

CONTROLE NEURO FUZZY APLICADO EM ALGORITMO DE BUSCA MPPT DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

FAGNER DOS SANTOS GOMES*, JOSÉ MAIA NETO*, WESLEY OLIVEIRA MAIA*, APARECIDO JÚNEO DOS SANTOS*, YURI ADAN GONÇALVES CORDOWIL*

**Faculdade de Ciência e Tecnologia de Montes Claros-FACIT
Praça da Tecnologia
77 São João*

Montes Claros, Minas Gerais, Brasil

Emails: fagnersantosg@hotmail.com, josemaianeto@hotmail.com,
wesleyoliveira@femc.edu.br, aparecidojuneo@gmail.com, adan_cks@hotmail.com

Abstract— In this paper was addressed an intelligent Neuro-Fuzzy control system based on computational intelligence techniques for maximum power point tracking in photovoltaic panels with supervised learning. Thereby it is expected increasing the efficiency of conversion of solar into electrical energy without the need for physical changes in solar modules. The classic techniques used at the moment, offer confiability, good efficiency and low level of implementation complexity, however, for systems more complex of conversors, presents deficiencies in tracking, incapables to keep the photovoltaic panels operating in max potency. Through of simulations in MATLAB/Simulink in many conditions of temperature variation and irradiance is possible verify the efficiency of Neuro-Fuzzy model, thus as compare the results with the classic model most used at the moment in different topologies of conversors. The proposed model seeks to offer a new alternative to tracking new deployments or replacement of the classic models. The results are promising, since the Neuro-Fuzzy control achieved satisfactory performance in tracking the maximum power point.

Keywords— neuro-fuzzy, tracking, energy, photovoltaic panels

Resumo— Neste artigo será abordado um sistema de controle inteligente Neuro-Fuzzy baseado em técnicas de inteligência computacional para sistemas de rastreamento do ponto de potência máxima em painéis fotovoltaicos, utilizando aprendizado supervisionado. Com isso, espera-se aumentar a eficiência da conversão da energia solar em energia elétrica, sem a necessidade de alteração física nos módulos solares. As técnicas clássicas utilizadas atualmente oferecem confiabilidade, eficácia e baixo grau de complexidade de implementação, entretanto, para sistemas mais complexos de conversores, apresentam deficiência no rastreamento, não sendo capazes de manter os painéis fotovoltaicos operando em sua máxima potência. Por meio de simulações no MATLAB/Simulink, em diversas condições de variação de temperatura e irradiância, é possível verificar a eficácia do modelo Neuro-Fuzzy, assim como comparar os resultados com o modelo clássico usado atualmente em diferentes topologias de conversores. O modelo proposto busca oferecer uma nova alternativa de rastreamento para novas implementações ou a substituição dos modelos clássicos. Os resultados obtidos são promissores, uma vez que, o controle Neuro-Fuzzy obteve desempenho satisfatório no rastreamento do ponto de máxima potência.

Palavras-chave— neuro-fuzzy, rastreamento, energia, painéis fotovoltaicos

1 Introdução

Com o aumento do consumo de energia elétrica pelas indústrias e pela população, e a recente crise hídrica enfrentada no Brasil, a produção de energia elétrica por meio de hidrelétricas está cada vez mais comprometida. Nesse cenário, novas fontes de energia limpa vêm sendo estudadas e implantadas, como por exemplo as energias eólica e solar.

A energia fotovoltaica tem sido uma das alternativas mais viáveis e utilizadas, principalmente em regiões semiáridas, que sofrem com a escassez de chuvas (Villalva, 2012). Além disso, trata-se de uma fonte energética praticamente inesgotável e oferece índice reduzido de agressão ao meio ambiente. No entanto, o seu aproveitamento ainda é considerado baixo em comparação com outros tipos de geração de energia. Para amenizar essa deficiência, são utilizados conversores do tipo CC/CC interligados ao sistema de placas solares, acompanhados de um algoritmo de rastreamento de máxima potência (Pinho and Galdino, 2014).

A técnica MPPT (*Maximum Power Point*

Tracking) é frequentemente abordada em pesquisas, pelo fato de possibilitar o rastreamento do maior valor de corrente e tensão fornecidos pela célula solar, independente das condições externas. Com isso, a evolução contínua dos algoritmos de busca MPPT é de fundamental importância para um melhor aproveitamento da energia gerada. Outro ponto a se destacar é que o aumento da eficiência de geração de energia pelas células fotovoltaicas sofre melhorias lentas e as novas tecnologias apresentam custo elevado (Carvalho, 2012).

