



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

ILTHON LUCAS ARRUDA RAMALHO PEREIRA

**ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE RASTREAMENTO
DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA DE UM PAINEL
FOTOVOLTAICO**

Campina Grande, Paraíba
Março de 2014

ILTHON LUCAS ARRUDA RAMALHO PEREIRA

ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE RASTREAMENTO
DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA DE UM PAINEL
FOTOVOLTAICO

*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: Eficiência Energética

Orientador:

Professor George Rossany Soares de Lira, D.Sc.

Campina Grande, Paraíba
Março de 2014

ILTHON LUCAS ARRUDA RAMALHO PEREIRA

ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE RASTREAMENTO
DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA DE UM PAINEL
FOTOVOLTAICO

*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: Eficiência Energética

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor George Rossany Soares de Lira, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho a minha mãe Hilda e ao meu pai Antonio, por todo apoio, carinho e compreensão, que sempre acreditaram no meu potencial, sacrificando sonhos e lazes por amor e dedicação a mim e meu irmão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Hilda Arruda Ramalho, e ao meu pai, Antonio Pereira, por ter se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, por ter me alimentado com saúde, força e coragem, as quais que foram essenciais para superação de todas as adversidades ao longo desta caminhada.

Agradeço também a toda minha família, em especial meu irmão Othon, que com todo carinho e apoio, não mediu esforços para que eu chegasse a esta etapa da minha vida.

Agradeço ao meu orientador, George, pela paciência e compreensão durante toda a realização deste trabalho.

Agradeço aos meus “companheiros de moradia” João Arthur, Wilson Neto e Lucas Omena, pelo constante incentivo e por tornarem minha temporada em Campina Grande muito mais agradável.

Agradeço aos amigos obtidos no curso, Felipe Fideles, Filipe Lucena, Ítalo Lucena, João Carvalho, Lucas Omena, Maurício Cardoso, Mariana Camurça, Maryana Scoralick, Regeli Suassuna e tantos outros por todos os momentos que partilhamos juntos durante esse curso, as noites em claro, momentos de apreensão e felicidade. Sem vocês eu não teria chegado até aqui.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

“O conhecimento nos faz responsáveis.”

Ernesto Che Guevara.

RESUMO

A geração de energia elétrica proveniente de painéis fotovoltaicos se configura como uma das melhores alternativas para redução dos problemas energéticos. Todavia a conversão deste tipo de energia apresenta um custo relativamente alto. Com o objetivo de minimizar o custo e aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos, o Rastreamento do Ponto de Máxima Potência RPMP para todas as condições climáticas é o fator chave para maximizar a potência entregue para diversas condições de irradiação e temperatura. A essência do Rastreamento do Ponto de Máxima Potência é representada pela implementação de algoritmos dedicados a encontrar e manter a operação próxima ao Ponto de Máxima PotênciaPMP. Neste trabalho serão apresentadas comparações entre metodologias para obtenção do PMPPonto de M`axima Potência propostas na literatura, tecendo comparações pertinentes com relação à quantidade de energia aproveitada, ondulação de tensão em regime e o desempenho dinâmico, realizando uma modelagem do sistema em ambiente Matlab/Simulink®.

Palavras-chave: Energia Solar, técnicas RPMP, Eficiência Energética.

ABSTRACT

The generation of electrical energy from photovoltaic panels is configured as one of the best alternatives to reduce energy problems. However the conversion of this type of energy is relatively costly today. In order to minimize the output power cost, the maximum power point tracking (MPPT) of the PV output for all sunshine conditions is a key factor to maximize the power output of a PV system for assigned conditions of radiation and temperature. The essence of the RPMP is represented by the implemented algorithm devoted to find and maintain the operation near to the Maximum Power Point (MPP). This work presents a careful comparison among the most usual techniques, doing meaningful comparisons with respect to the amount of energy extracted, PV voltage ripple, dynamic response and use of sensors, considering that the models are implemented via MatLab/Simulink®.

Keywords: Solar energy, RPMP Techniques, Energy Efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Diagrama de blocos geral de um sistema de energia fotovoltaica.....	4
Figura 2.2 - Diagrama de blocos do sistema de energia fotovoltaica proposto.	5
Figura 2.3 - Junção PN.....	6
Figura 2.4- Efeito fotovoltaico.	7
Figura 2.5 – Contatos entre os condutores metálicos e o semicondutor.....	8
Figura 2.6- Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.....	8
Figura 2.7 - (a) Curva I-V Típica de um Painel Fotovoltaico; (b) Curva P-V Típica de um Painel Fotovoltaico.....	10
Figura 2.8 – Curvas características de um painel fotovoltaico para diferentes níveis de irradiação solar e temperatura igual a 25°C. (a) Curva I-V. (b) Curva P-V.....	11
Figura 2.9 - Curvas características de um painel fotovoltaico para diferentes valores de temperatura e irradiação solar de 1000 W/m ² . (a) Curva I-V. (b) Curva P-V.....	12
Figura 2.10 - Topologia do conversor Buck.	13
Figura 3.1- Modelo do método da Tensão Constante.....	17
Figura 3.2 - Fluxograma do método P&O.....	18
Figura 3.3 – Tipos de configurações de perturbações possíveis.....	18
Figura 3.4 – Fluxograma do método P&O Modificado.....	20
Figura 3.5 - $\Delta P/\Delta I$ sobre a Curva I versus P.....	20
Figura 3.6 - Fluxograma Condutância Incremental.....	21
Figura 4.1- Diagrama de Blocos Simulink.....	24
Figura 4.2- Simulação do algoritmo P&O, $\Delta D=5\%$	25
Figura 4.3 - Simulação do algoritmo P&O, $\Delta D=2.5\%$	26
Figura 4.4 – Simulação do algoritmo P&O, $\Delta D=1\%$	27
Figura 4.5 - Simulação do Algoritmo Condutância Incremental, $\Delta D=2,5\%$	28
Figura 4.6 - Simulação do método de tensão constante, $\Delta D=2,5\%$	29
Figura 4.7 - Característica Tensão versus Potência.....	30
Figura 4.8 – Característica Tensão versus dP/dI	31
Figura 4.10 – Irradiação solar para simulação das técnicas RPMP.....	34
Figura 4.11 - Comparação dos desempenhos dos algoritmos de RPMP para diferentes valores da irradiação solar.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Definição de Parâmetros	9
Tabela 2- Parâmetros Fundamentais de um painel fotovoltaico	11
Tabela 3- Dados do painel fotovoltaico Kyocera KD245GX LFB2.....	22
Tabela 4 - Resultado das simulações	33

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
2	Sistema de Energia Fotovoltaica	3
2.1	Sistemas de Energia Fotovoltaica	3
2.1.1	Sistemas Autônomos.....	3
2.1.2	Sistemas Conectados a Rede Elétrica	3
2.2.	Sistema de Energia Fotovoltaica.....	4
2.2.1.	Sistema Simplificado Para Implementação do RPMP	4
2.3.	Células, Módulos e Arrays Fotovoltaicos	5
2.3.1	Célula Solar e o Efeito Fotovoltaico	5
2.3.2	Características de um Painel Fotovoltaico	9
2.3.3	Influência da Irradiação Solar e da Temperatura do Painel	11
2.4	Conversores Estáticos CC-CC	12
2.4.1	Conversores Buck	13
3	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência	15
3.1	Critérios de Desempenho de Sistemas RPMP.....	16
3.1.1	Estabilidade.....	16
3.1.2	Resposta Dinâmica.....	16
3.1.3	Erro de Regime Permanente	16
3.1.4	Eficiente para em Ampla Faixa de Potência	16
3.2	Técnicas de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência.....	17
3.2.1	Método da Tensão Constante	17
3.2.2	Perturbação e Observação (P&O)	17
3.2.3	Perturbação e Observação Modificado	19
3.2.4	Método da Condutância Incremental	20
4	Modelagem e Resultados.....	22
4.1	Modelagem do Conversor Buck	22
4.2	Modelagem do Dispositivo RPMP	23
4.3	Simulações dos Algoritmos	23
4.3.1	Perturbação e Observação (P&O)	24
4.3.2	Condutância Incremental	28
4.3.3	Método da Tensão Constante	29
4.3.4	Perturbação e Observação Modificado	30
4.4	Comparação entre os Algoritmos.....	33
4.5	Recomendações de Uso	36
5	Conclusão	37
	Bibliografia.....	38
	Apêndice – Rotina dos algoritmos.....	39

1 INTRODUÇÃO

Devido à crise global de energia e à poluição ambiental, o sistema fotovoltaico tornou-se uma importante fonte de energia renovável. A energia solar tem as vantagens de reserva máxima, inesgotável, e é livre de restrições geográficas, tornando esta tecnologia um tema de pesquisa amplo.

Atualmente a busca por formas alternativas para geração de energia elétrica vem aumentando cada vez mais. No que se refere à energia solar sabe-se que há uma área de pesquisa muito recente para a conversão dessa energia em energia elétrica, que pode ser realizada por meio de painéis fotovoltaicos. Devido ao rápido crescimento em áreas como eletrônica de potência e ao aperfeiçoamento dos semicondutores, bem como incentivos fiscais fornecidos, aumentou-se o interesse no processo de conversão de energia fotovoltaica.

Há previsões que as reservas de petróleo serão esgotadas em 2040, o gás natural em 2060, e do carvão por volta de 2300. Isso faz com que as questões de alto custo de instalação por quilowatt das centrais fotovoltaicas e a baixa eficiência em geradores fotovoltaicos, sejam estudados de modo a reduzir o problema.

A eficiência de conversão das células solares é medida pela proporção da radiação solar incidente sobre a superfície da célula que é convertida em energia elétrica. Atualmente, as melhores células apresentam um índice de eficiência de 30%. Além disso, os sistemas fotovoltaicos apresentam uma não linearidade na característica $V \times I$, existindo apenas um Ponto de Máxima Potência (PMP), e este varia de acordo com parâmetros meteorológicos.

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo comparativo entre as técnicas existentes para o rastreamento do PMP de painéis fotovoltaicos, visando analisar a eficiência no rastreamento, tempo de rastreamento e ondulação de tensão e potência em regime permanente.

O trabalho foi desenvolvido realizando uma revisão bibliográfica das principais técnicas de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (RPMP), procurando selecionar os algoritmos mais comumente utilizados. Posteriormente foram modelados os componentes dos sistemas fotovoltaicos para realizar de simulações no ambiente MatLab/Simulink®.

O capítulo 2 trata da fundamentação teórica sobre a energia solar fotovoltaica, o qual objetiva dar uma visão geral do funcionamento e uso dos painéis fotovoltaicos, apresentando os princípios físicos e a modelagem matemática do painel, bem como o estudo do conversor Buck, utilizado no processo de RPMP.

O capítulo 3 trata da introdução do sistema RPMP e revisão das diferentes técnicas de RPMP propostos na literatura, apresentando a lógica utilizada.

No capítulo 4 os sistemas de técnicas RPMP são modelados, projetando os componentes dos sistemas e avaliando os desempenhos, tecendo comparações entre as técnicas.

O capítulo 5 contém as conclusões e recomendações, e no anexo A contém os algoritmos utilizados nas técnicas MPPT.

2 SISTEMA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

Embora os painéis fotovoltaicos sejam capazes de transformar a energia solar em energia elétrica, outros componentes são necessários para conduzir, controlar, converter, distribuir e armazenar a energia produzida pelos painéis. Tais componentes compõem o sistema de energia fotovoltaica.

Neste capítulo será realizada a fundamentação teórica sobre os painéis fotovoltaicos, no que diz respeito aos princípios físicos, bem como o modelo matemático que descreve o comportamento do painel. Além disso, serão apresentados os componentes que fazem parte do sistema de energia fotovoltaica simplificado, para realização do RPMP.

2.1 SISTEMAS DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

Os sistemas de energia fotovoltaica são classificados de acordo com a sua funcionalidade, as solicitações operacionais e como o painel está conectado as cargas ou outras fontes de energia. Existem duas classificações principais: sistemas autônomos (*stand-alone systems*) e sistemas conectados a rede elétrica (*grid-connected systems*).

2.1.1 SISTEMAS AUTÔNOMOS

São sistemas onde a energia fotovoltaica é utilizada como fonte de energia primária para o abastecimento de uma carga isolada, onde não há intercâmbio de potência com a rede elétrica. Faz-se necessário o uso de baterias, para o fornecimento ininterrupto de energia para as cargas em condições de ausência de radiação solar. Em áreas remotas, podem ser mais economicamente viáveis que a extensão das linhas de transmissão.

2.1.2 SISTEMAS CONECTADOS A REDE ELÉTRICA

São sistemas onde a energia fotovoltaica é utilizada como fonte de energia secundária, projetados para operar em paralelo com a rede elétrica. Existe um fornecimento de potência do sistema fotovoltaico para a rede, possibilitando a geração distribuída de energia. Faz-se necessário o uso de inversores de frequência para o

fornecimento de energia elétrica alternada, com frequência idêntica a da rede e com o controle de fase para o fornecimento de potência.

2.2. SISTEMA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

O sistema completo de geração de energia elétrica, como mostrado na Figura 2.1, possui um controlador de carga, responsável pelo sistema de RPMP e a controle da tensão de saída DC em um valor fixo, usualmente 12 ou 24 V.

O controlador de carga alimenta a bateria e o inversor de potência, o inversor por sua vez é responsável pela conversão da tensão contínua em tensão alternada, para alimentar cargas ou mesmo fornecer potência para a rede elétrica. O inversor possui a função de determinar a frequência da tensão alternada, bem como, fase de operação, caso o sistema opere juntamente com a rede elétrica.

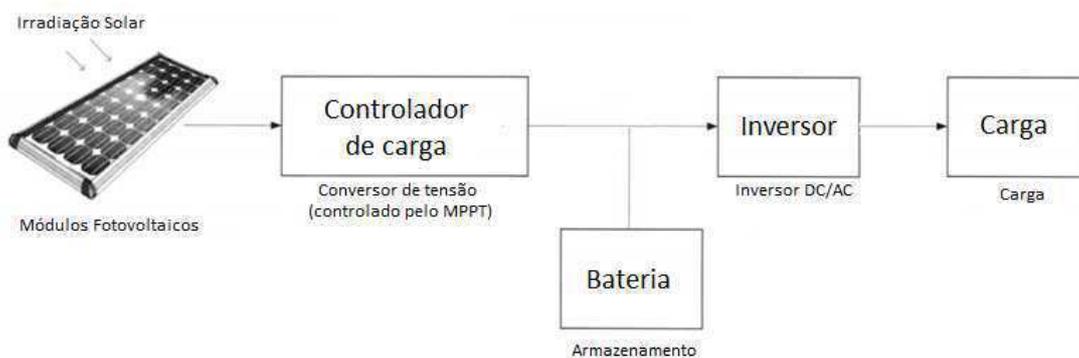


Figura 2.1 – Diagrama de blocos geral de um sistema de energia fotovoltaica.

