*.

Dados nominais do painel Kyocera KC200GT	
Corrente no ponto de máxima potência (I_{PMP})	7,61 A
Tensão no ponto de máxima potência (V_{PMP})	26,3 V
Potência de máxima potência (P_{PMP})	200,143 W
Tensão de circuito aberto ($V_{oc,n}$)	32,9 V
Corrente de curto circuito ($I_{sc,n}$)	8,21 A
Fator de idealidade (A)	1,3
Temperatura nominal de operação (T_n)	25°C
Irradiância nominal de operação (G_n)	1000 W/m^2
Número de células em série (N_s)	54
Resistência série (R_s)	0,221 Ω
Resistência paralela (R_p)	415,405 Ω

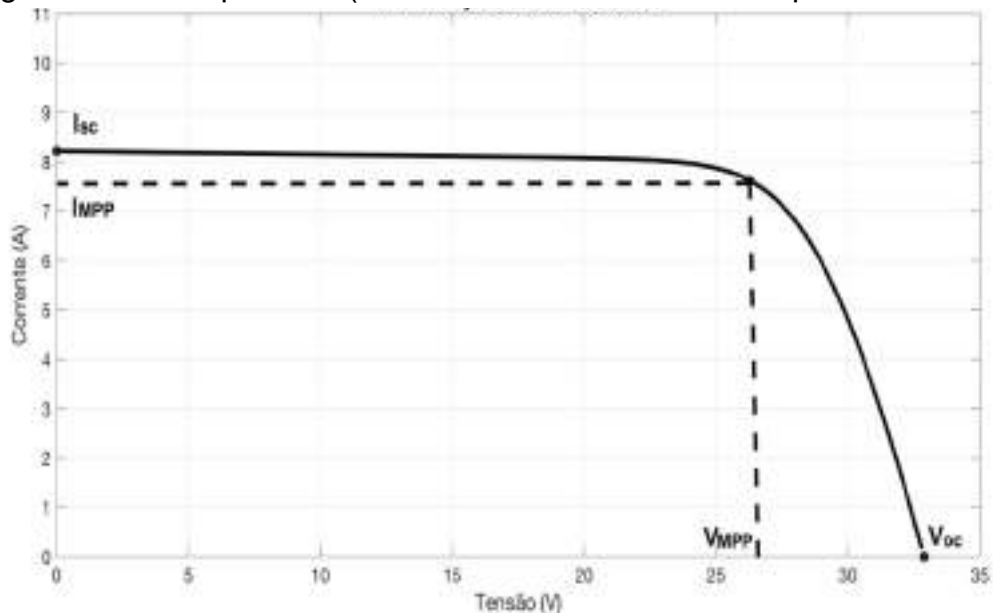
Fonte: Adaptado da folha de dados técnicos *Kyocera KC200GT*.

A tensão e a corrente de máxima potência são representadas, respectivamente, por V_{PMP} e I_{PMP} e a potência máxima por P_{PMP} , conforme ilustrado nas Figuras 6 e 7 para o módulo fotovoltaico *Kyocera KC200GT*. Indica-se também a corrente de curto-circuito (I_{sc}), a tensão de circuito aberto (V_{oc}) e o ponto de máxima potência (PMP). As curvas I-V e P-V das Figuras 6 e 7 foram geradas a partir das

equações do modelo matemático do painel fotovoltaico desenvolvido anteriormente, nas Equações (5-8).

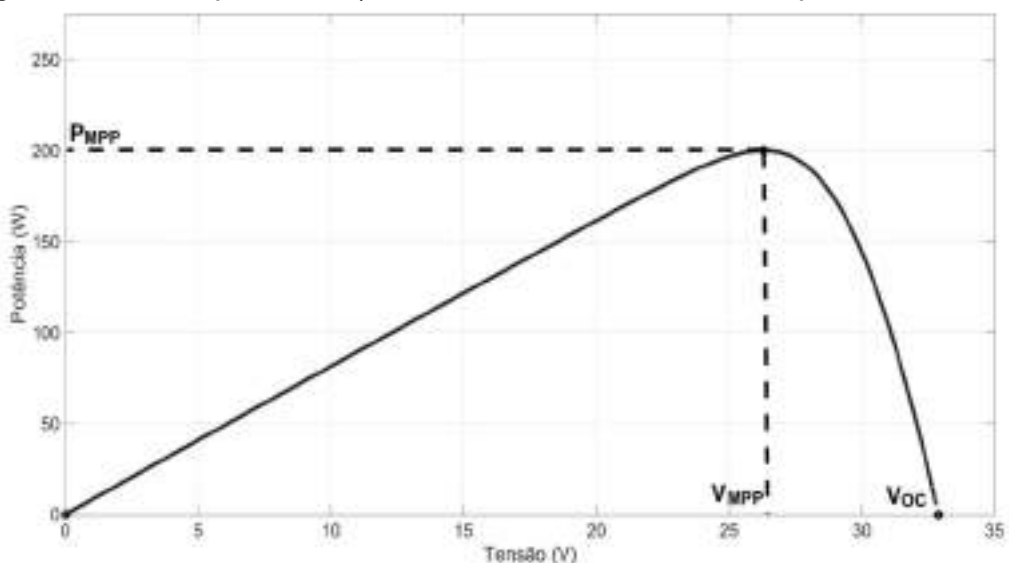
Por sofrerem interferência do nível de irradiação e também da temperatura do módulo, percebe-se nas Figuras 8 e 9 que com o aumento da irradiação incidente no módulo, a tensão de circuito aberto (V_{oc}) varia pouco, a corrente de curto-circuito (I_{sc}) varia linearmente e a potência de saída do módulo aumenta. Por outro lado, com o aumento da temperatura, a tensão de circuito aberto (V_{oc}) diminui, a corrente de curto-circuito (I_{sc}) varia pouco e a potência de saída do módulo diminui, como ilustrado nas Figuras 10 e 11.

Figura 6. Curva típica I-V. (Irradiância = 1000 W/m^2 / Temperatura = 25°C).



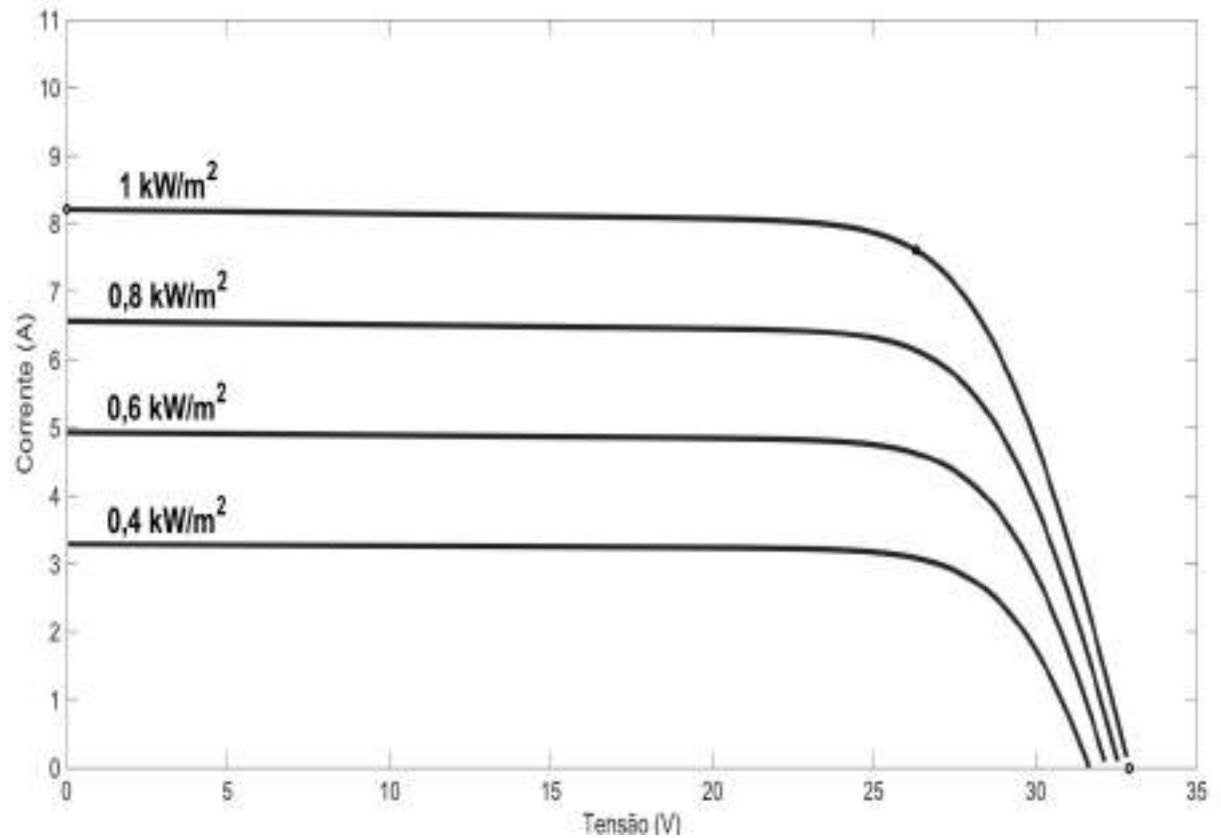
Fonte: Autoria própria.

Figura 7. Curva típica P-V. (Irradiância = 1000 W/m^2 / Temperatura = 25°C).



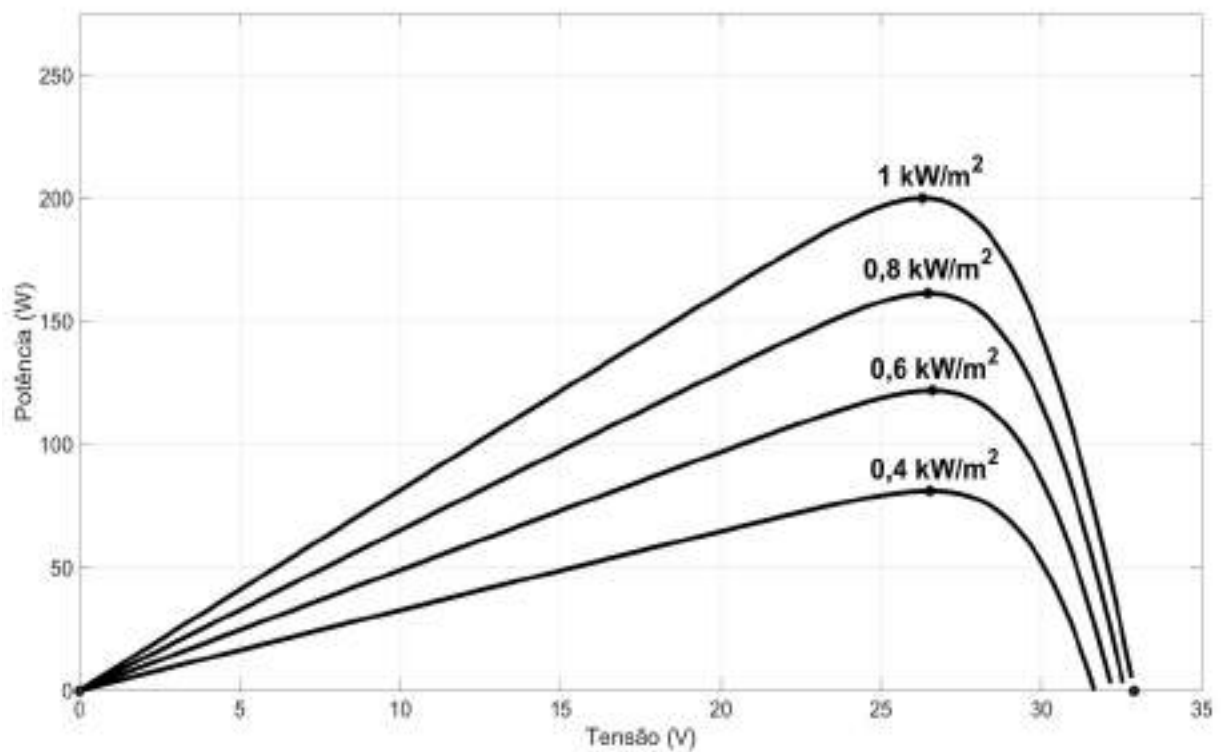
Fonte: Autoria própria.

Figura 8. Curva I-V para diferentes irradiâncias com temperatura de 25°C.



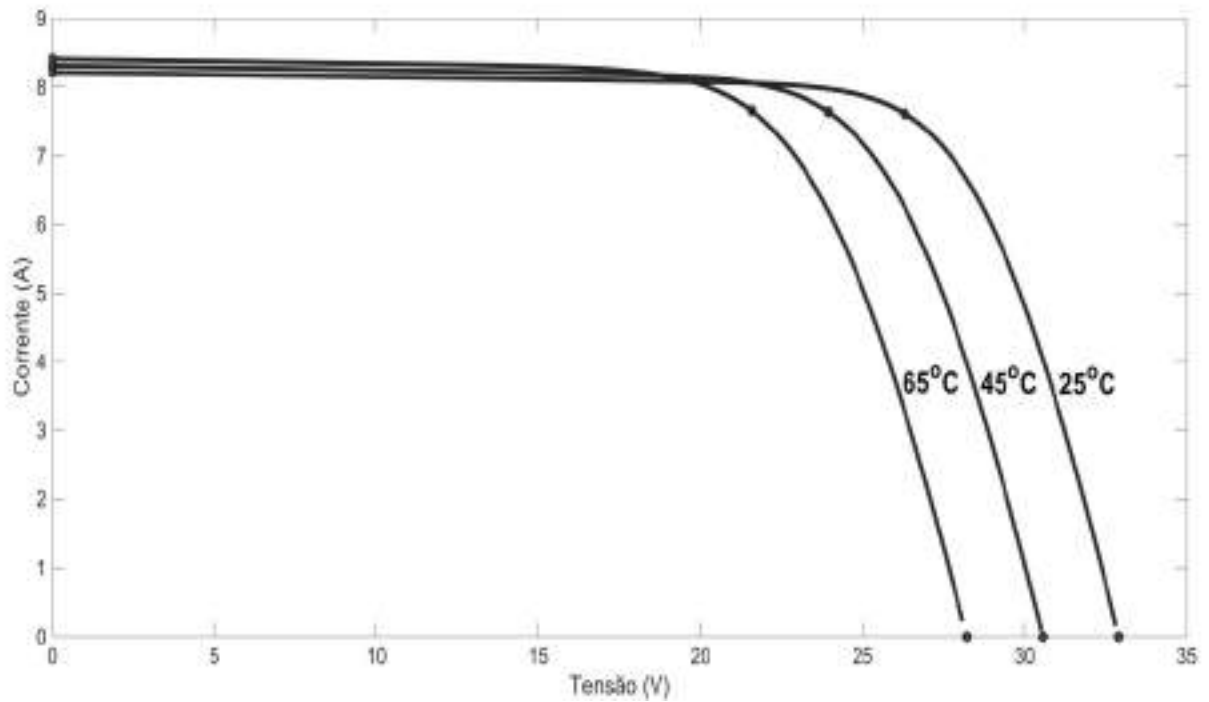
Fonte: Autoria própria.

Figura 9. Curva P-V para diferentes irradiâncias e temperatura de 25°C.



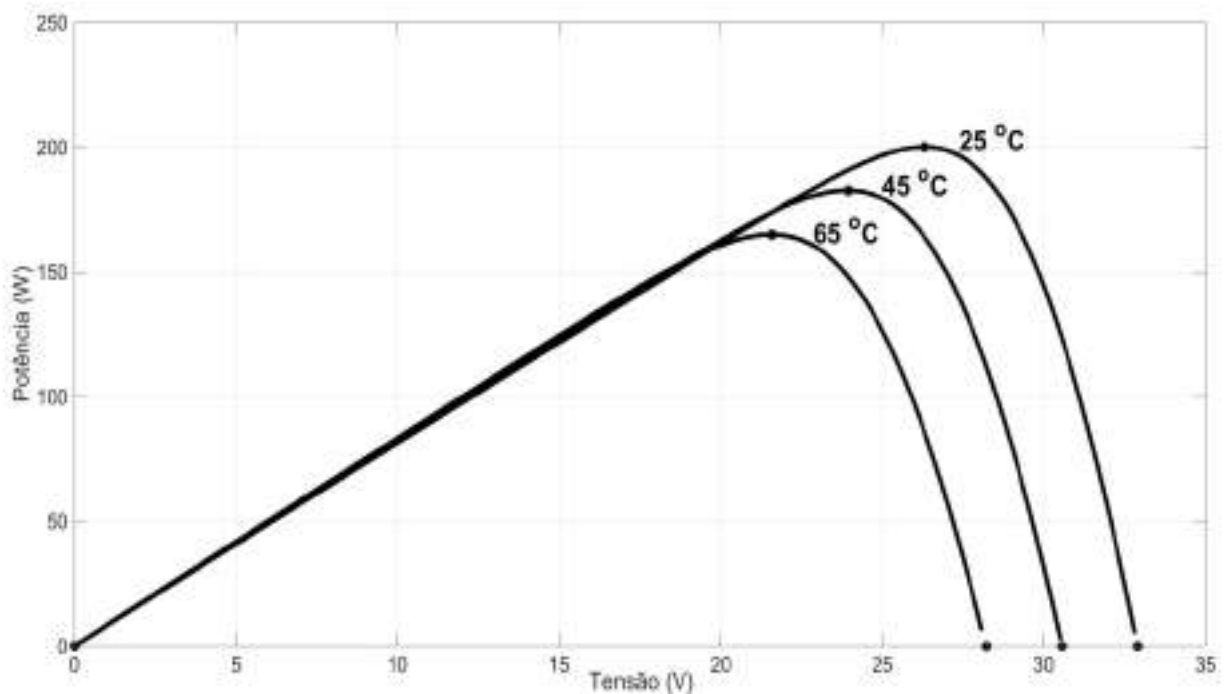
Fonte: Autoria própria.

