

**Eixo Temático: Inovação e Sustentabilidade em Diferentes Setores**

**ESTUDO DAS TÉCNICAS DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA  
POTÊNCIA DE UMA CÉLULA SOLAR FOTOVOLTAICA**

Patrícia de Andrade Paines e Nirvan Hofstadler Peixoto

**RESUMO**

Abordam-se, no presente trabalho, algumas Técnicas de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT) de uma célula solar fotovoltaica. A fonte motivadora para a realização deste trabalho foi à existência de várias abordagens e métodos para a obtenção do ponto de máximo aproveitamento da capacidade de geração de energia elétrica de uma célula solar em diferentes condições climáticas, tais como de radiação solar, temperatura ambiente, temperatura da célula solar e cargas durante um determinado intervalo de tempo. Para tal, utilizou-se a pesquisa bibliográfica como metodologia de trabalho, uma vez que a mesma propicia uma releitura de um tema, na busca de um novo enfoque e incentivo na utilização de energias renováveis.

**Palavras-chave:** Ponto de Máxima Potência; Célula fotovoltaica; Energias Renováveis.

## **INTRODUÇÃO**

As células fotovoltaicas são caracterizadas pela sua potência máxima, corrente e tensão em determinadas condições climáticas e tempo de operação. Segundo pesquisas de LASNIER e ANG. (1990), a produção de corrente e tensão de uma célula fotovoltaica dependem do nível de radiação solar e da temperatura ambiente, os quais podem alterar o ponto de operação da célula diretamente acoplado a uma determinada carga, o que faz a suma necessidade de conhecer o comportamento operacional da célula solar.

Para compensar a baixa eficiência das células solares e o alto custo de instalação de painéis fotovoltaicos, o máximo aproveitamento da capacidade de geração de energia elétrica de uma célula solar é obtido através da operação no Ponto de Máxima Potência (MPP), segundo SEGUEL (2009).

Novas abordagens envolvendo estudos e pesquisa de técnicas de Rastreamento do Ponto de Máxima foi à fonte motivadora para a realização deste trabalho. Assim, aborda-se no mesmo algumas formas de maximizar o aproveitamento de geração de uma célula solar.

## **OBJETIVOS**

O principal objetivo desse trabalho é utilizar a pesquisa bibliográfica uma vez que a mesma propicia uma releitura de um tema, permitindo buscar e incentivar novas soluções tecnológicas e inovadoras, visando o uso de fontes alternativas e renováveis.

Segundo entendimentos de Lakatos e Marconi (2003, p. 183), a pesquisa bibliográfica tem por objetivo conhecer as diferentes contribuições científicas disponíveis sobre determinado tema, dando suporte a todas as fases de qualquer tipo de pesquisa, uma vez que auxilia na definição do problema, na determinação dos objetivos, na construção de hipóteses, na fundamentação da justificativa da escolha do tema e na elaboração do relatório final.

## **METODOLOGIA**

Na otimização de projetos de aproveitamento de energia solar é de suma importância o conhecimento das variações da radiação solar e temperatura. A avaliação da potencialidade exige a realização de um levantamento dos níveis de radiação solar e temperatura do ar, por meio de medições com instrumentos e ou utilização de modelos matemáticos para extrapolação dos valores medidos para áreas desprovidas de dados.

Para garantir o maior tempo possível de operação dos painéis no MPP e a maior a eficiência/capacidade do sistema, é necessária uma técnica para procurar este ponto. As técnicas baseadas nesse princípio são chamadas de Técnicas de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT – Maximum Power Point Tracking).

Várias técnicas MPPT foram desenvolvidas, elas variam em muitos aspectos e as principais técnicas desenvolvidas foram: tensão constante, perturbação e condutância incremental e Hill Climbing. E outros métodos são mais experimentais, tais como redes neurais aplicadas e lógica Fuzzy (FARANDA, 2008).

### **1 Técnica de Tensão Constante (CV)**

Estudos de SEGUEL (2009), essa técnica é baseada que no fato da tensão de máxima potência ( $V_{max}$ ) e a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) tem aproximadamente uma relação linear independente de qualquer condição de radiação solar e temperatura.  $V_{max} \approx k_1 \cdot V_{oc}$

Onde  $k_1$ , chamado fator de tensão, depende das características do arranjo fotovoltaico utilizado. Este fator de tensão é geralmente calculado por meios empíricos, determinando  $V_{max}$  e  $V_{oc}$  para diferentes condições meteorológicas.

