



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**JOSÉ FÁBIO BRILHANTE DE FREITAS FILHO**

**RASTREAMENTO DO PONTO DE POTÊNCIA  
MÁXIMA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS  
UTILIZANDO O MÉTODO PERTURBA E OBSERVA**

CAMPINA GRANDE – PB

FEVEREIRO DE 2017

JOSÉ FÁBIO BRILHANTE DE FREITAS FILHO

RASTREAMENTO DO PONTO DE POTÊNCIA  
MÁXIMA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS  
UTILIZANDO O MÉTODO PERTURBA E OBSERVA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande como  
parte dos requisitos necessários para a obtenção do  
grau de Bacharel em Ciências no Domínio da  
Engenharia Elétrica*

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Orientador:

Professor Washington Luiz Araújo Neves, Ph. D.

CAMPINA GRANDE – PB

FEVEREIRO DE 2017

JOSÉ FÁBIO BRILHANTE DE FREITAS FILHO

RASTREAMENTO DO PONTO DE POTÊNCIA  
MÁXIMA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS  
UTILIZANDO O MÉTODO PERTURBA E OBSERVA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande como  
parte dos requisitos necessários para a obtenção do  
grau de Bacharel em Ciências no Domínio da  
Engenharia Elétrica*

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Aprovado em     /     /

**Professor Avaliador**

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador, UFCG

**Professor Washington Luiz Araújo Neves, Ph. D.**

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais, que por mim tudo fizeram sem medir esforços.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado perseverança e coragem para enfrentar dificuldades que muitas vezes ultrapassaram os contornos acadêmicos.

Aos meus pais, Fábio e Tatiane, por todos os ensinamentos e conselhos dados durante toda a minha vida. Foram os principais personagens da minha caminhada até esse momento. Sem eles eu jamais teria conseguido dar os passos que dei ou sequer ser a pessoa que sou.

À minha família em geral, tios, tias, avôs, avós, primos, etc. Foram de grande apoio em muitos momentos difíceis.

Aos meus amigos Juacyr, Vítor e Ray, e minha vó Zefinha, com quem tive a honra de dividir o teto. Agradeço por todo o apoio e cuidado prestados.

Aos meus amigos de curso, Rodrigo, Filipe, Ruan, Juacyr, entre outros, que dividiram comigo dias difíceis durante essa trajetória. Sem vocês a caminhada seria bem mais complicada. Obrigado por tudo.

A todos os meus amigos que fizeram parte dessa história.

Enfim, à todas as pessoas que de alguma forma contribuíram nessa minha jornada.

José Fábio Brilhante de Freitas Filho

*“Devia ter amado mais  
Ter chorado mais  
Ter visto o sol nascer  
Devia ter arriscado mais e  
até errado mais  
Ter feito o que eu queria  
fazer”*

Titãs

## RESUMO

Neste trabalho é realizado o estudo dos principais métodos de rastreamento do ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos, com ênfase no MPPT Perturba e Observa. Além disso, é mostrada a importância do rastreamento da máxima potência no aumento da eficiência energética desses sistemas que, atualmente, ainda apresentam elevado custo de implantação no Brasil e baixo rendimento. Destaca-se, também, a utilização do programa PSIM na simulação do MPPT Perturba e Observa e na análise de desempenho do sistema fotovoltaico proposto, do ponto de vista de fornecimento da potência máxima. Constata-se, por fim, a eficiência do método perturba e observa no rastreamento da potência máxima fornecida, mesmo diante da variação das condições de temperatura e de radiação solar.

**Palavras-chave:** Perturba e Observa, MPPT, rastreamento, potência máxima, eficiência, rendimento, sistema fotovoltaico, PSIM.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Perspectiva mundial da produção de energia fotovoltaica.....             | 01 |
| Figura 2 – Perspectiva do custo de implementação dos sistemas fotovoltaicos.....    | 02 |
| Figura 3 – Característica potência tensão (P – V) do módulo fotovoltaico.....       | 06 |
| Figura 4 – Características potência tensão (P – V) e corrente tensão (I – V).....   | 07 |
| Figura 5 – Variação da potência fornecida pelo módulo em função da perturbação..... | 08 |
| Figura 6 – Diagrama de blocos do MPPT P&O convencional.....                         | 09 |
| Figura 7 – Fluxograma do MPPT P&O convencional.....                                 | 10 |
| Figura 8 – Curva P-V indutância incremental.....                                    | 11 |
| Figura 9 – Diagrama de blocos do MPPT por realimentação de tensão.....              | 12 |
| Figura 10 – RNA para MPPT em sistemas fotovoltaicos.....                            | 13 |
| Figura 11 – Característica I – V do módulo com variação de temperatura.....         | 15 |
| Figura 12 – Janela inicial do PSIM.....   | 17 |
| Figura 13 – Sistema fotovoltaico montado no PSIM.....                               | 18 |
| Figura 14 – Módulo solar e parâmetros do modelo físico.....                         | 19 |
| Figura 15 – Conversor boost.....  | 20 |
| Figura 16 – MPPT P&O e malha de controle.....                                       | 22 |
| Figura 17 – Potência fornecida pelo módulo diante de variações de radiação.....     | 23 |
| Figura 18 – Potência fornecida pelo módulo diante de variações de temperatura.....  | 24 |



# SUMÁRIO

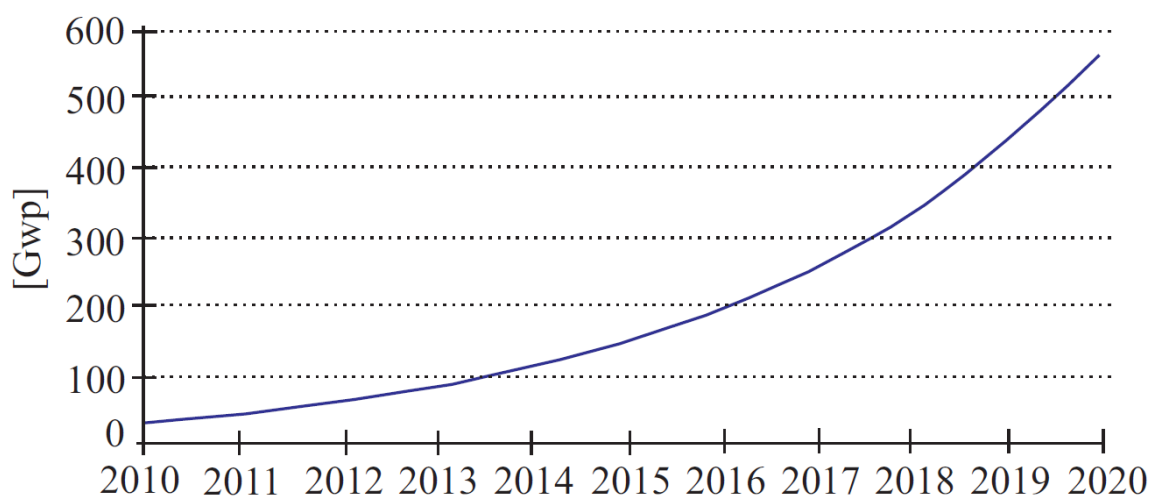
|   |    |
|---|----|
| <b>1. Introdução</b> .....  | 01 |
| 1.1. Objetivos.....   | 02 |
| 1.2. Estrutura do Trabalho.....   | 02 |
| <b>2. Rastreamento do Ponto de Máxima Potência em Sistemas Fotovoltaicos</b> .. | 03 |
| 2.1. Métodos MPPT Diretos.....  | 04 |
| 2.1.1 Perturba e Observa.....   | 05 |
| 2.1.2 Condutância Incremental.....  | 07 |
| 2.1.3 Realimentação de Tensão ou Corrente.....                                  | 10 |
| 2.1.4 Rede Neural Artificial.....   | 11 |
| 2.2. Métodos MPPT Indiretos.....  | 11 |
| 2.2.1 Análise de Tabela.....  | 12 |
| 2.2.2 Tensão Constante.....   | 14 |
| <b>3. Sistema e Resultados do MPPT Perturba e Observa</b> .....                 | 15 |
| 3.1. O PSIM.....  | 17 |
| 3.2. Sistema Analisado.....   | 18 |
| 3.2.1. Módulo Fotovoltaico.....   | 19 |
| 3.2.2. Conversor Boost.....   | 20 |
| 3.2.3. MPPT P&O e Malha de Controle.....  | 21 |
| 3.3. Resultados.....  | 22 |
| 3.3.1. Variação das Condições de Radiação Solar.....                            | 23 |
| 3.3.2. Variação das Condições de Temperatura.....                               | 24 |
| <b>4. Conclusão</b> .....   | 25 |
| <b>5. Trabalhos Futuros</b> .....   | 26 |
| <b>6. Referências Bibliográficas</b> .....                                      | 27 |

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, em função da escassez de reservas energéticas disponíveis e do crescimento da demanda energética mundial, tem-se observado a necessidade de busca por fontes de energia que sejam alternativas às fontes convencionais. De acordo com projeções feitas pela Agência Internacional de Energia (IEA), estima-se que no ano de 2035 terá ocorrido um crescimento maior que 30% da demanda energética mundial. Tais projeções impulsionam o desenvolvimento de sistemas de energia mais eficientes, confiáveis e baratos. Diante disso, as fontes de energia renováveis têm ganhado, progressivamente, mais espaço e, segundo cálculos feitos pela IEA, elas representarão um terço da produção mundial em 2035.