Figura 10. Curva I-V para diferentes temperaturas com irradiâncias de 1000 W/m^2 .



Fonte: Autoria própria.

Figura 11. Curva P-V para diferentes temperaturas com irradiância de 1000 W/m^2 .



Fonte: Autoria própria.

3 TÉCNICAS DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

3.1 Introdução

Conforme discutido anteriormente, a curva característica I-V de um módulo fotovoltaico varia com a temperatura e irradiância a que ele está submetido. Sob diversas condições de temperatura e de irradiância, é possível fazer o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). Com a forte tendência de uso da tecnologia fotovoltaica, é cada vez mais necessário o aprimoramento das técnicas de busca do ponto de máxima potência para quaisquer tipos de situações. Devido a essa necessidade atual, os estudos sobre esse tema trazem uma compreensão de como os sistemas devem se comportar. Assim, torna-se importante apresentar os principais algoritmos que são capazes de rastrear o ponto de máxima potência. Na literatura eles são classificados em métodos diretos e indiretos, a partir da forma em que o ponto de máxima potência é calculado.

3.2 Métodos Diretos

Nesta seção, os principais métodos diretos serão expostos. Eles são caracterizados pela medição da tensão e/ou da corrente sem a obrigação do conhecimento das características físicas do painel fotovoltaico. Assim, o ponto de máxima potência (PMP) é calculado com base nessas medições em tempo real, fazendo com que esses algoritmos respondam às alterações nas condições de operação do painel fotovoltaico, tornando os métodos mais eficientes. Enquadram-se como métodos diretos: (a) perturba e observa, (b) condutância incremental, (c) realimentação de tensão e (d) realimentação de corrente (KHATIB et al., 2010).

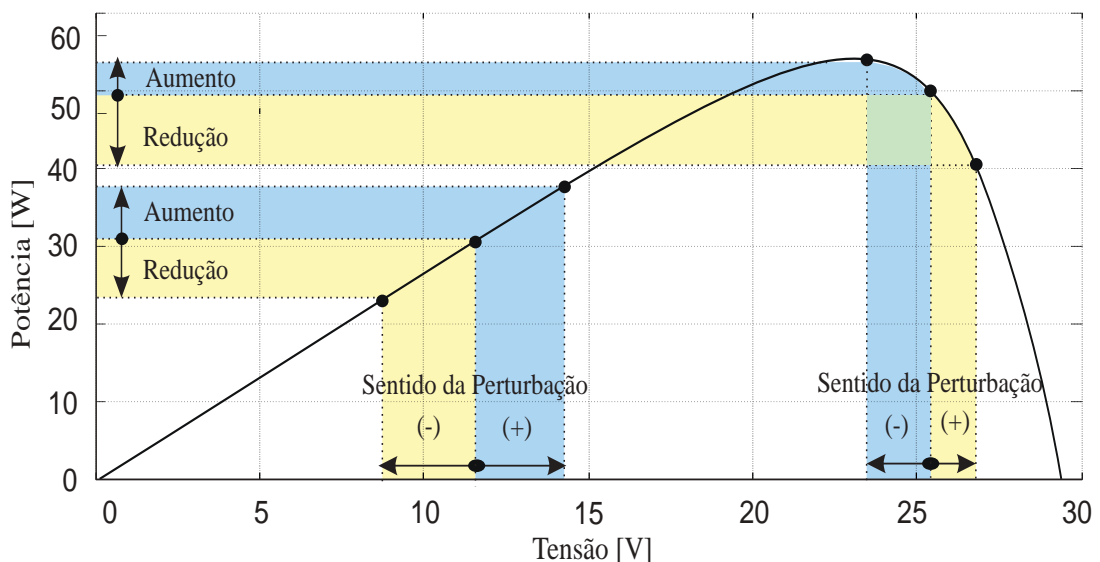
3.2.1 Perturba e Observa

O método Perturba e Observa (P&O) é o mais disseminado devido a sua facilidade de entendimento, implementação e bom desempenho quando aplicado em sistemas fotovoltaicos, contudo, também possui desvantagens. Ele é baseado na aplicação de uma perturbação no sistema e o monitoramento da sua resposta, como por exemplo, a partir de uma pequena perturbação inicial na tensão (ΔV) analisa-se

a potência (FARANDA e LEVA, 2008). Seu funcionamento se dá basicamente pela verificação dos valores de corrente e tensão do painel fotovoltaico e a partir desta informação extraída, calcula-se a variação da potência de saída do painel entre amostras consecutivas. Em harmonia com a variação de potência, a razão cíclica do conversor é ajustada para entregar a máxima potência à carga, e, conseqüentemente, a máxima potência do painel é atingida (ISHAQUE e SALAM, 2013).

Na Figura 12 ilustram-se as situações de quando há perturbações negativa e positiva no sistema. Para o caso de aumento da potência fornecida pelo painel a partir de uma perturbação positiva, o algoritmo seguirá com perturbações no mesmo sentido, que o levará ao ponto de máxima potência. Já para a diminuição de potência a partir de uma perturbação positiva, na iteração seguinte a perturbação irá ocorrer no sentido contrário. O mesmo argumento é válido caso ocorra diminuição da potência fornecida pelo painel. Portanto, o algoritmo P&O permite que a referência trabalhe em valores próximos ao PMP. Para um melhor entendimento, ilustra-se na Tabela 2 um resumo do funcionamento do método P&O (BARRETO, 2014).

Figura 12. Exemplo do funcionamento do método P&O.



Fonte: BARRETO (2014).

Tabela 2. Resumo do método P&O.

Sentido da Perturbação Atual	Varição da Potência	Sentido da Próxima Perturbação
Positiva	Positiva	Positiva
Positiva	Negativa	Negativa
Negativa	Positiva	Negativa
Negativa	Negativa	Positiva

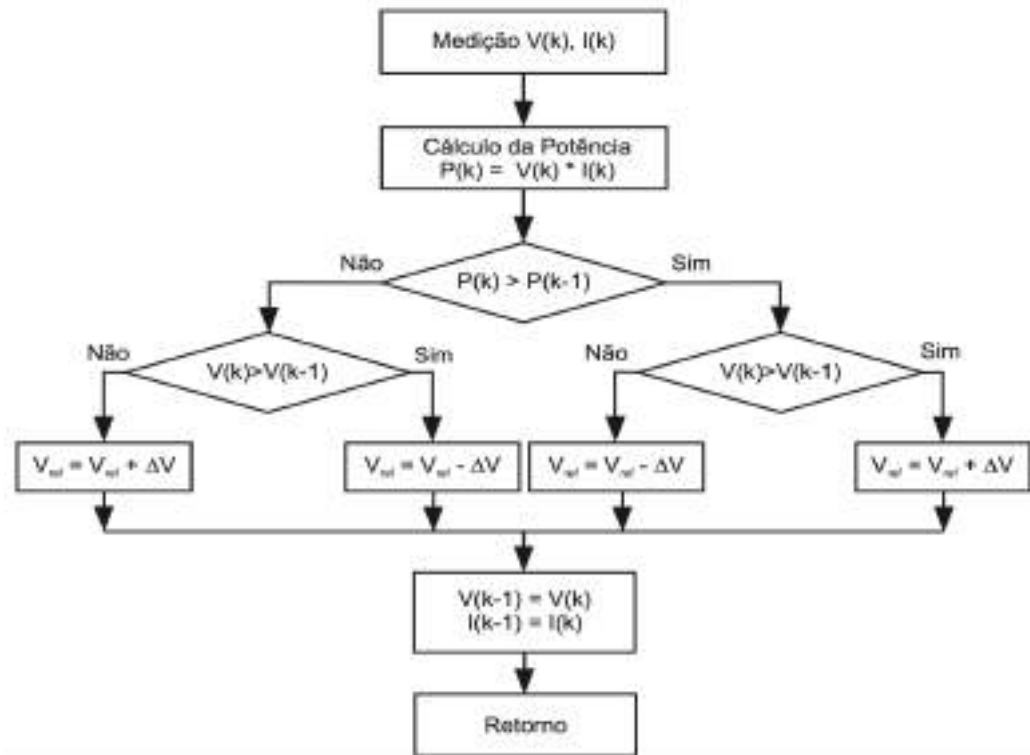
Fonte: Adaptado de BARRETO (2014).

Existem maneiras diferentes de se implementar o Perturba & Observa. Uma delas é por meio da variação da tensão de referência, que será regulada por uma malha de controle através de um controlador proporcional-integral (PI), que tem como função o controle da razão cíclica. Essa variação receberá um incremento ou decremento fixo, chamado de perturbação, com base no comportamento da potência fornecida pelo módulo. O controle da razão cíclica pode ser feito também diretamente pelo algoritmo MPPT. É importante mencionar que esse último caso simplifica a estrutura de busca do ponto de máxima potência, o tempo computacional é reduzido, assim como não existe a dificuldade de encontrar os ganhos do controlador, mas existe a desvantagem de uma menor eficiência do sistema.

Devido a perturbação fixa seja de tensão (ΔV) ou da razão cíclica (ΔD) a cada iteração, o PMP não é encontrado com exatidão. Por isso, em regime permanente, o sistema oscilará em torno do PMP, provocando um certo desperdício da energia disponível no sistema fotovoltaico (AZEVEDO, 2007). Uma solução para que a oscilação seja minimizada é a redução do intervalo de perturbação, que, por consequência, tornará o rastreamento do PMP lento. O método P&O opera bem quando não há uma variação brusca da irradiância e da temperatura, o que aumenta sua eficiência (OLIVEIRA, 2007).

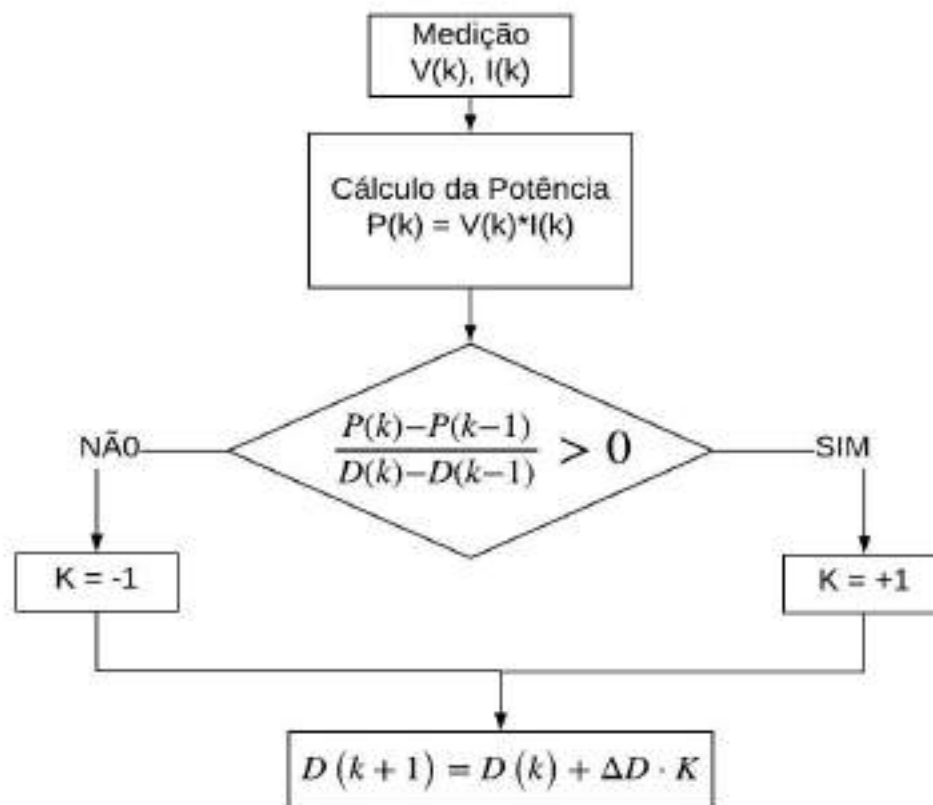
As Figura 13 e Figura 14 ilustram os fluxogramas dessas duas maneiras de implementação do método Perturba e Observa. Eles são chamados de Perturba e Observa convencional com perturbação fixa (BARRETO, 2014).

Figura 13. Fluxograma do método P&O (tensão de referência como saída).



Fonte: OLIVEIRA (2007).

Figura 14. Fluxograma do método P&O (razão cíclica como saída).

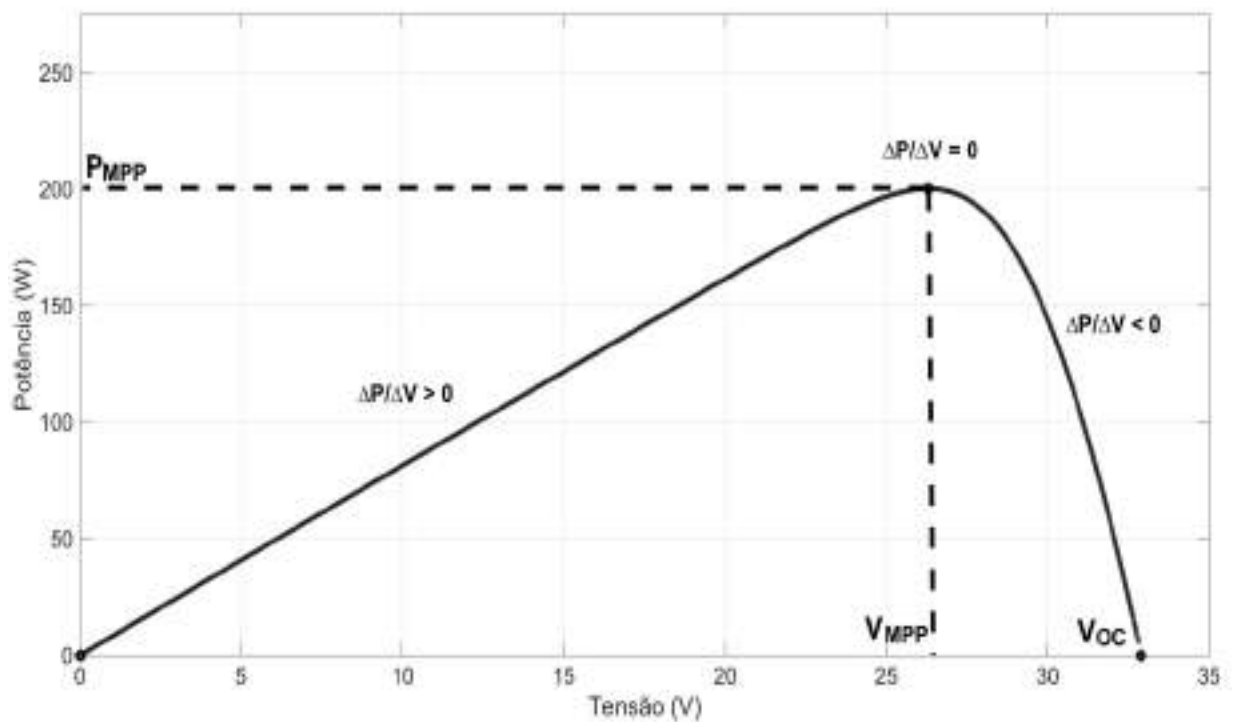


Fonte: Adaptado de DOLARA et. al (2009).

3.2.2 Condutância Incremental

Para obter melhores resultados, quando comparado ao método P&O, como taxa de convergência mais rápida e variações menores em torno do PMP, o método da Condutância Incremental (IC, do inglês *Incremental Conductance*) foi proposto por HUSSEIN et al. (1995). Ele possui uma boa eficiência e fácil implementação, tal como o método Perturba e Observa. Esse método é baseado nas derivadas da curva característica P×V dos painéis fotovoltaicos, como demonstrado na Figura 15. Pela curva, observa-se que quando o ponto de operação se encontra à esquerda do PMP, o valor da derivada da curva em relação a tensão ou corrente assume valor positivo. Já se o ponto estiver à direita do PMP, a derivada assume valor negativo. Finalmente, se o ponto estiver operando no PMP, assume valor zero.

Figura 15. Ilustração da Curva P-V para Condutância Incremental.



Fonte: Autoria própria.

Como o algoritmo MPPT trabalha baseado na mudança da potência (ΔP_{pv}) e da tensão (ΔV_{pv}) do painel fotovoltaico para calcular o PMP, as seguintes equações são as que regem o método IC (HAMZESCU e OPREA, 2013).

$$\frac{\Delta P_{pv}}{\Delta V_{pv}} = \frac{\Delta(V_{pv}I_{pv})}{\Delta V_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \rightarrow \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (9)$$

Em que, ΔI_{pv} é a mudança na corrente do PV, $-\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ é a condutância instantânea e $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}}$ é a condutância incremental. O ponto de máxima potência do arranjo fotovoltaico (PMP) é quando se tem $I_{pv} + V_{pv} \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} = 0$.

A partir dos detalhes da curva da Figura 15, apresenta-se na Tabela 3 o resumo da ideia geral do método. Na Figura 16 é ilustrado o fluxograma do método MPPT IC.

Tabela 3. Resumo da ideia geral do método IC.

Análise	Localização
$I_{pv} + V_{pv} \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} = 0$ ou $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$	No PMP
$I_{pv} + V_{pv} \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} > 0$ ou $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$	Lado esquerdo do PMP
$I_{pv} + V_{pv} \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} < 0$ ou $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$	Lado direito do PMP

Fonte: Adaptado de BARRETO (2014).

O algoritmo rastreia continuamente as saídas do painel fotovoltaico, ajustando assim a razão cíclica (D) do conversor a partir do aumento ou da diminuição da perturbação (ΔD) com base nas Equações da Tabela 3, para que assim o PMP seja atingido de forma rápida.