O fator de tensão é variável e encontra-se geralmente entre 0.7 e 0.8 (OJIMA e KOMATSU (2008)). Uma vez determinado  $k_1$ , o valor de  $V_{max}$  pode ser encontrado e para isso, é preciso desconectar o conversor do arranjo fotovoltaico periodicamente e medir a tensão de circuito aberto  $V_{oc}$ . O valor de  $V_{max}$  é utilizado como referência para ser comparado com a medição da tensão do painel ( $V_{pa}$ ) e gerar um sinal de erro que é utilizado para ajustar a tensão de controle ( $V_c$ ).

Para implementar a técnica é necessário o uso de chaves adicionais para desconectar os painéis fotovoltaicos do conversor de potência para que as aquisições de  $V_{oc}$  possam ser realizadas, o que resulta em uma falta momentânea de energia. Outra desvantagem é o fato de não se poder calcular o novo MPPT até que a medição de  $V_{oc}$  seja realizada novamente. Porém, a principal desvantagem do método é a presença de erro em regime permanente, devido a que a relação  $V_{oc}$  e  $V_{max}$  não é constante. Assim, o arranjo fotovoltaico nunca operará exatamente sobre o MPP (MASOUM, DEHBONEI e FUCHS, 2002).

Existem três parâmetros a serem considerados, o primeiro deles corresponde ao período de amostragem de tensão de circuito aberto ( $T_{ca}$ ), ou seja, o intervalo de tempo e que é desligado o arranjo fotovoltaico do conversor de potência, o segundo é o período de amostragem ( $T_a$ ), intervalo de tempo em que a tensão do painel é amostrada em funcionamento normal e o terceiro parâmetro corresponde ao ganho  $G$  do algoritmo para esta técnica.

Se  $T_{ca}$  for muito grande o MPP não pode ser seguido de cerca para mudanças nas condições meteorológicas. Com relação a  $T_a$  e  $G$ , ambos por conta própria estão relacionados com a velocidade de convergência e a estabilidade da técnica. Para o caso de um  $T_a$ , uma diminuição de seu valor permite aumentar a velocidade de convergência embora aumente a ondulação de potência em regime permanente, podendo chegar a instabilidade da técnica para valores muito pequenos. Para o caso do ganho  $G$ , um aumento do seu valor aumentará a velocidade de convergência e acrescentará também a ondulação em regime permanente da potência de saída do painel, chegando a ser instável para ganhos muito grandes (SEGUEL, 2009).

Para analisar o comportamento da técnica a mudanças atmosféricas, mantêm-se a temperatura do arranjo fotovoltaico constante e varia-se a radiação incidente. Também é possível manter a radiação incidente constante e variar a temperatura do arranjo. Quando a radiação atinge um valor baixo, se reduz muito a eficiência da técnica, devido ao valor do fator de tensão dos painéis ser baixo. Para a potência fornecida pelo arranjo para variações na sua temperatura e radiação incidente constante, o rendimento dos painéis é afetado quando a temperatura varia bruscamente. Isso explica basicamente o fato do fator de tensão se sensível a mudanças de temperatura.

## **2 Técnica de Perturbação e Observação (P&O)**

Consiste em perturbar a tensão do arranjo solar em uma dada direção, e observar o comportamento da sua potência de saída. Se a potência aumentar, a perturbação continua na mesma direção, caso contrário o sistema é perturbado na direção contrária. O processo descrito é repetido periodicamente e percebe-se que o MPP nunca será atingido, pois a técnica estará sempre perturbando a tensão do arranjo fotovoltaico.

Logo, em regime permanente o sistema oscila em torno do MPP desperdiçando um pouco de energia disponível nos painéis. Essa oscilação pode ser minimizada reduzindo o tamanho da perturbação, porém perturbações muito pequenas tornam a técnica lenta para rastrear o MPP. Para AZEVEDO (2007) existem dois parâmetros a serem definidos nesta técnica.

- a) Período de amostragem ( $T_a$ ), que corresponde ao intervalo de tempo em que é amostrada a tensão do arranjo fotovoltaico e, para o caso da técnica P&O, também da corrente do arranjo.
- b) Tamanho da perturbação ( $\Delta V$ ) aplicada à tensão de referência. Com relação a  $\Delta V$ , tem-se uma limitação prática que impede a escolha de perturbações muito pequenas. Tem-se que evitar que as perturbações na tensão de referência tenham a mesma ordem de grandeza que as oscilações presentes na tensão de barramento CC provocadas pelas não linearidades do conversor de potência e ruídos nas medições.

A escolha de um período de amostragem pequeno permite detectar rapidamente modificações nas condições meteorológicas, rastreando em menor tempo o novo MPP. Porém, existe uma limitação para o valor mínimo de  $T_a$  imposta pela dinâmica do conversor de potência. O  $T_a$  deve ser escolhido como sendo superior ao tempo de estabilização da tensão de saída do conversor para evitar instabilidade da técnica MPPT.