Fonte: [2] Bibliografia

2.2.1. SISTEMA SIMPLIFICADO PARA IMPLEMENTAÇÃO DO RPMP

Neste trabalho, será apresentado um sistema de energia fotovoltaica autônomo, que consiste de um conjunto de módulos fotovoltaicos, uma carga resistiva e um conversor abaixador DC/DC, que atuará como a interface de potência entre a carga e o módulo (Figura 2.2). Este sistema será utilizado para verificar a eficiência dos algoritmos RPMP propostos.

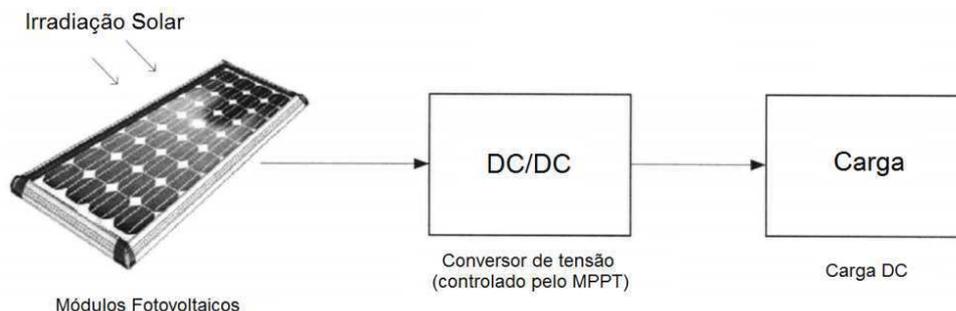


Figura 2.2 - Diagrama de blocos do sistema de energia fotovoltaica proposto.

Fonte: [2] Bibliografia

2.3. CÉLULAS, MÓDULOS E ARRAYS FOTOVOLTAICOS

As células solares (também chamadas células fotoelétricas ou células fotovoltaicas) são as unidades básicas dos sistemas fotovoltaicos. Algumas células solares são conectadas e agrupadas em um suporte para formarem um módulo fotovoltaico (também chamado de painel fotovoltaico). Os painéis são conectados entre si para formarem um sistema fotovoltaico, que são utilizados para suprir as solicitações de potência das cargas.

2.3.1 CÉLULA SOLAR E O EFEITO FOTOVOLTAICO

A célula solar é o menor elemento de um sistema fotovoltaico, atualmente a maioria das células produzidas é de silício. O átomo de silício possui quatorze elétrons, apresentando quatro elétrons na sua camada de valência que se ligam aos vizinhos em ligações covalentes, formando uma rede cristalina. Portanto, o silício puro não é um bom condutor elétrico, sendo necessário um processo de dopagem onde são adicionadas de impurezas que irão alterar as propriedades elétricas.

Ao adicionar átomos pentavalentes, como o fósforo, haverá um elétron em excesso para formar as ligações covalentes, ficando fracamente ligado a seu átomo de origem. Nesse caso, necessita-se somente de uma pequena quantidade de energia para liberar esse elétron para a banda de condução, algo em torno de 0,02 eV. O cristal dopado com átomos pentavalentes denomina-se de tipo N.

Se por outro lado, se forem introduzidos elementos trivalentes, como o boro, haverá falta de um elétron para satisfazer as ligações covalentes com os átomos de silício da rede. Essa falta de elétron é denominada buraco ou lacuna e o cristal dopado é denominado de tipo P.

Através da união dos cristais do tipo N e P, forma-se uma junção PN (Figura 2.3). A qual apresenta um elevado gradiente de concentração do lado N para P, estabelecendo uma redução de elétrons no lado N, tornando-o positivo, e um acúmulo de elétrons no lado P, tornando-o negativo. Esse processo alcança o equilíbrio quando o campo elétrico \mathcal{E} forma uma barreira capaz de impedir a passagem de elétrons livres remanescentes do lado N. A tensão total através da junção é denominada tensão de difusão, sendo cerca de 1 V. No silício a energia que um elétron deve adquirir para passar da banda de valência para a banda de condução é 1,12 eV.

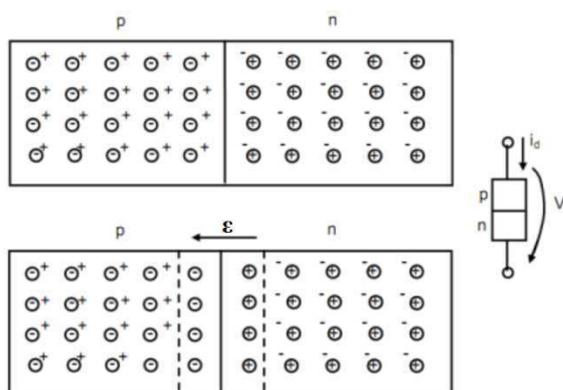


Figura 2.3 - Junção PN.

Fonte: [1] Bibliografia

Quando a região é iluminada, os fótons com energia igual ou maior a banda de condução do material do semiconductor podem ser absorvidos e produzem elétrons livres. Esse fenômeno é em essência, o efeito fotovoltaico. Esta separação de elétrons resulta em uma diferença de potencial entre as superfícies opostas da célula, esta tensão é denominada tensão de circuito aberto (V_{oc}). Se um condutor for conectado em ambas faces da célula, a corrente que circulará por ele é denominada corrente de curto circuito (I_{sc}).

O espectro da radiação solar contém fótons com energia variando de $\approx 0,5$ eV, na faixa de infravermelho, até 2,7 eV, na faixa do ultravioleta. A Figura 2.4 apresenta o esquema do efeito fotovoltaico.

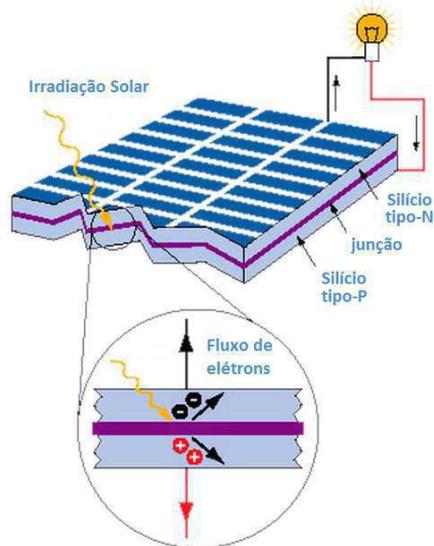


Figura 2.4- Efeito fotovoltaico.

Fonte: [4] Bibliografia

Fatores que influenciam a eficiência de uma célula solar:

- Fótons com energia menores que a banda de condução do material semiconductor não produzem energia, para o silício o valor da banda de condução é de 1,12 eV. Grande parte da energia solar incidente não é aproveitada.
- A resistência existente na conexão do semiconductor com o contato metálico superior, o qual conecta o painel ao circuito externo, diminui a eficiência. Porém aumentar a superfície metálica superior visando diminuir a resistência, diminui a área de absorção de radiação. Logo, há um compromisso entre os dois fatores. Ver Figura 2.5.
- Reflexo da radiação incidente prejudica a eficiência, é necessário o uso de coberturas antirreflexivas sobre as células.
- A temperatura afeta o funcionamento da célula, reduzindo a eficiência à medida que aumenta. O aumento da temperatura diminui a banda de condução do material semiconductor, resultando em um acréscimo de corrente de aproximadamente 0,1%. Porém a tensão de circuito aberto decresce a uma taxa de 0,3%/°C, resultando em uma diminuição de 1% da potência gerada a cada 2,7 Kelvins de elevação da temperatura.

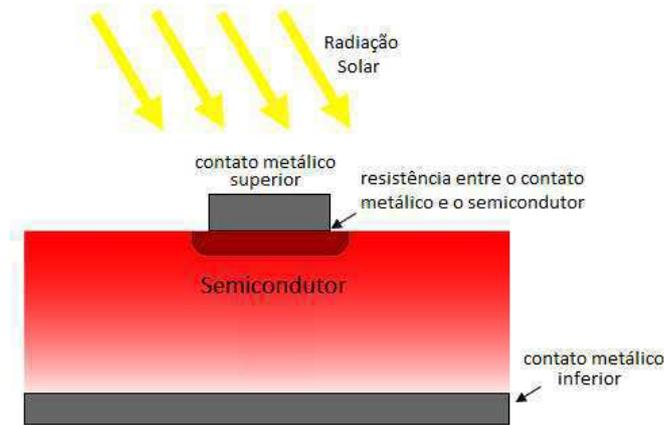


Figura 2.5 – Contatos entre os condutores metálicos e o semicondutor.

2.3.1.1. MODELAGEM DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA

O circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica é representado como uma fonte de corrente em paralelo com um diodo (Figura 2.6).

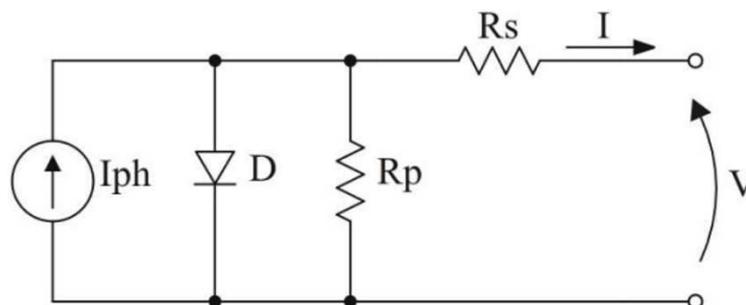


Figura 2.6- Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.

Fonte: [3] Bibliografia

A resistência em série, R_s , representa a queda de tensão através das perdas ôhmicas no material do semicondutor, nos contatos metálicos e no contato do metal com o semicondutor. A resistência em paralelo, R_p , representa as perdas devido às perturbações elétricas entre as partes da frente e de trás da célula, assim como, através de perturbações na zona de transição PN.

Aplicando a lei de Kirchhoff no circuito acima, obtém-se a expressão matemática para a corrente de saída da célula (1).

$$I = I_{ph} - I_r \cdot \left[e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot t}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p}, \quad (1)$$

A corrente de saturação reversa I_r é função da temperatura, e é dada por:

$$I_r = I_{rr} \cdot \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \cdot e^{\frac{q \cdot E_g}{n \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)}, \quad (2)$$

A corrente I_{ph} depende da radiação incidente e da temperatura.

$$I_{ph} = [I_{SC} + \alpha_T \cdot (T - T_r)] \cdot \frac{S}{1000}, \quad (3)$$

As definições das variáveis estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Definição de Parâmetros

Simbologia	Descrição
n	Fator de idealidade da junção.
k	Constante de Boltzmann. No SI, $k = 1,3806503 \cdot 10^{-23}$ J/K
t	Temperatura absoluta da célula.
q	Carga do elétron. No SI, $q = 1,60217653 \cdot 10^{-19}$ C
V	Tensão nos terminais da célula.
I_r	Corrente de saturação reversa da célula.
T_r	Temperatura de referência.
I_{rr}	Corrente de saturação reversa na temperatura de referência.
E_G	Energia da banda de condução do semicondutor.
I_{SC}	Corrente de curto-circuito da célula na temperatura e radiação nominais.
α_T	Coefficiente de temperatura de corrente de curto-circuito.
S	Radiação incidente em W/m ² .

2.3.2 CARACTERÍSTICAS DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO

Exemplos de curvas típicas I-V e P-V para um módulo fotovoltaico, fixados os parâmetros de irradiação solar e temperatura, são apresentados nas Figuras 2.7(a) e 2.7(b), respectivamente.

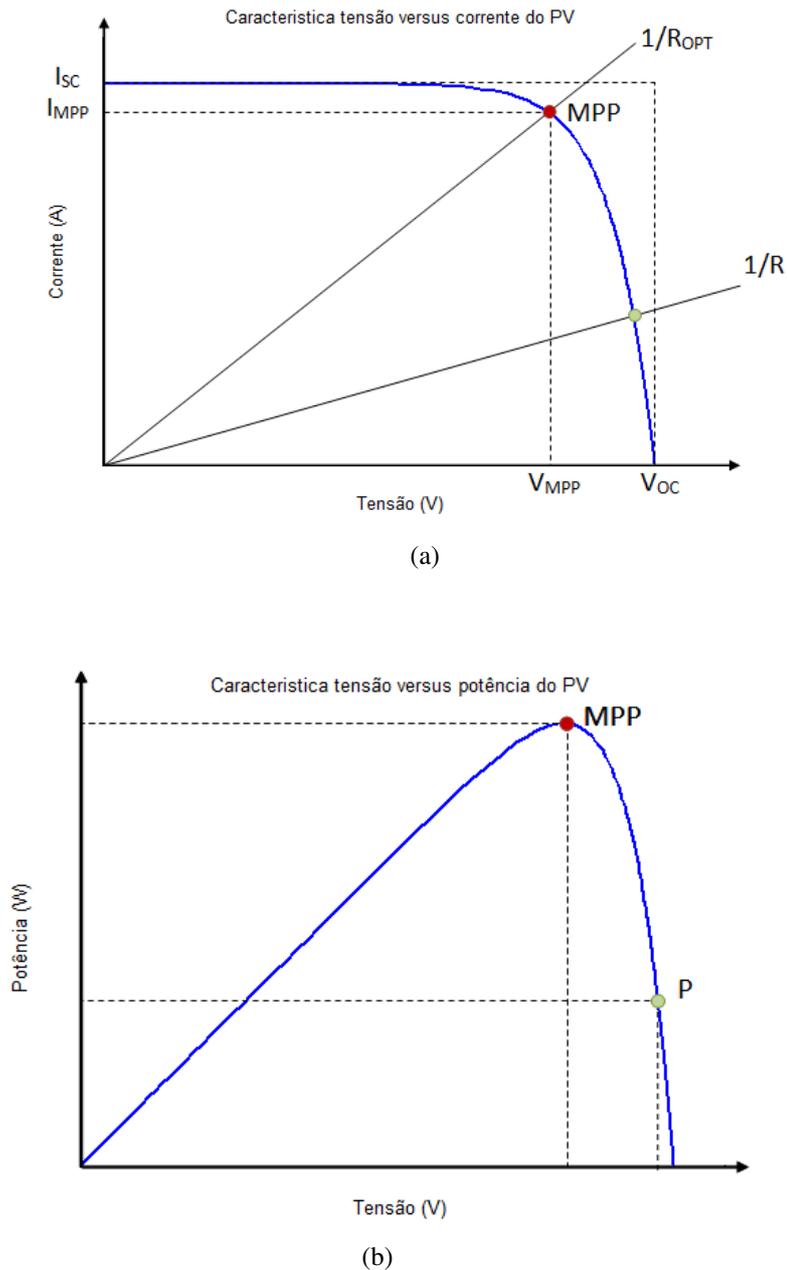


Figura 2.7 - (a) Curva I-V Típica de um Painel Fotovoltaico; (b) Curva P-V Típica de um Painel Fotovoltaico.