3.2.3 Perturba & Observa com Perturbação do Passo Variável

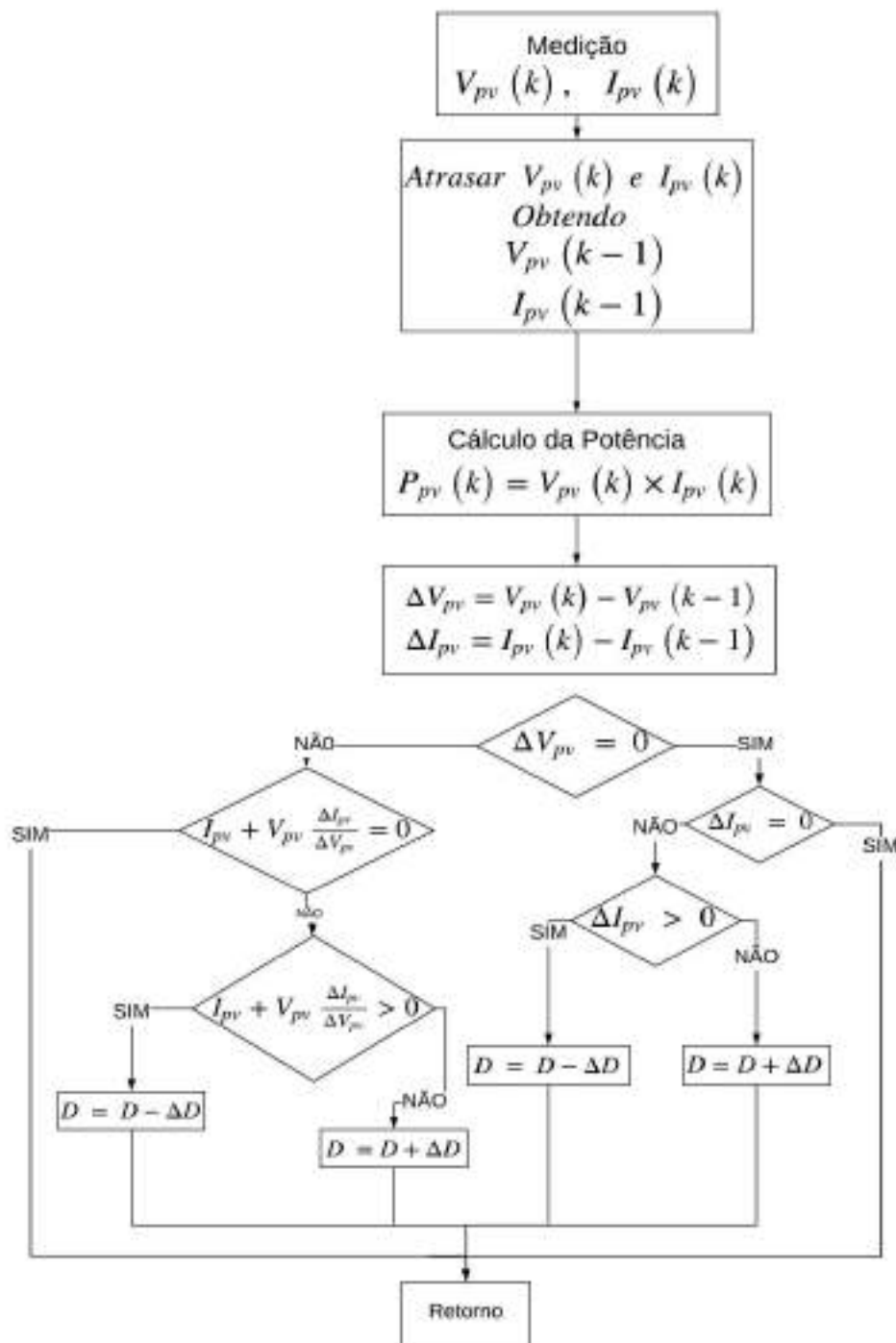
Para superar algumas desvantagens do método P&O convencional, como por exemplo, a oscilação que ocorre em torno do PMP, YÜKSEK e METE (2017) propuseram um algoritmo baseado no método P&O que tem como característica a atualização automática do tamanho da perturbação do passo da razão cíclica (ΔD), neste trabalho ele terá a seguinte nomenclatura: P&O_VS.

Este método funciona basicamente na alteração do tamanho da perturbação do passo a cada vez que ocorre uma mudança na irradiância ou temperatura, ajustando o sistema rapidamente para um novo PMP. YÜKSEK e METE (2017) relacionam a condutância incremental e a condutância instantânea definidas no método IC e a utilizam como uma variável de controle responsável pelo

dimensionamento do tamanho da perturbação do passo, chamada de CV e ilustrada na Equação 10.

$$CV = \frac{V_{pv} \Delta I_{pv}}{I_{pv} \Delta V_{pv}} \quad (10)$$

Figura 16. Fluxograma do algoritmo MPPT Condutância Incremental.



Fonte: Adaptado de MOHAMMED e DEVARAJ (2015).

O funcionamento desse algoritmo se dá a partir das posições de subida, descida e estado estacionário na curva P-V. Para uma posição de subida, o valor de tensão cai e de corrente aumenta, implicando em um valor de CV maior que 1 e, conseqüentemente, aumentando o tamanho da perturbação do passo da razão cíclica (ΔD), determinando assim um rastreamento mais rápido do PMP. Para o caso do valor de CV tornar-se negativo ou indefinido, o sistema passa a funcionar utilizando um tamanho de perturbação fixo da razão cíclica, que para este algoritmo foi definido como 0.05 ou -0.05. Quando o sistema está no estado estacionário, ou seja, os valores de tensão e corrente apresentam pequenas alterações, o valor de CV é 1, sendo necessário tamanhos menores de perturbações da razão cíclica para se ter menos oscilações em torno do PMP.

O valor de N (fator de escala) é determinado como sendo 0,001, como proposto por YÜKSEK e METE (2017). Ele pode ser ajustado manualmente e é uma parte essencial do algoritmo para aumentar o desempenho do MPPT. A Figura 17 traz o fluxograma que descreve o algoritmo.

3.2.4 Condutância Incremental com Perturbação do Passo Variável

ISALOO e AMIRI (2016) propuseram um novo método MPPT derivado do IC. Ele tem como principais vantagens a não utilização de métodos de medição, como por exemplo, sensores climáticos, aumento da velocidade de rastreamento do PMP e uma excelente precisão.

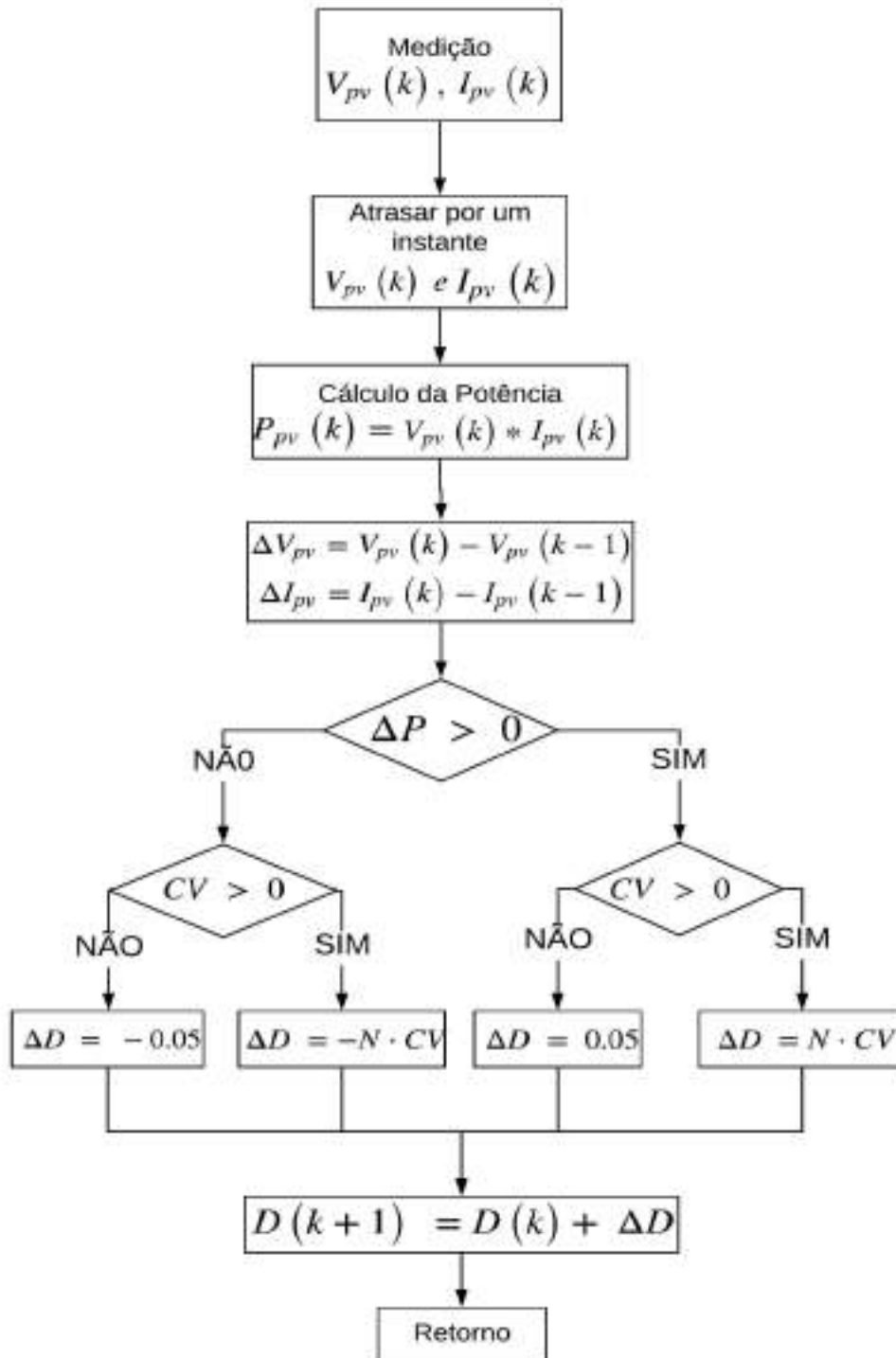
Este algoritmo usa a corrente de saída do painel fotovoltaico para estimar o nível de irradiância do sol, isso se deve ao fato da relação direta que existe entre essas duas grandezas. Esta corrente também é usada para ajustar o tamanho da perturbação do passo da razão cíclica (ΔD), como será mostrado adiante. Devido a essas características, esse algoritmo se tornou adequado para condições práticas de operação.

A equação utilizada para relacionar a corrente de saída do painel fotovoltaico com a razão cíclica é mostrada na Equação 11.

$$D(k) = D(k - 1) \pm \frac{N}{I} \times \left| \frac{\Delta P}{\Delta V} \right| = D(k - 1) \pm \frac{N}{I} \times \left| \frac{P(k) - P(k - 1)}{V(k) - V(k - 1)} \right| \quad (11)$$

Em que P , V e D representam a potência, a tensão de saída do arranjo fotovoltaico e a razão cíclica, respectivamente. N é um fator de escala que é regulado no estágio de projeto para ajustar o tamanho da perturbação do passo e I é a corrente de saída do arranjo.

Figura 17. Fluxograma do método Perturba & Observa com tamanho da perturbação do passo variável (P&O_VS).



Fonte: Adaptado de YÜKSEK e METE (2017).

O valor de N tem grande responsabilidade na determinação da performance do sistema MPPT. Devido a isso, um método simples para determinar o fator de escala foi proposto por ISALOO e AMIRI (2016), em que é escolhido inicialmente um grande passo de perturbação fixo ($\Delta D_{m\acute{a}x}$), que será o limitador do tamanho do passo variável do método condutância incremental. Para garantir a convergência do MPPT, a seguinte condição deve ser satisfeita:

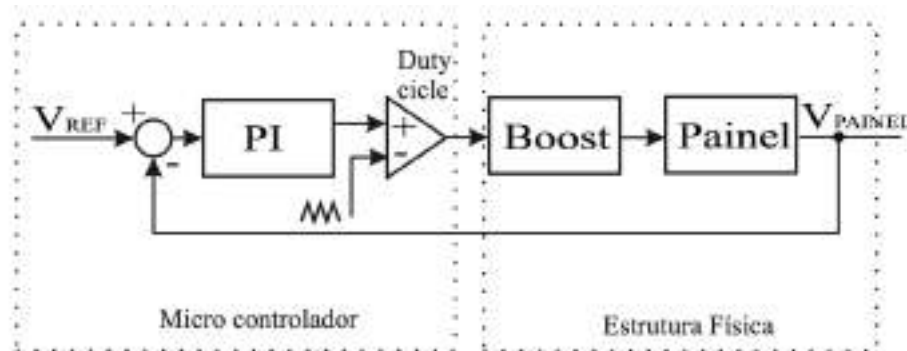
$$\frac{N}{I} \times \left| \frac{\Delta P}{\Delta V} \right| < \Delta D_{m\acute{a}x} \rightarrow N < \frac{\Delta D_{m\acute{a}x} \times I}{\left| \frac{\Delta P}{\Delta V} \right|} \quad (12)$$

Na Figura 19 o fluxograma do método proposto para obter o novo tamanho do passo a cada iteração é apresentado. Dessa maneira, o método cumpre sua função de comparar a inclinação das curvas P-V com um coeficiente variável que é alterado pela corrente de saída do módulo fotovoltaico (ISALOO e AMIRI, 2016).

3.2.5 Realimentação por Tensão ou Corrente

No método da realimentação por tensão ou corrente é aplicado um sistema de controle que vai adequando o ponto de operação para o ponto de máxima potência. Comumente, a realimentação passa por um controlador do tipo PI. O método funciona basicamente por meio de mudanças contínuas na tensão e na corrente que interferem na razão cíclica do conversor c.c.-c.c. e mantém a saída do painel fotovoltaico (tensão ou corrente) próximo da tensão de referência (BARRETO, 2014). A Figura 18 ilustra os detalhes desta técnica.

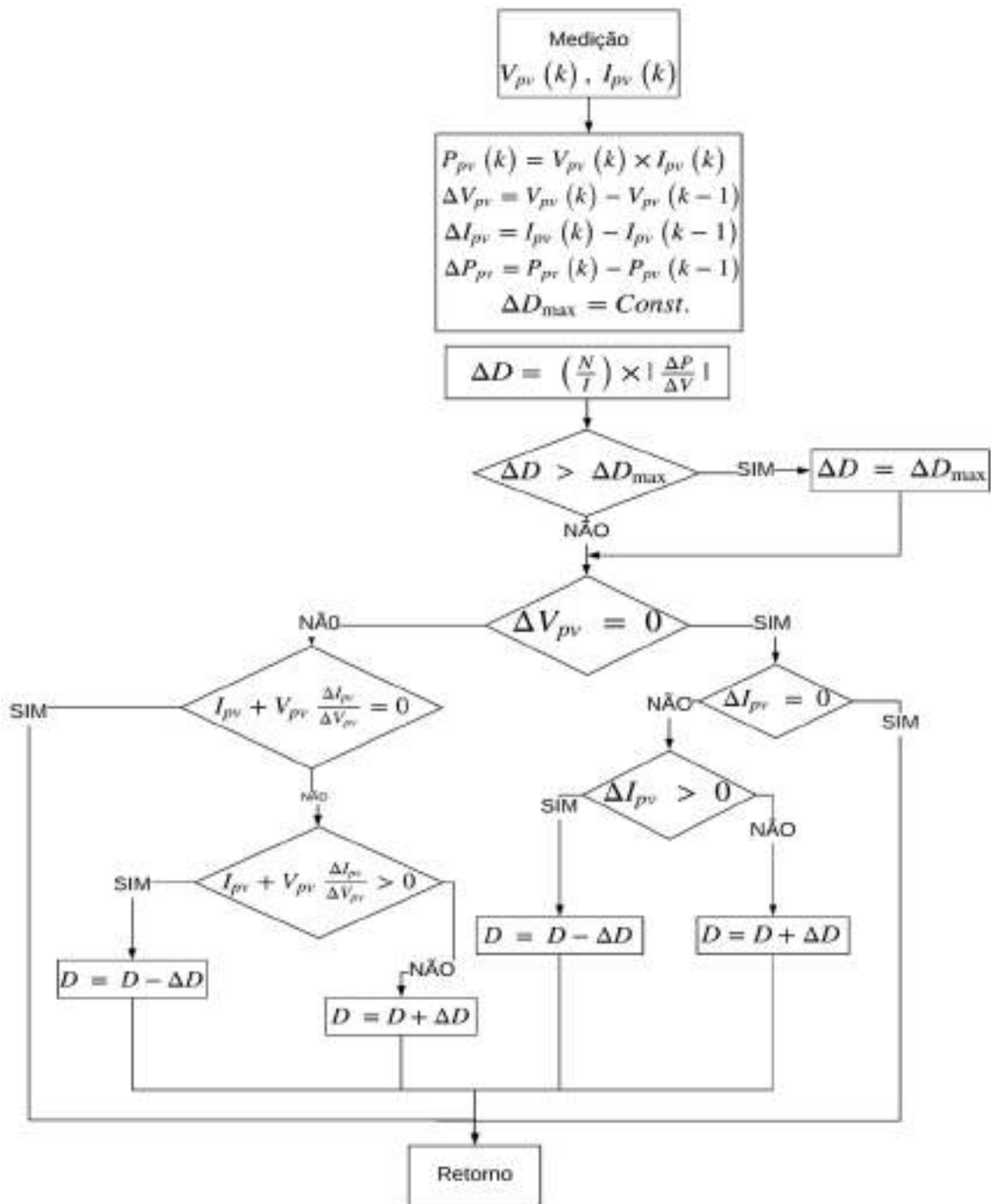
Figura 18. Método da realimentação por tensão ou corrente com tensão de referência.



Fonte: BARRETO (2014).

Esse sistema MPPT é utilizado em sistemas de baixo custo que precisam de maior simplicidade. Os problemas recorrentes desse método são as limitações quando há mudanças bruscas nas condições ambientais como irradiância e temperatura, além de não poderem ser auxiliados por baterias para armazenamento de energia, visto que estas possuem uma tensão fixa (SALAS et al., 2006).