Entre as limitações desta técnica, citam-se a presença de erro em regime permanente, resposta dinâmica lenta e operação fora do ponto de máxima potência, caso ocorram mudanças rápidas na temperatura e na radiação solar.

É possível afirmar o aumento de  $\Delta V$  produz um aumento também na velocidade de convergência, embora também se acrescente um ripple de potência em regime permanente. A diminuição do período de amostragem aumenta a velocidade de convergência, porém tende a aumentar a ondulação de potência em regime permanente. Para avaliar o comportamento da técnica a mudanças atmosféricas, consideram-se as mesmas condições da técnica CV.

### 3 Técnica de Condutância Incremental (INcCod)

A curva de Potência versus Tensão do arranjo de painéis fotovoltaicos é utilizada para a busca do MPP. Ela baseia-se nos valores da condutância instantânea e incremental do arranjo fotovoltaico. Essas grandezas são obtidas pelas medições de corrente e tensão do arranjo solar.

A derivada da potência de arranjo fotovoltaico em relação à tensão pode-se escrever da seguinte forma:  $\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV}$

Dividindo cada membro por V, tem-se:  $\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV}$

Como V sempre é positivo, o sinal da derivada de potência em relação à tensão é igual a  $(I/V + dI/dV)$ , ou seja, à soma da condutância instantânea ( $I/V$ ) e a condutância incremental ( $dI/dV$ ). Assim, esta técnica permite avaliar em que lado da curva de potência o sistema se encontra e também consegue identificar quando o sistema está operando no MPP, pois nessa condição  $dP/dV = 0$  e conseqüentemente  $I/V + dI/dV = 0$ . Quando essa condição é atingida, não é necessário alterar o ciclo de trabalho do conversor, pois significa que ele está operando no ponto MPP e a tensão de referência deve ser mantida. Dessa forma, evita-se o problema de oscilação do ponto de operação em torno do MPP.

Quando o sistema está operando no MPP a tensão do arranjo é mantida constante, então  $\Delta V=0$  e a condutância incremental não pode ser determinada. Neste caso, evita-se o

cálculo da condutância incremental e apenas a corrente do arranjo é avaliada. Para essa condição, se a corrente muda significa que o MPP mudou, assim uma perturbação é aplicada ao sistema para que se possa rastrear o novo MPP.

Nesta técnica, é preciso definir os parâmetros  $T_a$  e  $\Delta V$ . As mesmas considerações feitas para a técnica P&O são válidas. No entanto, esses não são os únicos parâmetros a serem definidos. Na prática a expressão  $I/V + dI/dV = 0$  que indica que o sistema esteja operando no MPP dificilmente será satisfeita, devido a ruídos de medição, erros de quantização e principalmente a discretização da tensão de referência (AZEVEDO, 2007). Neste caso, é necessário definir uma faixa tolerável ( $\Delta W$ ) em torno de zero, onde tal condição pode ser considerada verdadeira, ou seja,  $-\Delta W/2 < I/V + dI/dV < \Delta W/2$ . Se  $\Delta W$  é muito grande, a tensão de referência vai estabilizar em um valor muito distante da tensão de referência de máxima potência ( $V_{refmax}$ ). Pelo contrário se  $\Delta W$  é muito pequeno, a tensão de referência irá oscilar em torno de  $V_{refmx}$ . Em ambos os casos ocorre uma diminuição da eficiência técnica. A busca de um critério analítico para a escolha de  $\Delta W$  é complexo.

Para representar é necessário o desenvolvimento de um algoritmo, onde se deve ajustar o tamanho de  $\Delta W$ , realizando simulações para diferentes valores de  $\Delta W$ . É possível afirmar que para um valor muito grande da faixa de tolerância, a tensão de referência estabelece-se em um valor distante de  $V_{refmax}$  (SEGUEL, 2009).

Ao reduzir o nível de ondulação de tensão do arranjo, tem-se uma ondulação menor na potência fornecida pelo arranjo fotovoltaico, o que permite obter uma melhor eficiência na extração da energia solar.

#### **4 Hill Climbing (HC)**

Como o nome desta técnica já diz, subida de colina, este processo funciona aumentando ou diminuindo o ciclo de trabalho de um conversor Buck ou boost CC-CC, e observar seu impacto sobre a potência de saída. Esta potência é comparada ao seu valor anterior e de acordo com o resultado da comparação, o sinal de inclinação, ou é complementada ou permanece inalterada. Então o ciclo de trabalho PWM de saída é alterada em conformidade (DAOUD e MIDOUN, 2008).