Nesse contexto, o controle inteligente, que envolve técnicas como redes neurais e lógica *fuzzy*, se mostram uma alternativa interessante e com potencial de substituir as técnicas utilizadas atualmente (como o perturba e observa - P&O), posto que, ambas oferecem controle com resposta rápida e confiável, mesmo para sistemas com características não lineares.

As áreas de aplicação dos sistemas fotovoltaicos e o grande interesse observado através das numerosas publicações técnico-científicas, no âm-

bito acadêmico e industrial, reforçam a importância da realização de pesquisas voltadas às tendências futuras destes sistemas. Em Shanthi and Vanmukhil (2013), uma abordagem Neuro-Fuzzy é utilizada para fazer o controle do rastreamento da máxima potência e de um conversor CC/CA. Em Aldobhani and John (2008), um estudo experimental é realizado para encontrar a correlação entre I_{sc} e V_{oc} e P_{max} e V_{max} , respectivamente. Uma rede ANFIS (*Adaptive Neural Fuzzy Inference System*) é utilizada para estimar o valor de V_{max} e repassá-lo a um controlador *fuzzy* que, por sua vez, deverá estimar o sinal de controle PWM (*Pulse Width Modulation*) para manter a máxima potência do módulo.

Diferentemente das abordagens anteriores e de outras abordagens inteligentes para algoritmos de MPPT, como as abordadas em Arora and Gaur (2015) e Mlakic and Nikolovski (2016), a proposta deste trabalho é desenvolver uma rede Neuro-Fuzzy ANFIS utilizando como entradas apenas a potência e a tensão de saída dos painéis fotovoltaicos, para estimar o sinal de controle da chave estática de um conversor SEPIC. Este conversor, associado com as técnicas de rastreamento MPPT ANFIS e o MPPT P&O, são simulados em ambiente MATLAB/Simulink e, em seguida, é realizada uma comparação em relação ao desempenho. A análise dos resultados obtidos indicam um melhor desempenho do controle Neuro-Fuzzy em relação ao controle P&O.

2 Modelo do Sistema

A Fig. 1 mostra o modelo proposto do sistema, que consiste em um módulo fotovoltaico conectado a um conversor CC/CC. O algoritmo de controle implementado no bloco **Controle MPPT** possui como entradas os sinais de tensão (V_{pv}) e a potência (P_{pv}) do módulo fotovoltaico, sendo responsável por calcular o ponto de máxima potência a cada instante e enviar o sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) para o chaveamento *on/off* do conversor CC/CC.

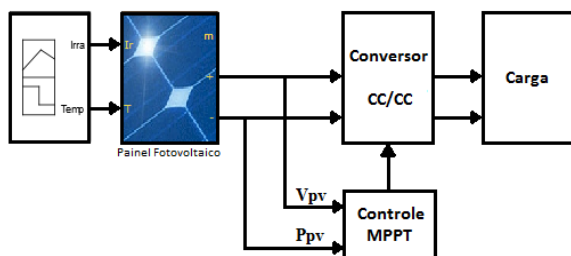


Figura 1: Diagrama de blocos do sistema fotovoltaico com controlador MPPT

Na configuração proposta, o sistema fotovoltaico é composto de um único módulo, cujas características são mostradas na tabela 1.

Tabela 1: Características do módulo fotovoltaico.

Modelo	BLD240-60P
Potência de pico (P_{max})	240W
Tensão em máxima potência (V_{mp})	30.18V
Corrente em máxima potência (I_{mp})	7.96A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	36.72V
Corrente de curto circuito (I_{sc})	8.99A
Número de células	60 células em série

2.1 Conversor CC/CC Sepic

O esquemático do conversor CC/CC SEPIC é apresentado na Fig. 2. Este tipo de conversor fornece uma tensão de saída que pode ser menor ou maior que a tensão disponível na entrada V_s , em que a regulação é em função da modulação por largura de pulso aplicada à chave T , com a polaridade da tensão de saída sendo a mesma da tensão de entrada (Mello, 2011).