Quando os terminais do painel fotovoltaico são conectados a uma resistência variável R , o ponto de operação é determinado pela intersecção da curva I-V do painel com o valor da impedância conectada. Para uma carga resistiva R , o painel irá operar onde $I/V = 1/R$, conforme mostrado na Figura 2.7(a).

O valor resistivo R_{OPT} corresponde ao ponto de operação de máxima potência do painel (PMP), pode-se observar na Figura 2.7(b) a diferença entre as potências fornecidas pelo painel em ambas as condições.

Tabela 2- Parâmetros Fundamentais de um painel fotovoltaico

Parâmetros	Simbologia	Descrição
Corrente de curto-circuito	ISC	É a corrente de saída do painel nas condições de curto-circuito.
Tensão de circuito aberto	Voc	É a tensão nos terminais do painel quando a corrente de saída é zero.
Ponto de máxima potência	PMP	Representa o valor de máxima potência do painel fotovoltaico, dado os valores de irradiação e temperatura.
Condições Padrões de Teste (<i>Standard Condition</i>)	SC	Representa a configuração do painel quando o nível de irradiação é 1000 W/m ² e a temperatura de operação é de 25°C.

2.3.3 INFLUÊNCIA DA IRRADIAÇÃO SOLAR E DA TEMPERATURA DO PAINEL

A influência da irradiação solar está diretamente ligada ao valor da corrente I_{ph} , conforme (3). Na Figura 2.8, pode-se observar a influência da radiação na característica do painel. Observa-se que a tensão de curto circuito VOC aumenta suavemente, enquanto a corrente de curto-circuito cresce linearmente com o aumento da irradiação.

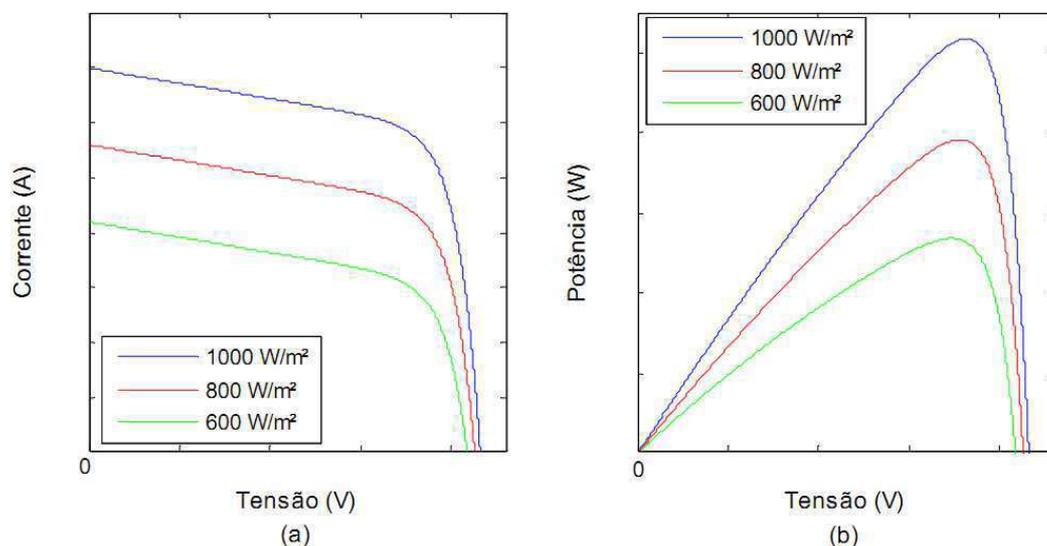


Figura 2.8 – Curvas características de um painel fotovoltaico para diferentes níveis de irradiação solar e temperatura igual a 25°C. (a) Curva I-V. (b) Curva P-V.

Fonte: [4] Bibliografia

O aumento da temperatura diminui a banda de condução do material semicondutor, resultando em um acréscimo de corrente de aproximadamente 0,06%/°C. Porém, a tensão de circuito aberto decresce a uma taxa de 0,36%/°C, resultando em uma diminuição de 1% da potência gerada a cada 2,7 Kelvins de

elevação da temperatura¹. Na Figura 2.9 observa-se a influência da temperatura na característica do painel.

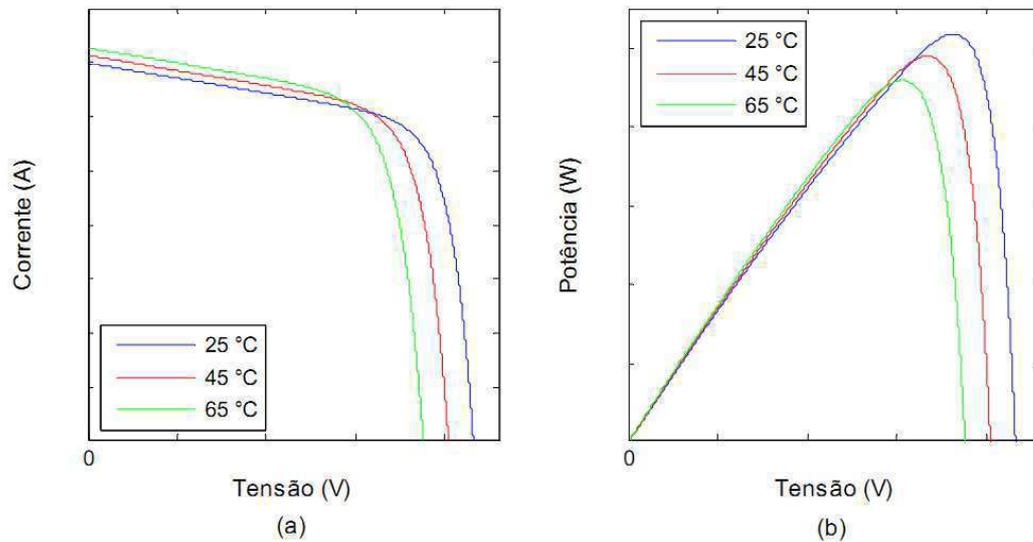


Figura 2.9 - Curvas características de um painel fotovoltaico para diferentes valores de temperatura e irradiação solar de 1000 W/m². (a) Curva I-V. (b) Curva P-V.

Fonte: [4] Bibliografia

2.4 CONVERSORES ESTÁTICOS CC-CC

Os conversores de potência são equipamentos que realizam a transformação da energia elétrica para a obtenção de características específicas de corrente ou tensão em determinados sistemas. São compostos por chaves em estado sólido (semicondutores), e através do controle de abertura e fechamento das chaves, são capazes de elevar ou abaixar um determinado nível de tensão ou corrente para valores de amplitudes desejados.

Os conversores CC-CC são dispositivos que recebem um nível de tensão ou corrente contínua nos seus terminais e adequam de acordo com as solicitações do sistema. Com o uso de conversores estáticos, é possível variar a impedância vista pela fonte primária, sendo essa característica de fundamental importância no uso em sistemas de energia fotovoltaicos.

As principais topologias de conversores estáticos CC-CC são: o conversor abaixador de tensão, também chamado de *Buck* ou *Step-down*, o conversor elevador de tensão, também chamado de *Boost* ou “Step-up” e por fim o conversor abaixador-elevador, também chamado de *Buck-Boost*.

¹ Valores extraídos do *datasheet* do painel utilizado para simulações. Kyocera KD245GX LFB2 245W.

Dado que o sistema em estudo possui um painel fotovoltaico (Kyocera KD245GX-LFB2 245W) que apresenta V_{MPP} entre 20-30V para uma ampla faixa de radiação incidente e o sistema é proposto para ser utilizado com uma bateria de 12V na saída do conversor, a topologia escolhida para este trabalho é a Buck.

2.4.1 CONVERSORES BUCK

A Figura 2.10 mostra a topologia de um conversor Buck. Nesta topologia S representa a chave estática de potência elétrica, D é um diodo de potência, L é um indutor para armazenamento de energia, C é um capacitor que armazena energia atuando como filtro de saída, V_i é a tensão de entrada e V_o é a tensão de saída.

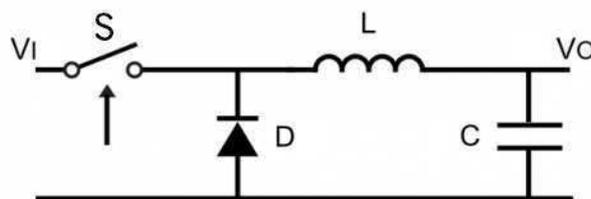


Figura 2.10 - Topologia do conversor Buck.

Fonte: wikimedia.org

A seguir é apresentado o princípio de funcionamento do conversor Buck::

a. Chave fechada:

Quando a chave S está fechada, há transferência de energia da fonte de tensão para o circuito. A energia é armazenada no indutor L e no capacitor C, além de alimentar a carga conectada nos terminais de V_o .

b. Chave aberta:

Quando a chave S está aberta, não há transferência de energia da fonte para o circuito. O indutor e o capacitor descarregam com o objetivo de manter a tensão e a corrente constante para a carga.

O conversor Buck pode trabalhar em dois modos de operação distintos, o modo de condução contínua ou descontínua, onde este é definido através do fluxo de corrente pelo indutor. O modo de condução contínua se caracteriza quando a corrente que flui pelo indutor é sempre maior que zero, caso contrário, estará no modo de condução descontínua. É vantajoso sempre trabalhar no modo de condução contínua, para isso deve-se projetar os componentes do circuito de forma a atender as solicitações do sistema.

As equações que modelam o conversor Buck são,:

$$D = \frac{t_{on}}{T}, \quad (4)$$

$$V_o = D \cdot V_i, \quad (5)$$

$$\Delta i_L = \frac{V_o \cdot T \cdot (1 - D)}{L}, \quad (6)$$

$$\Delta V_o = \frac{\Delta i_L \cdot T}{8C}, \quad (7)$$

em que T representa a o período de chaveamento, D o *duty cycle* de operação da chave, Δi_L a variação de corrente no indutor e V_o a tensão de saída do conversor.

Portanto, para projetar um conversor Buck que opere no modo de condução contínua é necessário calcular o valor do indutor e capacitor para, dada às variações aceitáveis na corrente do indutor e na tensão do capacitor.

Ajustando (6), tem-se:

$$D_{min} = \frac{V_o}{V_{imax}}, \quad (8)$$

$$L = \frac{V_{imax} \cdot T \cdot (D_{min} - D_{min})}{\Delta i_L} \quad (9)$$

$$C = \frac{\Delta i_L \cdot T}{\Delta V_o \cdot 8}, \quad (10)$$

3 RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

Um significativo problema em sistemas de energia fotovoltaica é a diferença entre as condições de operação da carga e do painel fotovoltaico. O máximo aproveitamento de um painel fotovoltaico ocorre quando este opera sempre no PMP, e como já foi visto no capítulo anterior, este ponto varia de acordo com as condições meteorológicas, como irradiação solar e temperatura às quais for exposto. As técnicas de RPMP foram desenvolvidas para resolver este problema.

Os casos que foram exibidos anteriormente tratam da variação individual da irradiação solar e da temperatura, porém é impossível encontrar essas variações independentemente, pois elas são altamente acopladas em condições de operações normais. Isso implica que as variações de radiação solar serão acompanhadas de variações de temperatura, tornando o sistema de RPMP ainda mais complexo.

Para superar estes problemas, são utilizados conversores estáticos com o chaveamento controlado pelos algoritmos RPMP para manter o painel fotovoltaico operando no PMP. Entretanto, a localização do PMP na curva I-V não é conhecida *a priori*. Uma maneira de calcular a localização é utilizando um modelo elétrico, como apresentado no capítulo 2. Porém para realizar essa previsão é necessário medir os níveis de irradiação e temperatura, tais aparelhos de medição apresentam um custo elevado, além de depender do conhecimento prévio de alguns parâmetros do painel fotovoltaico, que geralmente não são fornecidos adequadamente.

Nos últimos anos, vários algoritmos RPMP foram propostos para a utilização dos painéis fotovoltaicos em diferentes configurações. Neste capítulo, serão mostrados alguns desses algoritmos, e posteriormente serão realizados estudos comparativos entre eles.

3.1 CRITÉRIOS DE DESEMPENHO DE SISTEMAS RPMP

Considerando o RPMP como um sistema de controle, os requisitos a seguir são importantes para o projeto de um sistema.

3.1.1 ESTABILIDADE

O requisito fundamental de um sistema de controle dinâmico é um sistema estável. O modo de chaveamento dos conversores DC/DC são sistemas não lineares, a saída de um painel fotovoltaico também é não linear. Portanto, a estabilidade é um fator muito importante para avaliar sistemas RPMP.

3.1.2 RESPOSTA DINÂMICA

Um bom algoritmo RPMP necessita apresentar uma resposta rápida frente a variações das condições atmosféricas, i. e., temperatura e irradiação solar. O rápido rastreamento resulta em uma menor perda de energia solar.

3.1.3 ERRO DE REGIME PERMANENTE

Quando o PMP é alcançado e as condições atmosféricas são mantidas, o ideal é que o sistema opere exatamente neste ponto. Nos sistemas RPMP atuais é impossível, devido à lógica utilizada pelos algoritmos e à contínua variação das condições atmosféricas. Portanto, é preferível uma pequena flutuação em torno do PMP.

3.1.4 EFICIENTE PARA EM AMPLA FAIXA DE POTÊNCIA

A relação entre a potência fornecida pelo painel fotovoltaico e a potência entregue à carga é uma indicação de quão eficiente é o sistema de geração fotovoltaica. A eficiência para baixos níveis de irradiação solar é um sério problema para vários sistemas RPMP. Vários produtos trabalham eficientemente apenas durante o fornecimento das potências próximas a nominal. Porém, no período de um dia, um módulo fotovoltaico apresenta uma larga faixa de operação de potência, ocasionando uma operação em níveis de potência inferiores a potência nominal do painel, consequentemente os sistemas RPMP não trabalham eficientemente.