Dentre as alternativas energéticas disponíveis, uma delas se destaca pelo fato de ser gratuita e proveniente de uma fonte inesgotável: a energia solar. De acordo com a Agência Internacional de Energia, a energia renovável com a maior projeção de crescimento, até o ano de 2020, é a solar. A Figura 1 ilustra a perspectiva de crescimento mundial da produção de energia fotovoltaica, até o ano de 2020.

Figura 1 – Perspectiva mundial da produção de energia fotovoltaica.



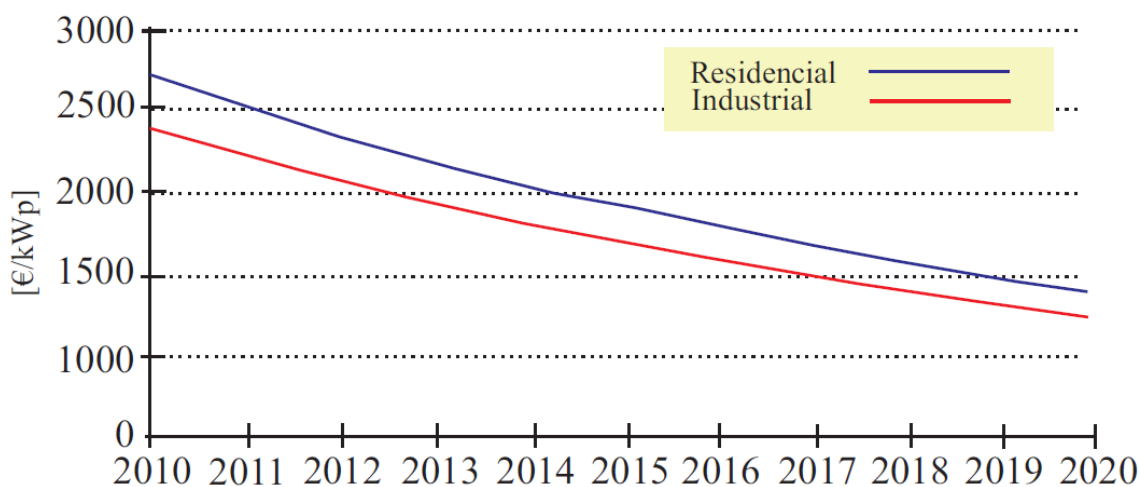
Fonte: (BARRETO, 2014)

Apesar da perspectiva de crescimento, a tecnologia fotovoltaica continua a apresentar os inconvenientes: de ser cara, no que diz respeito à implementação do sistema fotovoltaico; e de possuir rendimento muito baixo, no que diz respeito à eficiência de conversão (BARRETO, 2014). Ainda com a atual política de redução do

custo dos módulos fotovoltaicos, a geração de energia fotovoltaica ainda é de custo elevado, se comparada a outras tecnologias de geração de energia.

No Brasil, a tecnologia fotovoltaica ainda requer grande investimento e é considerada uma das tecnologias mais caras do mercado. Entretanto, esse custo tende a diminuir ao passar dos anos. Na Figura 2 é apresentada a perspectiva do custo de implementação dos sistemas fotovoltaicos até o ano de 2020, de acordo com estudos realizados por Breyer e Gerlach (2013).

Figura 2 – Perspectiva do custo de implementação dos sistemas fotovoltaicos.



Fonte: (BARRETO, 2014)

Além do custo elevado, a baixa eficiência de conversão é outra desvantagem inerente à tecnologia fotovoltaica, pois torna indispensável que sejam utilizadas grandes áreas para a captação da energia solar em quantidade satisfatória. Os sistemas fotovoltaicos, apesar da evolução tecnológica e da descoberta de novos materiais, ainda são considerados de muito baixo rendimento.

Os materiais utilizados na fabricação dos módulos fotovoltaicos são os semicondutores: silício cristalino c-Si; silício amorfo hidrogenado a-Si:H ou simplesmente a-Si; o telureto de cádmio CdTe e os compostos relacionados ao dissulfeto de cobre e índio  $\text{CuInSe}_2$  ou CIS (COSTA, 2010).

No entanto, apesar da evolução de pesquisas sobre semicondutores empregados no processo de fabricação dos módulos, constata-se que o retorno do capital aplicado na instalação de um sistema fotovoltaico pode demorar de 10 e 15 anos. Levando-se em conta que os componentes fotovoltaicos (painéis e conversores) possuem, em média,

vida útil de 20 anos, conclui-se que a taxa de retorno desse investimento é baixa. A Tabela 1 ilustra a eficiência e o custo de sistemas fotovoltaicos de acordo com o material semicondutor empregado no processo de fabricação do módulo.

Tabela 1 – Eficiência e custo de sistemas fotovoltaicos de acordo com o material semicondutor empregado no processo de fabricação do módulo.

| MATERIAL   | EFICIÊNCIA DOS MÓDULOS |           |
|--|------------------------|-----------|
|  | Laboratório            | Comercial |
| Silício Monocristalino                             | 19%                    | 12%       |
| Silício Policristalino                             | 20%                    | 13%       |
| Arsenieto de gálio (GaAs)                          | 8%                     | Xxx       |
| Silício Amorfo                                     | 9%                     | 7%        |
| Telureto de Cádmiio (CdTe)                         | 10%                    | 6%        |
| Deseleneto de cobre e índio (CuInSe <sub>2</sub> ) | 9%                     | 5%        |

Dessa forma, o elevado custo de implementação dos sistemas fotovoltaicos e o baixo rendimento na conversão de energia dos módulos têm incentivado a busca por estratégias de controle que melhorem a eficiência desses sistemas.

Nesse sentido, se faz necessário desenvolver estratégias de seguidor de máxima potência, para que o módulo fotovoltaico trabalhe sempre em torno do seu rendimento máximo. É dentro desse contexto que o rastreamento do ponto de potência máxima (MPPT, do inglês, *maximum power point tracking*) é essencial, pois seu correto desempenho garantirá o melhor aproveitamento da energia elétrica convertida no módulo e, portanto, a eficiência de conversão do sistema aumentará.

Portanto, o MPPT monitora, continuamente, a energia que está sendo convertida no módulo, garantindo que, para qualquer condição de temperatura e irradiância, seja entregue a potência máxima disponível ao sistema ao qual o módulo está conectado. Ou seja, o MPPT aumenta a eficiência de conversão de energia do sistema de geração.

## **1.1. OBJETIVOS**

Tomando como base o que foi apresentado, este trabalho objetiva: simular um sistema fotovoltaico específico, no qual o rastreamento da potência máxima é feito pelo MPPT Perturba e Observa; e verificar a eficiência desse método, diante de variações das condições de temperatura e radiação solar que o sistema fotovoltaico está submetido.

Além disso, o trabalho objetiva fazer o estudo dos principais métodos, diretos e indiretos, de rastreamento do ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos, com foco no perturba e observa.

Outro objetivo desse trabalho é fornecer um guia detalhado de modelagem e simulação do MPPT P&O, utilizando o programa PSIM.

## **1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO**

O trabalho é dividido em quatro seções. A primeira, Introdução, aborda as considerações gerais, o objetivo do trabalho e sua estrutura.

Na segunda, Rastreamento do Ponto de Máxima Potência em Sistemas Fotovoltaicos, são destacados os principais métodos, diretos e indiretos, de rastreamento do ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos.

Na terceira, Simulação e Resultado do MPPT P&O, são mostrados os passos necessários para a construção da simulação do sistema fotovoltaico com rastreamento do ponto de máxima potência pelo método perturba e observa. Além disso, é feita a análise dos resultados obtidos.

Na quarta, Conclusões, são abordadas as considerações gerais e as conclusões sobre o trabalho realizado.

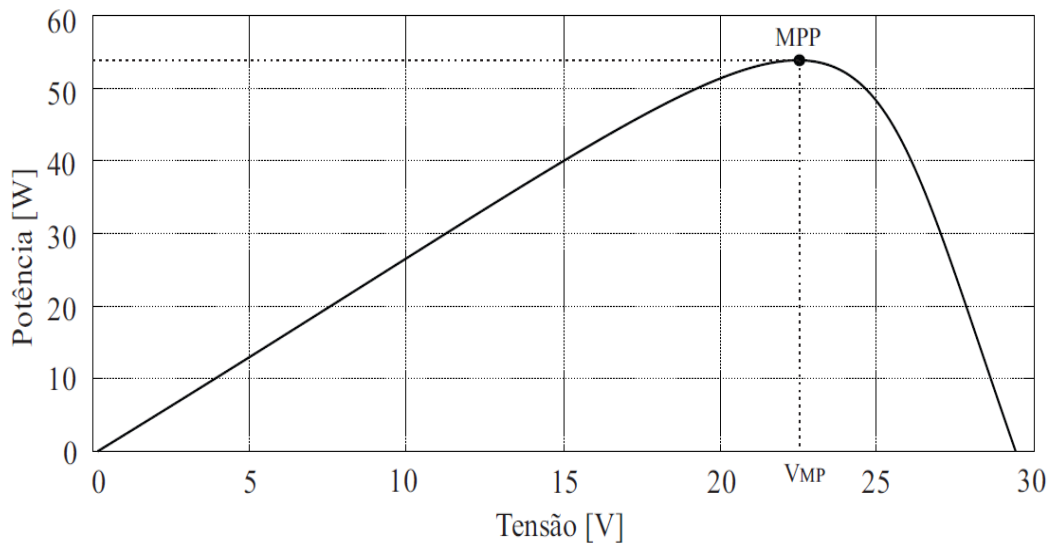
## 2. RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A modelagem matemática dos módulos fotovoltaicos é feita por meio de equações exponenciais e não lineares de ordem elevada. Tais equações relacionam corrente terminal e a tensão do módulo fotovoltaico com as condições de irradiância, temperatura e características físicas construtivas, advindas da dopagem do material.