Este método é adaptativo a perturbações ambientais, por exemplo, a contaminação da superfície do painel fotovoltaico, a degradação do desempenho elétrico ao longo dos anos, e assim por diante. No entanto, leva um tempo consideravelmente longo para buscar o ponto de potência máxima por causa das operações sucessivas.

#### **5 Fonte Emuladora de um Painel Fotovoltaico**

Uma fonte emuladora de um painel fotovoltaico é baseado na caracterização de um conversor, utilizando curvas de polarização para diferentes níveis de irradiação solar. Curvas adicionais podem ser obtidas numericamente através das curvas  $I \times V$  para aproximações razoáveis. A irradiação solar e a corrente de carga são variáveis de entrada. A Figura 1 mostra três curvas para a simulação de uma fonte emuladora Siemens Pro4 JF, para três níveis de irradiação solar diferentes.

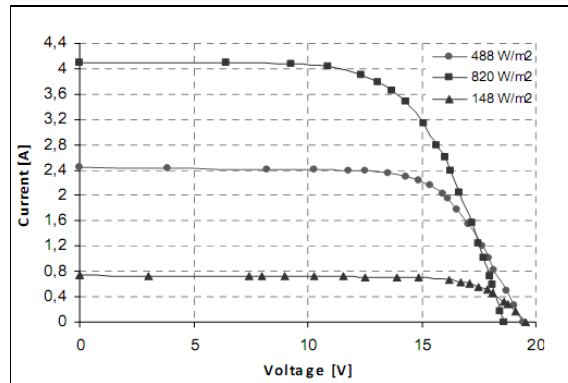


Figura 1: Curvas para três níveis diferentes de irradiação.

É possível observar que a curva dos 820 W/m<sup>2</sup> tem uma tensão de circuito aberto menor em comparação com as curvas de baixa irradiação. Isso ocorre pois a tensão gerada é dependente da temperatura, uma vez que uma maior irradiação incidente faz aumentar a temperatura. Onde a corrente é diretamente proporcional a irradiação G, como mostra a equação:  $\frac{I_{\lambda}}{I_{\lambda 0}} = \frac{G}{G_0}$

Onde mais precisamente,  $I_{\lambda}$  é uma função da temperatura T em curto circuito e da irradiação G, como mostra a equação:  $I_{\lambda} = I_{SC0} \frac{G}{G_0} [1 + \alpha (T - T_0)]$

Para aumentar o ganho da corrente gerada pela fonte de emulação com mudanças de temperatura e de tensão de circuito aberto  $V_{OC}$ , aumenta-se a irradiação para mudar a voltagem e a tensão reversa do diodo. Assim, a tensão de circuito aberto  $V_{OC}$  pode ser determinada pela equação:  $V_{OC} = V_{OC0} (1 - \beta \Delta T)$

Onde as variáveis com sub-índice 0 referem-se às condições padrões de teste,  $\alpha$  é o coeficiente de temperatura de curto circuito e  $\beta$  é uma constante relacionada ao tipo de material do painel fotovoltaico. Por esta equação, pode-se verificar que um aumento da temperatura diminui o fator multiplicativo de  $V_{OC0}$ , reduzindo a tensão de circuito aberto [10].

As curvas de polarização IxV para diferentes níveis de irradiação são linearmente interpolados usando outras curvas experimentais, em níveis acima de irradiação ( $G_H$ ) e níveis abaixo de irradiação ( $G_L$ ) dos valores reais medidos. A partir do valor real de irradiação ( $G_A$ ), as curvas de diferentes níveis de irradiação são obtidas com a interpolação constante de  $C_i$ , como mostra a equação:  $C_i = \frac{G_A - G_L}{G_H - G_L}$

Para cada  $C_i$  definido, é determinada uma nova curva de polarização, calculando cada ponto I-V através das equações:  $V_A = V_L + C_i (V_H - V_L)$  e  $I_A = I_L + C_i (I_H - I_L)$

Através destas equações, podem-se determinar as outras curvas para irradiações diferentes, como mostra o exemplo da Figura 2, onde as curvas mostradas são as sem preenchimento.