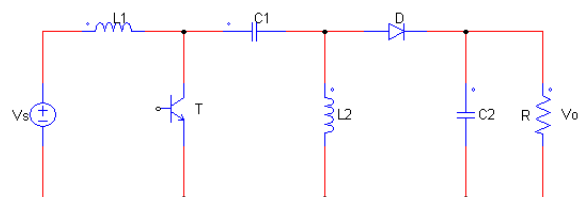


Figura 2: Circuito de um conversor CC/CC Sepic

Barbi (2006) ressalva que essa topologia é uma arquitetura simples, de isolamento total de sua estrutura, e que, sua entrada comporta-se como fonte de corrente implicando em baixa ondulação na corrente de entrada. A saída tem característica de fonte de tensão, facilitando a utilização de transformadores para obter múltiplas saídas.

Os conversores com quatro elementos armazenadores oferecem melhores características de tensão e corrente. No entanto, requer um sistema de controle mais complexo, por se tratarem de sistemas não lineares de quarta ordem ou mais (Mello, 2011; Barbi, 2006).

2.2 Controle MPPT

O rastreamento MPPT consiste num algoritmo interligado a um conversor CC/CC que, de acordo com as condições ambientais de temperatura e radiação, ajusta a tensão de saída do módulo fotovoltaico de modo que o funcionamento se processe no ponto correspondente à potência máxima. Desta forma, o desempenho do sistema fotovoltaico na geração de energia é dependente da técnica de controle utilizada (Castro, 2002).

A Fig. 3 mostra a curva característica de corrente e tensão de um painel fotovoltaico. O gráfico mostra que existe um ponto de máximo na curva, o qual é atingido quando o painel opera no valor ideal de corrente e de tensão. É importante ressaltar que esta curva sofre alterações devido a variações de temperatura e irradiância solar.

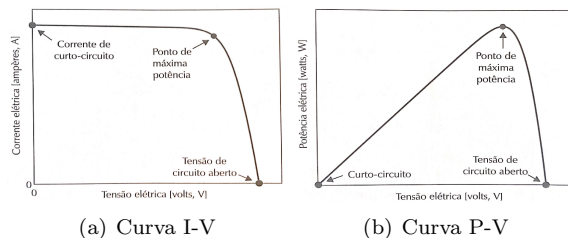


Figura 3: Curvas características de painéis fotovoltaicos

Carvalho (2012) afirma que a utilização de técnicas MPPT aumenta o rendimento dos módulos solares de 15% a 30% e que as principais características de um bom sistema de rastreamento consistem em: convergência para o melhor valor de PWM, rápida resposta dinâmica, erro em regime permanente baixo, robustez a distúrbios, mesma eficiência em diferentes níveis potenciais.

Destacam-se entre os algoritmos MPPT, os baseados em perturbação e observação e os de condutância incremental (Elgendy et al., 2008). Apesar da eficácia obtida com a utilização desses algoritmos, ocorrem oscilações em torno do ponto de máxima potência. Em contrapartida, Femia et al. (2004), e Syafaruddin et al. (2009) destacam que os algoritmos MPPT baseados em treinamento são mais rápidos, precisos, robustos e dispensam o conhecimento prévio detalhado do sistema fotovoltaico e da descrição precisa do modelo matemático. Destacando, nesse contexto, algoritmos com lógica *fuzzy* ou algoritmos provenientes das redes neurais artificiais.

3 Estratégias de Controle

3.1 MPPT P&O

O MPPT P&O atua periodicamente incrementando ou decrementando a razão cíclica, alterando a tensão de saída do módulo e, consequentemente, a potência extraída. O método calcula a potência extraída no ciclo atual e a compara com a potência anterior. Caso ocorra o aumento de potência, o sistema de controle mantém o mesmo sentido, caso contrário, invertido. O fluxograma do MPPT P&O é mostrado na Fig. 4.

3.2 Sistema ANFIS Proposto

A ideia base de um sistema híbrido Neuro-Fuzzy é construir um sistema de inferência *fuzzy* em uma estrutura paralela com uma rede neural, de forma que os algoritmos de aprendizado da RNA possam ser utilizados para ajustar os parâmetros do sistema de inferência *fuzzy*. Há também a possibilidade de desenvolver sistemas híbridos utilizando algoritmos genéticos (Jang et al., 1997).