A partir das características do módulo, nota-se que quanto maior for a corrente terminal, a tensão do módulo tende a diminuir, até que a corrente terminal alcance seu valor máximo (corrente de curto circuito  $I_{cc}$ ). Para cada condição ambiental de temperatura e irradiância solar, existe um ponto de trabalho no qual a potência fornecida, pelo módulo, é a máxima possível. Esse ponto é denominado de Ponto de Máxima Potência (MPP, do inglês *Maximum Power Point*).

Na Figura 3, apresenta-se a curva característica da potência fornecida pelo módulo fotovoltaico, em função da tensão terminal. Observa-se, nessa curva, que há uma tensão específica para a qual a potência, fornecida pelo módulo, é máxima. Tal tensão é chamada de tensão de máxima potência  $V_{MP}$  (do inglês, *voltage of maximum power*). É conveniente destacar que a tensão de potência máxima não é fixa e pode variar de acordo com as condições de irradiação solar e de temperatura à qual o módulo está submetido. Isto é, pequenas variações de temperatura ambiente, irradiação solar ou mesmo variações de temperatura do próprio módulo fotovoltaico podem fazer com que o módulo opere num ponto diferente do MPP e, conseqüentemente, a eficiência do sistema fotovoltaico pode ir a um patamar abaixo do esperado.

Figura 3 – Característica potência tensão (P – V) do módulo fotovoltaico.

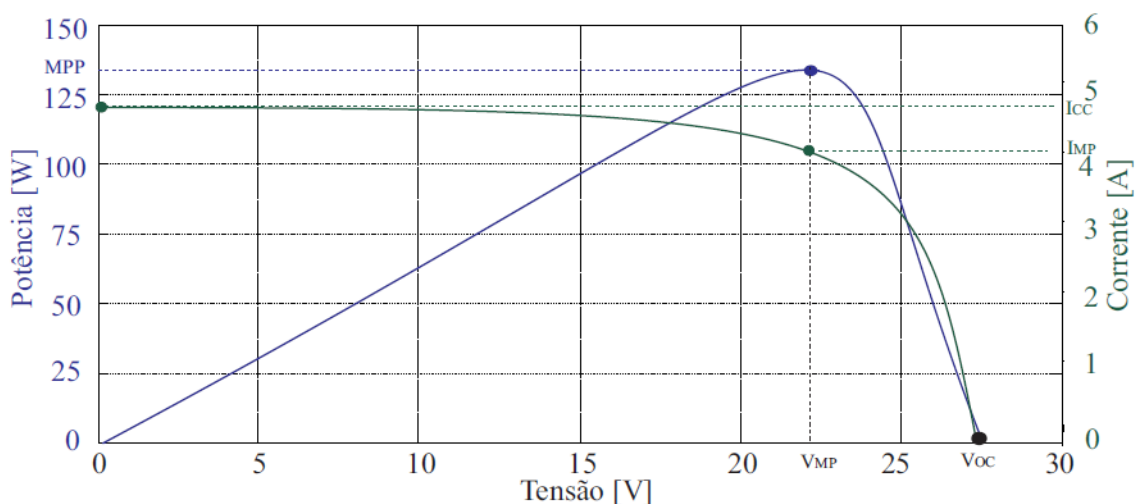


Fonte: (BARRETO, 2014)

É relevante evidenciar, também, que a característica potência tensão (P – V) é dependente do material utilizado na fabricação do módulo fotovoltaico. Assim, diferentes módulos submetidos às mesmas condições de temperatura e irradiação solar não necessariamente possuirão mesmo MPP.

Na Figura 4, ilustra-se o efeito da não-linearidade no comportamento dinâmico do módulo fotovoltaico, por meio das características potência tensão (P – V) e corrente tensão (I – V). Pode-se observar que quando o módulo opera na região próxima à corrente de curto-circuito  $I_{cc}$ , ocorrem pequenas variações de corrente e, dessa forma, o módulo funciona como fonte de corrente. Já quando o módulo opera na região próxima à  $V_{oc}$ , ocorrem pequenas variações de tensão e o módulo funciona como fonte de tensão. Sendo assim, a potência máxima fornecida pelo módulo pode ser obtida tanto pela regulação da corrente terminal quanto pela alteração da tensão terminal. Portanto, isso mostra que o MPP está associado a uma tensão terminal de máxima potência  $V_{MP}$  e a uma corrente terminal de máxima potência  $I_{MP}$ .

Figura 4 – Características potência tensão (P – V) e corrente tensão (I – V).



Fonte: (BARRETO, 2014)

Quanto à conexão do sistema fotovoltaico à rede elétrica, existem dois tipos: conexão utilizando dois estágios e conexão utilizando estágio simples. Na conexão utilizando dois estágios, há, entre o painel fotovoltaico e a rede, um conversor CC-CC, responsável pelo controle do ponto de potência máxima, e outro CC-CA, responsável pela injeção de potência no sistema elétrico. Já na conexão utilizando estágio único, há, entre o painel fotovoltaico e a rede, apenas um conversor CC-CA, responsável tanto pelo controle do ponto de potência máxima como pela injeção de potência no sistema elétrico.

## 2.1. MÉTODOS MPPTs DIRETOS

Os métodos MPPTs diretos são aqueles que usam medições de grandezas elétricas para o rastreamento do ponto de máxima potência. Esses métodos não necessitam do conhecimento das características físicas do módulo e, por esse motivo, são denominados de métodos de busca direta. Além disso, tais métodos são mais eficientes e proporcionam, ao sistema fotovoltaico, rendimento elevado, pelo fato de que o ponto de potência máxima, nessa configuração, não depende das condições de operação do sistema fotovoltaico. Nesta seção serão destacados os principais métodos diretos de rastreamento do ponto de máxima potência: perturba e observa; condutância incremental; realimentação de tensão ou corrente e redes neurais artificiais.

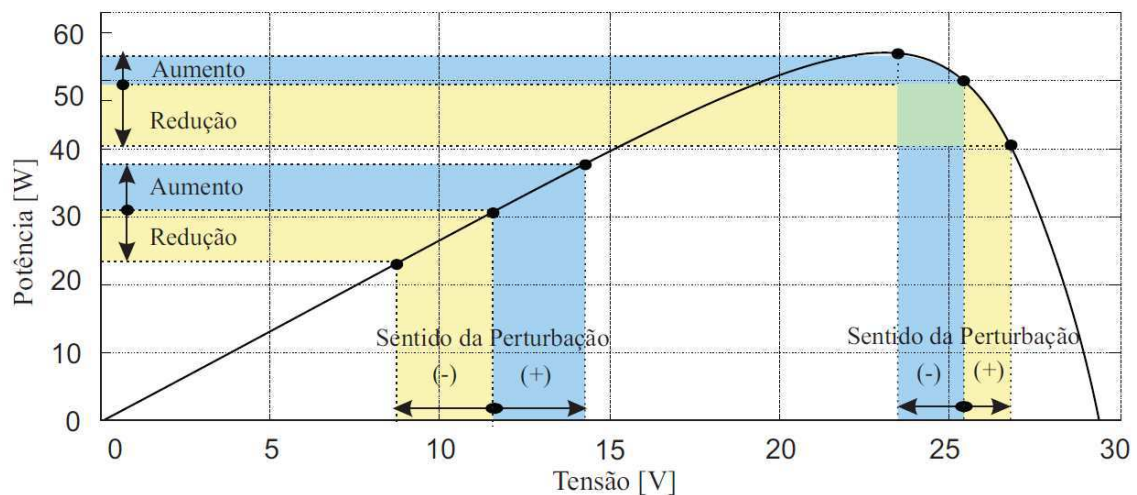


### 2.1.1. Perturba e Observa (P&O)

O método de rastreamento do ponto de máxima potência Perturba e Observa (P&O) é um dos mais eficientes e simples de serem utilizados em sistemas fotovoltaicos. Tal método insere perturbações no sistema e observa sua resposta.

A Figura 5 ilustra, para dois pontos de operação distintos, o comportamento da variação da potência em função da perturbação de tensão aplicada. Se o incremento na perturbação da tensão resultar no aumento da potência fornecida pelo módulo, significa dizer que o sistema está convergindo para atingir o ponto de máxima potência. Já se o incremento na perturbação da tensão resultar na diminuição da potência fornecida pelo módulo, significa dizer que o sistema está divergindo para atingir o ponto de máxima potência. Na Tabela 2, destaca-se a visão geral do algoritmo Perturba e Observa.

Figura 5 – Variação da potência fornecida pelo módulo em função da perturbação.