Figura 19. Fluxograma do método condutância incremental com tamanho da perturbação do passo variável (IC_VS).



3.3 Métodos Indiretos

Nos métodos indiretos, o algoritmo é iniciado com as informações técnicas do painel, como a tensão em circuito aberto (V_{OC}) e a corrente de curto-circuito (I_{SC}). O PMP é estimado a partir de um conhecimento anterior das características físicas do módulo fotovoltaico para um projeto específico. Em certos casos, essas informações não são informadas pelos fabricantes, assim, torna-se necessário a realização de ensaios para a descoberta das constantes e das características das curvas do painel fotovoltaico (HOHM e ROPP, 2003). Os métodos indiretos não determinam com precisão o PMP do sistema em uma condição distinta pois eles apontam para uma aproximação do PMP em uma certa temperatura e irradiância. Entre os métodos pertencentes a esta categoria estão: (a) método da tensão de circuito aberto e (b) método da corrente de curto circuito (KHATIB et al., 2010).

3.3.1 Método da Tensão de Circuito Aberto

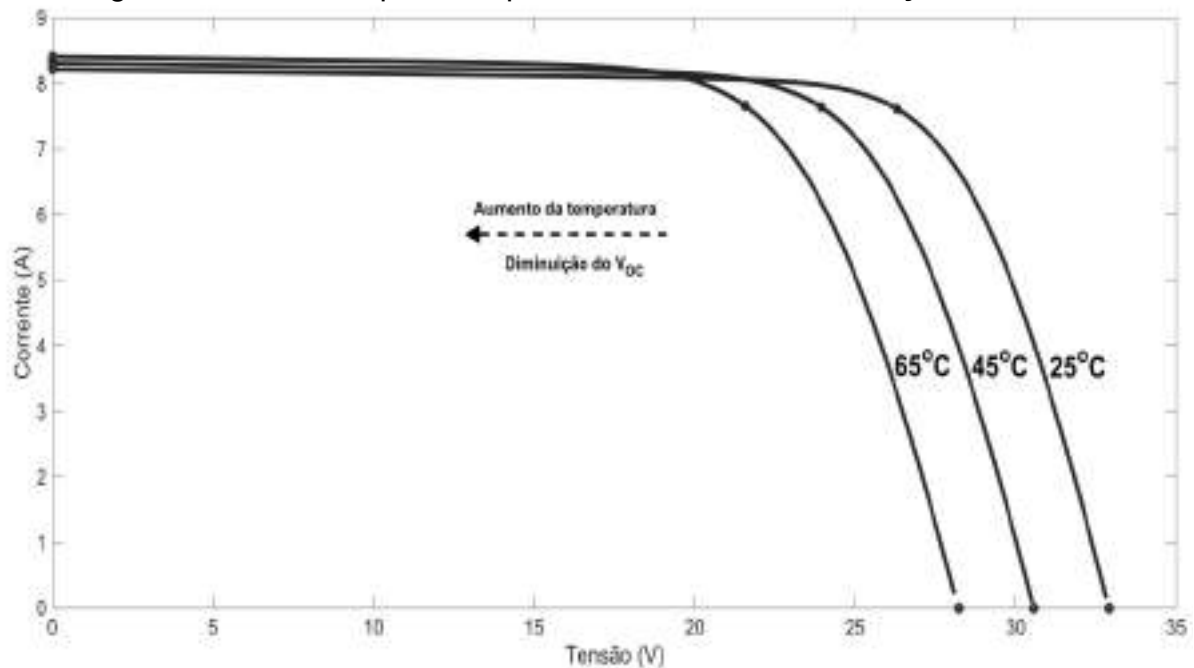
Este método tem como base a razão entre a tensão de máxima potência (V_{PMP}) e a tensão de circuito aberto (V_{OC}). Na Figura 20, percebe-se que a tensão de circuito aberto varia a partir de uma variação de temperatura, tendo em conta uma irradiância fixa. Assim, realizando uma aproximação linear entre a tensão de saída do arranjo fotovoltaico no PMP, V_{PMP} , e a tensão de circuito aberto, V_{OC} , o Método da Tensão de Circuito Aberto segue a seguinte equação:

$$V_{PMP} \approx k_1 * V_{OC} \quad (13)$$

Em que k_1 é um valor constante que depende das características do arranjo fotovoltaico. A literatura reporta que a margem de valores para k_1 está entre 0,73 e 0,80 para um módulo fotovoltaico de silício policristalino sob temperaturas entre 0°C e 60°C e irradiâncias de 200 a 1000 W/m².

O MPPT calcula o V_{PMP} a partir de um valor pré-ajustado de k_1 e do valor medido de V_{OC} . Em seguida, a constante k_1 , dada pela razão entre a tensão de máxima potência, V_{PMP} , e a tensão de circuito aberto, V_{OC} , é aplicada até que se encontre o PMP (HOHM e ROPP, 2003).

Figura 20. Curva I-V para temperaturas variáveis e irradiação constante.



3.3.2 Método da Corrente de Curto-Circuito

O método da corrente de curto circuito é semelhante ao método da tensão de circuito aberto, modificando, claro, as grandezas elétricas utilizadas. Ele é considerado o mais simples método de controle. Neste método, uma relação aproximadamente linear entre a corrente no ponto de potência máxima (I_{PMP}) e a corrente de curto circuito (I_{SC}) é considerada devido a característica física do módulo. Essa relação é expressada por:

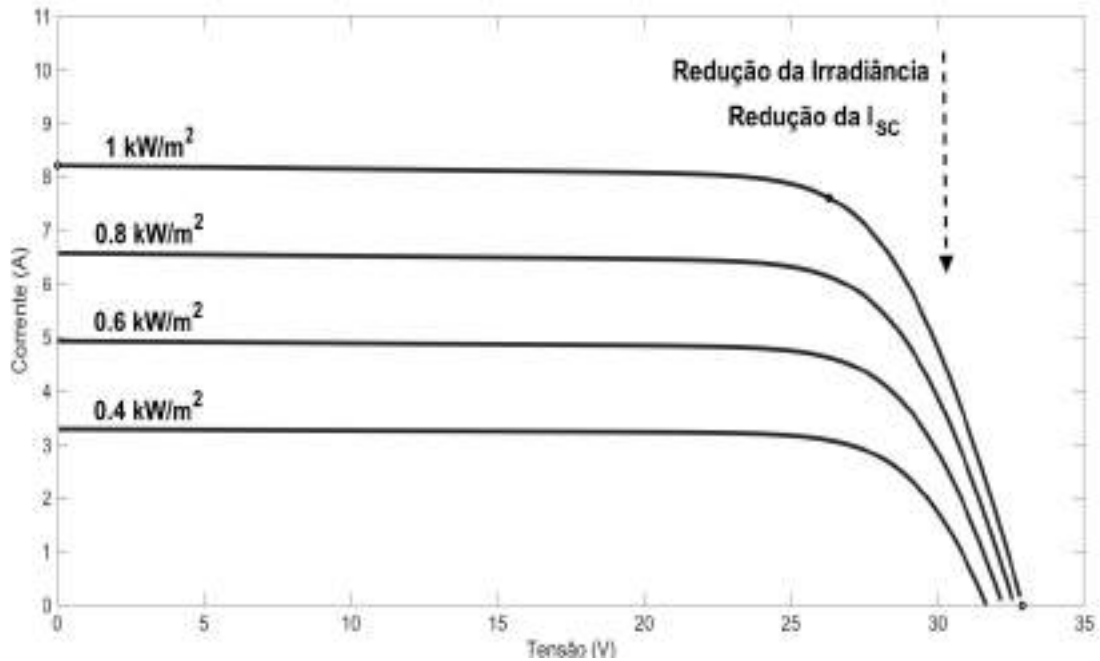
$$I_{PMP} \approx k_2 * I_{SC} \quad (14)$$

Em que k_2 é um valor constante que depende das características do arranjo fotovoltaico e sempre menor que 1. Geralmente, o valor dessa constante varia entre 0,72 e 0,92. (SHER et al., 2015).

A Equação 14 ilustra que o I_{PMP} pode ser determinado instantaneamente medindo o I_{SC} . Consequentemente, torna-se necessário para esse método um sensor para medir a corrente I_{SC} , sendo essa a maior dificuldade para a utilização desse método, já que para obter essa medição, é necessário criar uma condição de curto-circuito para o painel fotovoltaico. Como nenhuma energia é fornecida à carga pelo painel fotovoltaico durante a condição de curto-circuito ($V_{PV} = 0$) é notável a

perda de potência, tornando o método pouco eficiente (FARANDA e LEVA, 2008). Na Figura 21 ilustra-se a I_{SC} sendo modificada a partir da variação da irradiância e a manutenção da tensão constante.

Figura 21. Curva I-V para irradiação variável e temperatura constante.



Fonte: Autoria própria.

Os métodos citados nesta subseção são bem difundidos no meio acadêmico, mas eles não serão estudados neste trabalho de conclusão de curso. Serão analisados e comparados os métodos P&O, IC, P&O com tamanho da perturbação do passo variável (P&O_VS) e IC com tamanho da perturbação do passo variável (IC_VS).

4 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DOS MÉTODOS MPPT

4.1 Introdução

Neste capítulo será realizado um estudo de simulação para análise do comportamento do sistema fotovoltaico em variadas condições de operação. O *software* utilizado para a reprodução do sistema real em ambiente virtual foi o MATLAB®/Simulink®, o qual possui ferramentas matemáticas capazes de modelar todo o sistema a ser implementado.

4.2 Sistema Simulado

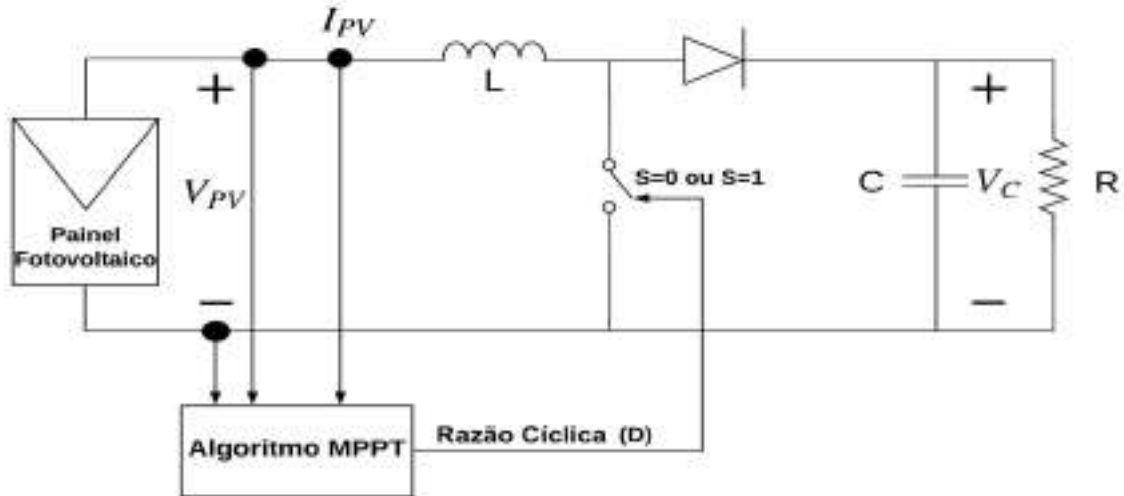
Compõem o sistema simulado neste trabalho de conclusão de curso um painel fotovoltaico modelo *Kyocera 200GT*, o qual se encontra modelado no Capítulo 2, os métodos MPPT (P&O, IC, P&O com tamanho da perturbação do passo variável e IC com tamanho da perturbação do passo variável) e um conversor c.c.-c.c. *Boost* (elevador de tensão), o qual será apresentado na subseção seguinte e que alimenta uma carga composta por um resistor $R = 5 \Omega$.

4.2.1 Conversor c.c.-c.c. *Boost*

Existem diversos tipos de conversores que podem ser utilizados em sistemas fotovoltaicos, como por exemplo, o *Boost*, *Buck*, *Buck-Boost* e o *Push-Pull*. Para este trabalho, a topologia escolhida foi a do conversor *Boost*. Essa escolha teve como base a sua característica de boa adaptabilidade aos sistemas fotovoltaicos devido ao número reduzido de componentes, tornando-o simples, e a sua característica de ser um conversor elevador de tensão, isto é, sua tensão de saída será sempre maior do que a tensão de entrada (OLIVEIRA, 2007).

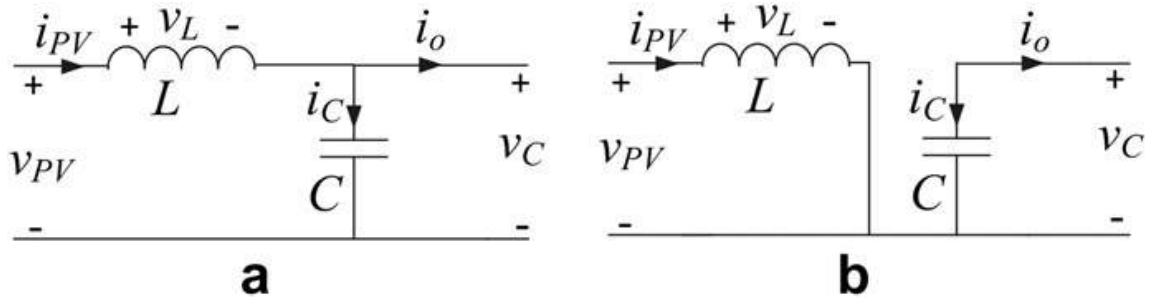
A Figura 22 ilustra o esquemático completo do sistema implementado e a Figura 23 ilustra o circuito equivalente do conversor c.c.-c.c. *Boost* para as duas condições de funcionamento. Logo em seguida as equações do conversor *Boost* são demonstradas.

Figura 22. Conversor *Boost* suprido por um arranjo fotovoltaico.



Fonte: Autoria própria.

Figura 23. Conversor c.c.-c.c. *Boost*. (a) Chave aberta, $S=0$. (b) Chave fechada, $S=1$.



Fonte: KAKOSIMOS e KLADAS (2011).

Quando a chave é considerada aberta, ou seja, $S=0$, o conversor boost pode ser descrito pelas seguintes equações (seguindo as Leis de *Kirchhoff*):

$$\frac{dI_{PV}}{dt} = \frac{V_{PV}}{L} - \frac{V_C}{L} \quad (15)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{I_{PV}}{C} - \frac{V_C}{RC} \quad (16)$$

Para o caso de a chave estar fechada, ou seja, $S=1$, tem-se:

$$\frac{dI_{PV}}{dt} = \frac{V_{PV}}{L} \quad (17)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = -\frac{V_C}{RC} \quad (18)$$

A partir das Equações (15-18) obtidas por meio do circuito do conversor Boost, pode derivar-se o sistema de equações de tempo discreto considerando uma frequência de amostragem T_S . Nesse caso, quando a chave estiver aberta obtêm-se as Equações 19 e 20 e para o caso de a chave estar fechada as Equações 21 e 22.

$$V_{c(k+1)} = V_{c(k)} + (1 - s) \frac{T_S}{C} I_{PV(k)} - (1 - s) \frac{T_S}{RC} V_{c(k)} \quad (19)$$

$$I_{PV(k+1)} = I_{PV(k)} - (1 - s) \frac{T_S}{L} V_{c(k)} + (1 - s) \frac{T_S}{L} V_{PV(k)} \quad (20)$$

$$V_{c(k+1)} = V_{c(k)} - (1 - s) \frac{T_S}{C} I_{PV(k)} - s \frac{T_S}{RC} V_{c(k)} \quad (21)$$

$$I_{PV(k+1)} = I_{PV(k)} - (1 - s) \frac{T_S}{L} V_{c(k)} + s \frac{T_S}{L} V_{PV(k)} \quad (22)$$

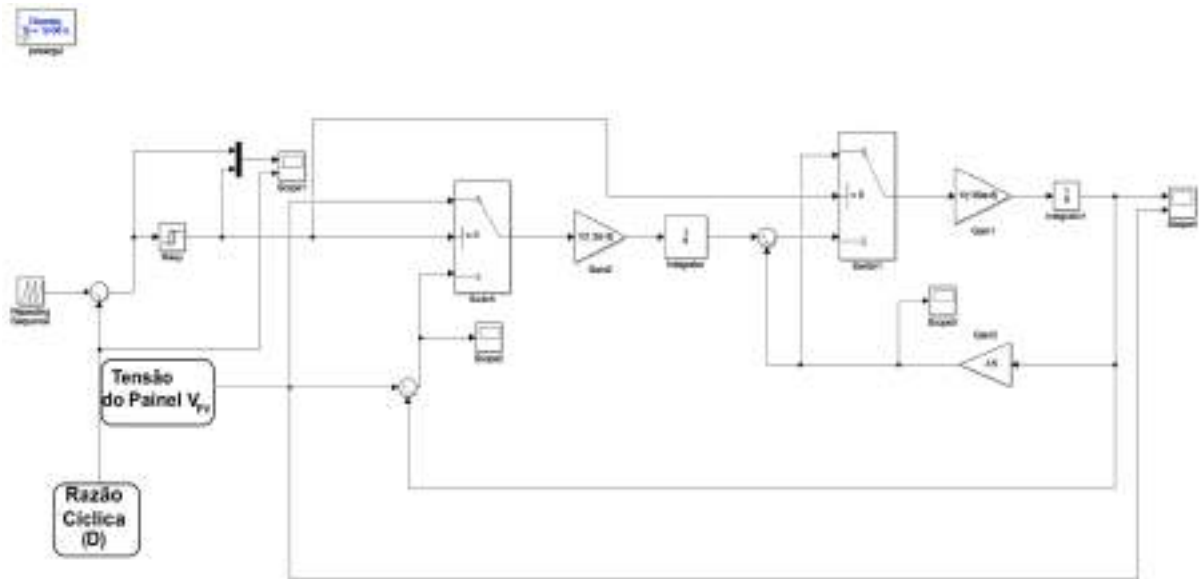
Na Figura 24 é ilustrado o conversor desenvolvido e na Tabela 4 são apresentados os parâmetros do conversor empregado, de acordo com (BOUILOUTA et al., 2013). Nessa estrutura, a tensão de entrada fornecida pelo painel fotovoltaico é regulada por meio da variação da razão cíclica (D) fornecido pelo algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). Dessa maneira, o sistema é capaz de operar em sua tensão e corrente de máxima potência (V_{PMP} e I_{PMP}). Na Figura 25 encontra-se o sistema completo desenvolvido e simulado em MATLAB®/Simulink®. Nele estão contidos o painel fotovoltaico, os quatro métodos MPPT, o conversor c.c.-c.c. Boost e a carga de 5 Ω .