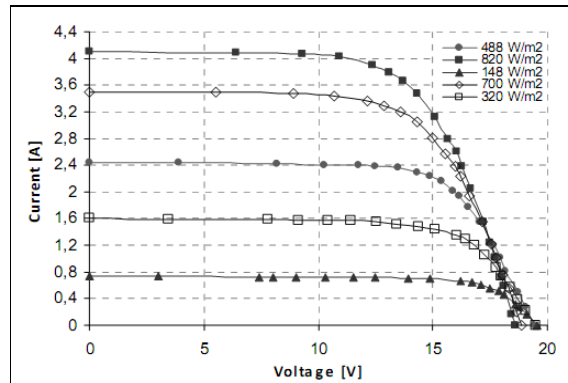


Figura 2: Curvas de polarização e curvas interpoladas.

Como observado nas Figuras 1 e 2, no processo de interpolação é intrínseco o efeito da temperatura, e este efeito é mais evidente com baixa corrente de carga.

## 6 Tensão em aberto OV(Open – Voltage)

O funcionamento de um seguidor de tensão em circuito aberto (OV) é muito semelhante à do sistema de seguimento da corrente de curto-circuito, sendo este aplicado à tensão.

A tensão em MPP tem uma relação próxima (em %) da tensão em circuito aberto ( $V_{ca}$ ), sendo que variações na temperatura e radiação modificam este valor numa janela de 2%. De um modo geral é utilizado o valor de 76% de tensão  $V_{ca}$  para o valor de  $VMPP$ .

De modo análogo a SC, OV requer que o painel seja desligado do conversor de modo a medir a tensão em aberto, com os inconvenientes que tal acarreta.

## 7 Medição da temperatura

A tensão em vazio da célula solar varia principalmente com a temperatura à qual se encontra. Obtendo os valores da temperatura da célula, tensão do painel e/ou radiação incidente é possível através da aplicação da formula especifica encontrar o ponto de funcionamento MPP do painel.

## 8 Célula piloto

No método de seguimento da célula piloto é utilizada uma célula com as mesmas características das presentes nos módulos do painel. Esta encontra-se posicionada junto com o painel de modo a estar sujeita às mesmas condições de radiação e temperatura.

Um algoritmo de OV ou SC é primeiramente aplicado sobre a célula piloto, quando o ponto MPP da célula é encontrado os resultados são aplicados no painel. Este método elimina as perdas provocadas por estes métodos para medir  $I_{sc}$  e  $V_{ca}$ . Por outro lado a célula utilizada tem de ser selecionada cuidadosamente para que possa refletir corretamente o comportamento do painel. A célula piloto devido à sua localização pode não estar nas mesmas condições gerais que o resto do painel (sujeidade, sombra), o que pode levar a um MPP errado.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho visa pesquisa bibliográfica de escritos de diversos autores, tais como Azevedo, Bonifácio, Seguel e entre outros. E tem como principal objetivo o conhecimento dos vários métodos de obter o Ponto Máximo de Potencia de uma célula solar. E assim, proporcionando o interesse em realização de testes e simulações de células solares monocristalinas de maior rendimento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, Gustavo M. S. Sistema de conversão de energia fotovoltaica com compensação baseada em Corrente e Tensão. Dissertação de mestrado – UFPE. Recife – PE, 2007.
- BONIFÁCIO, P. J. S. Seguidor fotovoltaico: uma variação do p&o - simulação e prototipagem. Dissertação de Mestrado – FCT. Lisboa – PT, 2010.
- DAOUD, A. and MIDOUN, A. Single Sensor Based Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Technique for Solar Water Pumping System. *Electrical Power Quality and Utilisation*, Journal Vol. XIV, No. 2, 2008.
- FARANDA, R. Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems. *WSEAS Transactions on Power Systems* , 446-455, 2008.
- LAKATOS, E.M; MARCONI, M.A. Fundamentos de metodologia científica. 5.ed. São Paulo: Atlas, 2003.
- LASNIER, F.; ANG, G. T. Photovoltaic engineering handbook. Ed. IOP Publishing Ltd. New York-USA. 1990. 548p
- MASOUM, M. A. S.; DEHBONEI, H. and FUCHS, E. F. Theoretical and Experimental Analyses of Photovoltaic Systems with Voltage- and Current-Based Maximum Power-Point Tracking. *IEEE Transactions Energy Conversion*, Vol. 17, pp. 514-522, 2002.
- OJIMA, D. T. and KOMATSU, W. A MPPT Algorithm Implementation Using FPGA for an Experimental PV System. 9<sup>th</sup> Brazilian Power Electronics Conference, pp. 672-675, 2008.
- SEGUEL, Julio I. L. Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital. Dissertação de Mestrado - UFMG. Belo Horizonte – MG, 2009.
- TRAPP, J. G.; LIMA, L. P.; FARRET, F. A.; FERNANDES, F. T. and BALEN, G. FC and PV emulation by buck converter based on experimental VxI curves and dynamic response. COPEB 2011.