Fonte: (BARRETO, 2014)

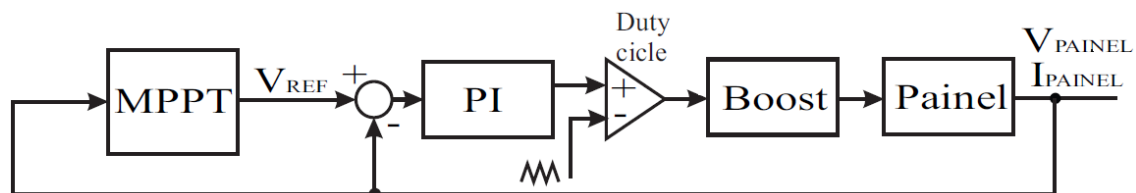
Tabela 2 – Visão geral do algoritmo Perturba e Observa (P&O).

| Sentido da Perturbação atual | Varição de Potência | Sentido da Próxima Perturbação |
|------------------------------|---------------------|--------------------------------|
| Positiva                     | Positiva            | Positiva                       |
| Positiva                     | Negativa            | Negativa                       |
| Negativa                     | Positiva            | Negativa                       |
| Negativa                     | Negativa            | Positiva                       |

O rastreamento do ponto de máxima potência pelo método P&O convencional é feito inserindo-se incrementos ou decrementos, fixos e sucessivos, no valor da tensão de referência, a depender dos valores observados da potência fornecida pelo módulo, de tal maneira que, em regime permanente, a potência fornecida seja a mais próxima possível do MPP. No entanto, como a perturbação é permanente, observa-se que em regime permanente haverá oscilações da potência fornecida em torno do ponto de potência máxima. Tais oscilações dependem da intensidade da perturbação inserida. Dessa forma, fica clara a importância de se fazer a análise prévia do sistema envolvido, de tal forma que se possa determinar o melhor valor para o incremento (ou decremento) no referencial de tensão. Esse valor varia de acordo com as configurações do sistema em análise.

Na Figura 6, ilustra-se o diagrama de blocos do método P&O convencional. Observa-se que o MPPT fornece a tensão de referência, a qual sofre incrementos que dependem das observações da variação de potência fornecida pelo módulo. O controlador PI é responsável por fazer a regulação da tensão de referência. Além disso, é conveniente destacar que a perturbação inserida, no referencial de tensão, possui valor fixo nesse método.

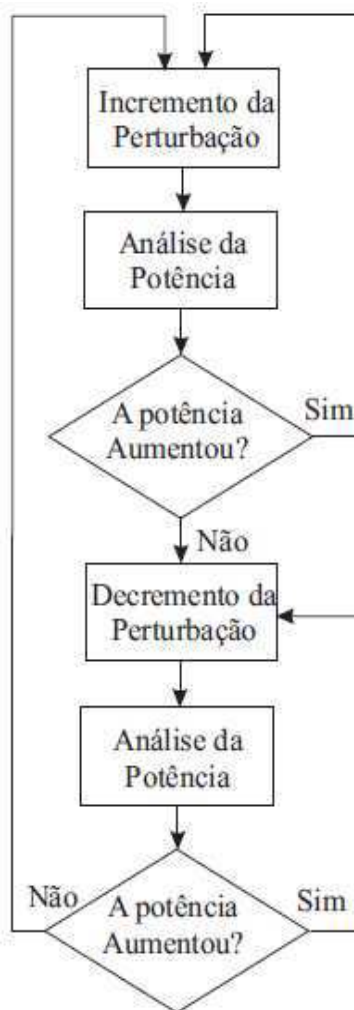
Figura 6 – Diagrama de blocos do MPPT P&O convencional.



Fonte: (BARRETO, 2014)

Na Figura 7, apresenta-se o fluxograma representativo da sequência de instruções e execuções implementadas no MPPT perturba e observa. Sempre após o incremento da perturbação no referencial de tensão, ocorre a análise da potência fornecida pelo módulo: se ela tiver aumentado, ocorrerá novo incremento da perturbação e posterior análise de potência; se ela tiver diminuído, ocorrerá decremento da perturbação e posterior análise de potência. E esse processo repete-se periodicamente, sempre visando aumentar a potência fornecida pelo sistema fotovoltaico.

Figura 7 – Fluxograma do MPPT P&O convencional.

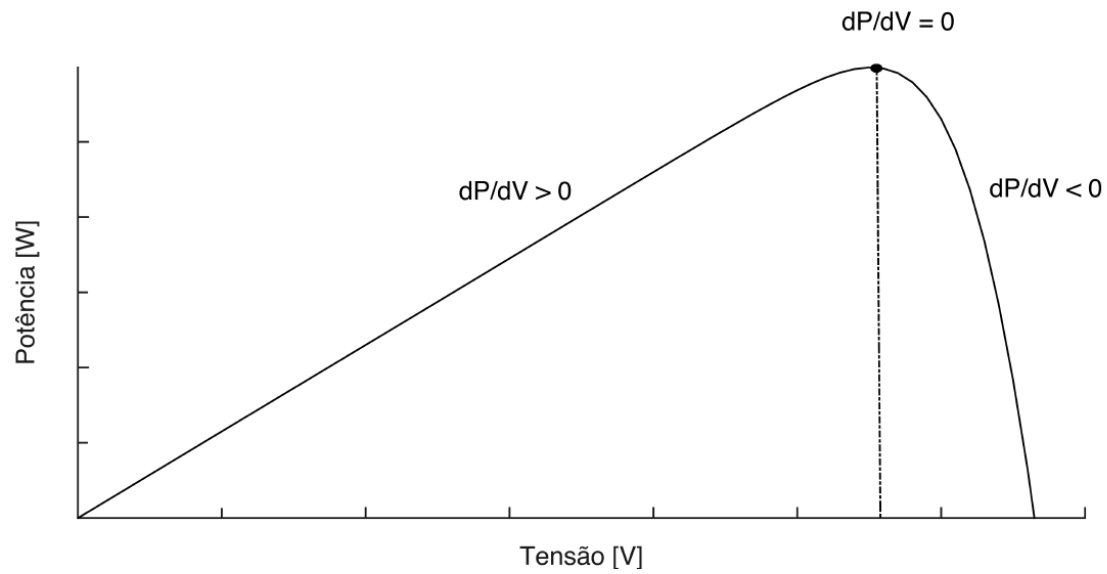


Fonte: (BARRETO, 2014)

### 2.1.2. Condutância Incremental

Esse método regula a tensão do módulo fotovoltaico de acordo com a tensão no ponto de potência máxima. De acordo com a característica P-V do módulo, observa-se que a derivada da potência fornecida, em relação à tensão, é: positiva, se o ponto de ponto de operação estiver à esquerda do ponto de máxima potência; negativa, se o ponto de operação estiver à direita do ponto de máxima potência; ou nula, se o ponto de operação coincidir com o ponto de potência máxima. A Figura 8 ilustra, graficamente, esse comportamento.

Figura 8 – Curva P-V indutância incremental.



Fonte: (SOUSA, 2016)

No ponto de máxima potência, a derivada da potência fornecida pelo módulo em relação à tensão é nula. Matematicamente:

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

A partir dessa relação, pode-se desenvolver as equações que avaliam os parâmetros neste método, para diferentes pontos de operação:

- Operação no ponto de máxima potência:

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

- Operação à esquerda do ponto de máxima potência:

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}. \quad (3)$$

- Operação à direita do ponto de máxima potência:

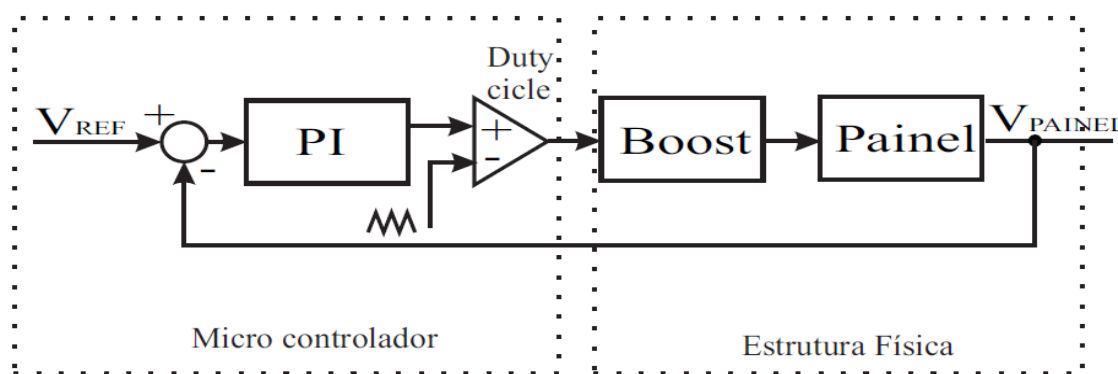
$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}. \quad (4)$$

Caso haja variação das condições de temperatura ou radiação solar, ocorrerá também mudança da condutância. Conseqüentemente, será calculada a nova tensão de referência, baseando-se no ponto de operação atual do sistema. Essa nova tensão de referência é calculada por meio da malha de controle interno, a qual utiliza o controle PI ou por histerese.

### 2.1.3. Realimentação de Tensão ou Corrente

A realimentação de tensão ou corrente é uma configuração de controle que promove mudanças na tensão ou na corrente, periodicamente, de acordo com o ciclo de trabalho do conversor CC-CC, visando fazer com que o ponto de operação do sistema esteja sempre próximo do ponto de potência máxima. Isto é, ao final de cada ciclo, o sistema é realimentado com a tensão (ou corrente), que passa por um controlador PI ou por histerese, e a saída do controlador atua no ciclo de trabalho do conversor, fazendo que a saída do módulo (tensão ou corrente) se aproxime do ponto de referência, ou seja, do ponto de potência máxima (SALAS et al., 2006). A Figura 9 ilustra o diagrama de blocos do MPPT por realimentação de tensão.

Figura 9 – Diagrama de blocos do MPPT por realimentação de tensão.