Tabela 4. Especificações do Conversor c.c.-c.c. Boost.

Denominação	Valores
Frequência de chaveamento (f_s)	20 kHz
Tensão de entrada	Próprio V_{PMP}
Indutância (L)	1,2 mH
Capacitância (C)	100 μ F
Resistência (R)	5 Ω

Fonte: Adaptado de BOUILOUTA et al. (2013).

Figura 24. Esquema de um Conversor c.c.-c.c. *Boost* elaborado no Simulink®.



Fonte: Autoria própria.

4.3 Resultados da Implementação Computacional

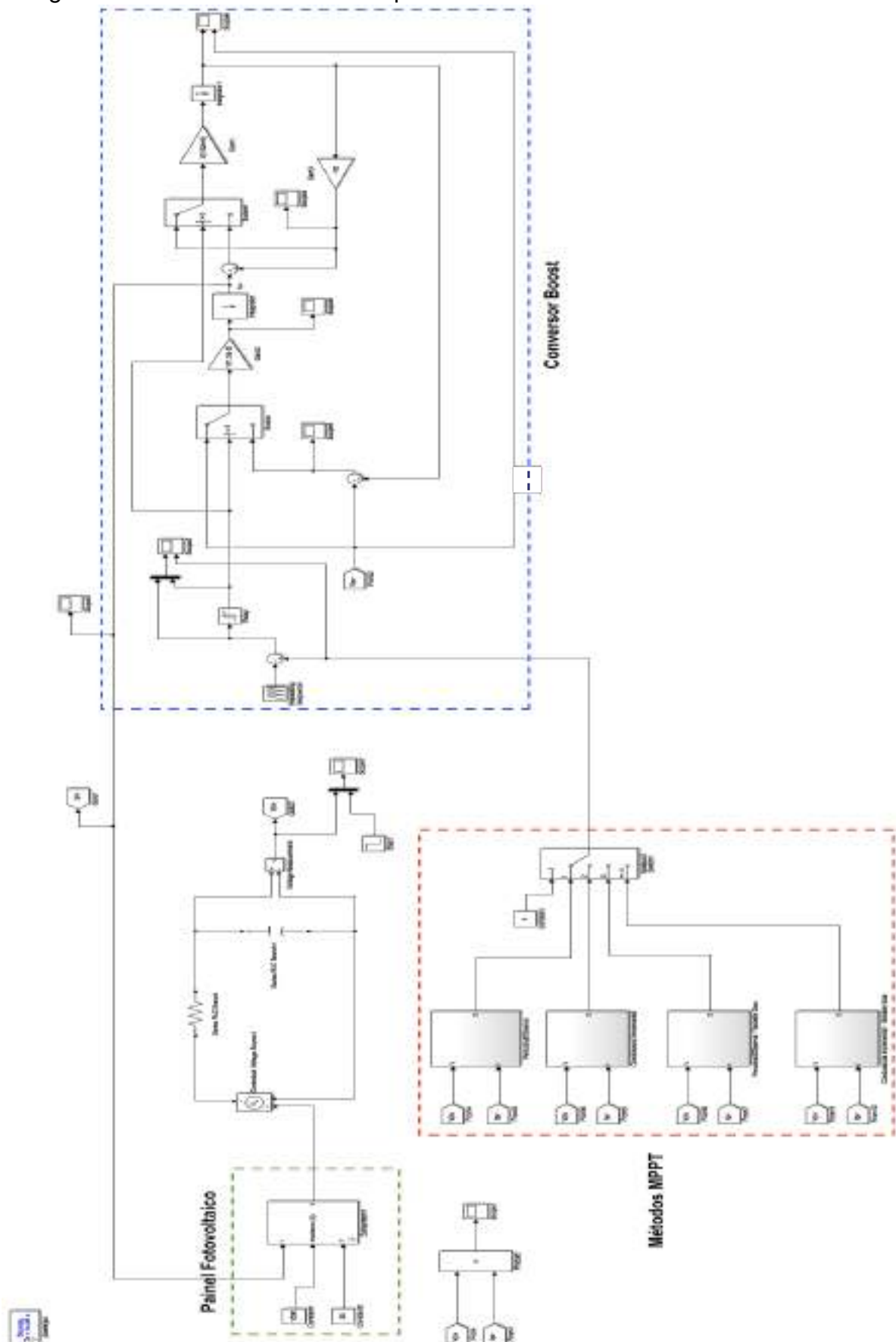
Nesta seção serão apresentados os resultados oriundos da simulação do sistema apresentado na Figura 25. Os resultados foram obtidos por meio do *software* MATLAB®/Simulink®.

4.3.1 Comparação entre as técnicas de MPPT

Para que se tenha uma boa comparação de métodos de rastreamento de máxima potência, algumas características como resposta dinâmica, erro em regime permanente e eficiência do sistema para variadas situações de irradiância precisam ser analisadas de forma ampla. Define-se como sendo a eficiência (η) do painel em porcentagem a relação entre a potência medida (P_{medida}) e a potência máxima do arranjo fotovoltaico ($P_{máxima}$) como expressado na equação abaixo:

$$\eta = \frac{P_{medida}}{P_{máxima}} \times 100\% \quad (23)$$

Figura 25. Sistema fotovoltaico implementado utilizando MATLAB®/Simulink®.



Fonte: Autoria própria.

A resposta dinâmica é estudada por intermédio de duas mudanças diferentes de irradiância, sendo elas de 1000 W/m² para 700 W/m² e de 700 W/m² para 1000 W/m². Essas mudanças possibilitam realizar a análise do tempo que cada técnica leva para que o PMP seja obtido. Já a resposta em regime permanente é analisada pela comparação da média da potência medida com a potência máxima para cada situação de irradiância. Com o auxílio da folha de dados do painel fotovoltaico *Kyocera KC200GT* é possível consultar a potência máxima para os valores de irradiância de 1000 W/m² e 700 W/m² que são, respectivamente, 200,143 W e 141,8 W. O passo de cálculo foi definido como 33 μs ($\frac{1}{30 \text{ kHz}}$), este valor define o tempo para que os valores de referência no algoritmo MPPT sejam atualizados.

Quatro métodos são simulados e comparados, são eles: P&O, IC, P&O, P&O_VS e IC_VS, os quais são descritos no capítulo anterior. Na Tabela 5 são detalhados todos os resultados para diferentes ciclos de trabalho para que assim encontre-se a melhor situação no que se refere à eficiência do arranjo.

Tabela 5. Comparação entre as técnicas MPPT (regime transitório e regime permanente).

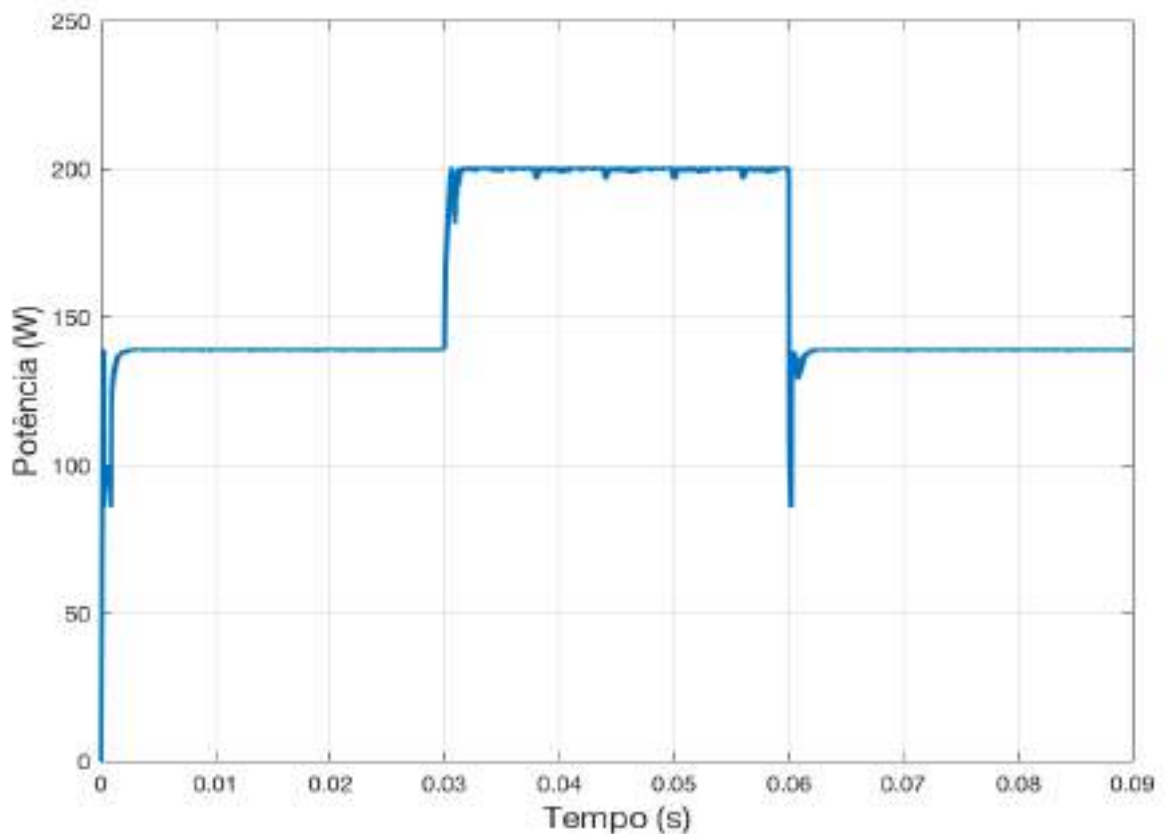
Técnicas MPPT	Tempo de ajuste (ms)		Potência média (W)	
	Irradiância – 1000 para 700 W/m ²	Irradiância – 700 para 1000 W/m ²	Irradiância 700 W/m ²	Irradiância 1000 W/m ²
P&O, $\Delta D = 0,004$	5,00	7,00	138,881	200,010
P&O, $\Delta D = 0,008$	3,00	2,00	138,822	199,997
P&O, $\Delta D = 0,01$	2,00	1,50	138,713	199,795
IC, $\Delta D = 0,004$	2,50	2,00	138,913	200,027
IC, $\Delta D = 0,008$	1,50	1,50	138,895	199,975
IC, $\Delta D = 0,01$	1,10	1,10	138,891	199,846
P&O_VS	1,30	1,50	138,869	200,073
IC_VS	1,50	2,00	138,914	200,081

Fonte: Autoria própria.

O resultado da simulação da técnica P&O (Figura 14) com passo fixo de 0,01 ($\Delta D = 0,01$) é ilustrado na Figura 26. Neste caso, o rastreamento do PMP ocorre por meio da variação da razão cíclica, a qual controla a chave do conversor *Boost*. Como já mencionado no Capítulo 2 e analisado na Tabela 5, um passo maior no valor de incremento ou decréscimo acarretará em um tempo menor para que o algoritmo

atinja o PMP, entretanto, as oscilações em torno deste ponto aumentam, é o que ocorre para a perturbação de passo fixo escolhido nesta simulação quando comparado com os passos fixos 0,004 e 0,008. Percebe-se também que mesmo com uma variação de irradiância, o método testado consegue se estabelecer em torno do ponto de referência sem muitas dificuldades. O valor da perturbação de passo fixo 0,01 foi o máximo incremento conseguido para as simulações devido a maus resultados quando de um passo maior, pois tal situação leva a razão cíclica (D) a um ponto afastado do ideal, resultando em uma tensão equivocada, provocando assim uma perda de eficiência ao sistema.

Figura 26. Resultado de simulação da técnica P&O com mudanças de irradiância (700 W/m^2 e 1000 W/m^2).



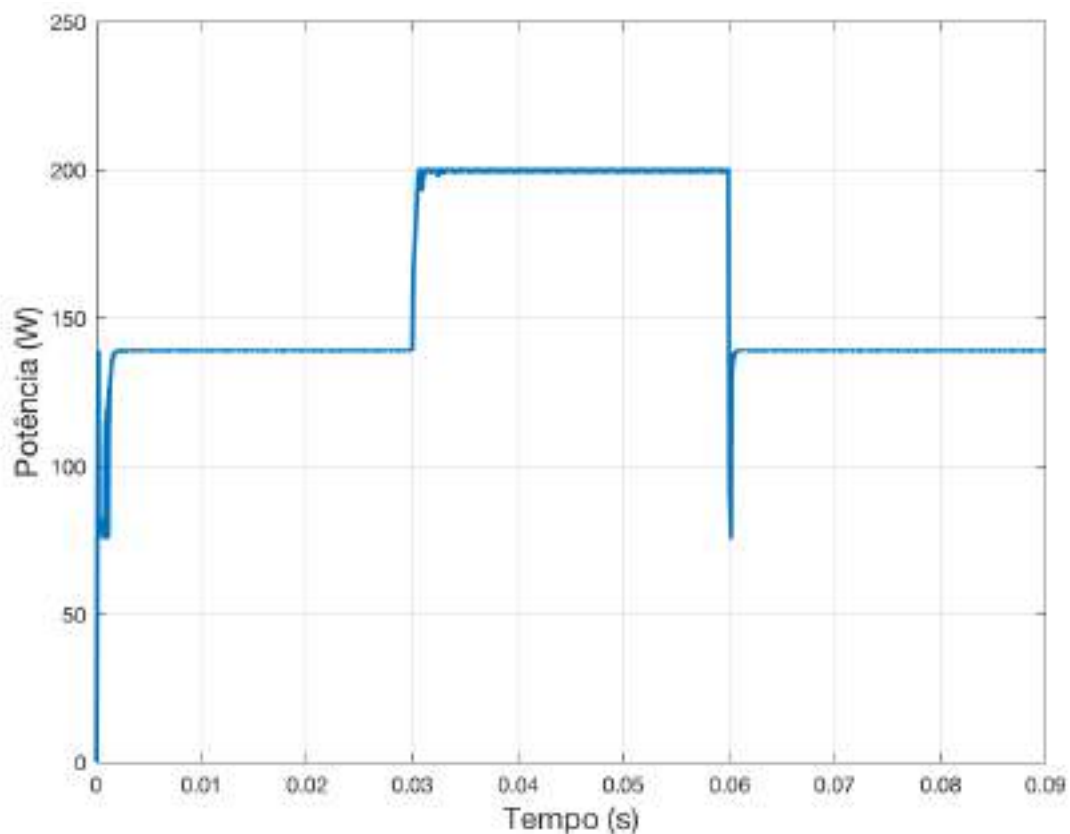
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 27 o resultado da simulação do método IC (Figura 16) com variação de irradiância é ilustrado. Para este caso, o tamanho da perturbação de passo fixo, assim como no método P&O descrito anteriormente, foi de 0,01 ($\Delta D = 0,01$). O algoritmo IC continuamente rastreia a saída do painel fotovoltaico ajustando a razão cíclica (D) do conversor *Boost* por intermédio da perturbação (ΔD) baseados nas equações mostradas na Tabela 3 do capítulo anterior. A técnica IC funciona de

maneira similar ao P&O, tendo como vantagens em relação ao método anterior a taxa de convergência mais rápida e variações menores em torno do PMP, como notado no resultado de simulação ilustrado na Figura 27. É importante também comentar que, assim como na técnica do Perturba & Observa, quanto maior o valor de incremento ou decremento, menor será o tempo para que o algoritmo atinja o PMP, resultando em um aumento das oscilações em torno do ponto desejado.

Uma pequena diferença entre a potência máxima teórica e a potência do painel fotovoltaico para uma perturbação da razão cíclica (ΔD) de 0,01 obtida pelo rastreador de máxima potência é percebida, conforme análise feita na Tabela 5. O método IC com passo fixo apresenta resultados satisfatórios em regime transitório e em regime permanente, consistindo assim em um dos métodos mais interessantes de rastreamento do PMP.

Figura 27. Resultado de simulação da técnica IC com mudanças de irradiância (700 W/m^2 e 1000 W/m^2).



