

PROPOSTA DE ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO BASEADO EM REDES NEURAS ARTIFICIAIS

Eduardo Antonio Cardoso¹ – eduardo.cardoso@aluno.ufabc.edu.br

Federico Bernardino Morante Trigo² – federico.trigo@ufabc.edu.br

Ricardo da Silva Benedito² – r.benedito@ufabc.edu.br

José Luis Azcue Puma¹ – jose.azcue@ufabc.edu.br

¹Universidade Federal do ABC, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

²Universidade Federal do ABC, Programa de Pós-graduação em Energia

Resumo. Como a demanda por energia tem aumentado nos últimos anos, a utilização de energias renováveis e não poluentes tem tido um destaque e atraído a atenção, dentre elas a energia solar tem crescido bastante, principalmente nesta última década. As células solares possuem a característica básica de converter diretamente a energia solar em eletricidade, mas a eficiência na conversão depende em grande parte de condições atmosféricas como a incidência de irradiação solar, temperatura e velocidade do vento. Visando obter a melhor relação de potência gerada foram desenvolvidos diversos algoritmos que buscam encontrar o ponto no qual a potência gerada no módulo fotovoltaico seja a máxima para cada um dos parâmetros que degradam a eficiência. Neste trabalho foram mostradas algumas abordagens destes algoritmos que são comumente utilizados e foi proposto um algoritmo utilizando uma rede neural artificial. A simulação apresentada mostra as vantagens do uso do método proposto para ser uma alternativa vantajosa em relação ao método mais convencional.

Palavras-chave: Energia Solar, Efeito Fotovoltaico, Rastreamento do Ponto de Máxima Potência.

1. INTRODUÇÃO

A sociedade mundial atual exige uma necessidade crescente de energia. No relatório divulgado recentemente por REN21 (2017) a média da demanda por energia cresceu 2% nos últimos dez anos. As principais fontes de geração de energia ainda são as originárias de combustíveis fósseis e da energia nuclear que juntas contribuíram com 80,7% do consumo total de energia estimada para o ano de 2015, em contrapartida observa-se uma tendência em optar pela energia gerada por fontes renováveis, que são fontes inesgotáveis e não poluentes. Comparando os dados do relatório com o trabalho de Bastos *et al.* (2012), que mostra os dados referentes a 2008, o uso de fontes renováveis cresceu de 19% para 19,3% sendo que a fatia das fontes como hidroeletricidade, energia solar e eólica representaram 10,2%, contra uma estimativa de apenas 6% em 2008.

Assim, o uso de fontes de energia renováveis torna-se uma opção confiável e vem apresentando um crescimento superior ao da demanda da última década demonstrando que há um esforço mundial em buscar alternativas para geração de energia visando substituir a de origem fóssil.

A energia solar fotovoltaica teve um forte crescimento nesta última década, e é um meio para que o acesso à energia possa atingir pequenas comunidades como uma alternativa à rede de energia convencional. Além disso, com a queda dos custos de fabricação. Rodrigues, Teixeira e Braga (2003) esclarecem que esta solução tem se tornado economicamente viável em aplicações de geração distribuída, na qual ocorre geração de energia elétrica monofásica em pequena escala injetada entre a rede elétrica e as cargas no chamado ponto de acoplamento comum (PCC, do inglês *point of common coupling*), no qual auxilia o suprimento da demanda local através da injeção de potência no sistema elétrico caso haja excedente de geração, nesta configuração, o medidor de energia elétrica necessita ser bidirecional para registrar tanto o consumo como a geração.

Os módulos fotovoltaicos são os responsáveis pela conversão da energia solar em energia elétrica. Eles são constituídos de várias células fotovoltaicas interligadas para fornecer um valor de tensão e corrente elétrica que tenha utilização prática além de ser um conjunto que promove proteção adequada às células. Em Pinho e Galdino (2014) é mostrado que a eficiência na conversão de energia das melhores células solares fabricadas em laboratório feitas de Silício monocristalino é da ordem de 25% que representa um valor baixo quando é feita uma comparação com outras formas de geração de energia utilizadas atualmente.

Outro ponto importante a ser considerado é que a tensão e a corrente de saída dos módulos fotovoltaicos também variam conforme as condições ambientais como a temperatura e incidência da radiação solar. Para conseguir extrair a máxima potência do módulo diante destas variáveis, são utilizados conversores c.c./c.c. (corrente contínua) com algoritmos para o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT, do inglês: *Maximum Power Point Tracking*). Com a evolução das pesquisas no desenvolvimento de novos algoritmos para busca do MPPT a eficiência aumenta e há um melhor aproveitamento da geração de energia ao longo do dia.

Este trabalho compara alguns dos algoritmos de MPPT com a simulação computacional no ambiente Matlab/Simulink e também através de testes como a ocorrência do efeito do sombreamento no módulo fotovoltaico que representa uma condição que altera as características de funcionamento do módulo de modo abrupto e necessita que o algoritmo tenha uma convergência rápida para o novo ponto de máxima potência.

2. MODELO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Khamis e Shareef (2013) mostram o aumento de benefícios ambientais, alta confiabilidade e a eficiência com geradores distribuídos constituídos com sistemas fotovoltaicos, no entanto existem problemas operacionais relacionados com a segurança e qualidade de energia. Normas internacionais como a IEEE STD 929-2000, IEEE STD 519-1992, IEEE STD 1547-2001 e IEC 61727 e brasileiras como a NBR 16149 e NBR 16150 abordam questões sobre as características da interface de conexão dos sistemas fotovoltaicos com a rede elétrica, expondo ensaios que atestam a conformidade. Definem parâmetros importantes a serem observados no desenvolvimento dos sistemas, como níveis de conteúdos harmônicos máximos que podem ser injetados na rede ou sistemas de proteção que garante que a rede seja desligada em caso de falta de rede elétrica, evitando a ocorrência do chamado ilhamento na geração distribuída.