Fonte: (BARRETO, 2014)

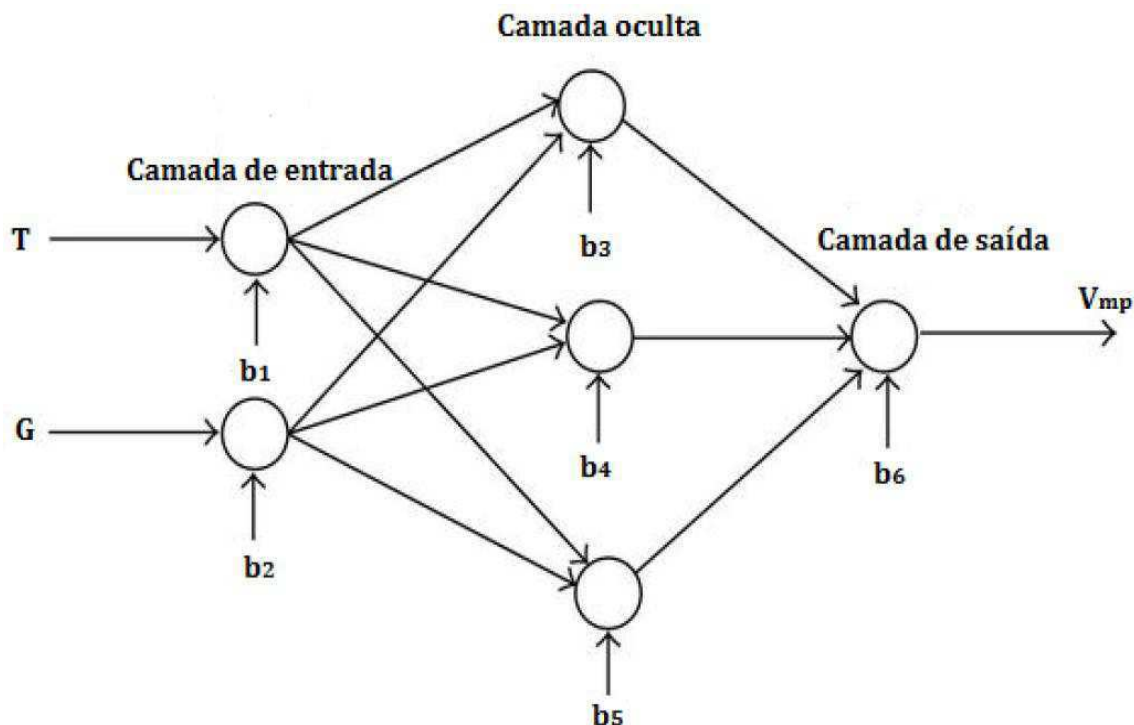
A desvantagem desse método é que ele possui limitações quando ocorrem variações nas condições ambientes de radiação solar e temperatura. Além disso, a utilização desse esquema de seguidor é inapropriada para sistemas que possuem baterias para o armazenamento de energia, tendo em vista que as mesmas fornecem uma determinada tensão que é fixa.

### 2.1.4. Rede Neural Artificial (RNA)

As Redes Neurais Artificiais (RNAs) são modelos matemáticos inspirados nos princípios de funcionamento dos neurônios biológicos e na estrutura do cérebro. Elas funcionam de forma semelhante à técnica de aprendizado do neurônio humano para resolver problemas matemáticos, isto é, adquirem conhecimento baseado na experiência.

A rede neural para rastreamento do ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos necessita do “treinamento do algoritmo”. Para tanto, a RNA modelada e constituída pelas camadas: *de entrada*, onde são injetados na RNA os dados referentes às condições ambientais de radiação solar e temperatura; *intermediárias*, compostas por funções de ativação e somadores, que servem para adicionar os sinais de entrada multiplicados pelos seus respectivos pesos; *de saída*, responsáveis por fornecer a tensão no ponto de máxima potência (ARTHISHRI, 2014). A Figura 10 ilustra o esquemático da RNA para o rastreamento do ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos.

Figura 10 – RNA para MPPT em sistemas fotovoltaicos.



Fonte: (SOUSA, 2016)

## **2.2. MÉTODOS MPPTs INDIRETOS**

Os métodos MPPTs indiretos são aqueles que usam um banco de dados com algumas características físicas do módulo para calcular o ponto de máxima potência. Tal banco de dados é previamente definido de acordo com o comportamento típico do módulo fotovoltaico diante de mudanças nos valores tensão e de temperatura (HOHM; ROPP, 2000).

Em alguns métodos indiretos, as características físicas necessárias já são fornecidas pelo próprio fabricante do módulo. Em outros, é necessária a realização de experimentos para obter as constantes e as características requeridas, dependendo do método.

Dessa forma, os métodos indiretos rastreiam o ponto de potência máxima de maneira restrita, isto é, o alcance do ponto de máxima potência só é possível para os módulos ensaiados e não pode ser realizado nos outros módulos com características diferenciadas. Além disso, tais métodos são eficientes apenas para uma condição específica de radiação solar e temperatura e mostram-se ineficientes quando ocorre variação das condições de operação.

### **2.2.1. Análise de Tabela**

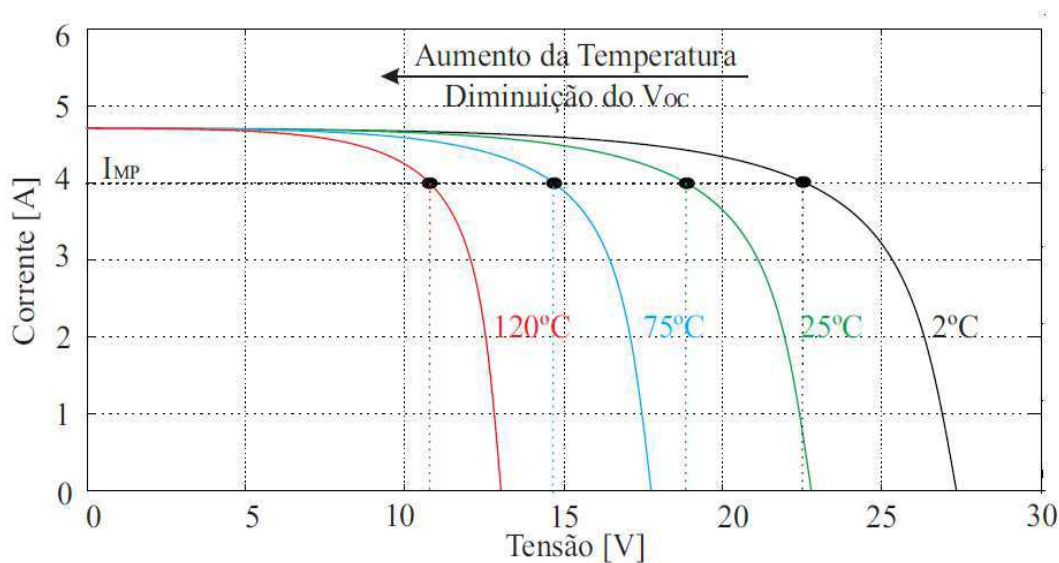
Esse método, desenvolvido por Ibrahim et al. (1999), sugere a utilização de tabela para rastrear o ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos. A tabela é armazenada na memória do processador digital de sinais. Na tabela, são armazenados diversos valores de tensão de referência, para várias condições de temperatura e radiação solar diferentes. O método faz a comparação entre a tensão de circuito aberto medida, do módulo, e a tensão de referência no ponto de máxima potência, considerando uma condição específica de temperatura e radiação solar.

O grande inconveniente desse método é a limitação de memória para armazenamento dos dados de referência. Dessa forma, por mais que exista grande variedade de dados na tabela, para diversas condições de operação, nunca será possível armazenar os dados referentes a todas as condições de operação possíveis (ISRAEL, 2015).

### 2.2.2. Tensão Constante

O rastreamento do ponto de máxima potência pelo método indireto de tensão constante baseia-se no fato de que a razão entre a tensão de máxima potência e a tensão de circuito aberto é aproximadamente constante. Tal fato ocorre devido à tensão de circuito aberto variar basicamente em função da mudança de temperatura. A Figura 11 ilustra esse comportamento, considerando fixa a radiação solar.

Figura 11 – Característica I – V do módulo com variação de temperatura.



Para implementar esse método, mede-se a tensão de circuito aberto e então a constante, dada pela razão entre a tensão de máxima potência e a tensão de circuito aberto, é continuamente utilizada até que se chegue ao ponto de máxima potência. (SOUSA, 2016).

### 2.2.3. Corrente Constante

O método de corrente constante é análogo ao método de tensão constante, descrito anteriormente. O seguidor MPPT do tipo corrente constante baseia-se no fato de que a razão entre a corrente no ponto de potência máxima e a corrente de curto-circuito é aproximadamente constante (SOUSA, 2016).



Tal aproximação linear depende da característica física do módulo, podendo a corrente de máxima potência variar entre 78% e 92% da corrente de curto-circuito. O inconveniente desse método é: ter que realizar curto-circuito no arranjo dos módulos fotovoltaicos e possuir pouca eficiência, pois não se garante um ponto certo de operação.