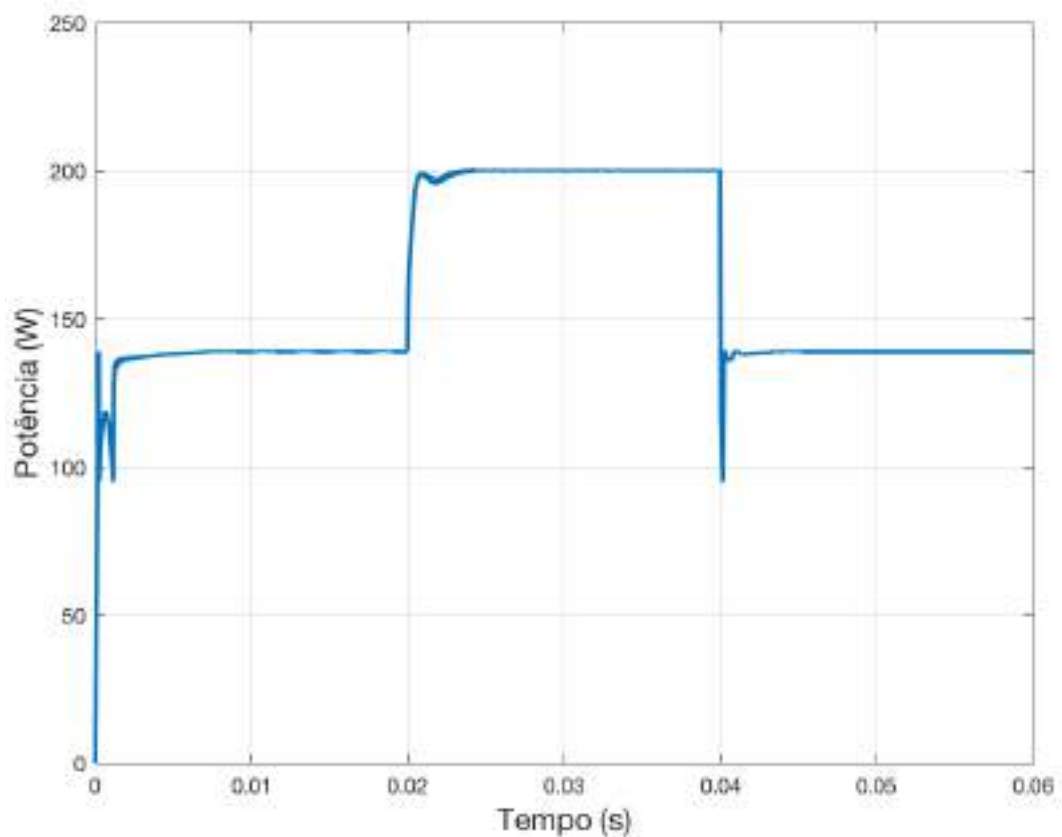
Fonte: Autoria própria.

A Figura 28 ilustra o resultado de simulação do rastreamento do ponto de máxima potência para o método P&O com passo variável (Figura 17), com o parâmetro do fator de escala fixado em $N = 0,001$. Todos os testes foram realizados

em uma temperatura fixada em 25°C e irradiâncias entre 700 W/m² e 1000 W/m². Os resultados obtidos da simulação mostrados tanto na Tabela 5 quanto na Figura 28 ratificam que o tempo de rastreamento é mais rápido que o método P&O tradicional para o teste de irradiância que começa a partir de 700 W/m², de repente salta para 1000 W/m² no tempo $t = 2$ ms e subitamente volta para 700 W/m² no tempo $t = 4$ ms e as oscilações em torno do PMP em regime permanente são diminuídas.

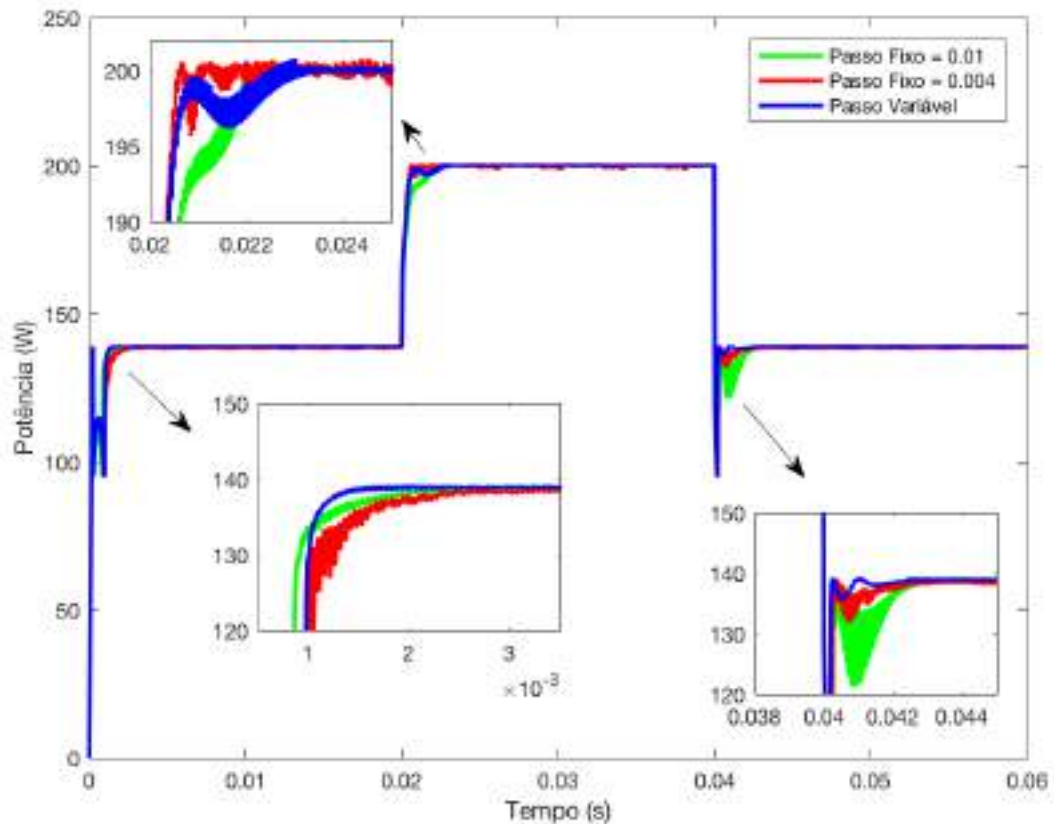
Como é visto na Figura 29, que traz resultados de simulação de diferentes métodos de MPPT (P&O e P&O com passo de perturbação variável), a resposta do algoritmo P&O com passo de perturbação variável demonstra sucesso ao atingir o PMP antes dos algoritmos do método P&O com passo de perturbação fixo ($\Delta D = 0,01$ e $\Delta D = 0,004$), o que é um comportamento esperado desta técnica.

Figura 28. Resultado de simulação para o método P&O com passo de perturbação variável e mudanças de irradiância (700 W/m² e 1000 W/m²).



Fonte: Autoria própria.

Figura 29. Resultados de simulação para o P&O com passo fixo e variável e mudanças de irradiância (700 W/m^2 e 1000 W/m^2).

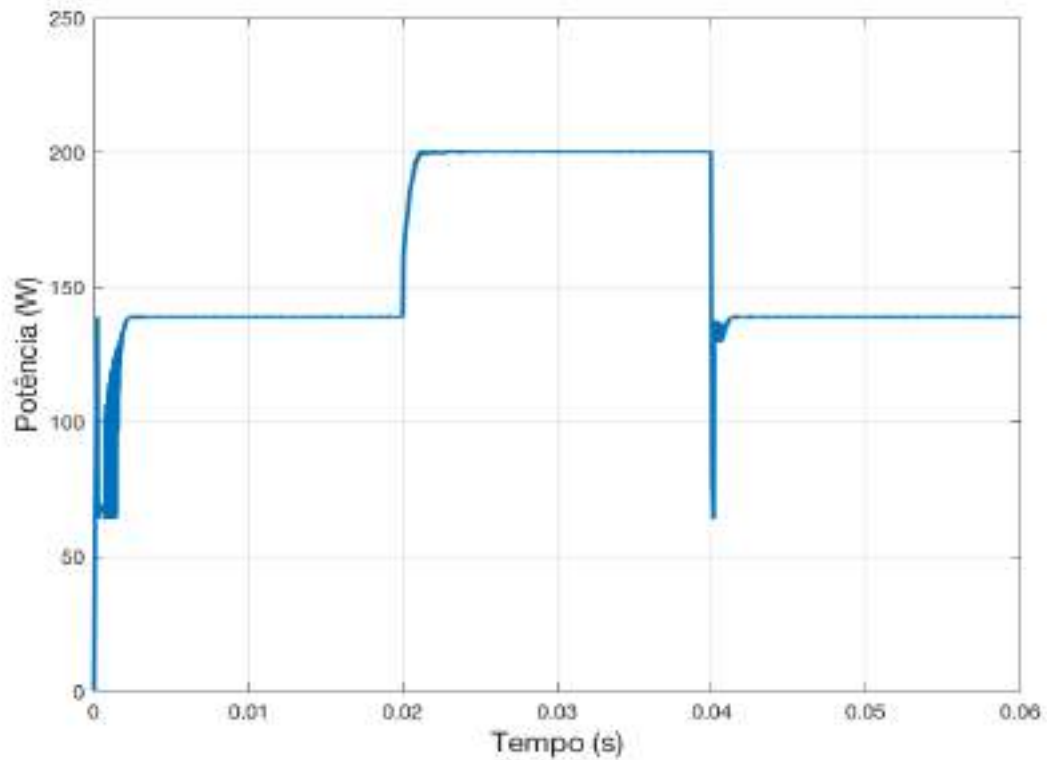


Fonte: Autoria própria.

Para a técnica IC com passo de perturbação variável (Figura 19), a irradiação também foi programada para ser alterada de 700 para 1000 W/m^2 a 2 ms e de 1000 para 700 W/m^2 a 4 ms . O $\Delta D_{m\acute{a}x}$ é definido como $0,005$ e o $N = 0,02$. O resultado da simulação desta técnica é mostrado na Figura 30, ela apresenta bom resultado tanto em regime transitório quanto em estado estacionário.

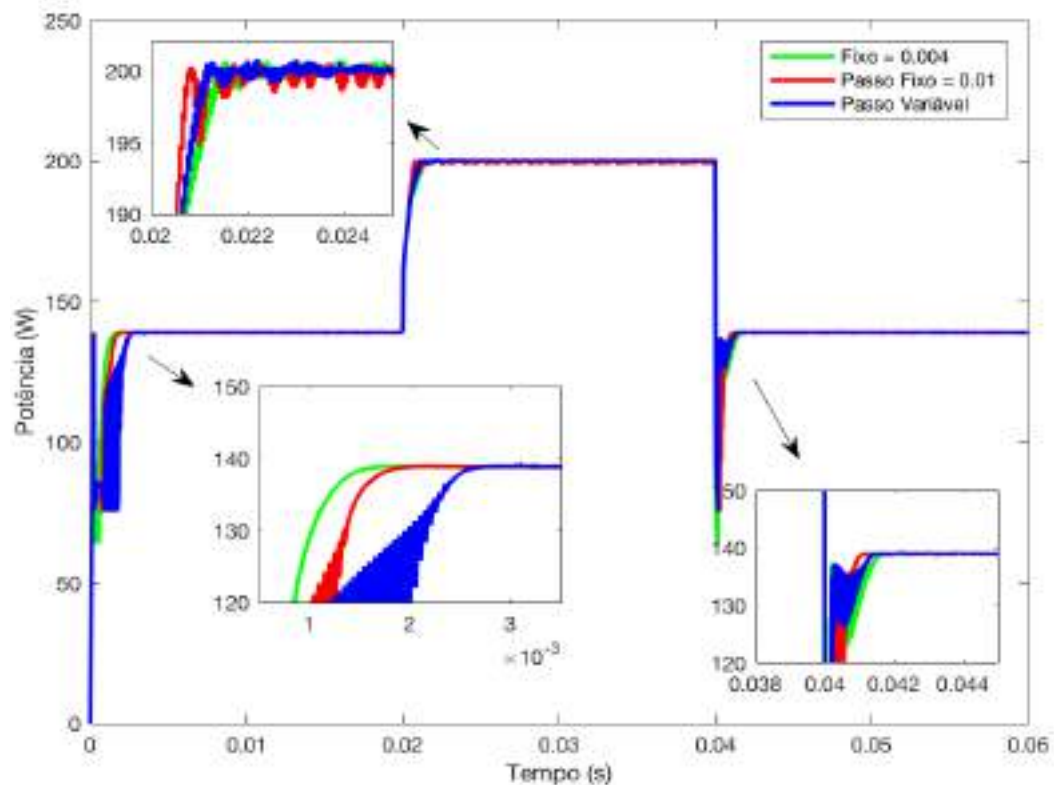
Na Figura 31, é demonstrado resultados de simulação dos algoritmos MPPT IC e IC com passo de perturbação variável. Por causa do pequeno valor de $|dP|/|dV|$, percebe-se que as oscilações no estado estacionário são diminuídas. Além disso, o desempenho dinâmico é satisfatório tanto para os métodos de tamanho de passo de perturbação fixo ($0,01$ e $0,004$) quanto variável.

Figura 30. Resultados de simulação para o método IC com passo de perturbação variável e mudanças de irradiância (700 W/m^2 e 1000 W/m^2).



Fonte: Autoria própria.

Figura 31. Resultados de simulação para o método IC com passos de perturbação fixo e variável com mudanças de irradiância (700 W/m^2 e 1000 W/m^2).



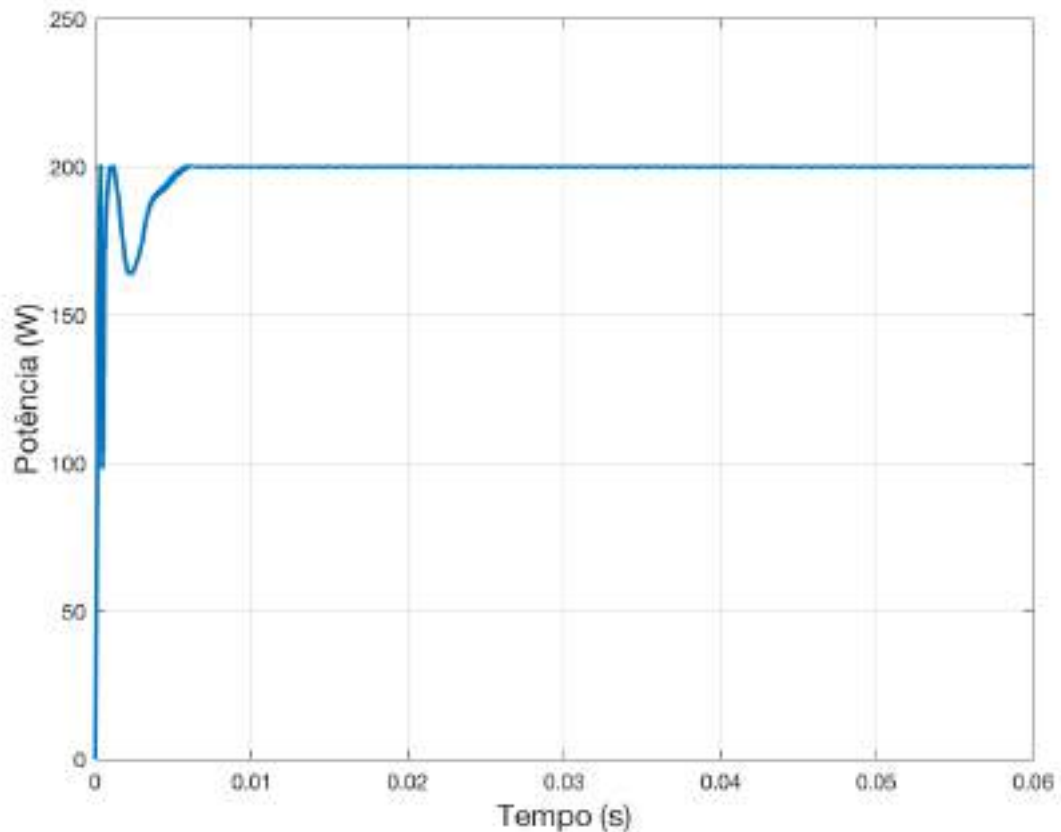
Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Eficiência

Tendo acesso ao valor de máxima potência (P_{PMP}) disponibilizado na folha de dados do painel fotovoltaico *Kyocera KC200GT* e a informação da potência retirada da simulação, torna-se possível o cálculo da eficiência para cada método. Os valores de irradiância e temperatura escolhidos foram os padrões, que são 1000 W/m^2 e 25°C .

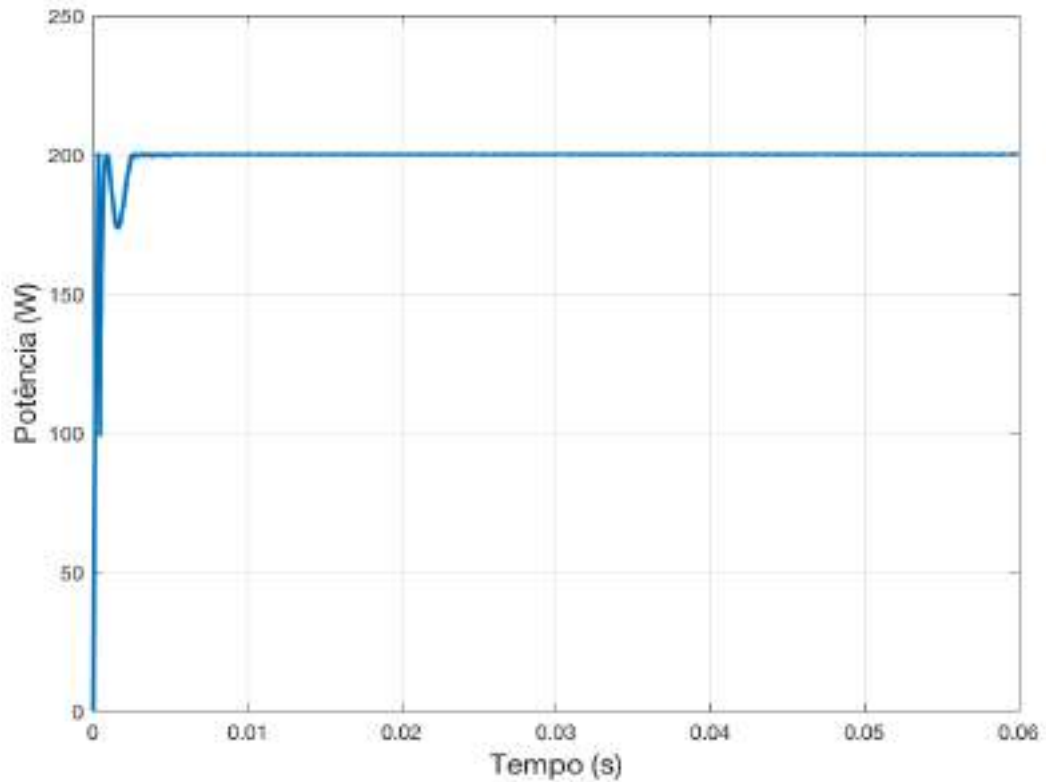
As Figuras 32 a 35 trazem as simulações para cada método. Para os métodos P&O e IC o passo de perturbação (ΔD) escolhido foi o de 0,004. A Tabela 6 fornece a eficiência do sistema para cada método, calculada pela Equação 23, por meio dos valores já encontrados na Tabela 5 e a P_{PMP} do painel fotovoltaico fornecido pelo fabricante na folha técnica de dados, cujo valor é $200,143 \text{ W}$.