2.1 Rastreamento do ponto de máxima potência

Os módulos fotovoltaicos, segundo Zhang (2013), são dentre as fontes renováveis de geração de energia as mais promissoras devido a abundância e à disponibilidade da energia solar por todo o mundo. Consta-se que o investimento nesta fonte de energia tem aumentado rapidamente. No entanto, deve-se destacar que a energia solar é intermitente e possui uma flutuação devido as diversas condições ambientais. Neste sentido, um dos pontos de maior interesse nas pesquisas é aproveitar a máxima potência disponível da energia solar que flui pelo módulo fotovoltaico. Como também salientou Dash *et al.* (2014) as alterações de irradiação e temperatura modificam os pontos de operação dos módulos fotovoltaicos ocasionando que ele não gere a máxima potência disponível, sendo necessário, o rastreamento constante deste ponto para eliminação do erro entre a carga e os pontos de máxima tensão e corrente. A implementação de um algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) também influi no custo da instalação de um sistema fotovoltaico porque reduz o número de módulos fotovoltaicos requerido para se obter uma determinada potência na saída.

O algoritmo de MPPT, como foi assegurado por Aliesfahani e Shahbazian (2015), é obtido por um método que seja rápido e eficiente. Constitui um grande desafio, pois, há variáveis como irradiação solar, temperatura e velocidade do vento alterando constantemente inibindo que se extraia o máximo do potencial sistema fotovoltaico. Porém para Rodrigues, Teixeira, e Braga (2003), apesar de não ser essencial para o funcionamento do sistema, a inclusão deste requisito pode aumentar a energia gerada em até 11%, assim ficam claras as vantagens em implementar um bom algoritmo de MPPT para o módulo fotovoltaico.

O modelo apresentado para a célula fotovoltaica é utilizado para realizar as simulações computacionais. Como mostrado em Roque (2014) a simplificação é constituída de uma fonte de corrente, I_{pv} , um diodo, D , e resistores em série, R_s , e em paralelo, R_p , a Fig. 1 mostra o modelo.

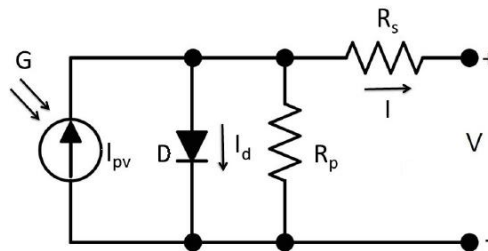


Figura 1 – Modelo equivalente de uma célula fotovoltaica
Fonte: Adaptado de Casaro (2008)

A irradiação incidente, G , controla a fonte de corrente, o efeito da recombinação das portadoras é simulado pela presença do diodo, D , devido a corrente reversa, I_d , e das resistências, a eq. (1) representa o circuito equivalente do módulo através da equação característica.

$$I = I_{pv} - I_d \left[e^{\left(\frac{V + R_s I}{V_T a} \right)} - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (1)$$

Esta equação é não-linear, a corrente nos terminais de saída, I , não pode ser isolada na equação, o termo, V_T , é a tensão térmica do painel e seu valor é obtido pela relação $N_s k T / q$, sendo N_s o número de células em paralelo no módulo, k é a constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$), T é a temperatura da junção p-n e q é a carga do elétron ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$), além destas constantes, a é o chamado fator de idealidade do diodo, que também foi considerado na fórmula.

Para cada valor da tensão de saída, V , pode-se determinar a corrente, I . Assim, a partir desta equação são levantadas as chamadas curvas características. A Fig. 2 mostra a relação entre corrente e tensão, gráfico I-V e também a curva que pode ser obtida pela relação entre a potência e tensão, gráfico P-V. Nesta curva observa-se que a potência gerada é nula nos pontos que correspondem a corrente e tensão nulas, I_{sc} e V_{oc} respectivamente e existe um único par de valores, V_{max} e I_{max} no qual a potência de saída é máxima, P_{max} .

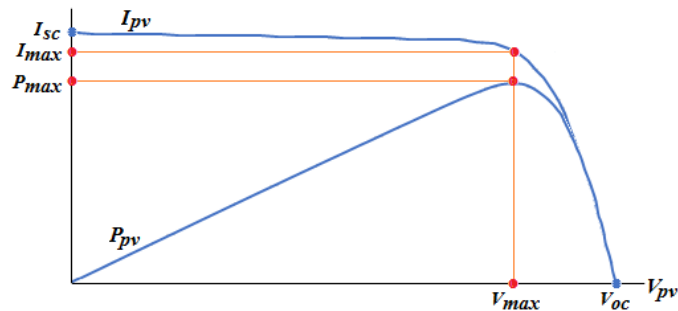


Figura 2 – Curvas características I-V e P-V de um módulo fotovoltaico
Fonte: Adaptado de Casaro (2008)

É importante salientar os cinco pontos principais das curvas características, a tensão de circuito aberto V_{oc} , a corrente de curto circuito I_{sc} (do inglês: *short circuit current*), potência máxima P_{max} e os valores de tensão e corrente máximos que são relacionados a P_{max} , V_{max} e I_{max} respectivamente.

O aspecto do gráfico mostrado pela Fig. 2 irá variar com a temperatura e com a irradiação. Em dias nublados, a irradiação é menor e a corrente produzida será proporcionalmente menor. Para dias cuja temperatura é mais elevada é a tensão produzida que diminui proporcionalmente. Por isso, as curvas fornecidas na documentação dos fabricantes são apresentadas como na Fig. 3, em que há um conjunto de curvas para a temperatura constante (a) e outro para a irradiação constante (b). Elas são as curvas do modelo do módulo fotovoltaico utilizado nas simulações realizadas neste trabalho.