### 3. SIMULAÇÃO E RESULTADOS DO MPPT P&O

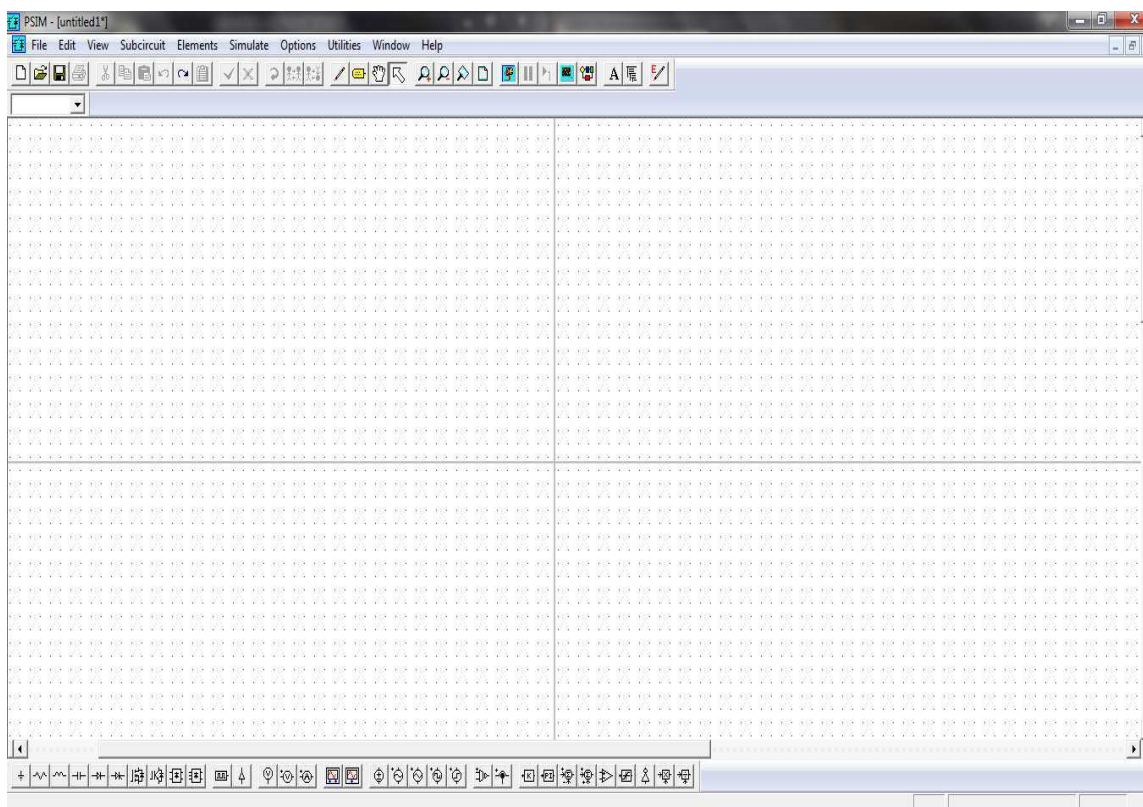
Neste capítulo são descritos detalhes da implementação e da simulação do rastreamento do ponto de máxima potência pelo método perturba e observa, em um sistema fotovoltaico específico. Para realizar tal simulação, utilizou-se o software PSIM, o qual é especialmente projetado para eletrônica de potência.

#### 3.1. O PSIM

O PSIM é um software projetado, especialmente, para a simulação de circuitos de eletrônica de potência.

Além de poder ser utilizado em quase todos os tipos de circuitos, digitais ou analógicos, o PSIM apresenta interface gráfica amigável, simulação rápida e apresentação de formas de onda semelhante à tela de um osciloscópio. A Figura 12 ilustra a janela do PSIM.

Figura 12 – Janela inicial do PSIM.



Fonte: o próprio autor

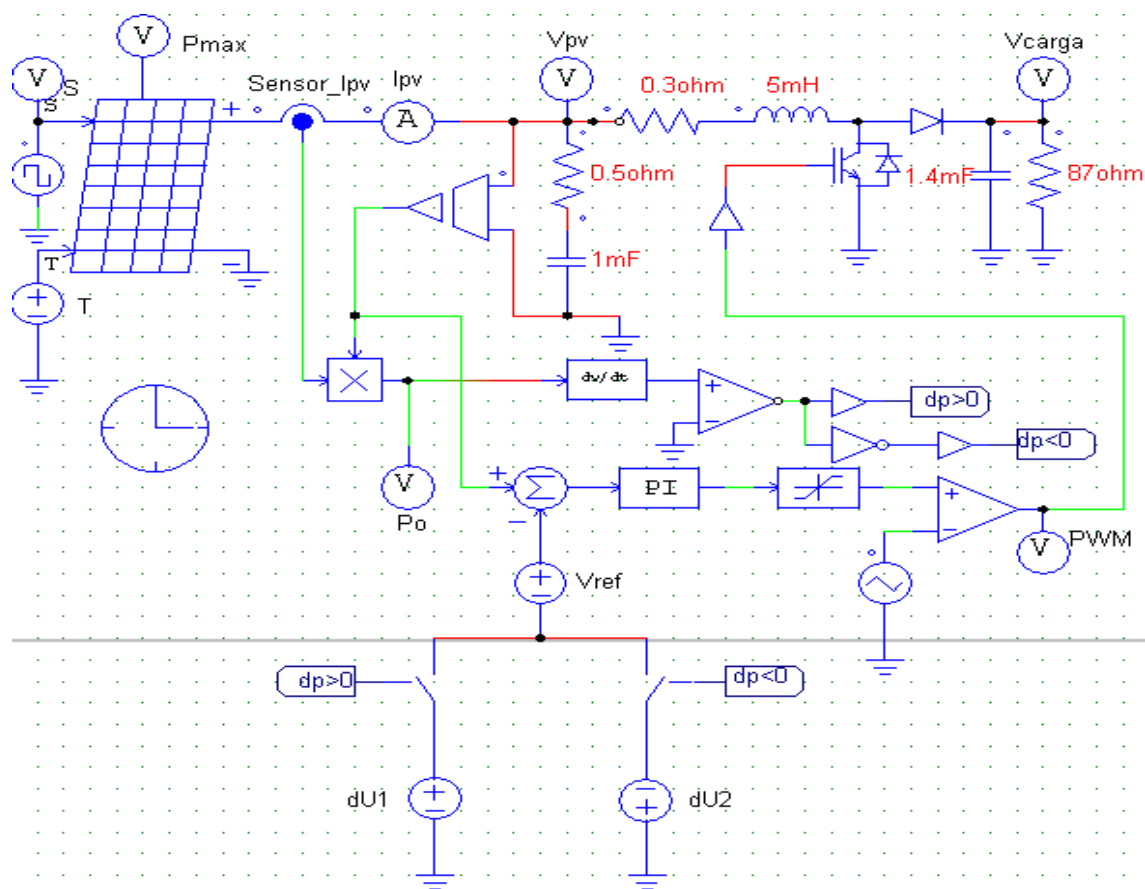
O PSIM também é muito útil para simular quase todos os tipos de circuitos, cobrindo uma vasta faixa de aplicações. O software utiliza comandos que são armazenados nos “arquivos de comando”, os quais, por sua vez, são lidos pelo simulador PSIM. Tais comandos são simples de usar e aprender.

É conveniente destacar, também, que o PSIM não diferencia a ordem de grandeza dos circuitos (microvolts ou megavolts). Dessa forma, cabe ao usuário ter conhecimentos teóricos para avaliar se os resultados da simulação são compatíveis ou não com os resultados esperados.

### 3.2. SISTEMA ANALISADO

O sistema elétrico analisado é composto por: módulo fotovoltaico; conversor elevador de tensão boost; seguidor de máxima potência perturba e observa; e carga resistiva. A Figura 13 ilustra o sistema fotovoltaico, por completo, montado no PSIM.

Figura 13 – Sistema fotovoltaico montado no PSIM.



Fonte: o próprio autor

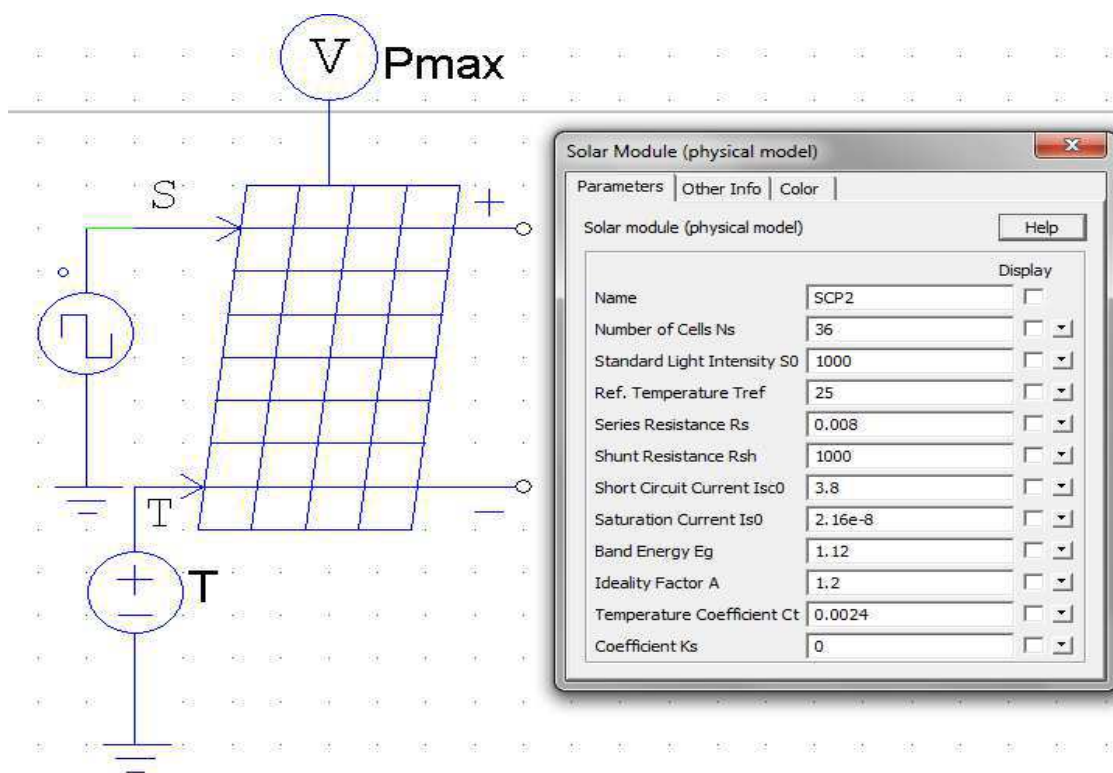
As subseções a seguir irão ilustrar separadamente cada elemento constituinte do sistema fotovoltaico implementado no PSIM.