3.2 TÉCNICAS DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

Serão apresentadas quatro técnicas de RPMP, são elas: Tensão Constante, Perturbação e Observação (P&O), Perturbação e Observação Modificado e Condutância Incremental.

3.2.1 MÉTODO DA TENSÃO CONSTANTE

O método da tensão constante utiliza resultados empíricos, baseados no fato de que a tensão de operação no PMP é da ordem de 70% à 80% do valor da tensão em circuito aberto (V_{oc}), e esta relação linear é praticamente independente de quaisquer variações de radiação e temperatura. O controle é realizado em malha fechada de tensão, conforme diagrama mostrado na Figura 3.1.

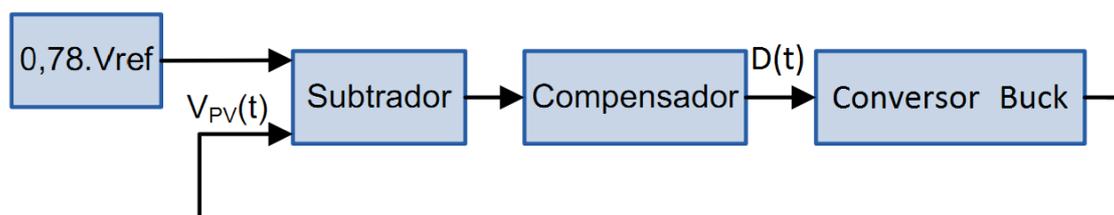


Figura 3.1- Modelo do método da Tensão Constante.

Fonte: [5] Bibliografia

3.2.2 PERTURBAÇÃO E OBSERVAÇÃO (P&O)

O método da perturbação e observação é um método iterativo de RPMP. É aplicada uma perturbação na tensão de saída do painel, e então é realizada uma leitura periódica dos valores de tensão e corrente para realizar o cálculo da potência de saída do módulo fotovoltaico, comparando a potência obtida no ciclo atual com a potência obtida no ciclo anterior. A perturbação é caracterizada pela variação no ciclo de trabalho do conversor Buck. Caso a tensão varie e a potência aumente, o sistema de controle muda o ponto de operação naquela direção; caso contrário, muda o ponto de operação na direção oposta. O fluxograma do algoritmo é apresentado na Figura 3.2 e os casos possíveis para perturbação em um módulo fotovoltaico na Figura 3.3.

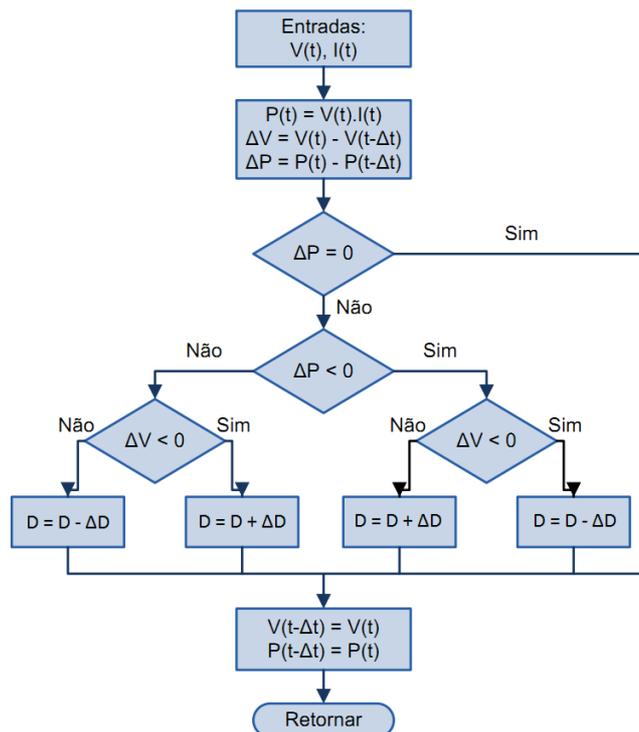


Figura 3.2 - Fluxograma do método P&O.

Fonte: [5] Bibliografia

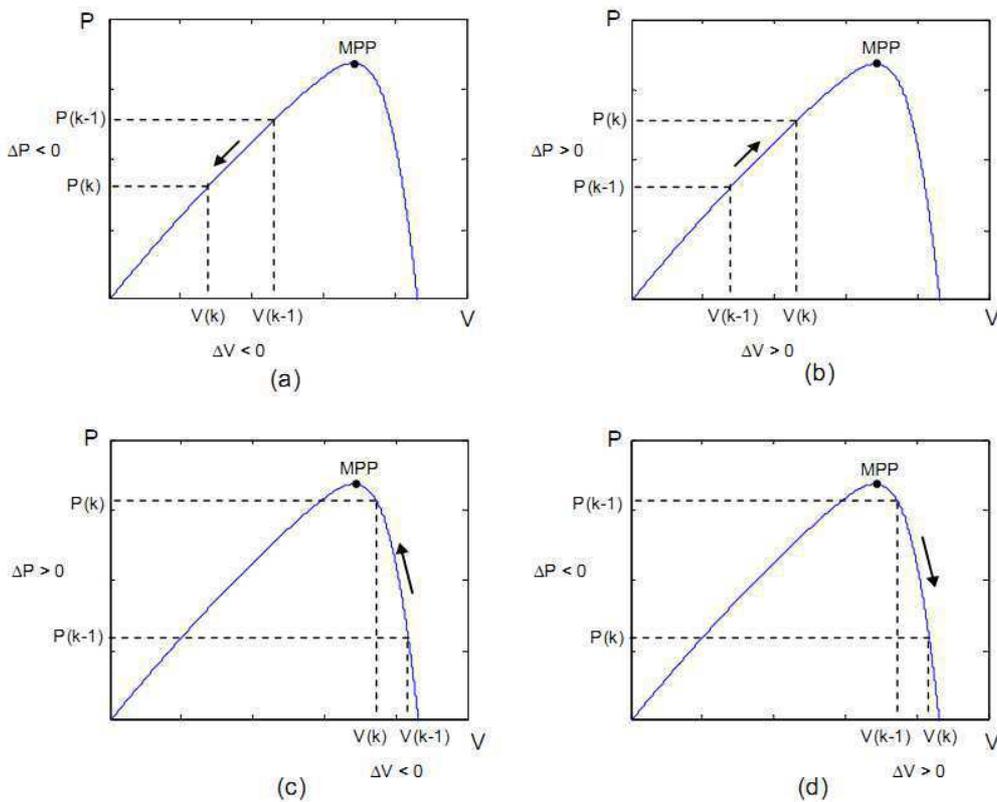


Figura 3.3 – Tipos de configurações de perturbações possíveis.

Fonte: [4] Bibliografia

Observa-se na Figura 3.3, que se o painel estiver operando com valores de tensão menores que V_{MPP} , perturbações positivas na tensão resultarão em variações positivas na potência e perturbações negativas, resultarão em variações negativas. Já quando o painel opera com valores de tensão superiores aos valor de V_{MPP} , perturbações positivas na tensão resultarão em variações negativas na potência e perturbações negativas, resultarão em variações positivas na potência.

3.2.3 PERTURBAÇÃO E OBSERVAÇÃO MODIFICADO

De um modo geral, os algoritmos de RPMP utilizam um tamanho de passo fixo, o que é determinado pelos requisitos de precisão e velocidade de rastreamento. No entanto, se o tamanho do passo é aumentado para um aumento da velocidade de rastreamento, a precisão diminui, resultando numa baixa eficiência e vice-versa. Desenvolveu-se um algoritmo de passo variável para o método P&O e é dedicado a encontrar uma maneira simples e eficaz para melhorar a precisão de rastreamento e para superar as desvantagens em algoritmos RPMP tradicionais.

O fluxograma do algoritmo de passo variável P&O RPMP é mostrado na Figura 3.4, onde o tamanho do passo é automaticamente ajustado de acordo com o ponto de operação do gerador fotovoltaico. Quando ocorre uma mudança brusca na irradiação solar, o tamanho do passo é automaticamente ajustado de acordo com o ponto de operação. Se o ponto de operação está longe de ser o PMP, aumenta-se o tamanho do passo que permite uma capacidade de rastreamento rápido.

A variação de passo adotada para reduzir o problema mencionado acima é apresentada da seguinte forma:

$$D(k) = D(k) - N \cdot \frac{\Delta P}{\Delta I} \quad (11)$$

em que N é o fator de escala que determina o desempenho do sistema RPMP e é sintonizado de acordo com o projeto. O sistema de controle RPMP apresenta característica inerente apresentada na Figura 3.5.

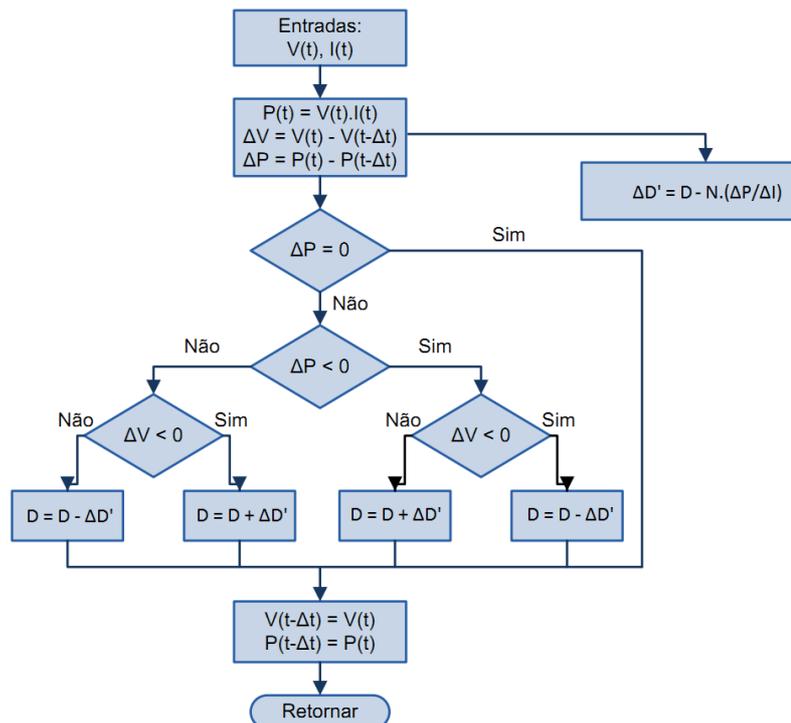


Figura 3.4 – Fluxograma do método P&O Modificado.

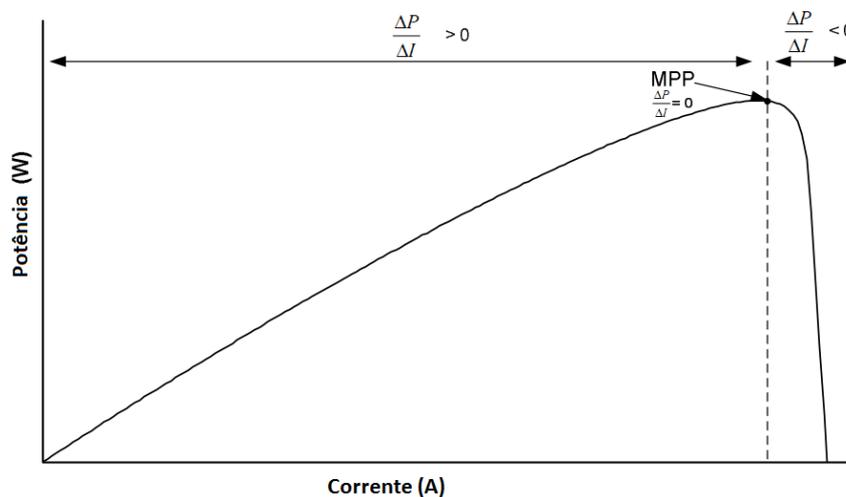


Figura 3.5 - $\Delta P/\Delta I$ sobre a Curva I versus P.

Fonte: [6] Bibliografia

3.2.4 MÉTODO DA CONDUTÂNCIA INCREMENTAL

O método da Condutância Incremental (IC) é baseado no fato de que a inclinação da curva de potência do painel solar é nula no PMP ($dP/dV=0$), positiva à esquerda e negativa à direita. Este método busca o PMP da mesma forma que o método

P&O. O fluxograma básico é apresentado na Figura 3.6. Este método utiliza sensores para medir a corrente e a tensão do painel.

A derivada da potência do painel fotovoltaico em função da tensão, se expressa como:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV}, \quad (12)$$

$$\frac{1}{V} \cdot \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV}, \quad (13)$$

Analisando (13), como V é sempre positivo, o sinal da derivada de potência em relação à tensão é dependente do segundo termo da equação, ou seja, da soma da condutância instantânea (I/V) e a condutância incremental (dI/dV). Dessa maneira, a técnica permite avaliar em qual lado de operação da curva de potência se encontra o ponto de operação do sistema, pois nessa condição $dP/dV = 0$. Na prática é necessário definir um limite para considerar que o sistema está operando no PMP, para isso é definido um ΔW de tolerância.

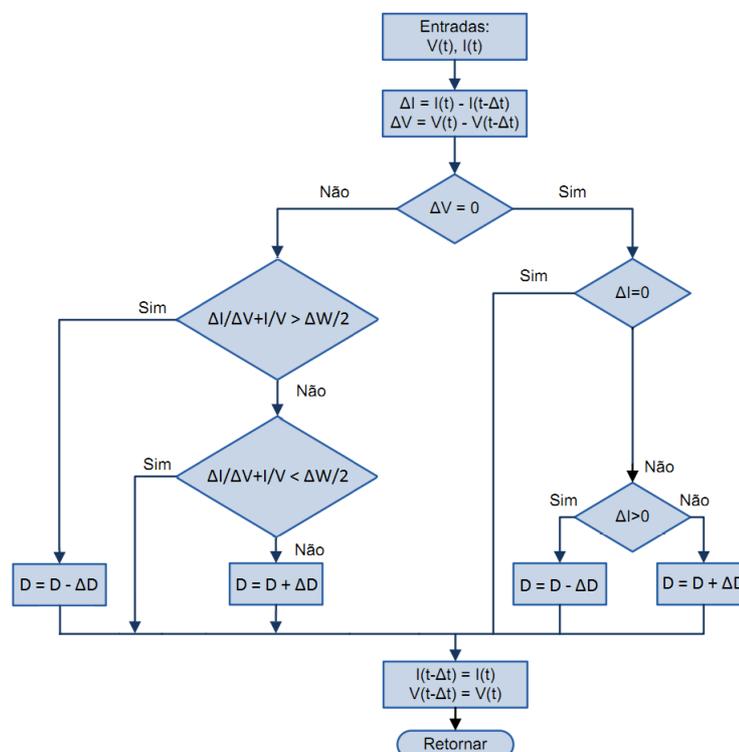


Figura 3.6 - Fluxograma Condutância Incremental.