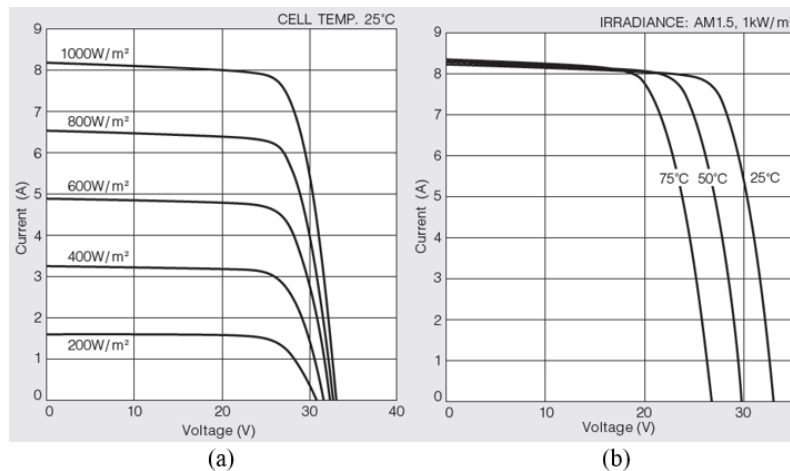


Figura 3 – Curvas I-V para o módulo fotovoltaico Kyocera KC200GT
Fonte: especificação fabricante

2.2 Efeito do sombreamento

Ao longo do dia as variações de irradiação e temperatura ocorrem naturalmente e há também situações como sombreamento quer seja total ou parcial sobre o módulo devido a nuvens, árvores, folhas, prédios etc. que causam variações bruscas destes níveis. Como explicado em Pinho e Galdino (2014) este efeito é a causa da redução da potência. Como normalmente as células estão conectadas em série, todos os módulos são afetados, além de causar o risco de danos aos módulos devido ao chamado ponto quente (do inglês: *hotspot*) que pode levar a ruptura do vidro e fusão de polímeros que fazem parte da estrutura dos módulos.

Na Fig. 4 é representado o aspecto da curva característica quando parte de suas células estão sob o efeito do sombreamento, nota-se que o algoritmo precisa ser robusto e eficiente para poder detectar o ponto de máxima potência e evitar que fique em um chamado máximo local.

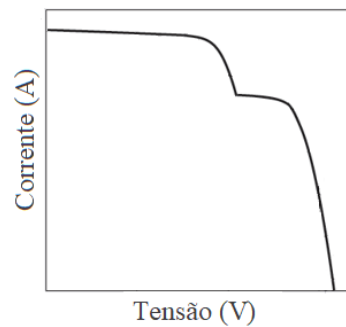


Figura 4 – Curva I-V para associação em série de módulos
Fonte: adaptado de Bastos *et al.* (2012)

Como está descrito em Bastos *et al.* (2012) quando há associação de módulos fotovoltaicos em condições normais ambos contribuem para o fornecimento de potência ao sistema, no entanto, em condições de sombreamento, há um desequilíbrio, fazendo com que o gráfico fique com o aspecto da Fig. 4, neste caso há algoritmos que dificilmente conseguiriam encontrar o ponto de máximo, pois, a sua concepção foi feita para que se estabilizasse em um valor de máximo. Deste modo, se a varredura do algoritmo tivesse início à direita do gráfico, o máximo local seria encontrado, como resultado o sistema fotovoltaico não estaria fornecendo a máxima potência.

2.3 Análise do modelo proposto

O modelo proposto neste trabalho para o sistema fotovoltaico é apresentado na Fig. 5. Ele é formado por um módulo fotovoltaico interligado a um conversor c.c./c.c. O módulo já possui um bloco presente no ambiente Matlab/Simulink pronto para uso conforme a especificação do fabricante. Os algoritmos de MPPT estão indicados no bloco correspondente, e possuem como entradas a tensão e a corrente do módulo. A saída do bloco tem a função de alterar os pulsos gerados no controlador PWM (do inglês: *Pulse Width Modulation*) que é responsável pelo processo de chaveamento do transistor de potência do conversor c.c./c.c. (Gomes *et al.*, 2016).

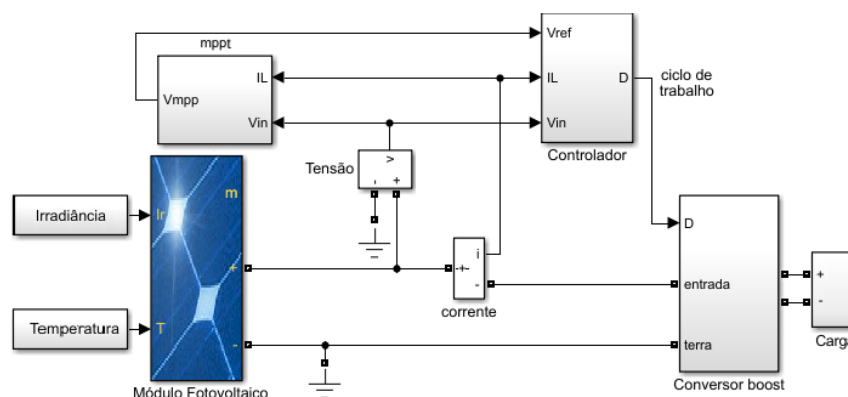


Figura 5 – Sistema fotovoltaico proposto básico
Fonte: elaboração própria

O sistema proposto representa o esquema básico para a realização dos testes, o bloco do módulo fotovoltaico deve ser multiplicado para poder simular as condições de sombreamento, assim como o bloco da temperatura e irradiação, eles permitem a variação dos parâmetros para realizar a simulação com diferentes valores, já para o bloco MPPT deve conter os algoritmos que foram analisados e servem para estabelecer a simulação. Assim pode-se comparar os resultados e verificar qual o método mais eficiente dentre os que a simulação proposta neste trabalho.