### 3.2.1. Módulo Fotovoltaico

O PSIM fornece modelos físicos já prontos de módulos fotovoltaicos. Para realizar essa simulação, utilizou-se o elemento *Solar Module (physical model)*, disponível em: *Elements | Power | Renewable Energy*.

Ao clicar duas vezes sobre o elemento *Solar Module (physical model)*, pode-se ajustar os parâmetros do módulo solar de acordo com suas características físicas, as quais variam dependendo do módulo. Alguns parâmetros ajustáveis do módulo são: número de células; intensidade de radiação solar padrão; temperatura de referência, resistência série, resistência *shunt*; corrente de saturação, fator de idealidade; coeficiente de temperatura; dentre outros. Tais parâmetros são preenchidos de acordo com os datasheets dos módulos. Na Figura 14 são ilustrados os valores dos parâmetros usados neste trabalho.

Figura 14 – Módulo solar e parâmetros do modelo físico.



Fonte: o próprio autor

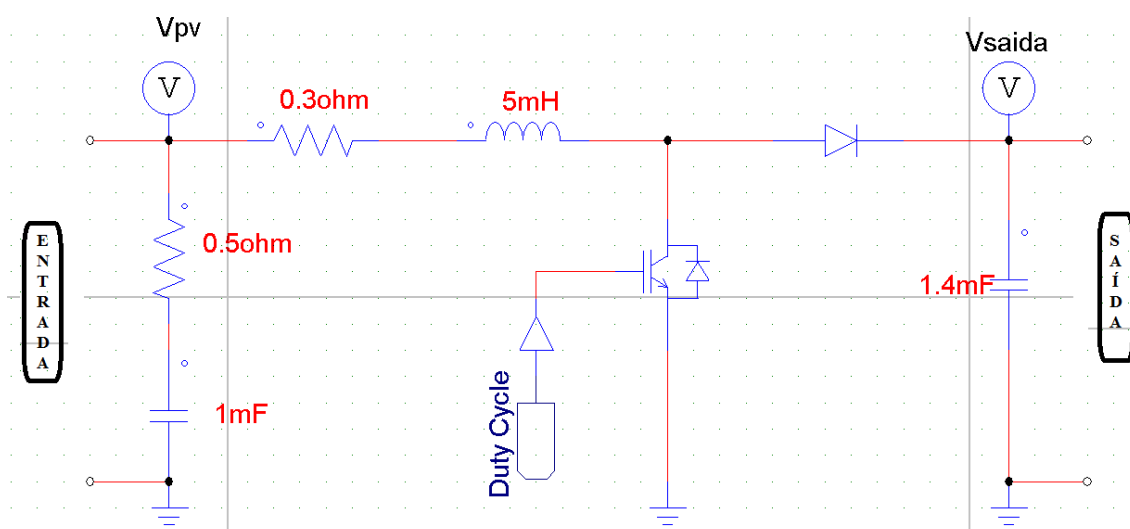
É conveniente destacar que o módulo solar requer duas entradas: temperatura e radiação solar. A temperatura  $T$  foi ajustada por uma fonte de tensão DC, cujo valor de amplitude foi 25 V (para simular a temperatura padrão de 25°C). Já a radiação solar  $S$  foi simulada por uma fonte de tensão que fornece um trem pulsos, cujos valores de amplitude variam na faixa compreendida entre 1kV e 800V (para simular valores diários típicos de radiação solar).

### 3.2.2. Conversor CC-CC Boost

O conversor CC-CC boost é inserido entre o painel fotovoltaico e a carga. É por meio do controle do seu ciclo de trabalho que é possível rastrear o ponto de potência máxima do sistema fotovoltaico. Além disso, o conversor boost é responsável por elevar a tensão de saída do módulo fotovoltaico.

O módulo fotovoltaico simulado neste trabalho possui tensão de saída 16V. De acordo com especificações de projeto, pode-se ajustar os valores dos parâmetros do conversor boost para obter a tensão de saída desejada. Neste trabalho, a tensão escolhida para a saída do conversor (tensão aplicada à carga resistiva) foi de 64V. A Figura 15 ilustra o conversor boost implementado no PSIM.

Figura 15 – Conversor boost.



Fonte: o próprio autor

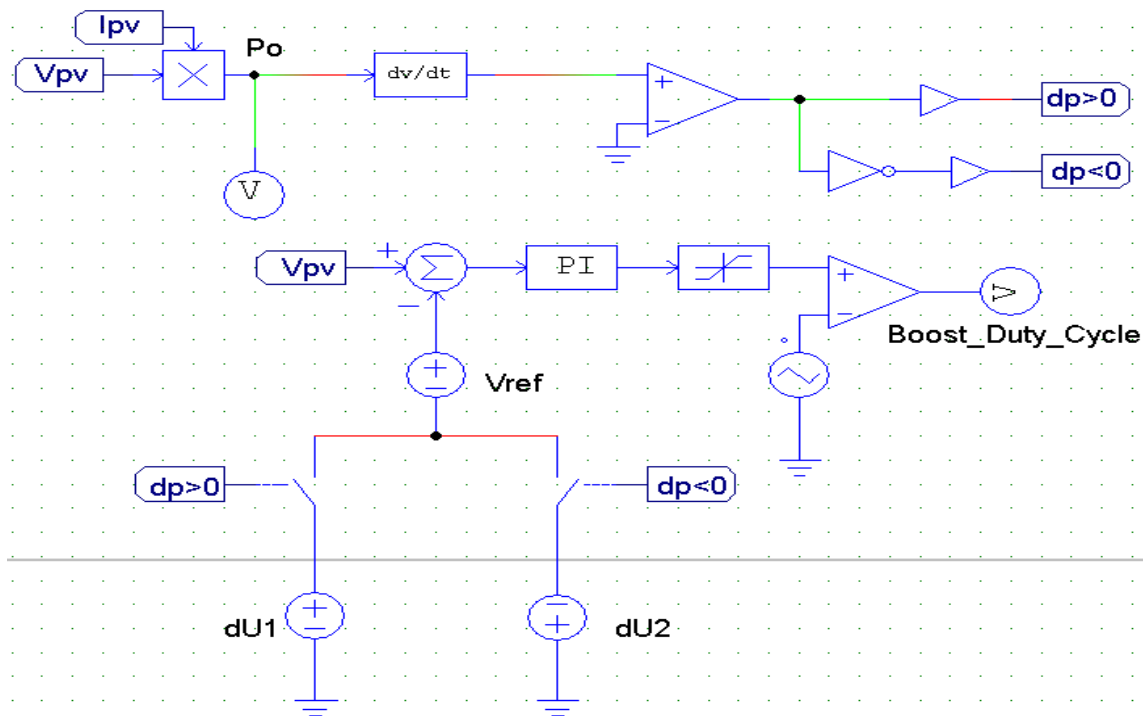
É válido destacar que o valor do *Duty Cycle* do conversor é controlado pelo MPPT perturba e observa, cuja implementação será detalhada no subtópico a seguir.

### **3.2.3. MPPT P&O e Malha de Controle**

Inicialmente, o método P&O realiza medições de tensão e corrente no terminal positivo do módulo fotovoltaico, por meio de sensores de tensão e de corrente. Posteriormente, tais valores passam pelo multiplicador, que por sua vez fornece os valores da potência instantânea fornecida pelo módulo fotovoltaico ao longo do tempo. Em seguida, avalia-se a variação da potência fornecida pelo módulo: caso essa variação seja positiva, incrementa-se o valor da tensão de referência, que é de 16V, em 0,1V; caso seja negativa, decrementa-se o valor da tensão de referência em 0,1V.

Em seguida, na malha de controle, compara-se a tensão do módulo fotovoltaico, lida pela sensor, com a tensão de referência, depois de incrementada ou decrementada, e o sinal de erro passa pelo controlador PI, cujo ganho  $K_p$  e constante de tempo  $\tau$  foram ajustados, respectivamente, para: 3 e 1ms. O sinal de saída do controlador passa pelo limitador de tensão e, posteriormente, é comparado com uma onda triangular de frequência 5kHz gerando, assim, o sinal PWM que fornece o valor do ciclo de trabalho do conversor boost. A Figura 16 ilustra os esquemas do MPPT P&O e da malha de controle, implementados no PSIM.

Figura 16 – MPPT P&amp;O e malha de controle.