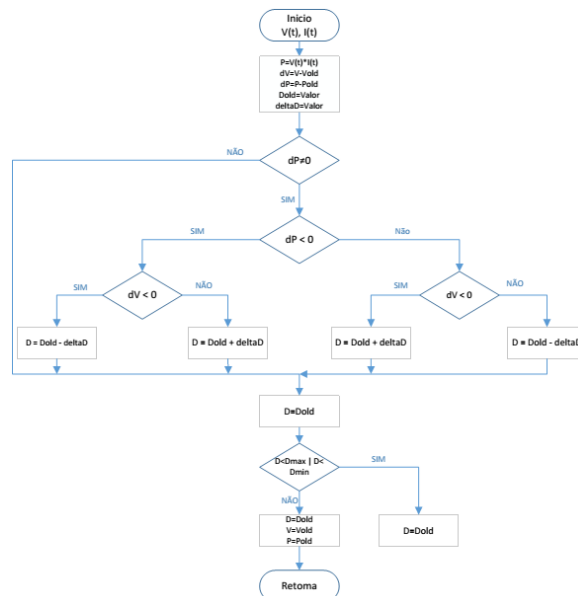


Figura 4: Fluxograma do MPPT P&O

O modelo implementado consiste em um sistema de inferência *fuzzy* do tipo Takagi-Sugeno de duas entradas e uma saída. As entradas são tensão e potência fornecida pelo módulo fotovoltaico e a saída é o sinal de controle PWM. Cada entrada possui 7 funções de pertinência divididas em dois tipos, trapezoidais nas extremidades e triangulares nas centrais. Essa configuração tem como objetivo minimizar as oscilações através da rápida convergência de dados distantes da média, além de apresentar menor custo computacional. O grau de pertinência para todas as funções foi mantido em 0,5 para ambas as entradas. As funções de pertinência para a entrada em tensão são representadas na Fig. 5, a mesma configuração foi usada para a entrada em potência.

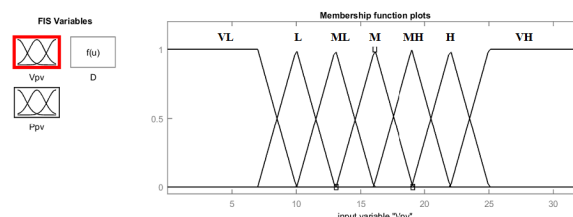


Figura 5: Funções de pertinência

As variáveis linguísticas das funções de pertinência para as variáveis de entrada apresentadas na Fig. 5 foram definidas considerando valores muito baixo (VL), baixo (L), meio baixo (ML), médio (M), meio alto (MH), alto (H) e muito alto (VH). A saída é do tipo constante e fornece o valor da modulação por largura de pulso. Após o treinamento, a rede ANFIS se comporta como um sistema de inferência *fuzzy*, estando apta a efetuar o controle do sistema em condições variadas de temperatura e irradiância.

Como resultado, tem-se uma estrutura Neuro-Fuzzy ANFIS de duas entradas lineares, com 7 funções de pertinência em cada uma delas, totalizando 49 parâmetros lineares, apresentada na Fig. 6. Além disso, a saída é do tipo constante, variando entre os valores 0 e 1. Por ser uma arquitetura rígida, tem-se um total de 49 regras.

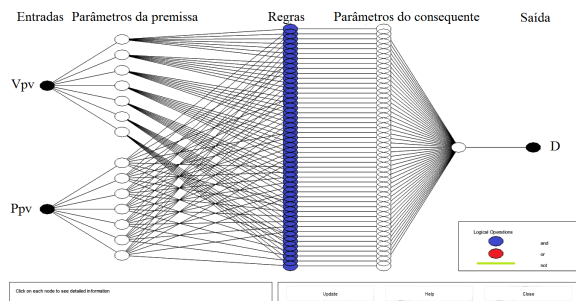


Figura 6: Estrutura ANFIS

3.3 Dados e Parâmetros de Treinamento

Os dados foram obtidos por meio de simulação utilizando o MPPT P&O. O formato final dos dados é apresentado na Fig. 7, onde, a primeira coluna representa a tensão fornecida pelo painel, a segunda coluna está relacionada com a potência e a terceira coluna indica a saída do ciclo de trabalho desejado. Os dados para treinamento, teste e validação foram extraídos em intervalos de forma que não possuíssem mesma amostra. Foram selecionados 2000 dados para treino, 1600 para teste e 1000 para validação. A rede foi treinada com uma tolerância de erro fixada em 0,001 e 1000 épocas de treinamento.