3. ALGORITMOS PARA OTIMIZAÇÃO DO MPPT

As técnicas atualmente empregadas para disponibilizar a máxima potência dos módulos fotovoltaicos para o próximo estágio do sistema, por exemplo, um conversor c.c./c.c., as técnicas são diversas e cada uma delas apresentam vantagens relacionadas principalmente com a rapidez com que se atinge o ponto de máxima potência e também sua precisão. Uma das mais simples foi a mostrada por Zhang (2013), o Método de Fração da Tensão de Circuito Aberto que estima o valor do ponto de máxima potência usando como base o valor de V_{oc} e considerando ser linearmente proporcional a V_{max} , ou seja, igual a uma fração do valor de V_{oc} , este método é muito simples de implementar e requer um sensor de tensão instalado. Ocorre, no entanto, que o valor de máxima potência nunca é atingido por ser uma estimativa e requer que o

sistema fotovoltaico seja constantemente desligado para a leitura do valor atual de V_{oc} . Sousa (2016) afirma que as técnicas mais precisas apresentam um algoritmo complexo e são bem mais difíceis de serem implementadas na prática.

As principais técnicas utilizadas são Perturba e Observa (P&O), indutância incremental (IC) e outras utilizando métodos de inteligência artificial como Redes Neurais e Lógica *Fuzzy* também são muito utilizadas e presentes em vários autores como Zhang (2013) e Sousa (2016).

A literatura também aponta diversas modificações dentre estas técnicas para melhorar o desempenho, Curral (2012), por exemplo, explica que a técnica *Hill Climbing* é uma variação do método P&O em que a perturbação gerada pelo algoritmo é feita diretamente no ciclo de trabalho gerado pelo controlador PWM, como salienta Dash *et al.* (2014) esta técnica tem sido muito utilizada porque ela resulta no valor real de máxima potência. A perturbação inserida no PWM resulta na alteração da potência, como a inclinação da curva de característica P-V é conhecida, o algoritmo altera a direção do ponto de operação até atingir o valor máximo. Para o este método é necessário monitorar os valores da tensão e corrente do módulo fotovoltaico e normalmente um microcontrolador é utilizado para controle do algoritmo.

3.1 Perturba e Observa (P&O)

O método P&O é classificado como direto por Pinho e Galdino (2014) porque o algoritmo obtém os valores de entrada, no caso, a corrente e a tensão vindas do módulo fotovoltaico a todo o instante para o algoritmo determinar o ponto de máxima potência e também independem das características do módulo, podendo ser utilizado para qualquer modelo.

Gazoli (2011) aponta como um método exato, ou seja, através da perturbação do ponto de operação do sistema, obtém-se um resultado, que é comparado com o valor do ponto anterior e uma ação, então, é tomada pelo algoritmo para aumentar ou diminuir o valor a ser perturbado. Para rastreamento do ponto de máxima potência de um módulo fotovoltaico, são inseridas perturbações, ou seja, alterações dos valores tensão de referência e que dependendo do valor medido, esta grandeza é incrementada ou decrementada, pois depende se a potência obtida do módulo fotovoltaico aumentou ou diminuiu. Este método usa o conceito que é o mais simples existente para implementar uma técnica de MPPT.

Neste trabalho será utilizada na simulação a técnica P&O por ser um método simples e de fácil implementação. A Fig. 6 ilustra o diagrama em blocos relacionada a este método.

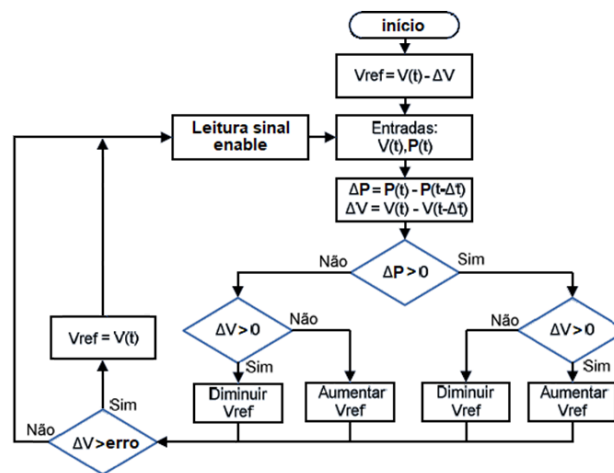


Figura 6 – Técnica P&O

Fonte: adaptado de Curral (2012)

Uma observação importante pode ser constatada no diagrama de blocos apresentado é que o valor do MPP nunca é encontrado. Esta característica ocorre porque o algoritmo é baseado em passos de verificação e tomada de decisão se a potência lida é maior ou menor que a anterior, percebe-se que ao atingir a região limite do MPP, o algoritmo fica sempre oscilando em torno do MPP especificado.

3.2 Condutância incremental (IC)

É um método direto assim como o P&O. O princípio de funcionamento do algoritmo baseia-se na análise da inclinação da curva característica P-V. Quando o valor da inclinação for nulo, então o ponto é o de máxima potência, portanto, tomando a derivada da potência pela tensão, dP/dV . Da mesma forma, quando o valor for nulo a potência é a máxima, para valores positivos, é necessário elevar a tensão de referência e negativos, o valor de referência deve ser reduzido (Cunha, 2016).

Como explicado em Roque (2014) a partir da curva P-V, obtém-se as regras para a estimar a direção na qual a perturbação irá seguir, através da variação dos incrementos de corrente e tensão do módulo, ΔI e ΔV respectivamente, até atingir o ponto de máximo a Fig. 7 detalha o algoritmo.

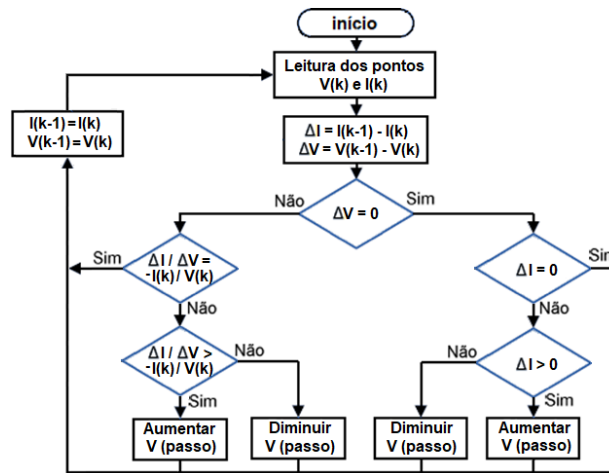


Figura 7 – Técnica IC
 Fonte: adaptado de Roque (2014)

Este algoritmo apresenta uma maior complexidade para ser implementado como pode ser observado comparando os diagramas em blocos com o diagrama do método P&O, no entanto, apresenta a vantagem de ter uma resposta rápida quando há mudanças atmosféricas bruscas, porque a variação da tensão funciona como um passo que é grande quando a diferença da tensão, ΔV , for grande e pequeno para valores próximos ao ponto de máxima potência.