Fonte: o próprio autor

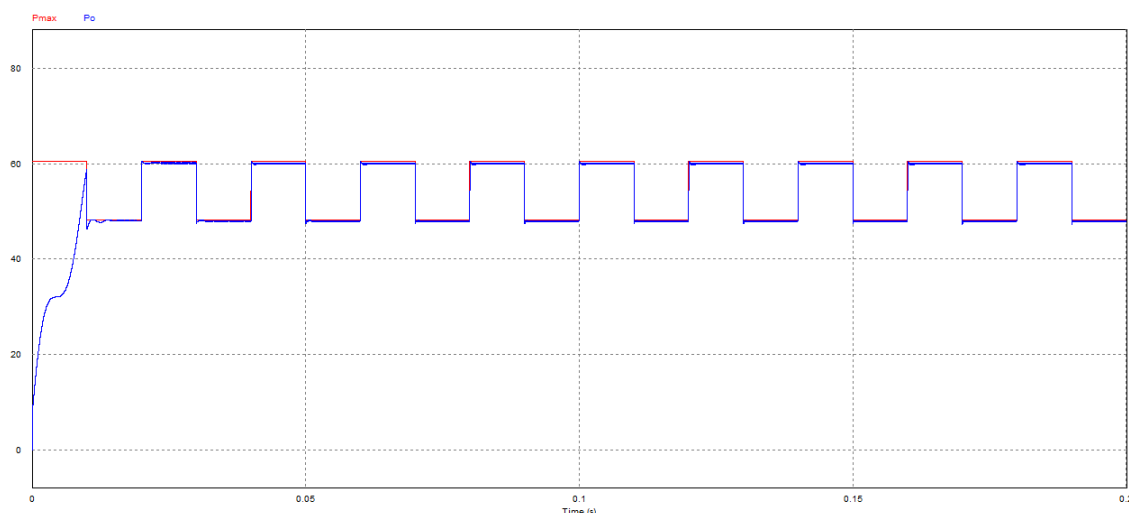
### 3.3. RESULTADOS

Para observação dos resultados, verificou-se o valor da potência máxima  $P_{max}$  que pode ser fornecida pelo módulo e comparou-se esse valor com o da potência observada  $P_o$  que é efetivamente fornecida pelo módulo fotovoltaico, para diferentes condições de radiação solar e de temperatura. Os resultados são mostrados a seguir.

#### 3.3.1. Variação das Condições de Radiação Solar

Para verificar o efeito da variação da radiação solar, manteve-se a temperatura constante em  $25^{\circ}\text{C}$  e aplicou-se um trem de pulsos no terminal de entrada que representa a radiação solar incidente no módulo fotovoltaico, para ver se a potência efetivamente observada no sistema coincide com a potência máxima que pode ser fornecida pelo módulo. Escolheu-se o trem de pulsos pelo fato de que ele apresenta mudanças periódicas de amplitude e, desse maneira, representa bem os níveis de radiação solar. Na Figura 17, são apresentadas as respostas do sistema frente à variações da radiação solar.

Figura 17 – Potência fornecida pelo módulo diante de variações de radiação.



Fonte: o próprio autor

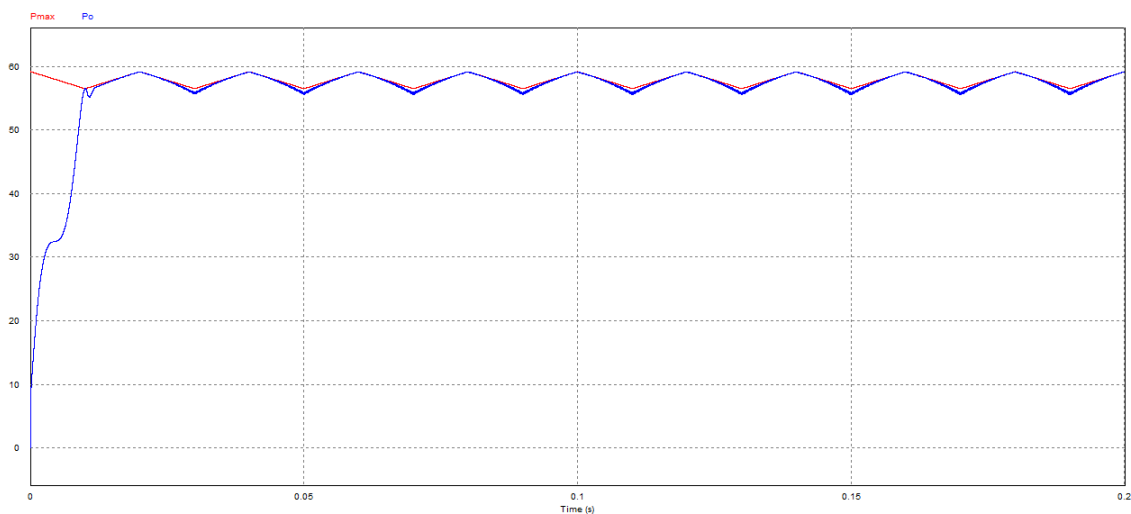
Pode-se observar que o rastreamento da potência máxima, pelo método perturba e observa, funcionou de maneira adequada, pois a potência fornecida pelo módulo atingiu o valor máximo em um tempo relativamente curto de aproximadamente 10ms. Em regime permanente, resposta da potência observada, frente às variações das condições de radiação solar, foi satisfatória, pois seguiu a potência máxima de referência.

### 3.3.2. Variação das Condições de Temperatura

Para verificar o efeito da variação da temperatura, manteve-se a radiação solar constante e aplicou-se um trem de pulsos triangulares no terminal de entrada que representa a temperatura do sistema fotovoltaico, para ver se a potência efetivamente observada no sistema coincide com a potência máxima que pode ser fornecida pelo módulo. Escolheu-se o trem de pulsos pelo fato de que ele apresenta mudanças periódicas de amplitude e, desse maneira, representa bem as variações de temperatura. Na Figura 18, são apresentadas as respostas do sistema frente às variações de temperatura.



Figura 18 – Potência fornecida pelo módulo diante de variações de temperatura.



Fonte: o próprio autor

Pode-se observar que o rastreamento da potência máxima, pelo método perturba e observa, funcionou de maneira adequada, pois a potência fornecida pelo módulo atingiu o valor máximo em um tempo relativamente curto de aproximadamente 10ms. Em regime permanente, a resposta da potência observada, frente às variações das condições de temperatura, foi satisfatória, pois seguiu a potência máxima de referência.

## 4. CONCLUSÃO

Este trabalho descreveu a modelagem e a simulação do método de rastreamento do ponto de máxima potência perturba e observa, para um sistema fotovoltaico simples, onde se desejava garantir a eficiência da geração de energia. Para tanto, foi utilizado o software PSIM, devido a sua interface ser simples, por ser um programa bastante difundido na área de eletrônica de potência e por já possuir modelos físicos prontos dos módulos fotovoltaicos.

O MPPT perturba e observa foi modelado considerando seu algoritmo de funcionamento onde se verifica as variações da potência fornecida pelo módulo fotovoltaico e, a partir dessa análise, determina-se o ciclo de trabalho do conversor CC-CC boost utilizado no sistema.

Foram simulados diferentes casos para observação do comportamento da variação da potência fornecida pelo módulo, frente à mudanças das condições ambientes de temperatura e radiação solar. Os resultados mostraram desempenho satisfatório do método perturba e observa, tendo em vista que diante das variações, tanto de temperatura como de radiação solar, a potência fornecida pelo módulo foi muito próxima da potência máxima.

Portanto, em termos gerais, o trabalho atingiu, de maneira satisfatória, seu objetivo principal de rastrear o ponto de potência máxima, em um sistema fotovoltaico, pelo método perturba e observa.

## 5. TRABALHOS FUTUROS

Como continuação do trabalho realizado, propõe-se:

- Simular o rastreamento do ponto de máxima potência por outros métodos, diretos e indiretos, como por exemplo: condutância incremental, realimentação de tensão ou corrente, corrente constante, tensão constante, análise de tabela, dentre outros;
- Colocar em prática a montagem dos sistemas fotovoltaicos simulados;
- A partir das montagens realizadas, verificar quais métodos são mais eficientes no aumento do rendimento dos sistemas fotovoltaicos;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRAGA, D. C. **Modelagem e Estimação dos Parâmetros de um Módulo Fotovoltaico**. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Brasil, 2008.
- BRUMATTI, M. et al. **Ambiente de simulação para estudos de máximo aproveitamento energético de módulos fotovoltaicos**. Anais do II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, Vitória, ES, 2007.
- CABRAL, C. V. T. et al. **Modelagem e simulação de gerador fotovoltaico**. XV Congresso Brasileiro de Automática, Gramado - RS. Anais do XV Congresso Brasileiro de Automática, v. 1, p. 1–6, 2004.
- CAMPOS, F. F. **Algoritmos Numéricos**. 2a. ed. LTC, 2007. ISBN 9788521615378.
- CASARO, M. M.; MARTINS, D. C. **Enhancement of photovoltaic system model**. XVII Congresso Brasileiro de Automática, Juiz de Fora - MG. Anais do XV Congresso Brasileiro de Automática, Sep. 2008.
- CASTAÑER, L.; SILVESTRE, S. **Modelling Photovoltaic System using Pspice**. John Wiley & Sons Ltd, England, 2002. 358 p. ISBN 0-470-845279.
- CASTRO, R. M. G. **Introdução à energia fotovoltaica**. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, DEEC/Secção de Energia, Energias Renováveis e Produção Descentralizada, Jan. 2004.
- CELIK, A. N.; ACIKGOZ, N. **Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four-and five-parameter models**. Applied energy, v. 84, p. 1–15, 2007.
- BARRETO, R. L. **Contribuições ao Método de Rastreamento de Máxima Potência Para Sistemas Fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Brasil, 2014.