Vpv	Ppv	Ciclo PWM
2.4775641e+00	1.115531e+01	6.700000e-01
5.4083632e+00	2.4175549e+01	6.700000e-01
1.1696321e+01	5.1545363e+01	6.700000e-01
1.3248738e+01	5.8233278e+01	6.700000e-01
1.7785586e+01	7.7464240e+01	6.700000e-01
2.0012952e+01	8.6849358e+01	6.646000e-01
2.3914846e+01	1.0298621e+02	6.586000e-01
2.5721451e+01	1.1029991e+02	6.532000e-01
2.8670858e+01	1.2055218e+02	6.472000e-01
2.9546430e+01	1.2243959e+02	6.418000e-01

Figura 7: Amostra dos dados usados no treinamento

4 Treinamento, Simulação e Resultados

O treinamento, teste e *check* da rede Neuro-Fuzzy, foi realizado utilizando a *tollbox NeuroFuzzyDesigner* do MATLAB. O resultado do treinamento é representado na Fig. 8. Nota-se que o sinal de saída real (curva em vermelho) praticamente sobrepõe a saída desejada (curva em azul).

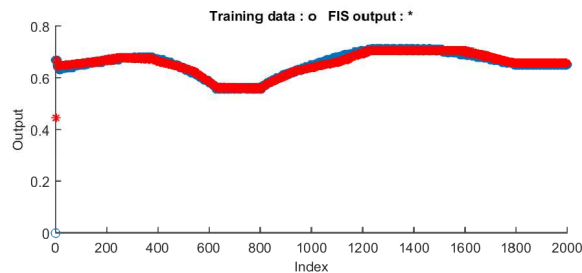


Figura 8: Resultados do treinamento

A Fig. 9 mostra o teste realizado após o treinamento da rede. Observa-se que em praticamente todo o teste realizado, a saída real (vermelho) acompanha a saída desejada (azul), qualificando assim o treinamento realizado.

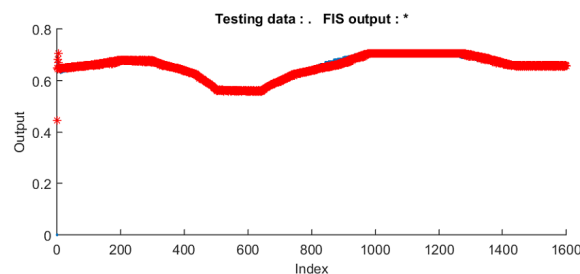


Figura 9: Testes após o treinamento

Por fim, é apresentado na Fig. 10 as curvas referentes à validação do treinamento. O resultado é considerado satisfatório, com a rede conseguindo rastrear a saída desejada em todo percurso de amostras de dados utilizada, não havendo variações fora dos padrões.

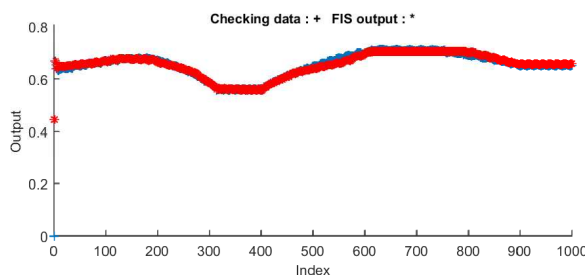


Figura 10: Verificação dos dados após treinamento e testes

Com erro de treinamento de 0,0135, os gráficos apresentados mostram que o conjunto de dados amostrados foram capazes de realizar o treino e validação da rede ANFIS proposta.

4.1 Definição da Temperatura e Irradiância

As simulações foram realizadas com dois padrões de irradiância e temperatura, o primeiro com pouca variação (representado na Fig. 11) e o segundo com variações bruscas (representado na Fig. 12). Este último sendo utilizado para avaliação dos limites do controle MPPT.