3.3 Redes Neurais

O desenvolvimento de algoritmos de inteligência artificial (IA), com o uso de redes neurais artificiais (RNA) é uma aplicação que vem se tornando muito utilizada para MPPT. Como explicado em Curral (2014), a RNA é um conjunto constituído de três camadas, camada interna, camada oculta e camada de saída (do inglês: *input layer*, *hidden layer* e *output layer*), cada uma destas camadas são interligadas por diversos nós e a resposta a uma entrada é dependente do treinamento no qual a RNA é submetida. No caso de um sistema fotovoltaico é necessário utilizar como entrada os parâmetros do módulo fotovoltaico, como a tensão de circuito aberto, a corrente de curto-circuito e os valores de irradiância e temperatura atuais. Como resposta é fornecido o valor do ciclo de trabalho do controlador PWM.

A Fig. 8 mostra em blocos como é a implementação de uma RNA no sistema fotovoltaico.

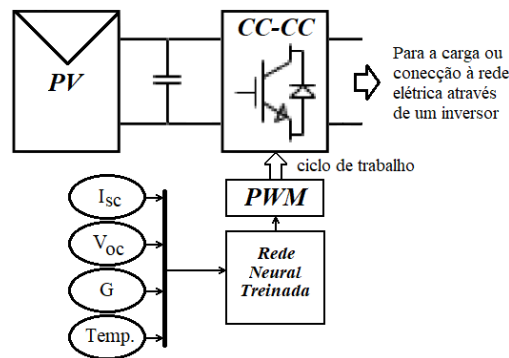


Figura 8 – Método de MPPT usando uma RNA
 Fonte: adaptado de Curral (2012)

Observa-se que este método é dependente do modelo do módulo fotovoltaico utilizado, assim a cada configuração de módulo fotovoltaico utilizado, deve-se refazer o treinamento da RNA, de modo que os pesos entre as ligações necessitam ser devidamente determinados através do processo de aprendizagem para que o ponto de máxima potência seja estabelecido constantemente.

Como demonstrado por Oliveira (2016) a simulação utilizada aplicou uma RNA de duas entradas e uma saída e vinte neurônios na camada oculta no sistema fotovoltaico constituído por dois módulos fotovoltaicos e um conversor tipo boost. Após a realização do treinamento, os testes realizados demonstraram que o algoritmo com RNA conseguiu encontrar o MPP em todas as variações de irradiação, no qual simulou condições de sombreamento parcial do sistema, o que não foi possível com o método P&O utilizado. Esta constatação ocorreu porque o P&O encontrou um ponto de máximo local e como resultado a potência entregue ao sistema foi menor, o que comprometeu a eficiência do método de MPPT.

4. SIMULAÇÃO DOS ALGORITMOS DE MPPT USANDO O SIMULINK

A simulação para o ambiente Matlab/Simulink envolveu o desenvolvimento do circuito baseado na Fig. 5 para dois algoritmos de MPPT, o método P&O e uma RNA com o objetivo de constatar qual metodologia apresenta a melhor eficiência no que diz respeito a resposta do sistema para encontrar o MPP quando há variação do nível de irradiação e temperatura.

A Fig. 9 representa o bloco P&O que foi elaborado para a simulação e segue a representação do fluxograma da Fig. 6 tendo como entradas a tensão (V_{in}) e a corrente (I_L) que são extraídas do bloco do módulo fotovoltaico.

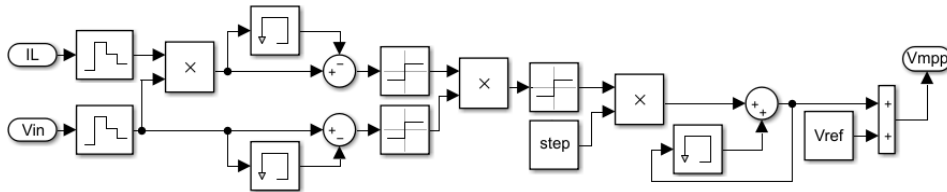


Figura 9 – P&O desenvolvido para o Simulink
Fonte: elaboração própria

Para a RNA foi implementada conforme o procedimento explicado em Bastos *et al.* (2012) através da técnica do *back propagation*. A Fig. 10 mostra como a RNA foi desenvolvida na simulação. Ela apresenta três camadas sendo que a camada de entrada é composta de dois valores, a irradiância e a temperatura, valores que mudam constantemente. A camada oculta foi estabelecida com vinte neurônios treinados para reagir quando há alteração dos valores de entradas, resultando para a saída um valor de tensão que é relacionada com o valor de referência que aponta para a potência máxima de acordo com os valores encontrados nas duas entradas.

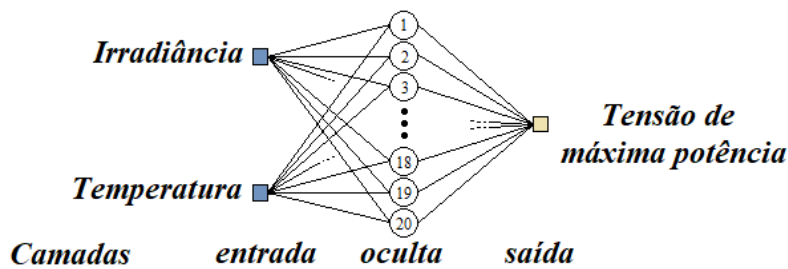


Figura 10 – Representação das camadas do RNA proposto para o trabalho
Fonte: elaboração própria

Deste modo o valor de tensão obtido como resultado é o valor de referência para o controlador PWM do próximo bloco da simulação, de maneira a permitir o controle do ciclo de trabalho do transistor do conversor c.c./c.c., esta atuação do circuito garante em tempo real a máxima potência transferida do módulo fotovoltaico para a carga.