Figura 32. Método P&O com $\Delta D=0,004$ e irradiância de 1000 W/m^2 .



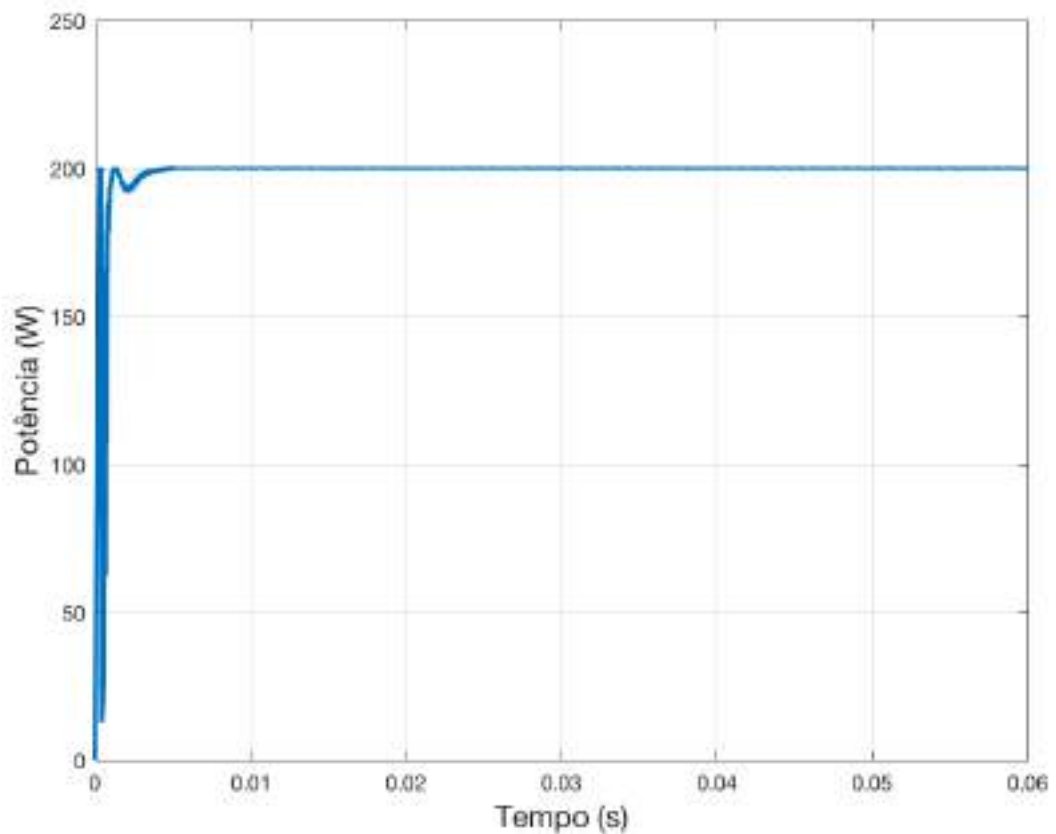
Fonte: Autoria própria.

Figura 33. Método IC com $\Delta D=0,004$ e irradiância de 1000 W/m^2 .



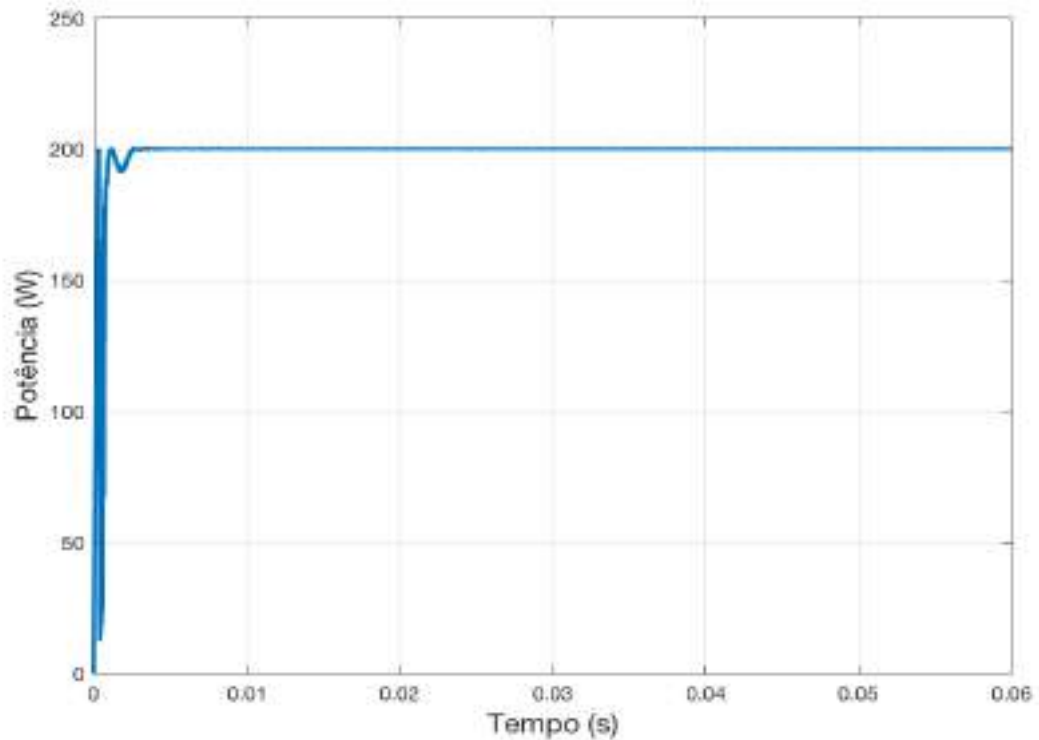
Fonte: Autoria própria.

Figura 34. Método P&O com passo de perturbação variável e irradiância de 1000 W/m^2 .



Fonte: Autoria própria.

Figura 35. Método IC com passo de perturbação variável e irradiância de 1000 W/m².



Fonte: Autoria própria.

Tabela 6. Eficiência dos métodos MPPT.

Técnicas MPPT	Potência média (W)	η (%)
	Irradiância – 1000 W/m ² Temperatura – 25°C	
P&O, $\Delta D = 0,004$	200,010	99,93
IC, $\Delta D = 0,004$	200,027	99,94
P&O_VS	200,073	99,96
IC_VS	200,081	99,97

Fonte: Autoria própria.

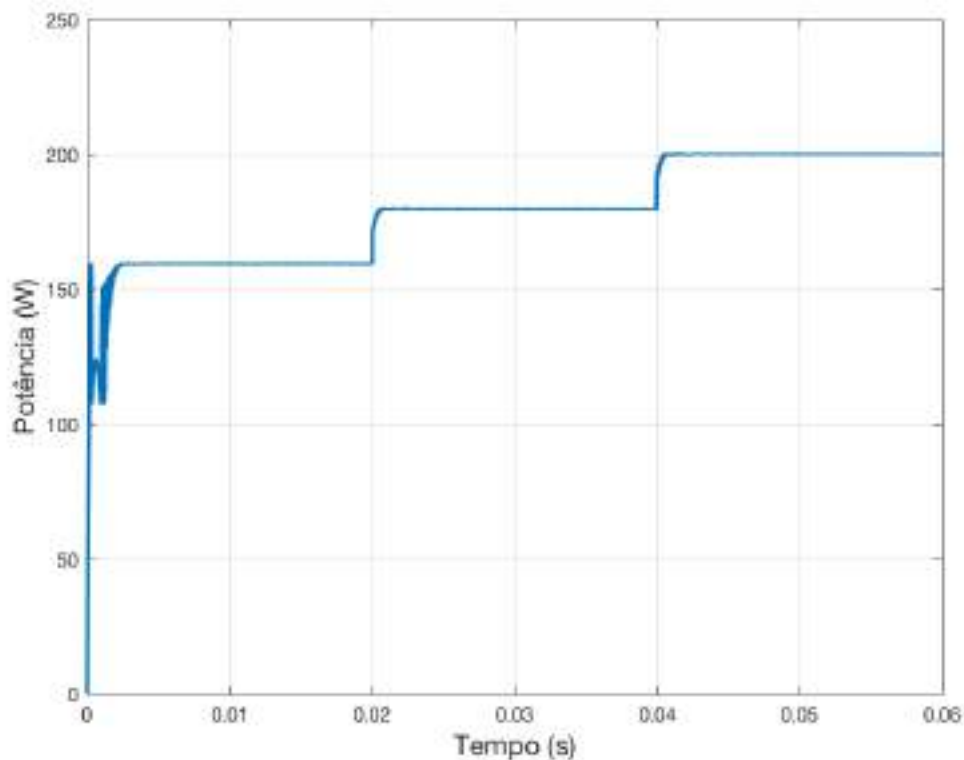
Portanto, definindo como bom resultado a eficiência de 99,50% (SILVA, 2018), conclui-se que todos os métodos estudados neste trabalho possuem uma excelente eficiência. Mas, tendo em vista os valores alcançados pelos métodos P&O_VS e IC_VS, esses se tornam os melhores para uma irradiância de 1000 W/m² e temperatura de 25°C.

4.3.3 Comportamento do sistema para situações diversas

Nesta seção serão apresentadas algumas situações que demonstram a influência da variação da irradiância e da temperatura na potência entregue pelo painel fotovoltaico. Primeiramente, fixou-se uma temperatura de 25°C e variou-se a irradiância de três formas: crescente (800-900-1000 W/m²), decrescente (1000-900-800 W/m²) e aleatória (800-1000-900 W/m²). Os resultados são ilustrados nas Figuras 36, 37 e 38.

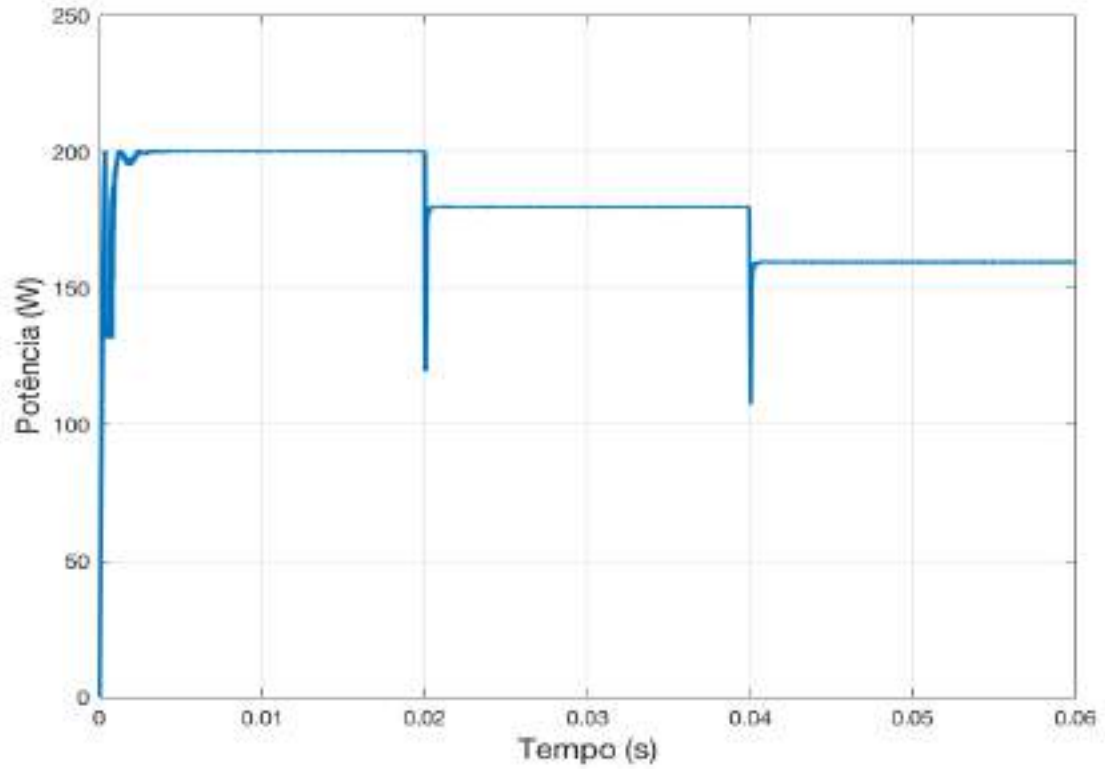
Outro teste a ser feito é o de fixar a irradiância em 1000 W/m² e variar a temperatura de forma crescente (15°C-25°C-35°C), decrescente (35°C-25°C-15°C) e aleatória (25°C-15°C-35°C). Nas Figuras 39, 40 e 41 são ilustradas estas situações. Assim como para o teste anterior, quando houve variação de irradiância e temperatura fixa, as figuras a seguir ilustram os resultados de simulação para o método IC com passo de perturbação variável.

Figura 36. Método IC com passo de perturbação variável e irradiância crescente (800/900/1000 W/m²).



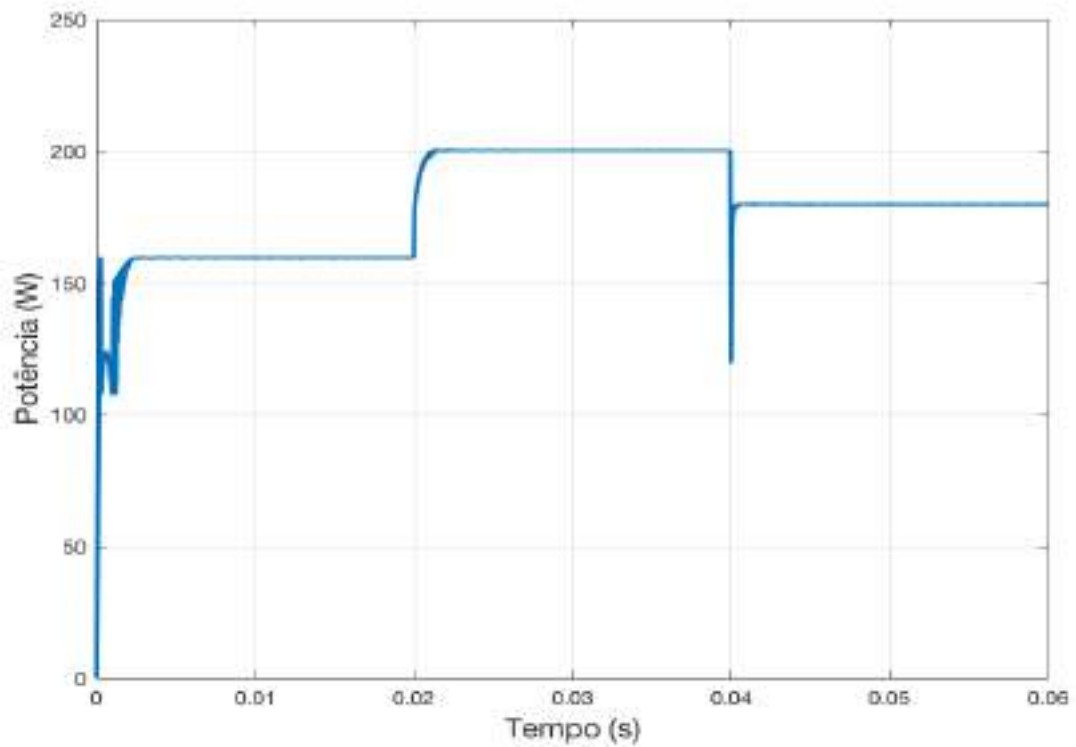
Fonte: Autoria própria.

Figura 37. Método IC com passo de perturbação variável e irradiância decrescente (1000/900/800 W/m²).



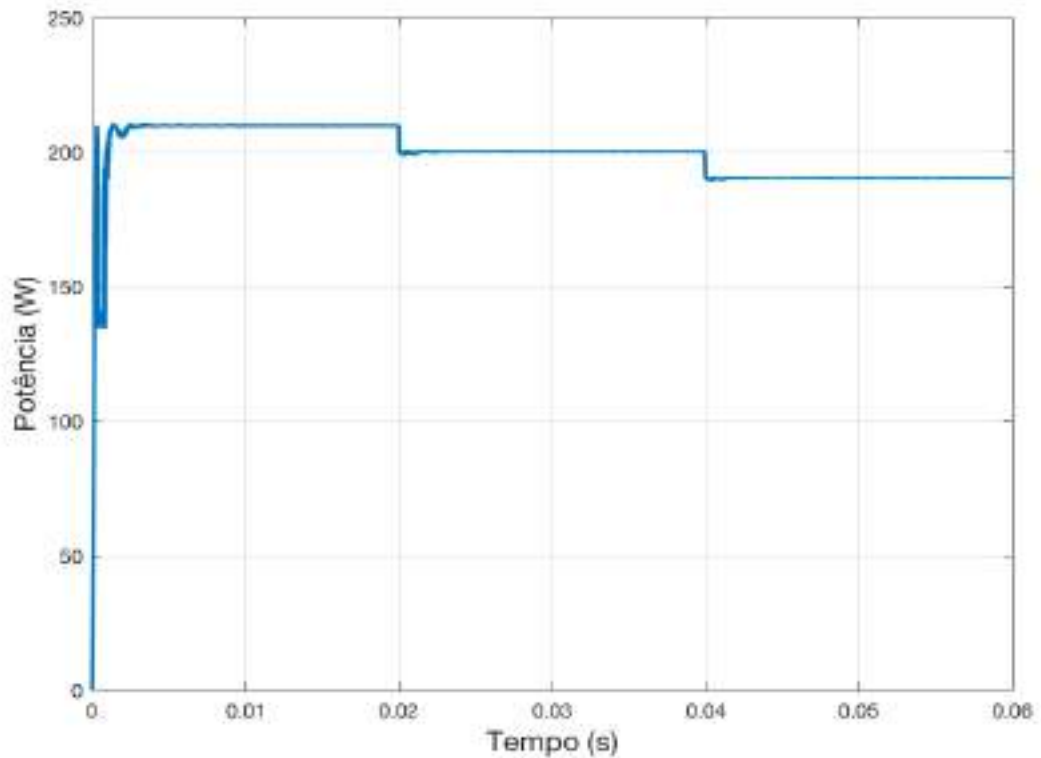
Fonte: Autoria própria.