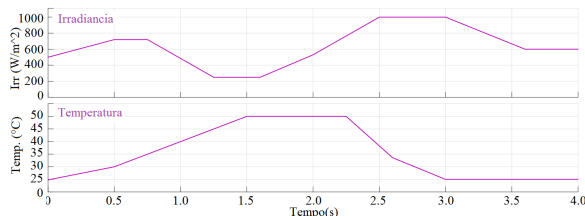


Figura 11: Primeiro teste: Temperatura e irradiância com baixa oscilação.

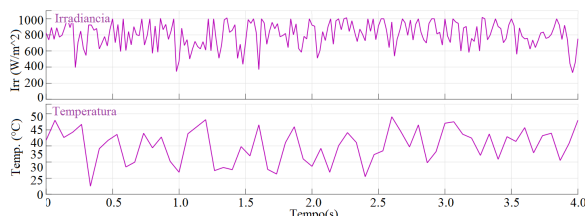


Figura 12: Segundo teste: Temperatura e irradiância com alta oscilação.

4.2 Resultados de Simulação

A Fig. 13 mostra o rastreamento realizado pelo MPPT P&O nas condições mostradas na Fig. 11. Foi constatado a partir dos resultados que o algoritmo P&O conseguiu rastrear a potência e não sofreu alterações durante a simulação. Entretanto, não conseguiu manter o painel operando em sua máxima potência. Oscilações previstas foram observadas, caracterizando a dificuldade do rastreamento P&O utilizando o conversor SEPIC.

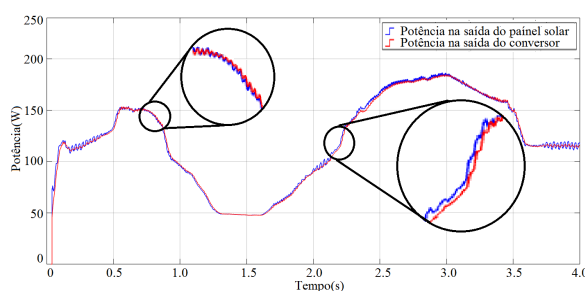


Figura 13: MPPT P&O com baixa oscilação

A Fig. 14 mostra o rastreamento feito pelo MPPT Neuro-Fuzzy nas condições mostradas na Fig. 11. O modelo proposto ofereceu precisão e resposta rápida às variações de irradiância e temperatura, mantendo o painel operando na máxima potência e não sendo observado nenhum tipo de oscilação ou falha no decorrer da simulação. Esses resultados comprovam a adaptabilidade da rede ANFIS às situações as quais foi designada a exercer o controle. Além disso, mostra sua capacidade em controlar sistemas não lineares.

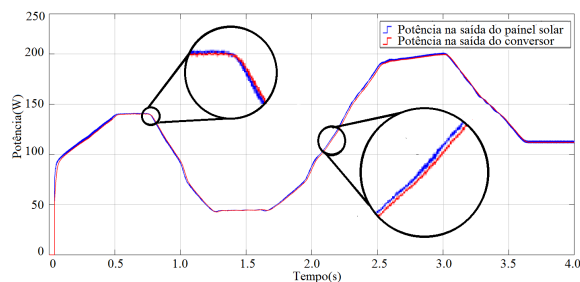


Figura 14: MPPT ANFIS com baixa oscilação

A Fig. 15 mostra o resultado do rastreamento realizado pelo MPPT P&O nas condições mostradas na Fig. 12. Mesmo efetuando o rastreamento, o MPPT P&O não conseguiu manter o painel operando em máxima potência e apresentou ruídos nos picos de potência, caracterizando a dificuldade da técnica com variações bruscas e frequentes.

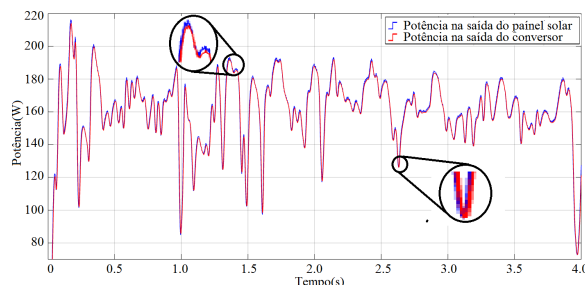


Figura 15: MPPT P&O com baixa oscilação

O rastreamento realizado pelo MPPT proposto nas condições mostradas da Fig. 12 é representado na Fig. 16. Nota-se que praticamente não existem oscilações ou ruídos no rastreamento da potência, mesmo nos picos máximos e mínimos, e novamente o painel fotovoltaico opera em máxima potência.