4 MODELAGEM E RESULTADOS

Neste capítulo serão modelados os componentes utilizados no sistema de energia fotovoltaica que será simulado, será considerado o painel solar fotovoltaico Kyocera KD245GX LFB2 245W, que foi adquirido pelo Laboratório de Alta Tensão (LAT - UFCG), destinado ao aprendizado acadêmico.

O sistema será configurado como foi mostrado na Figura 2.2.

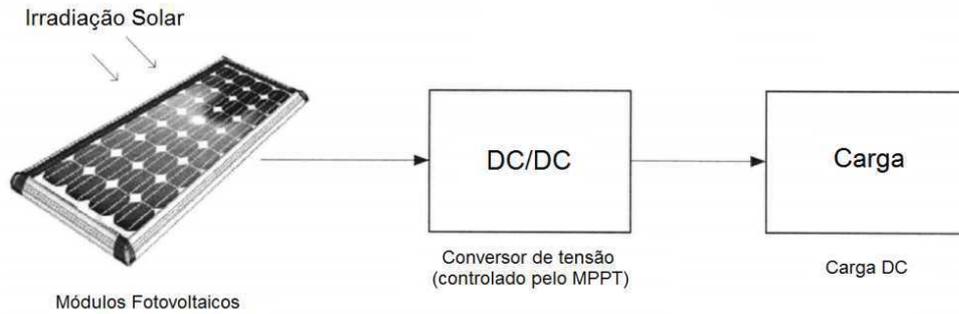


Figura 2.2 - Diagrama de blocos do sistema de energia fotovoltaica proposto.

Os dados do painel fotovoltaico Kyocera são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3- Dados do painel fotovoltaico Kyocera KD245GX LFB2

Potência Máxima	$P_{MAX} = 245 \text{ W}$
Tensão no PMP	$V_{MPP} = 29.8 \text{ V}$
Corrente no PMP	$I_{MPP} = 8.23 \text{ A}$
Tensão de Circuito Aberto	$V_{OC} = 36.9 \text{ V}$
Corrente de Curto-Circuito	$I_{SC} = 8.81 \text{ A}$
Número de células em série	$N_s = 60$

4.1 MODELAGEM DO CONVERTOR BUCK

Para modelar o conversor Buck é considerado o regime de operação de condução contínua. Para o dimensionamento dos elementos do circuito, capacitor e indutor, são desprezadas as resistências internas da chave e o diodo. A frequência de chaveamento para o projeto foi definida em 10 kHz, sugerido em [5].

Admitindo uma ondulação de corrente de 10% da corrente máxima de saída do módulo, pode-se determinar o valor da indutância utilizando (9).

Considerando a tensão de entrada máxima como V_{OC} nominal, e a tensão de saída mínima igual a 12 V (tensão da bateria proposta para o sistema), tem-se um valor de $D_{min} = 0,3$. Logo, temos:

$$L = \frac{36,1 \cdot (0,3 - 0,09)}{10^4 \cdot 0,1 \cdot 8,91} = 850 \mu H$$

Para o cálculo do capacitor, considera-se uma ondulação máxima aceitável igual a 1% da tensão média de saída (tensão da bateria). Utilizando (10), tem-se:

$$C = \frac{0,1 \cdot 8,91}{10^4 \cdot 0,01 \cdot 12 \cdot 8} = 93 \mu F$$

O controle do chaveamento do conversor Buck será realizado pelo dispositivo de RPMP.

4.2 MODELAGEM DO DISPOSITIVO RPMP

Para realizar o rastreamento, é necessário realizar medições das variáveis de estado do circuito, como tensão e corrente. Um dos fatores que influenciam no comportamento do algoritmo é o tempo de amostragem (t_a) dos valores de tensão e corrente. Outro fator importante para alguns algoritmos é o valor do passo incremental para variação da tensão do painel, neste trabalho varia-se a tensão diretamente pelo o uso do *duty-cycle* (ΔD).

O tempo de amostragem para todos os algoritmos foi definido constante em 10 ms.

4.3 SIMULAÇÕES DOS ALGORITMOS

Nas simulações foi avaliado o comportamento da potência e tensão dos módulos fotovoltaicos e o tempo de resposta para convergir no PMP. Foram simulados os quatro algoritmos apresentados na Seção 3. Na figura 4.1 tem o diagrama de blocos no Simulink das simulações utilizadas.

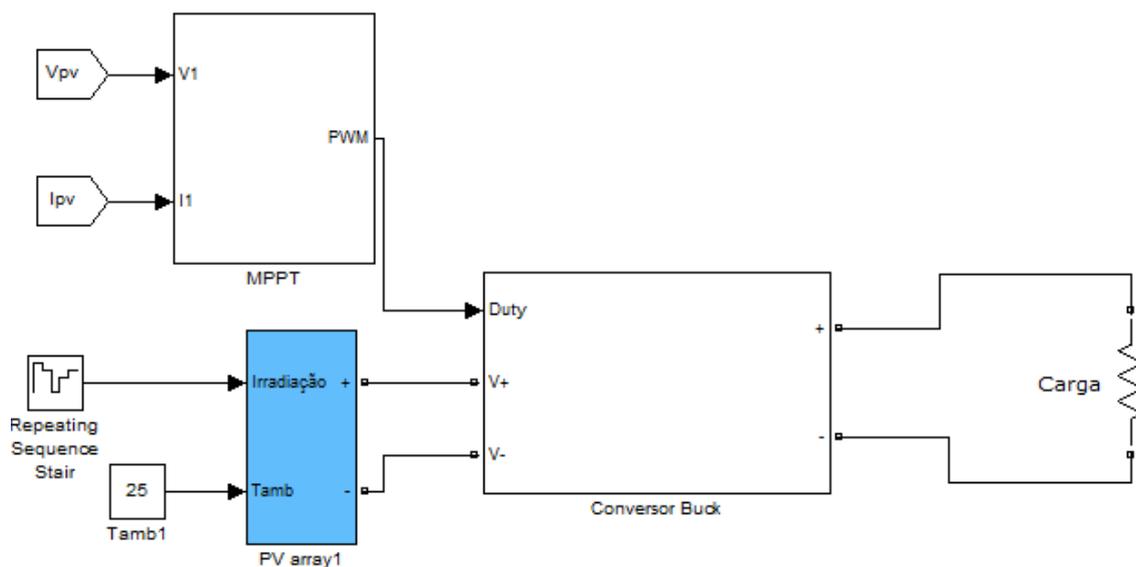
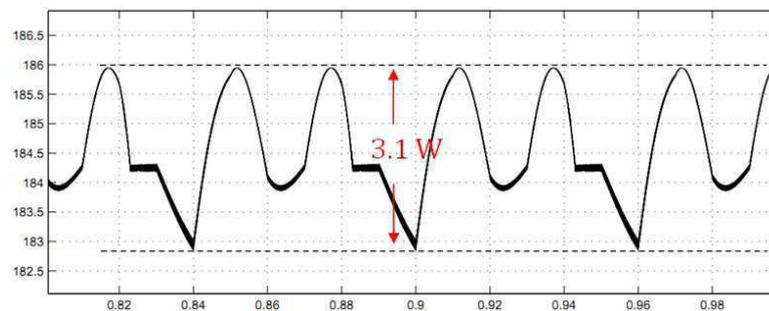


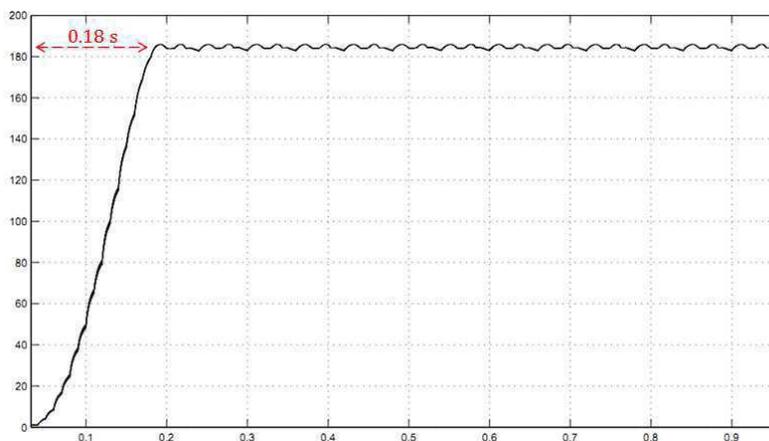
Figura 4.1- Diagrama de Blocos Simulink

4.3.1 PERTURBAÇÃO E OBSERVAÇÃO (P&O)

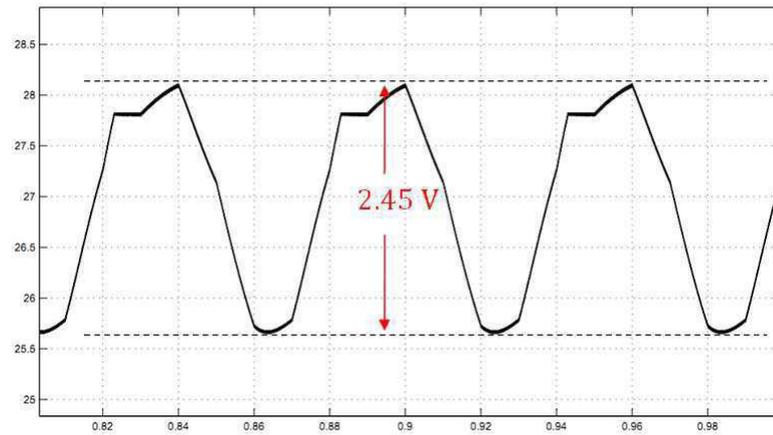
Como esse é um algoritmo de passo incremental fixo, foram efetuadas três simulações com diferentes valores de ΔD ($\Delta D=5\%$, $\Delta D=2,5\%$ e $\Delta D=1\%$). Nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 são exibidos os resultados das simulações. Foram considerados $G = 800 \text{ W/m}^2$ e $T = 25^\circ\text{C}$.



(a)



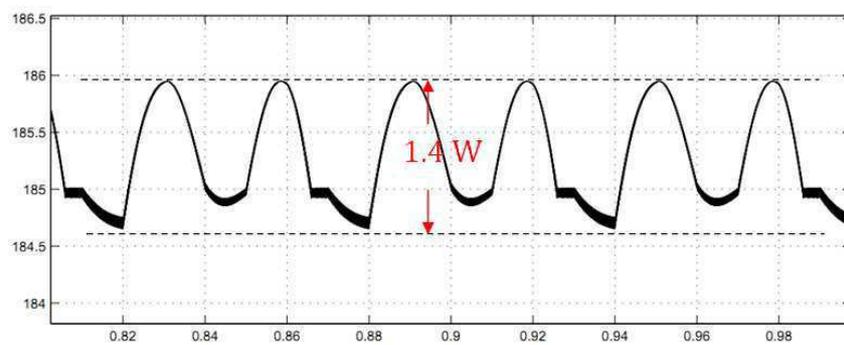
(b)



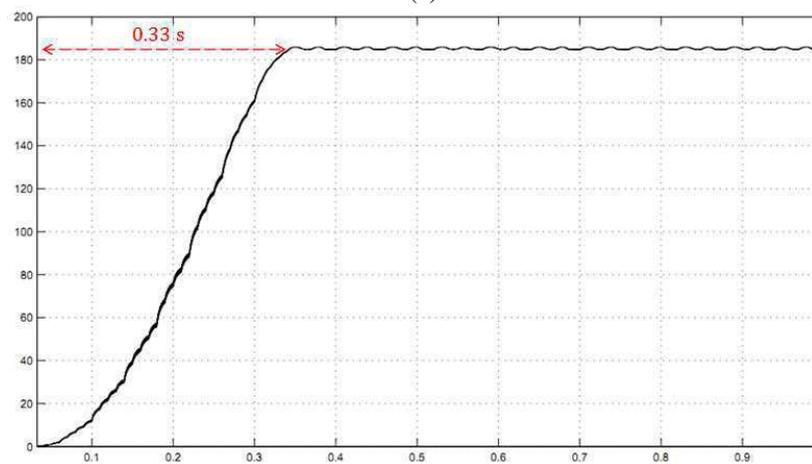
(c)

Figura 4.2- Simulação do algoritmo P&O, $\Delta D=5\%$. (a) Variação de Potência em regime permanente. (b) Tempo de convergência. (c) Variação da tensão em regime permanente.

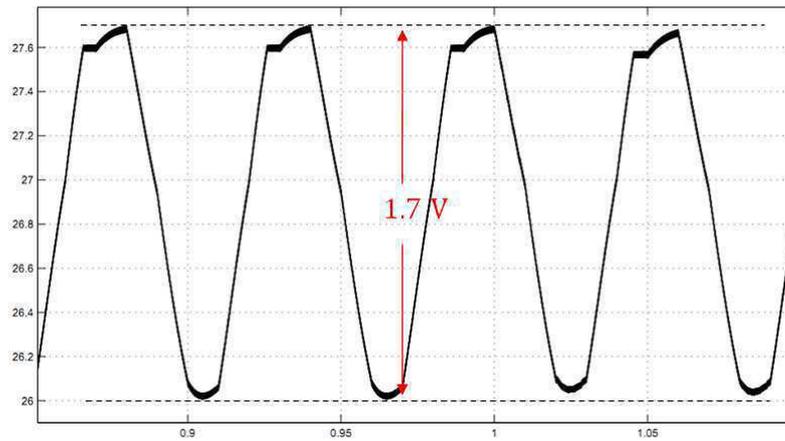
Observa-se na Figura 4.2 que o tempo de resposta foi de 0,18 s, a ondulação de potência de 3,1 W e a ondulação de tensão de 2,45 V.