A Fig. 11 mostra o resultado obtido após o treinamento da RNA e representa o valor de tensão máximo encontrado para cada amostra obtida. Como cada amostra é função da irradiação que variou de 100 até 1000 W/m² com passo de 50 W/m² e da temperatura cuja variação foi de 20 até 70°C com passo de 2,5°C para cada passo da irradiação se obteve o resultado esperado de aumento do valor de tensão com o aumento da irradiação, e ao mesmo tempo a diminuição do valor desta tensão com o aumento da temperatura.

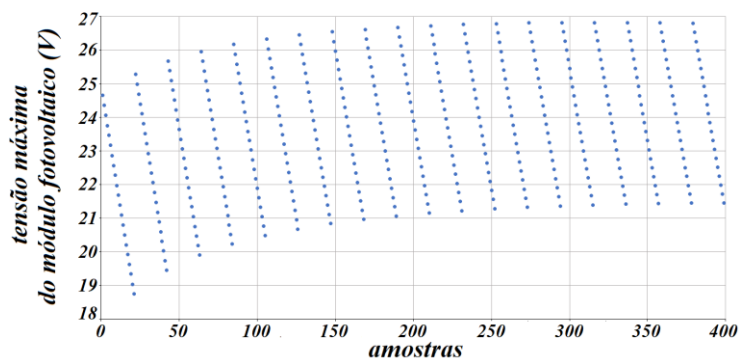


Figura 11 – Gráfico da variação da tensão extraída do módulo fotovoltaico pelas amostras de treinamento
Fonte: elaboração própria

Com os dois algoritmos estabelecidos foi realizada uma simulação para cada um, obedecendo as mesmas condições de variação de irradiação e temperatura. As simulações foram elaboradas conforme os procedimentos descritos em Bastos *et al.* (2012), Gomes *et al.* (2016) e Zhang (2013) nas quais as variações de irradiação e temperatura foram bruscas e focam especificamente no desempenho dos algoritmos de MPPT. Com isso pode-se comparar os resultados e apontar o modelo que é mais eficiente, para isso, a Fig. 12 mostra a variação dos parâmetros de entrada ao longo de toda a simulação e a resposta de cada um dos algoritmos foi evidenciada pelo comportamento da tensão extraída do módulo fotovoltaico, V_{in} , do bloco do algoritmo.

O tempo total da simulação foi de 0,45 segundos sendo que a irradiação foi alterada de 1000 W/m^2 para 800 W/m^2 após 0,1s depois para 600 W/m^2 em 0,2s e retornou a 1000 W/m^2 em 0,3s. A temperatura também teve variação, inicialmente com 20°C , indo para 45°C aos 0,05s e alterou para 70°C em 0,15s permanecendo até 0,25s quando a temperatura foi reduzida para 25°C , a partir de 0,37s foi estabelecido um aumento gradual em forma de rampa até a temperatura atingir 45°C no final da simulação.

O elevado número de alterações nas condições de entrada, tanto para a irradiação como para a temperatura foi feita com o objetivo de observar o comportamento de cada um dos algoritmos de rastreamento de MPP testado. É esperado, como discutido em seções anteriores deste trabalho, que os algoritmos busquem os novos pontos de máxima potência de maneira rápida, precisa e eficaz para cada variação das condições iniciais. Desta forma os resultados expostos na Fig. 12 podem ser comparados para os dois métodos empregados.