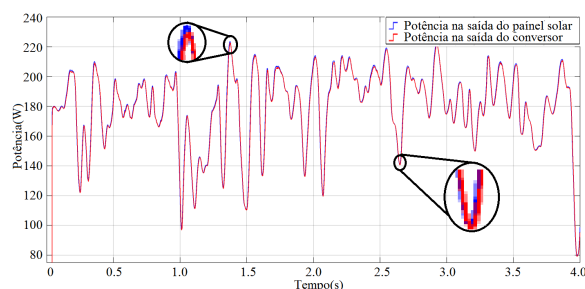


Figura 16: MPPT ANFIS com alta oscilação

Os resultados mostrados indicam uma vantagem considerável do controlador MPPT Neuro-Fuzzy em relação ao MPPT P&O, tanto em potência máxima, quanto em tempo de resposta às mudanças de incidência de irradiação solar a que foram submetidos.

5 Conclusão

Como era previsto, o conversor SEPIC ofereceu maior dificuldade em seu controle, apresentando altas oscilações de tensão para valores distantes da média. Essa característica fez com que o controlador P&O sofresse maiores oscilações e apresentasse ruído nos pontos de pico de potência para ambas as variações a que foi submetido. Além disso, não conseguiu manter o sistema operando em máxima potência. Enquanto isso, o controlador híbrido Neuro-Fuzzy comprovou as hipóteses levantadas, apresentando resposta instantânea ao sistema e entrada rápida em regime permanente. Entretanto, possui maior complexidade para ser implementado. Mesmo em mudanças bruscas de temperatura e irradiância, o controlador manteve os painéis operando em seu MPPT com elevada eficácia.

Referências

- Aldobhani, A. M. S. and John, R. (2008). Maximum power point tracking of pv system using anfis prediction and fuzzy logic tracking, *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, 2008. IMECS 2008. Hong Kong*, Vol. 2, pp. 1359–1366.
- Arora, A. and Gaur, P. (2015). Comparison of ann and anfis based mppt controller for grid connected pv systems, *2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, pp. 1–6.
- Barbi, I. (2006). *Conversores CC-CC Básicos Não Isolados*, 1 edn, Edição dos Autores.
- Carvalho, P. E. (2012). *Avaliação das principais técnicas para obtenção de mppt de painéis fotovoltaicos*, Dissertação de mestrado, Universidade de Taubate.
- Castro, R. M. G. (2002). *Introdução a Energia Fotovoltaica*, Instituto Superior Técnico Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Elgendy, M. A., Zahawi, B. and Atkinson, D. J. (2008). Analysis of the performance of dc photovoltaic pumping systems with maximum power point tracking, *Power Electronics, Machines and Drives, 2008. PEMD 2008. 4th IET Conference on*, pp. 426–430.
- Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G. and Vitelli, M. (2004). Optimizing sampling rate of p o mppt technique, *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, Vol. 3, pp. 1945–1949 Vol.3.
- Jang, J.-S. R., Sun, C.-T. and Mizutani, E. (1997). *Neuro-Fuzzy and SoftComputing: A computational approach to learning and machine intelligence*, 1 edn, Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Mello, L. F. P. (2011). *Power Eetronics*, 1 edn, MC Graw-Hill.
- Mlakic, D. and Nikolovski, S. (2016). Anfis as a method for determinating mppt in the photovoltaic system simulated in matlab/simulink, *2016 39th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, pp. 1082–1086.
- Pinho, J. T. and Galdino, M. A. (2014). *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*, CEPEL-CRESESB, Rio de Janeiro.
- Shanthi, T. and Vanmukhil, A. S. (2013). Anfis controller based mppt control of photovoltaic generation system, *IJCA Proceedings on International Conference on Innovations In Intelligent Instrumentation, Optimization and Electrical Sciences ICIIOES(11)*: 23–29.
- Syafaruddin, Karatepe, E. and Hiyama, T. (2009). Artificial neural network-polar coordinated fuzzy controller based maximum power point tracking control under partially shaded conditions, *IET Renewable Power Generation* 3(2): 239–253.
- Villalva, M. G. (2012). *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações*, 1 edn, Erica.