(a)



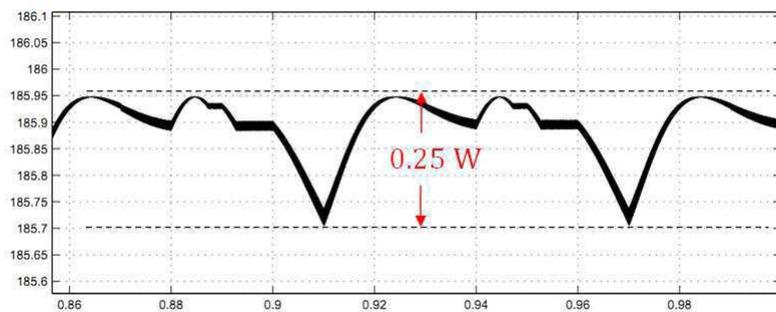
(b)



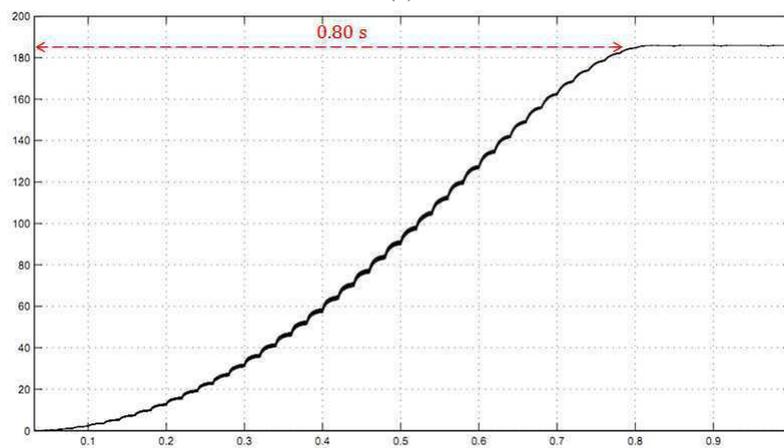
(c)

Figura 4.3 - Simulação do algoritmo P&O, $\Delta D=2.5\%$. (a) Variação de Potência em regime permanente. (b) Tempo de convergência. (c) Variação da tensão em regime permanente.

Observa-se na Figura 4.3 que o tempo de resposta foi de 0,33 s, a ondulação de potência de 1,4 W e a ondulação de tensão de 1,7 V.



(a)



(b)

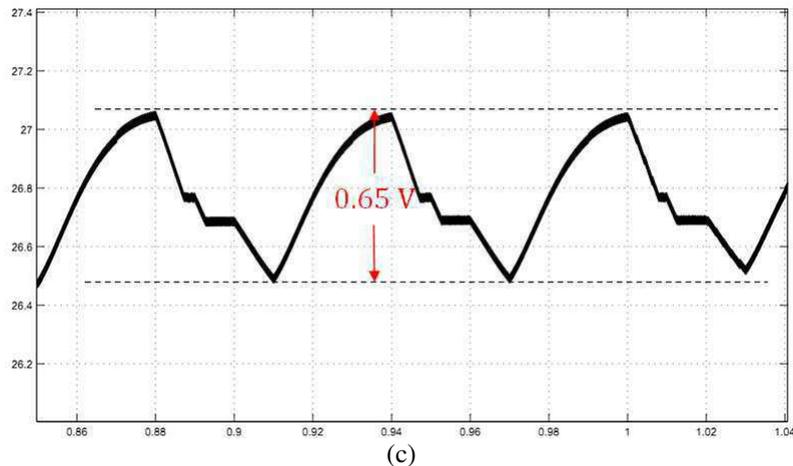


Figura 4.4 – Simulação do algoritmo P&O, $\Delta D=1\%$. (a) Variação de Potência em regime permanente. (b) Tempo de convergência. (c) Variação da tensão em regime permanente.

Observa-se na Figura 4.4 que o tempo de resposta foi de 0,80 s, a ondulação de potência de 0,25 W e a ondulação de tensão de 0,65 V.

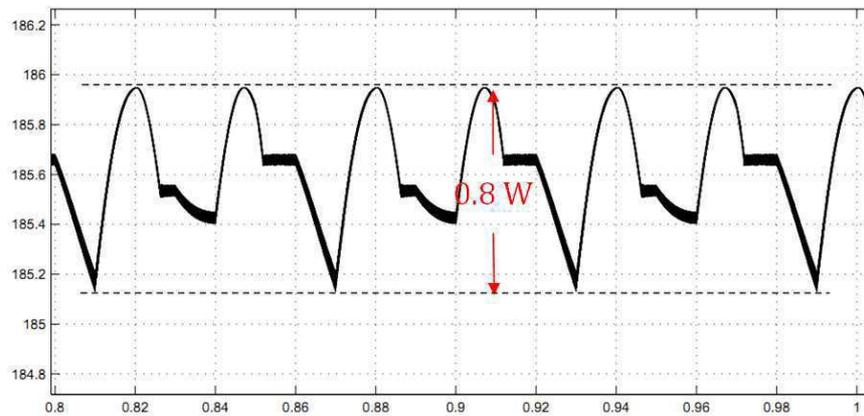
Observa-se que o aumento do passo incremental, reflete diretamente no comportamento do circuito, quanto maior o passo incremental, mais rápido é atingido o PMP, porém o sistema apresenta uma maior flutuação nos valores de tensão e potência.

Ao aumentar o passo incremental, o sistema alcança os níveis de *duty-cycle* referentes ao PMP em menos iterações, resultando em um menor tempo de resposta, porém ao atingir o nível do PMP, o sistema oscila em torno do ponto de operação com um passo incremental fixo de alto valor, provocando grandes variações de potência. Um sistema mais eficiente apresenta um alto passo incremental até o momento de convergência para o PMP e após isso, reduz o passo incremental para diminuir a flutuação em torno do PMP.

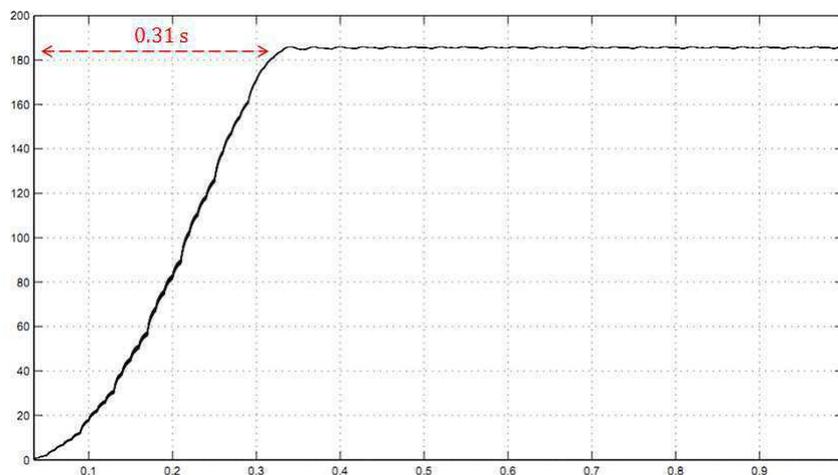
Para os próximos algoritmos que necessitem de passo fixo, será fixado o passo de 2,5%, visto que dentre os resultados obtidos é o que apresenta melhor relação entre tempo de resposta e variações na potência e tensão de saída do painel.

4.3.2 CONDUTÂNCIA INCREMENTAL

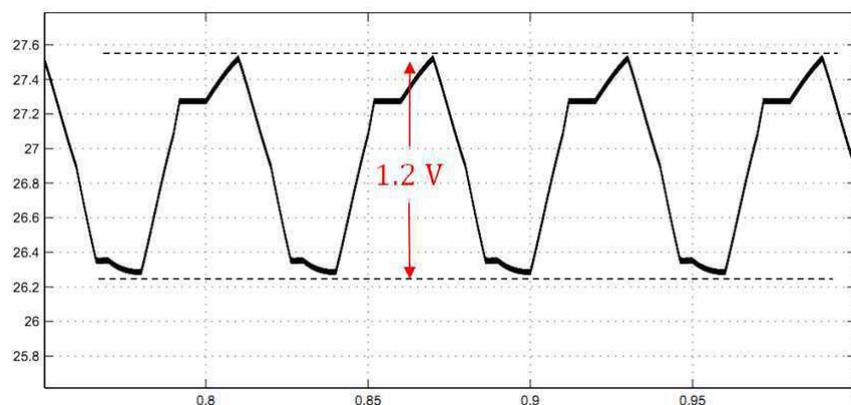
Na Figura 4.5 é exibido o resultado das simulações do algoritmo de condutância incremental. Os valores de irradiação solar e temperatura são respectivamente, $G = 800 \text{ W/m}^2$ e $T = 25^\circ\text{C}$.



(a)



(b)



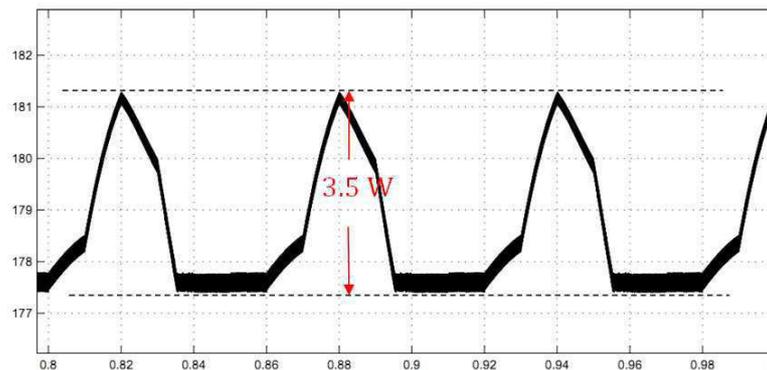
(c)

Figura 4.5 - Simulação do Algoritmo Condutância Incremental, $\Delta D = 2,5\%$. (a) Variação de Potência em regime permanente. (b) Tempo de convergência. (c) Variação da tensão em regime permanente.

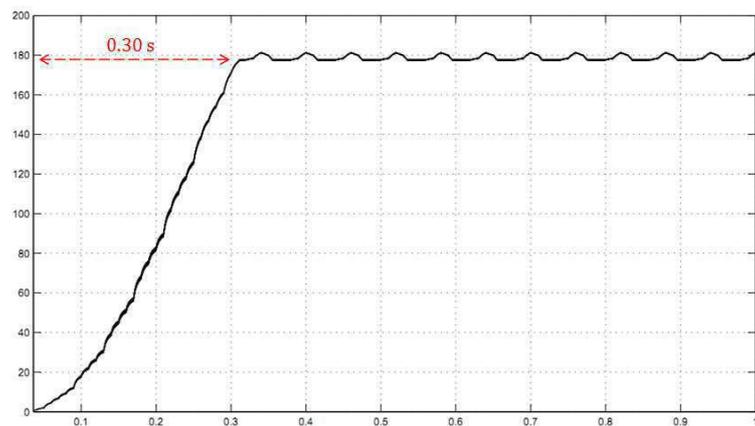
Observa-se na Figura 4.5 que o tempo de resposta foi de 0,31 s, a ondulação de potência de 1,4 W e a ondulação de tensão de 1,7 V.

4.3.3 MÉTODO DA TENSÃO CONSTANTE

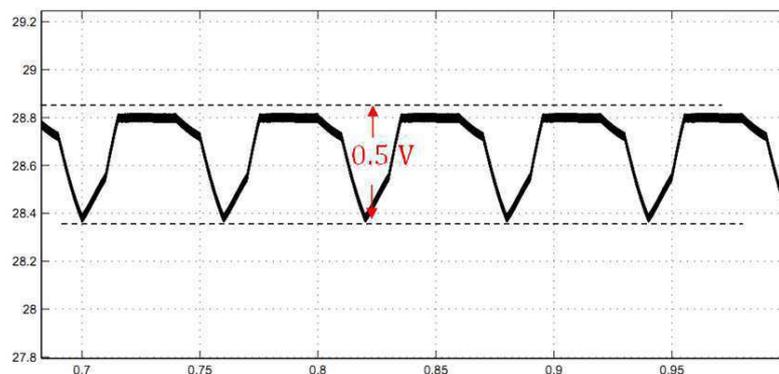
Na Figura 4.6 é exibido o resultado das simulações do método da tensão constante. Os valores de irradiação solar e temperatura são respectivamente, $G = 800 \text{ W/m}^2$ e $T = 25^\circ\text{C}$.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.6 - Simulação do método de tensão constante, $\Delta D=2,5\%$. (a) Variação de Potência em regime permanente. (b) Tempo de convergência. (c) Variação da tensão em regime permanente

Observa-se na Figura 4.6 que o tempo de resposta foi de 0,30 s, a ondulação de potência de 3,5 W e a ondulação de tensão de 0,5 V.

4.3.4 PERTURBAÇÃO E OBSERVAÇÃO MODIFICADO

Esse método apresenta um passo incremental variável e para sua modelagem é necessário determinar o fator de escala N, mostrado em (11). O valor foi calculado empiricamente, observando o valor de dP/dI da curva do painel sob condições nominais.

Com base nos valores máximos de dP/dI no intervalo de tensão centrado no PMP, foi determinado um índice de escala N de modo que os valores máximos de dP/dI multiplicados pelo N sejam da ordem de 8% (valor máximo de *duty cycle* definido).

Foi determinado um intervalo de tensão de aproximadamente 5 V, o que apresenta um intervalo de potência de aproximadamente 10 W (Figura 4.7). Logo, foi analisado dP/dI nesse mesmo intervalo de tensão (Figura 4.8).