Figura 38. Método IC com passo de perturbação variável, temperatura fixa em 25°C e irradiância aleatória (900/1000/800 W/m²).



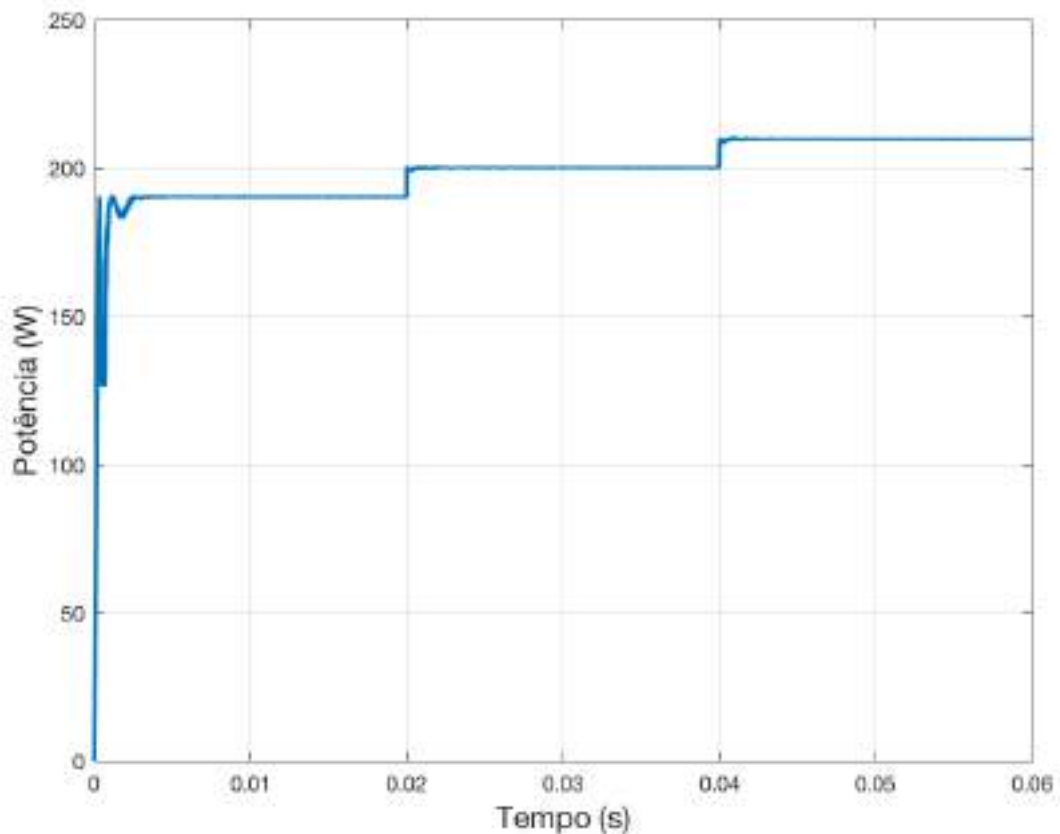
Fonte: Autoria própria.

Figura 39. Método IC com passo de perturbação variável, irradiância fixa em 1000 W/m^2 e temperatura crescente ($15^\circ\text{C}/25^\circ\text{C}/35^\circ\text{C}$).



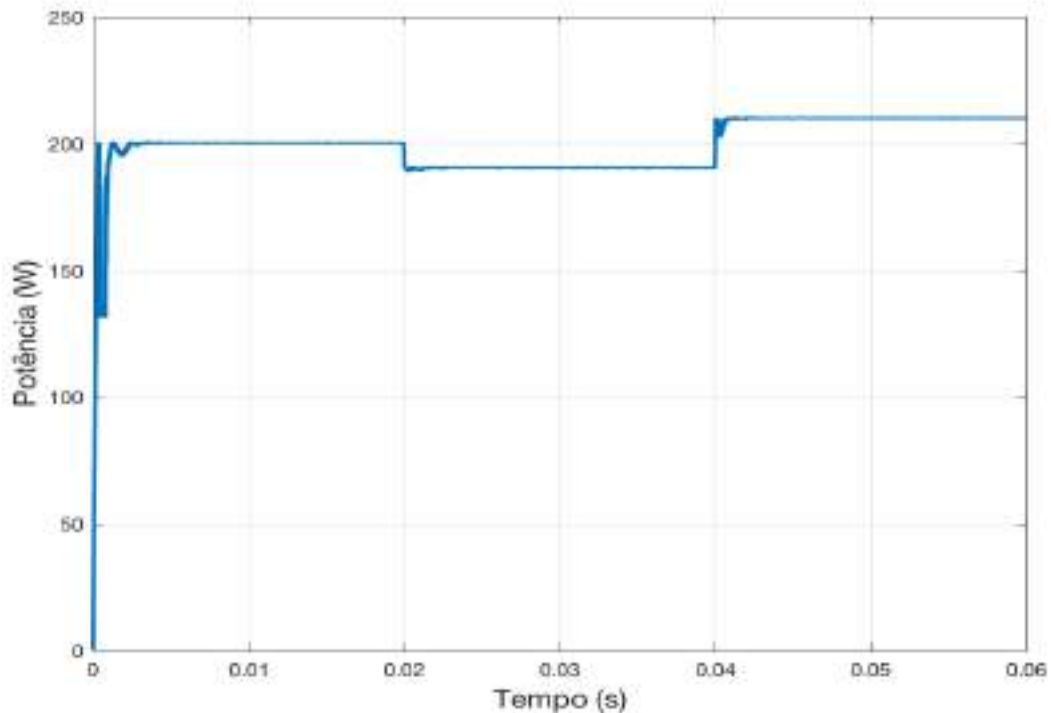
Fonte: Autoria própria.

Figura 40. Método IC com passo de perturbação variável, irradiância fixa em 1000 W/m^2 e temperatura decrescente ($35^\circ\text{C}/25^\circ\text{C}/15^\circ\text{C}$).



Fonte: Autoria própria.

Figura 41. Método IC com passo de perturbação variável, irradiância fixa em 1000 W/m^2 e temperatura aleatória ($25^\circ\text{C}/15^\circ\text{C}/35^\circ\text{C}$).



Fonte: Autoria própria.

Após os resultados de simulação mostrados nas figuras acima, conclui-se que a influência da variação da irradiância no painel fotovoltaico provoca uma variação de potência. Para um aumento de irradiância, há uma elevação da potência, já para uma diminuição de irradiância, percebe-se uma diminuição da potência. Isto acontece porque a corrente de curto circuito (I_{sc}) sofre um aumento ou uma diminuição em razão da mudança da irradiância. Já a tensão de circuito aberto (V_{oc}) sofre uma pequena alteração, como explicitado no Capítulo 2, subseção 2.2.6.3. Assim, a I_{sc} é a grande responsável por esta variação da potência a partir de uma mudança de irradiância. Vale ressaltar que mesmo com um aumento ou diminuição brusca da irradiância, o método consegue se comportar de maneira coerente, atingindo com certa rapidez o regime permanente e, por consequência, o PMP.

Já o comportamento para uma variação de temperatura é o inverso do observado anteriormente. As Figuras 39 a 41 mostram que um aumento de temperatura leva a uma queda da potência entregue pelo arranjo fotovoltaico e uma diminuição de temperatura ocasiona aumento da potência. Isso ocorre devido a característica do dispositivo fotovoltaico, que, a partir do aumento da temperatura, a tensão de circuito aberto (V_{oc}) é diminuída, a corrente de curto-circuito (I_{sc}) varia pouco e a potência de saída do módulo diminui, como comentado na subseção

2.2.6.3 do Capítulo 2. Nota-se também que o comportamento está de acordo com o que era esperado e a rapidez com que se atinge o PMP e o regime permanente se mostra satisfatória.

5 CONCLUSÃO

Realizou-se neste trabalho de conclusão de curso a modelagem de um sistema fotovoltaico isolado da rede elétrica utilizando o programa MATLAB®/Simulink®. Tal sistema é composto por um painel fotovoltaico modelo *Kyocera KC 200GT*, um conversor c.c.-c.c. do tipo *Boost*, uma carga resistiva e quatro técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência que são: Perturba & Observa, Condutância Incremental, Perturba & Observa com passo de perturbação variável e Condutância Incremental com passo de perturbação variável.

Cada parte que forma o sistema a ser implementado foi simulado, primeiramente, de forma independente para uma verificação de funcionamento. Após isso, houve a conexão de todos os elementos. A partir desse momento, as simulações para as análises das técnicas MPPT foram realizadas.

Pode-se destacar que sem essas técnicas discutidas ao longo do trabalho, não é possível extrair a máxima potência de um sistema fotovoltaico que esteja sob determinado nível de irradiância ou temperatura, mesmo com alguns aspectos negativos que alguma técnica possa apresentar. A boa eficiência dos métodos apresentados no Capítulo 4 faz concluir que todas as técnicas estudadas neste trabalho apresentam resultados satisfatórios, ficando a cargo do projetista a decisão de escolha do melhor método a ser aplicado.

No Capítulo 4 foram expostos os resultados de simulação com base na variação do passo da perturbação utilizando um conversor *Boost* que tem por objetivo auxiliar no estudo da eficiência das técnicas. Para tal estudo utilizou-se a variação dos valores dos incrementos de perturbação do passo (ΔD), de modo que se observasse a importância desse parâmetro para a eficiência da técnica. Diante o exposto, a técnica IC_VS foi escolhida como a melhor técnica devido ao seu desempenho quanto a sua eficiência.

Por fim, vale ressaltar que as técnicas demonstraram ter uma excelente resposta às mudanças bruscas de irradiância e temperatura, levando o método MPPT a encontrar o PMP e controlá-lo de maneira adequada. Como sugestão de trabalhos futuros, um estudo mais aprofundado das técnicas e a realização de experimentos utilizando painéis fotovoltaicos reais, como aqueles disponibilizados pelo CEAR, são de grande valia tanto para o meio acadêmico quanto para o mercado que investe neste tipo de tecnologia.

REFERÊNCIAS

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **BIG – Banco de Informações de Geração: Capacidade de Geração do Brasil 2017**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 17 out. 2017.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração distribuída**. Setembro de 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acesso em: 22 mar. 2018.

ARICHI, F.; CHERKI, B.; DJEMAI, M. "**Discrete state estimation in hybrid photovoltaic systems**." Environment Friendly Energies and Applications (EFEA), 2012 2nd International Symposium on. IEEE, 2012.

AZEVEDO, G. M. S.. **Sistema de conversão de energia fotovoltaica com compensação baseada em corrente e tensão**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2007.

BARRETO, Rodrigo Lopes. **Contribuições ao método de rastreamento de máxima potência para sistemas fotovoltaicos**. 2014. 85 f. Dissertação (Mestrado em Automação e Sistemas; Engenharia de Computação; Telecomunicações) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

BOUILLOUTA, A.; MELLIT, A.; KALOGIROU, S. A.. **New MPPT method for stand-alone photovoltaic systems operating under partially shaded conditions**. *Energy* 55 (2013): 1172-1185.

CASTRO, Rui MG. Introdução à energia fotovoltaica. **DEEC/Secção de Energia, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa**, 2007.

CRESESB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO / CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Componentes de um sistema fotovoltaico**. Junho de 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=341>. Acesso em: 22 mar. 2018.

DINÇER, F. **The analysis on photovoltaic electricity generation status, potential and policies of the leading countries in solar energy**. ELSEVIER Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.15, p.713–720, 2011.

DOLARA, A.; FARANDA, R.; LEVA, S. "**Energy Comparison of Seven MPPT Techniques for PV Systems**". J. Electromagnetic Analysis & Applications JEMAA, p. 3:152-162, 2009.

DRIESSE, A.; HARRISON, S.; JAIN, P. **Evaluating the effectiveness of maximum power point tracking methods in photovoltaic power systems using array**

performance models. In *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC*, p. 145–151, 2007.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2017.** Rio de Janeiro, Brasil, junho de 2017.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Inserção da geração fotovoltaica distribuída no Brasil: condicionantes e impactos.** Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

FARANDA R.; LEVA, S. **Energy comparison of mppt techniques for pv systems.** Em: *WSEAS Transactions on Power Systems*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 447–455.

HAMZESCU, M. R.; OPREA, S. **Practical Guide to Implementing Solar Panel MPPT Algorithms.** Microchip Technology Inc., 2013. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00001521A.pdf>>. Acesso em 03 abr. 2018.

HOHM, D.P.; ROPP, M.E.. **Comparative Study of Maximum power point tracking algorithms,** *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2003, Vol.11, No.1, pp. 47-62.

HUA, CHIHCHIANG; LIN, JONGRONG; SHEN, CHIHMING. **Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 45, n. 1, p. 99-107, 1998.

HUSSEIN, K. et al. **Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions.** *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, v. 142, n. 1, p. 59–64, 1995. ISSN 1350-2360.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **KEY WORLD ENERGY STATISTICS.** Paris, França, Setembro de 2017. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ElectricityInformation2017Overview.pdf>>. Acesso em 30 jan. 2018.

INEE. INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **O que é geração distribuída.** Disponível em: < http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp>. Acesso em: 06 jun. 2018.

ISALOO, B. A.; AMIRI, P. **Improved variable step size incremental conductance MPPT method with high convergence speed for PV systems.** *Journal of Engineering Science and Technology (JESTEC)* 11.4 (2016): 516-528.

ISHAQUE, K.; SALAM, Z. **A review of maximum power point tracking techniques of {PV} system for uniform insolation and partial shading condition.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 19, n. 0", p. 475 – 488, 2013. ISSN 1364-0321.

KAKOSIMOS, P. E.; KLADAS, A. G.. **Implementation of photovoltaic array MPPT through fixed step predictive control technique.** (2011) *Renewable energy*, 36(9), 2508-2514.

KHATIB, T. T.; MOHAMED, A.; AMIM, N.; SOPIAN, K. **An improved indirect maximum power point tracking method for standalone photovoltaic systems.** Em: *Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering, Selangor, Malaysia, pp.(56–62).* 2010, March.

KOU, Q.; KLEIN, S. A.; BECKMAN, W. A. **A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems.** *Solar Energy*, 64(1-3):33–40, September 1998.

KOUTROULIS, EFTICHIOS; KALAITZAKIS, KOSTAS; VOULGARIS, NICHOLAS C. **Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system.** *IEEE Transactions on power electronics*, v. 16, n. 1, p. 46-54, 2001.

KYOCERA SOLAR. **KYOCERA KC200GT Data Sheet.** Especificação técnica.

MOHAMMED, S. S.; DEVARAJ, D. **"Simulation of Incremental Conductance MPPT based two phase interleaved boost converter using MATLAB/Simulink,"** *2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICEC.C.T)*, Coimbatore, 2015, pp. 1-6.

OLIVEIRA, K. C. **Avaliação da Conversão da energia Fotovoltaica em Sistemas Isolados.** 2007. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2007.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: CEPEL, 2014.

RENEWABLES 2017 GLOBAL STATUS REPORT. **Market and industry trends.** Disponível em: <http://www.ren21.net/gsr-2017/chapters/chapter_02/chapter_02/>. Acesso em: 08 mar. 2018.

RODRIGUES, Flávia F. C.; BORGES, Carmen L.T.; FALCAO, Djalma M. **Programação da contratação de energia considerando geração distribuída e incertezas na previsão de demanda.** *Sba Controle & Automação*, Natal, v. 18, n. 3, p. 361-371, setembro de 2007. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-17592007000300008&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 25 mar. 2018.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil.** Editora UFSC/LABSOLAR. Florianópolis, 2004.

SALAS, V. et al. **Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems.** *Solar energy materials and solar cells*, v. 90, n. 11, p. 1555-1578, 2006.

SERA, DEZSO et al. **Optimized maximum power point tracker for fast-changing environmental conditions.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 55, n. 7, p. 2629-2637, 2008.

SHER, HADEED AHMED et al. **A New sensorless hybrid MPPT algorithm based on fractional short-circuit current measurement and P&O MPPT**. IEEE Transactions on Sustainable Energy, v. 6, n. 4, p. 1426-1434, 2015.

SILVA, A. **Estudo comparativo entre técnicas de seguimento do ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2018.

SILVA, E. A. **Técnicas de estimação de parâmetros de módulos fotovoltaicos**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2015.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1. ed. Rio de Janeiro: Érica, 2012.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; RUPPERT FILHO, E. **Modeling and circuit-based simulation of photovoltaics arrays**. Brazillian Journal of Power Eletronics, v. 14, n. 1, p. 35- 45, 2009.

XIAO, WEIDONG; DUNFORD, WILLIAM G. **A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems**. In: Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual. IEEE, 2004. p. 1957-1963.

YÜKSEK, G.; METE, A. N. **A hybrid variable step size MPPT method based on P&O and INC methods**. Em: Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2017 10th International Conference. 30 nov. 2017 (pp. 949-953). IEEE.