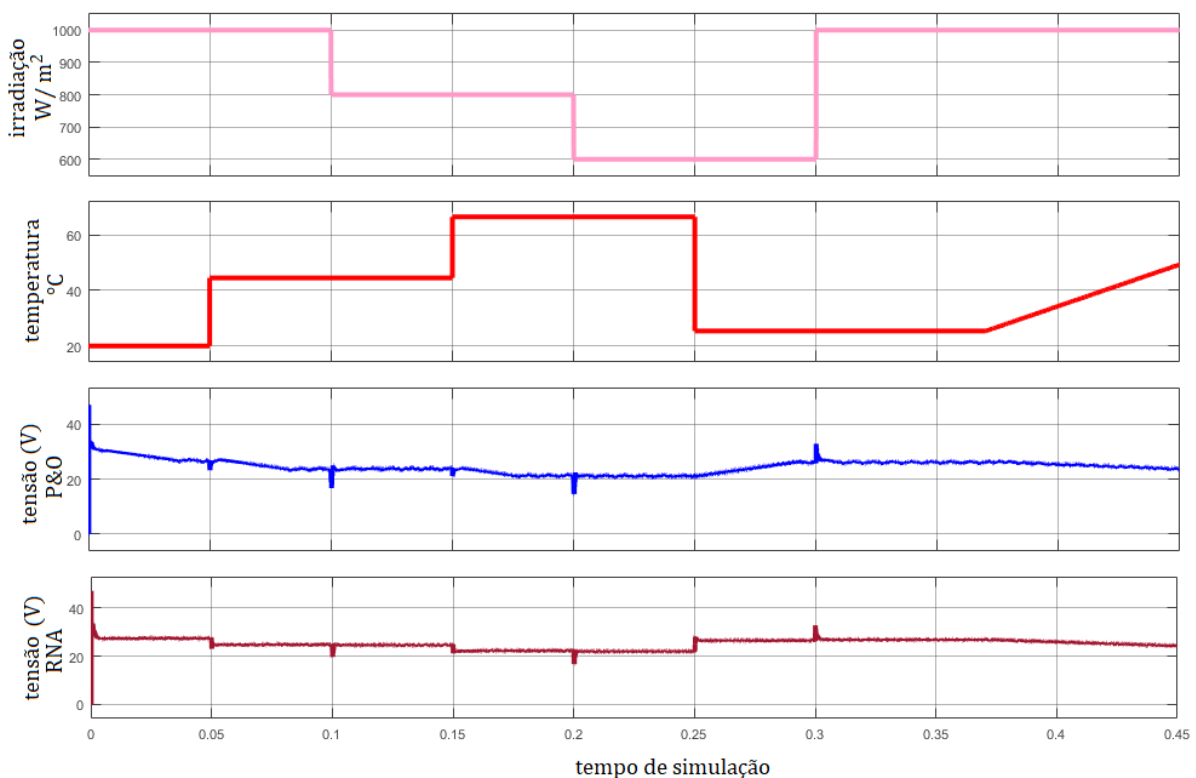


Figura 12 – Resultado comparativo da simulação

Fonte: elaboração própria

5. CONCLUSÕES

O artigo apresentou e comparou a utilização de dois algoritmos de seguimento do ponto de máxima potência visando exclusivamente a análise do desempenho de cada algoritmo tomando como parâmetros de entrada a irradiação e a temperatura do módulo. As transições bruscas e elevadas permitiram comparar os métodos de MPPT, porém, uma situação de teste real não foi levada em consideração que as variações das condições iniciais não são tão abruptas como as apresentadas pelas simulações, cabendo em um trabalho futuro aprofundar os métodos e incluir estas condições de variação mais próximas da realidade.

Através dos gráficos da Fig. 12 os resultados obtidos para a tensão do módulo fotovoltaico, podem ser observados que para o P&O os valores de máxima potência demoraram um maior tempo para serem atingidos do que o exibido pela RNA treinada, de fato, o valor de máximo para este método foi atingido quase que instantaneamente, além disso o valor final não apresentou variação significativa quando comparado com o P&O, ou seja, pode-se verificar que o valor da tensão não estabiliza no valor máximo, a Fig. 13 detalha a variação de maneira que se observa como o comportamento do técnica utilizando a RNA treinada atinge o valor de máximo rapidamente e não apresenta uma oscilação entre um valor como aconteceu no P&O.

Por conta deste detalhe pode-se concluir que o método P&O é mais demorado para atingir o ponto de máxima potência, e também não é capaz de atingir em seu valor exato de máximo devido a variação da perturbação. Para melhorar este aspecto é necessário diminuir o passo da variação da perturbação, com isto, o cálculo tende a se tornar mais preciso e se aproximar do valor ideal. Porém, há um custo associado, que irá tornar o algoritmo ainda mais lento devido à maior quantidade de processamento do algoritmo.

O algoritmo proposto na simulação, baseado em uma RNA treinada pelo método *back propagation* mostrou resultados que otimizaram o sistema de geração com o módulo fotovoltaico. Ao longo do procedimento, com as variações dos valores de entrada, o algoritmo sempre forneceu o maior valor de potência quando comparado com o método mais comum de MPPT.

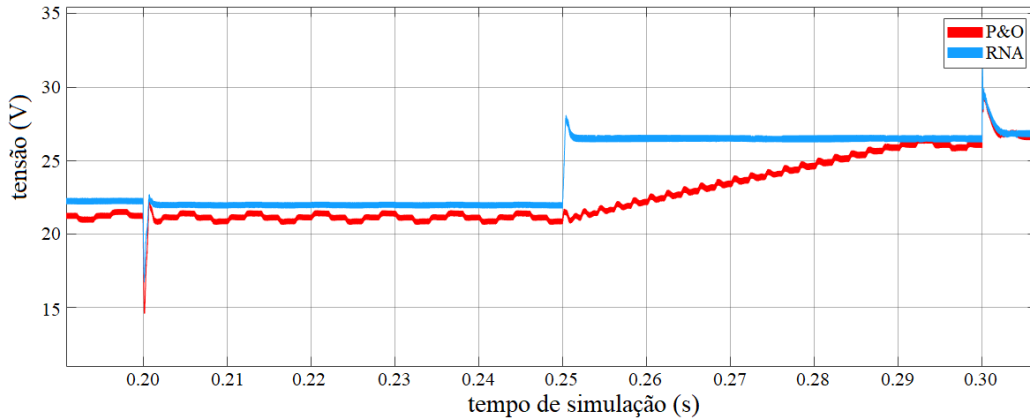


Figura 13 – Detalhe dos algoritmos RNA e P&O
Fonte: elaboração própria

A Fig. 14 compara a potência fornecida pelos algoritmos, através da análise do gráfico é possível constatar que o algoritmo de RNA proposto neste trabalho é uma forma mais eficiente de se obter o valor máximo da potência porque a potência extraída atinge o maior valor quase que instantaneamente após a mudança das condições de entrada, irradiação ou temperatura. Por outro lado, o P&O apresentou um comportamento mais lento para atingir o valor máximo.

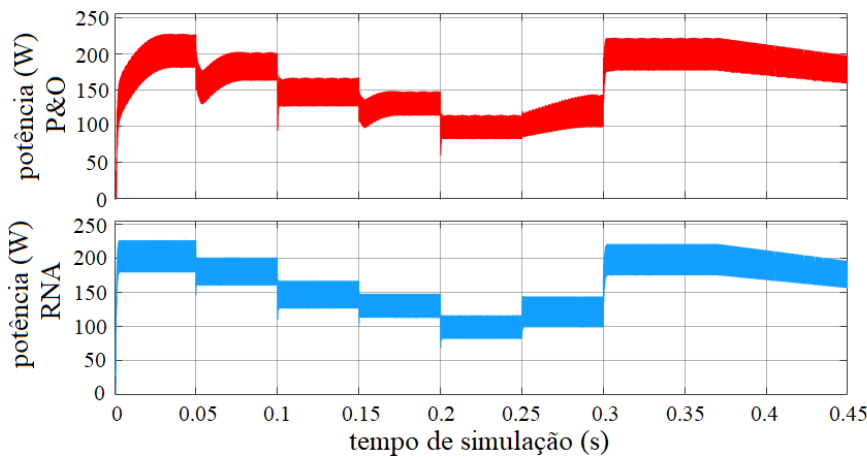


Figura 14 – Relação potência gerada em cada um dos algoritmos
Fonte: elaboração própria