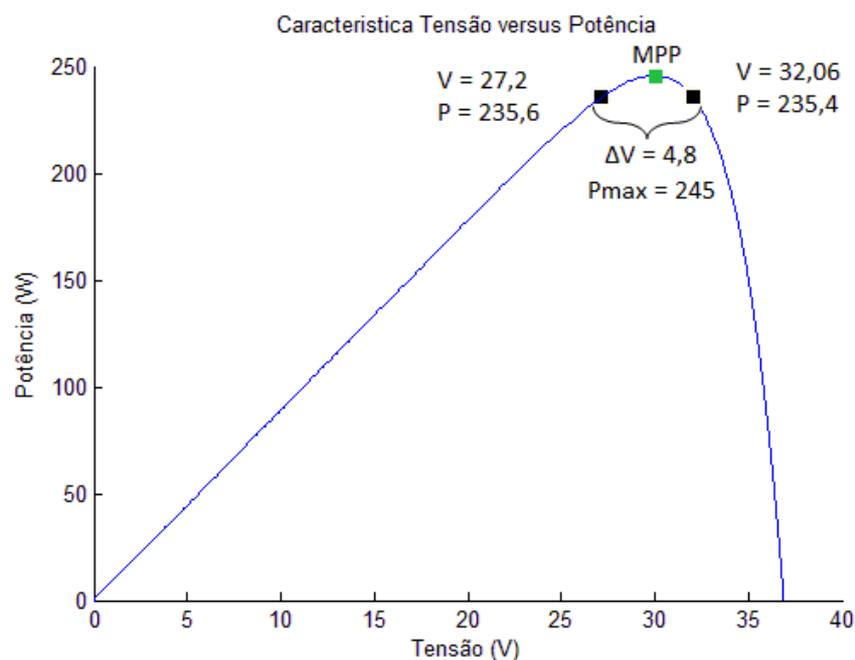
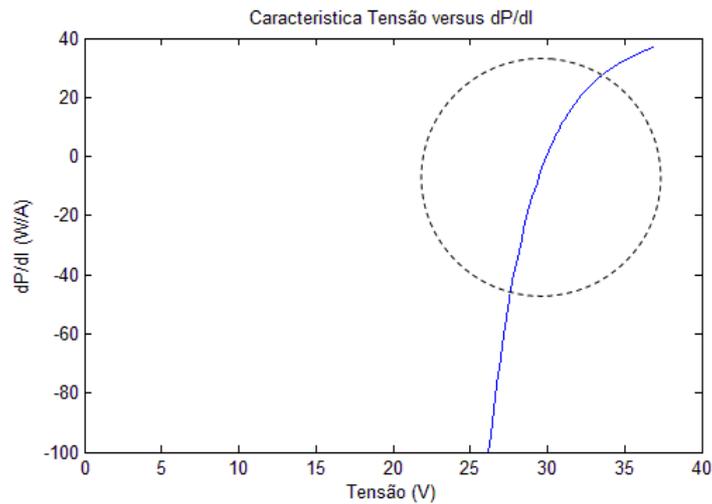
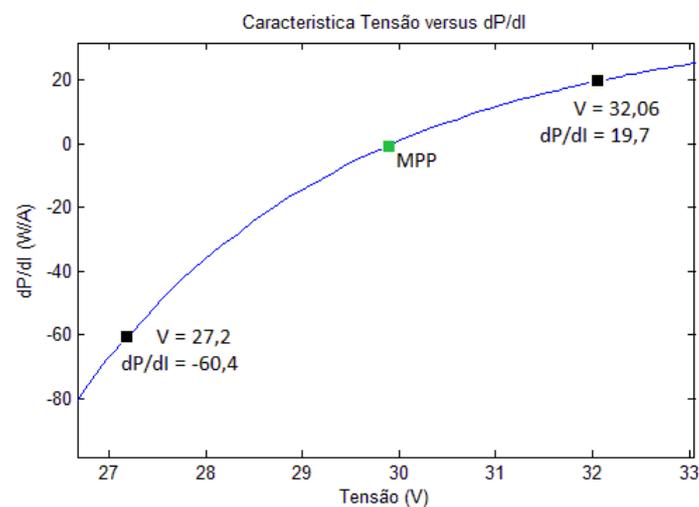


Figura 4.7 - Característica Tensão versus Potência



(a)



(b)

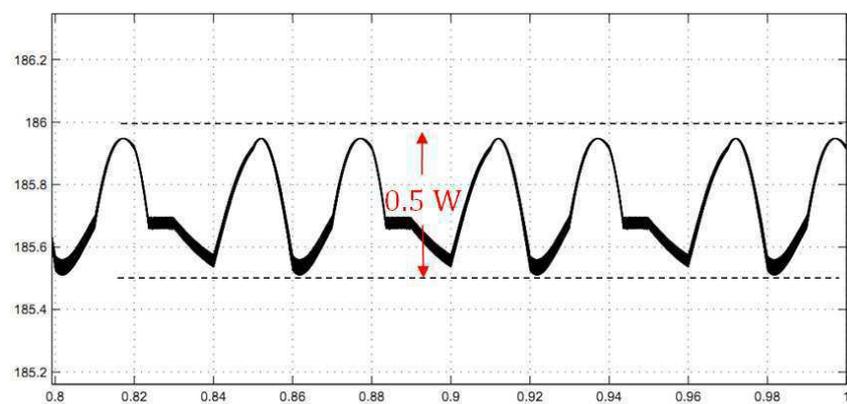
Figura 4.8 – Característica Tensão versus dP/dI. (a) Para todo intervalo de tensão;
(b) para o intervalo de tensão entre 27-33 V;

Definindo como o *duty-cycle* máximo 8%, e determinando como 60,4 o valor máximo de variação de dP/dI, obtem-se:

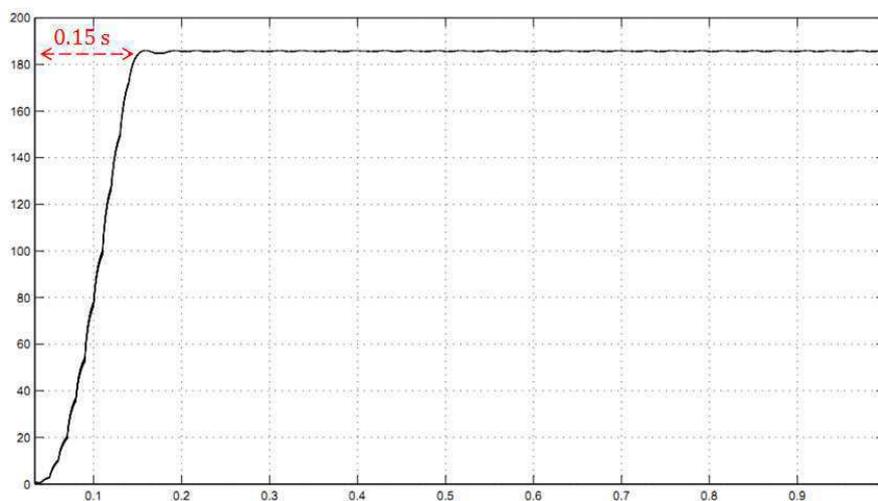
$$N = \frac{0,08}{60,4} = \frac{1}{750}$$

Foi adicionado um bloco para saturar valores de $|dP/dI|$ maiores que 60,4 W/A. Portanto, utilizando como comparação os parâmetros em questão, para valores de potência até 235,6 W o passo incremental será de 8% e após isso varia de acordo com $N \cdot \Delta P / \Delta I$.

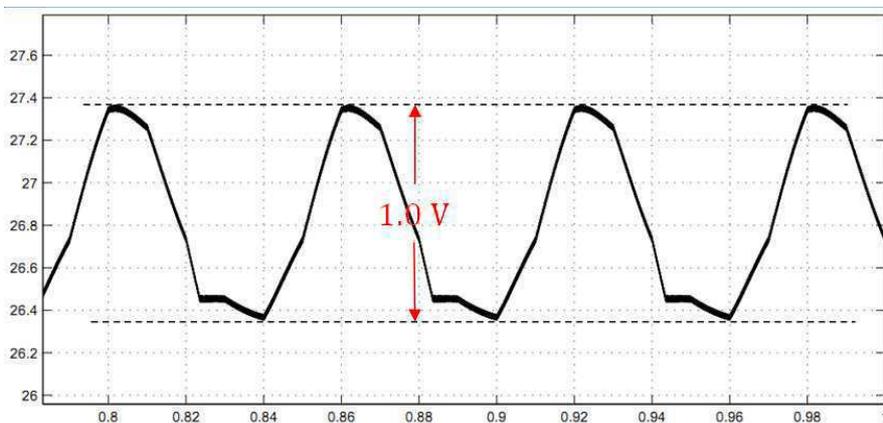
Na Figura 4.8 é exibido o resultado das simulações. Os valores de irradiação solar e temperatura são respectivamente, $G = 800 \text{ W/m}^2$ e $T = 25^\circ\text{C}$.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.9 - Simulação do Perturbação e Observação Modificado. (a) Variação de Potência em regime permanente. (b) Tempo de convergência. (c) Variação da tensão em regime permanente

Observa-se na Figura 4.9 que o tempo de resposta foi de 0,15 s, a ondulação de potência de 0,5 W e a ondulação de tensão de 1,0 V.

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS ALGORITMOS

A partir dos resultados obtidos nas simulações é possível perceber as diferenças de operação entre os algoritmos. A comparação utilizará como base o período de amostragem de 10 ms e a variação de passo igual a 2,5% para os algoritmos de passo incremental fixo. A potência máxima fornecida pelo painel para as condições de irradiação igual a 800 W/m² e temperatura de 25°C é de 188 W. Na Tabela 5 estão explicitados os valores das simulações.

Tabela 4 - Resultado das simulações

Algoritmo RPMP	Resultados			
	Tempo de resposta (s)	Ondulação de potência (W)	Ondulação de tensão (V)	Eficiência (P _{ref} = 188W)
Perturbação e Observação (P&O)	0,33	1,4	1,7	98,53%
Condutância Incremental	0,31	0,8	1,2	98,72%
Tensão Constante	0,30	3,5	0,5	95,50%
Perturbação e Observação Modificado	0,15	0,5	1,0	98,82%

Pode-se notar uma grande semelhança entre as técnicas de Perturbação e Observação e Condutância incremental, apresentando um tempo de resposta e eficiência satisfatórias.

O método da tensão constante apresenta um bom tempo de resposta, pequena ondulação de tensão, elevada ondulação de potência e baixa eficiência se comparado aos demais.

O método que apresenta melhor desempenho é o “Perturbação e Observação Modificado”, apresentando um rápido tempo de resposta, uma pequena ondulação de potência e alta eficiência para as condições dessa simulação.

Para analisar o comportamento das técnicas a mudanças atmosféricas, foi realizada mais uma simulação. Variou-se o nível de irradiação solar como está mostrado na Figura 4.10 e realizou-se a mesma simulação para todos os algoritmos propostos. O resultado das simulações está mostrado na Figura 4.11. A resposta das técnicas RPMP Perturbação e Observação e Condutância Incremental apresentaram respostas bastante similares causando uma poluição visual no gráfico, por esta razão o método da Condutância Incremental foi retirado da figura.

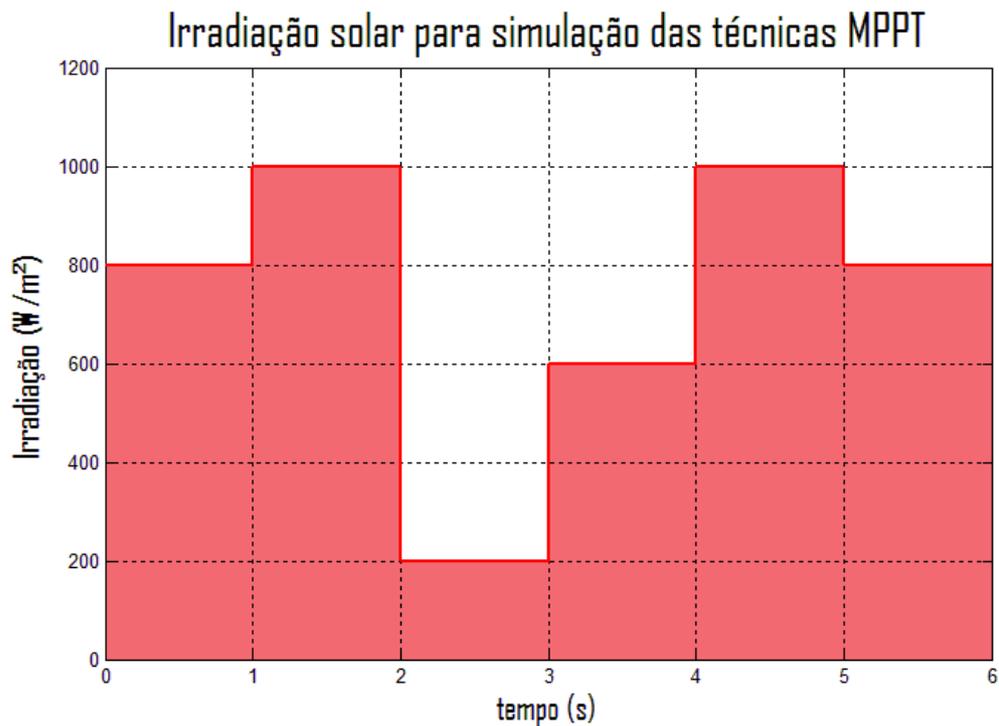


Figura 4.10 – Irradiação solar para simulação das técnicas RPMP

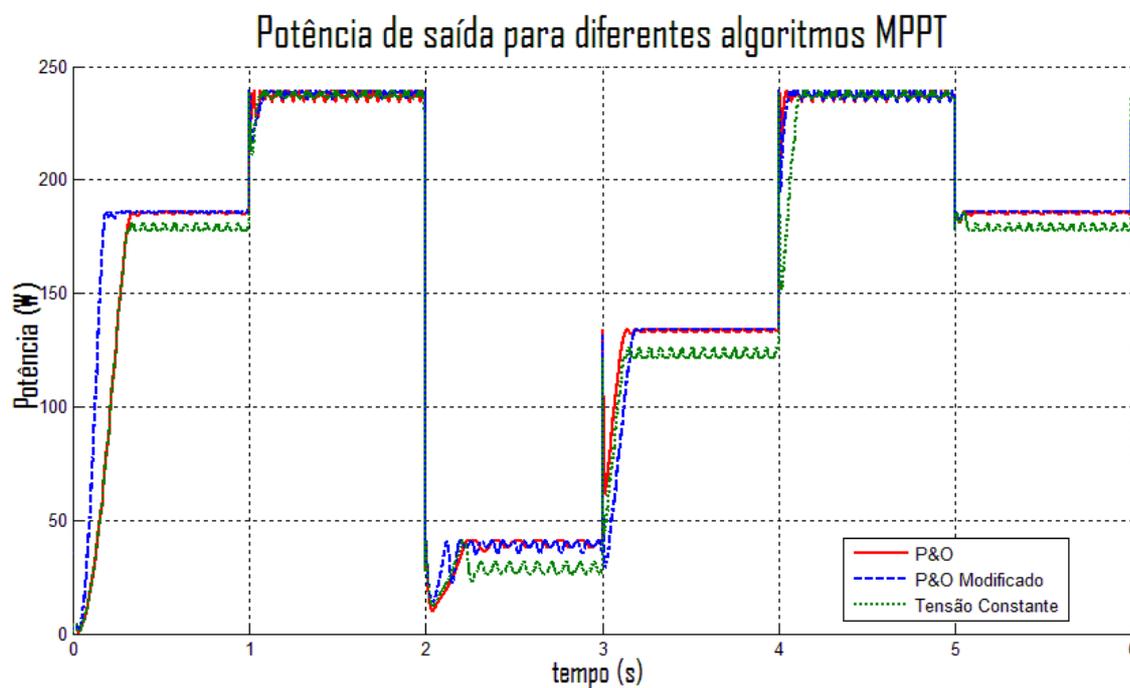


Figura 4.11 - Comparação dos desempenhos dos algoritmos de RPMP para diferentes valores da irradiação solar.

Na Figura 4.10 é clara a ineficiência de rastreamento do PMP do método de tensão constante, o qual opera em uma potência inferior aos demais algoritmos, dado as variações de radiação.

O tempo de resposta para os algoritmos são satisfatórios, onde o algoritmo P&O modificado apresenta melhor desempenho, exceto no intervalo entre 200 W/m² e 600 W/m². Isso deve ser ocorrer pelo dimensionamento da variável de escala N, pois a variável foi determinada utilizando as condições de operações nominais do painel e comportamento de dP/dI muda com a variação da potência.

Com relação à ondulação de potência, pode-se dizer que os algoritmos são menos eficientes para pequenos valores de irradiação, apresentando elevada ondulação de potência. Sendo o algoritmo que apresenta menor ondulação o P&O modificado.

4.5 RECOMENDAÇÕES DE USO

O sistema proposto, utilizando o conversor abaixador Buck, é eficaz para cargas resistivas que apresentam impedâncias menores que o valor da impedância do ponto de máxima potência (V_{MPP}/I_{MPP}), pois para cargas maiores a melhor configuração de potência é deixar o conversor Buck com a chave sempre fechada, impossibilitando a atuação do controlador RPMP. Dado que a função de casamento de impedância do conversor Buck é dada por R/D^2 , onde D é o ciclo de trabalho do conversor.

O sistema é eficaz também quando está conectado a fontes que operem em um nível de tensão abaixo dos valores de V_{MPP} , para este sistema são consideradas tensões abaixo de 20 V, valor obtido pela análise da tensão do PMP para diversas configurações de irradiação e temperatura.

Como o sistema é proposto com a utilização de uma bateria de 12 V e a máxima potência do sistema é de 245 W, obtemos uma impedância de $0,59 \Omega$ à plena carga.

A impedância mínima do PMP se configura nas condições nominais, onde $R_{MPP(\min)} = 29.8/8.23 = 3,62 \Omega$. Portanto o sistema poderá atender de forma satisfatória as solicitações de carga.

5 CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho foi abordado todo o processo que envolve o rastreamento do ponto de operação de máxima potência, RPMP. Inicialmente foram apresentadas as configurações utilizadas no sistema de conversão fotovoltaica, possibilitando a compreensão do comportamento não linear dos painéis fotovoltaicos e a necessidade do uso de técnicas RPMP.

Foram analisados os conversores estáticos que normalmente estão associados a este processo, concluindo-se que o conversor Buck é o mais apropriado para a realização deste projeto, visto que é proposta uma bateria de 12 V na saída do sistema fotovoltaico e a tensão do PMP para diversas condições atmosféricas é sempre maior que a tensão da bateria.

Foram explicitados e analisados alguns métodos de RPMP. Foram efetuadas simulações do sistema fotovoltaico utilizando as técnicas propostas. Por fim, foram realizadas comparações entre os métodos e concluiu-se que o método que apresentou melhor resultado foi o P&O modificado.

Por tudo que foi referido anteriormente, este projeto permitiu uma aprendizagem aprofundada na área de sistemas de conversão de energia fotovoltaica, esta área está em constante desenvolvimento pois apesar de ser uma fonte de energia renovável e abundante, ainda é pouco competitiva em termos de rendimento e custo com relação a outras formas de energia.

O trabalho realizado possibilita uma série de estudos futuros. Por exemplo, realizar novas comparações entre as recentes técnicas desenvolvidas para o RPMP, utilizando a interface de simulação desenvolvida neste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Goetzberger, J. Knobloch, B. Voss, **Crystalline Silicon Solar Cells**, editorial John Wiley & Sons Ltd, 1 ed., Inglaterra, 1998.
- [2] D. Hansen, Poul Sorensen, Lars H. Hansen and. Henrik Bindne, **Models for a Stand-Alone PV System**, *Technical Report of Riso National Laboratory, Roskilde, December 2000.*
- [3] CASARO, M. M.; MARTINS, D. C. **Modelo de Arranjo Fotovoltaico Destinado a Análises em Eletrônica de Potência via Simulação**. *Eletrônica de Potência*, v. 13, n. 3, p. 141-146, 2008.
- [4] SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais. Agosto 2009.
- [5] BRITO, M.A. G. **Avaliação das Principais Técnicas para Obtenção de MPPT de Painéis Fotovoltaicos**. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP. Abril 2010.
- [6] Ahmad Al-Diab, **Variable Step Size P&O MPPT Algorithm for PV Systems**. **International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment**, OPTIM 2010
- [7] VITORINO, M. A. **Sistema de bombeamento fotovoltaico com motor de indução e sem baterias**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Agosto 2008.
- [8] Walker, Geoff. **Evaluating MPPT Converter Topologies Using a Matlab PV Model**. *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, Australia, Vol. 21, No. 1, 2001.
- [9] Markvart, Tomas (ed.) (2000) **Solar electricity**. 2nd edition, John Wiley & Sons
- [10] Yadav, A. Pradeep. **Comparison of MPPT Algorithms for DC-DC Converters Based PV Systems**. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* Vol. 1, Issue 1, July 2012

APÊNDICE – ROTINA DOS ALGORITMOS

A) Método Perturbação e Observação

O algoritmo foi implementado no Matlab e o diagrama de blocos da rotina é mostrado na Figura A.1.

```
function y = fcn(D_P, D_V, Duty)
%#codegen
deltaD = 0.025;
if(D_P >= 0)
    if(D_V >= 0)
        Duty= Duty - deltaD;
    else
        Duty= Duty + deltaD;
    end
else
    if(D_V <= 0)
        Duty= Duty - deltaD;
    else
        Duty= Duty + deltaD;
    end
end
y = Duty;
```

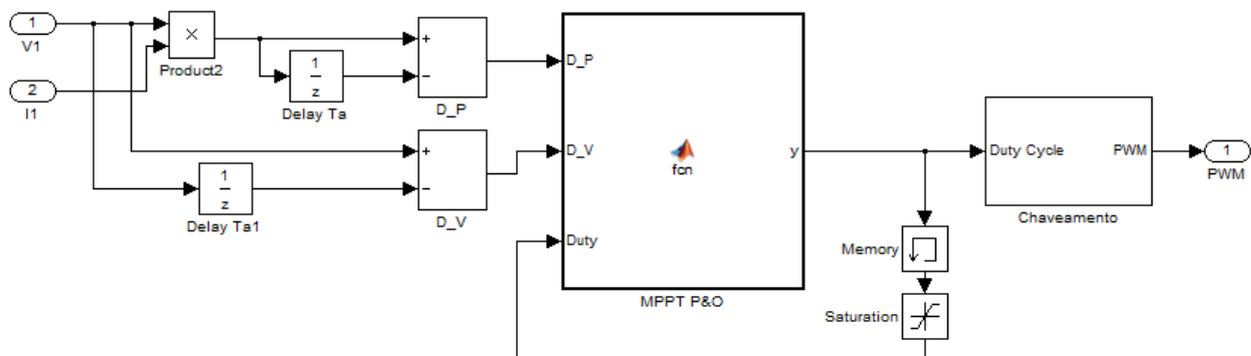


Figura A.1 – Diagrama de blocos do método Perturbação e Observação

B) Método Tensão Constante

O algoritmo foi implementado no Matlab e o diagrama de blocos da rotina é mostrado na Figura B.1.

```
function y = fcn(V, Duty)
%#codegen
deltaD = 0.025;
Vref = 0.78*36.9;
```

```

if(V > Vref)
    Duty= Duty + deltaD;
else
    Duty= Duty - deltaD;
end
y = Duty;

```

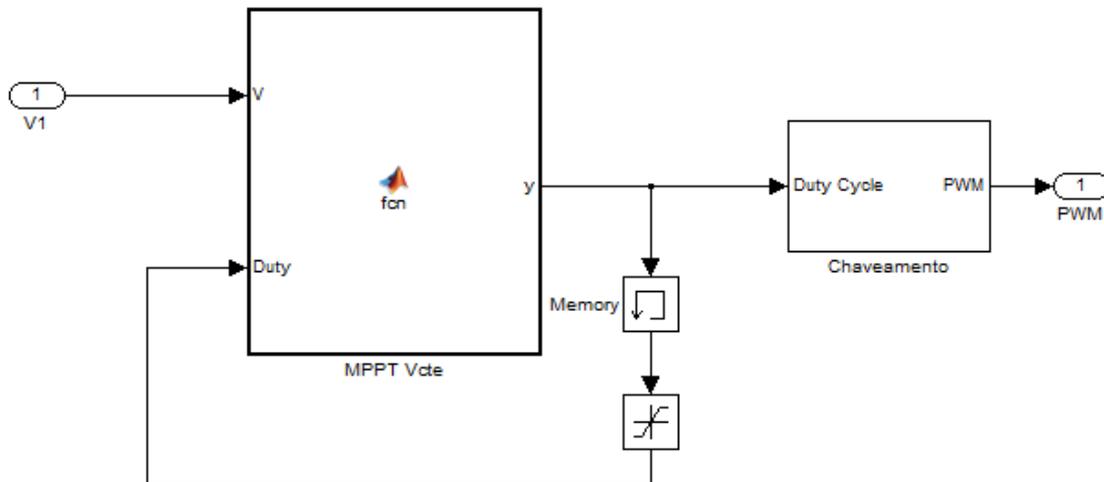


Figura B.1 – Diagrama de blocos do método Perturbação e Observação

C) Método Condutância Incremental

O algoritmo foi implementado no Matlab e o diagrama de blocos da rotina é mostrado na Figura C.1

```

function y = fcn(V, I, D_V, D_I, Duty)
%#codegen
deltaD = 0.025;
if(D_V == 0)
    if(D_I > 0)
        Duty= Duty - deltaD;
    end
    if(D_I < 0)
        Duty= Duty + deltaD;
    end
else
    if(D_I/D_V > -I/V)
        Duty= Duty - deltaD;
    end
    if(D_I/D_V < -I/V)
        Duty= Duty + deltaD;
    end
end
end
y = Duty;
.

```

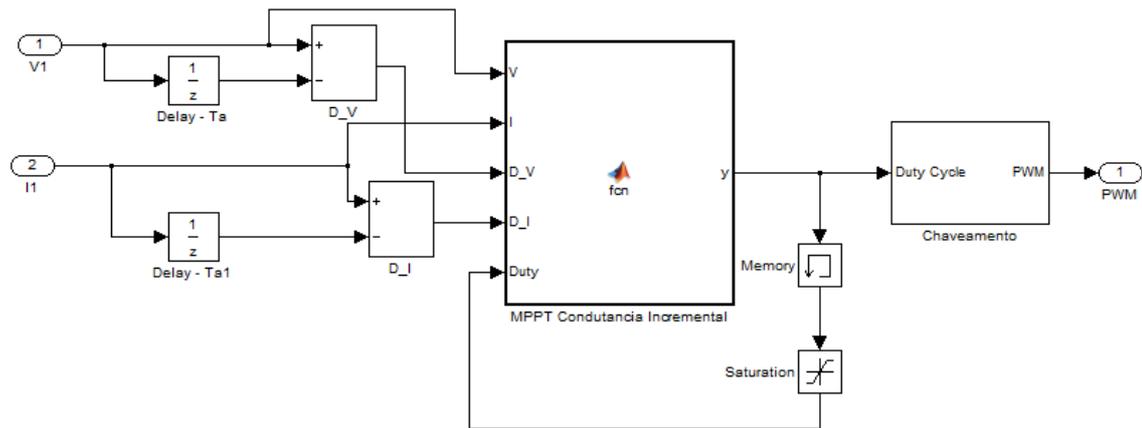


Figura C.1 – Diagrama de blocos do método Perturbação e Observação

D) Método Perturbação e Observação Modificado

O algoritmo foi implementado no Matlab e o diagrama de blocos da rotina é mostrado na Figura D.1.

```
function y= fcn(D_P,D_V,DPDI,Duty)
%#codegen

deltaD = 1/750*DPDI;

if(D_P > 0)
    if(D_V > 0)
        Duty= Duty - deltaD;
    else
        Duty= Duty + deltaD;
    end
else
    if(D_V < 0)
        Duty= Duty - deltaD;
    else
        Duty= Duty + deltaD;
    end
end
y = Duty;
```

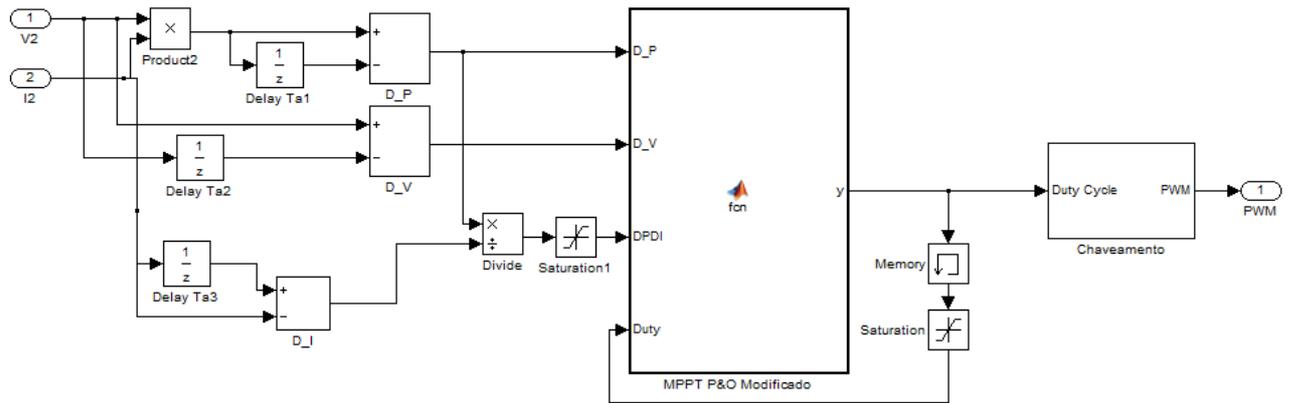


Figura D.1 – Diagrama de blocos do método Perturbação e Observação Modificado