Este artigo demonstrou que os módulos fotovoltaicos precisam ter um algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência para entregar constantemente ao sistema a maior energia disponível para melhorar o desempenho e eficiência do sistema de geração distribuída. O resultado de pesquisas de novos algoritmos de MPPT, levou aos fabricantes a disponibilizar no mercado uma grande variedade de controladores de MPPT para o rastreamento dos pontos de máxima potência de maneira rápida e eficiente, na qual atinge em torno de 98% de eficiência na extração destes pontos. Com isto o sistema fotovoltaico sempre disponibiliza a maior energia gerada em qualquer condição. Os produtos disponíveis possuem os mesmos objetivos que movem as pesquisas relacionadas a este tema, na qual o algoritmo continuamente compara os pontos de operação do gerador, a tensão e a corrente extraídas do módulo fotovoltaico e ajusta-os para alcançar o maior valor de potência. Este processo é automático, ou seja, o usuário não tem a necessidade de realizar qualquer tipo de ajuste ou monitorar o controle do algoritmo no equipamento instalado.

Por este motivo o uso dos algoritmos de MPPT tem se popularizado e lhe garante a melhor opção para o projeto de um sistema fotovoltaico, é importante salientar que os custos iniciais do sistema com MPPT é maior quando se compara com um outro projeto similar, porém que não apresenta um algoritmo de rastreamento, no entanto, a diferença é absorvida em parte pela redução da quantidade de módulos fotovoltaicos na instalação porque todo o projeto do sistema fotovoltaico foi otimizado, levando a um número menor destes módulos que são necessários para se obter a potência requerida no projeto e parte é absorvida ao longo do tempo, pois, a vida útil de um sistema fotovoltaico instalado gira em torno de 25 anos, desta maneira o sistema estaria oferecendo diariamente valores maiores de potência gerando, assim, uma economia significativa na planta instalada.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do ABC (UFABC) pelo apoio para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Aliesfahani, S., Shahbazian M., 2015. Maximum Power Point Tracking for Solar Photovoltaic System Using Genetic Programming Toolbox for Identification of Physical System, Journal of Automation and Control, vol. 3, no. 1: 25-28. doi: 10.12691/automation-3-1-4.
- Bastos, R.F., Moçambique N.E.M., Machado, R.Q., Aguiar, C.R., 2012. Rede Neural Artificial Aplicada na Busca do Ponto de Máxima Potência em Painéis Fotovoltaicos, Congresso Brasileiro de Automática, CBA, Campina Grande.
- Casaro, M.M., Martins D.C., 2008. Modelo de arranjo fotovoltaico destinado a análises em eletrônica de potência via simulação, Eletrônica de Potência, Vol. 13, nº 3, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Cunha, R.B.A., 2016. Proposta de sistema fotovoltaico monofásico conectado à rede elétrica, dissertação de mestrado, UFBA, Salvador.
- Curral, N.C.L., 2012. Micro inversor para módulo fotovoltaico, dissertação de mestrado, FEUP, Portugal.
- Gomes, F.S., *et al.*, 2016. Controle Neuro Fuzzy Aplicado em Algoritmo de Busca MPPT de Painéis Fotovoltaicos, XXI Congresso Brasileiro de Automática, CBA, Vitória.
- Dash, S. K., Verma, D., Nema, S., Nema R. K., 2014. Comparative analysis of maximum power point (MPP) tracking techniques for solar PV application using MATLAB simulink, pp. 1–7, IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE-2014), Jaipur, India.
- Khamis, A., Shareef, H., 2013. An Effective Islanding Detection Method Using Neuro-Phase Space Technique, World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 7.
- Oliveira, T.L., Silva, L.R.C., Souza, A.C., Guimarães, G.C., Yamanaka, K., 2016. Controle De Máxima Potência De Um Sistema Fotovoltaico Utilizando Redes Neurais Artificiais, XIV CEEL, Uberlândia.
- Pinho, J. T., Galdino, M. A., 2014. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, CEPTEL-CRESESB, Rio de Janeiro.
- REN21, 2017. Renewables 2017 Global Status Report. [em linha]. Disponível em: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf. Acesso em 22/10/2017.
- Rodrigues, M., Teixeira, E. C., Braga, H. A. C., 2003. Uma Visão Topológica Sobre Sistemas Fotovoltaicos Monofásicos Conectados à Rede de Energia Elétrica, Fifth Latin- American Congress: Electricity Generation and Transmission, São Pedro, São Paulo.
- Roque, A.M., 2014. Utilização de Algoritmos de Rastreamento de Pontos de Máxima Potência em Sistemas Fotovoltaicos, trabalho de conclusão de curso, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.
- Zhang, F., *et al.*, 2013. Adaptive Hybrid Maximum Power Point Tracking Methodology for Photovoltaic Systems. IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 28, n 2.

PROPOSED OF OPTIMIZATION ALGORITHM FOR MAXIMUM POWER POINT OF A PHOTOVOLTAIC SYSTEM BASED ON NEURAL NETWORKS

Abstract. *As the demand for energy has increased in recent years, the use of renewable and non-polluting energy has been highlighted and attracted attention, among them the deployment of photovoltaic systems has grown considerably, especially in the last decade. Despite this the efficiency of solar cells is very low and the amount of energy generated depends on the irradiation, ambient temperature, and weather conditions. Therefore, many algorithms were developed to track the maximum power of the photovoltaic systems. In this paper were shown some of most common approaches for these methods and it was proposed an algorithm based on neural networks as a technique more advantageous when it is compared with the most conventional method.*

Key words: *Solar Energy, Photovoltaic Effect, Maximum Power Point Tracking*