

IMPLEMENTAÇÃO DE TÉCNICAS DE MPPT EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO UMA PLATAFORMA COMPUTACIONAL

G. B. Lima¹, F. R. Arduini¹, R. A. Jordão¹, R. H. Milhorim¹, D. B. Rodrigues¹, L. C. G. Freitas²

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia Elétrica, Uberaba - Minas Gerais¹

Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Elétrica, Uberlândia - Minas Gerais²

gustavo.lima@icte.ufcm.edu.br, fernando.arduini@yahoo.com.br, ra_jordao@hotmail.com, rafael_milhorim@hotmail.com,
danillorodrigues@yahoo.com.br, lcgfreitas@yahoo.com.br.

Resumo - Neste trabalho será apresentado a análise e simulação computacional das principais técnicas de controle responsáveis por extrair a máxima potência disponível em um sistema fotovoltaico típico. Essas técnicas, conhecidas na literatura como MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), são essenciais para a adequada operação de sistemas fotovoltaicos quando estes estão conectados à rede elétrica. Serão apresentados os detalhes pertinentes à implementação das técnicas além dos gráficos gerados via simulação computacional utilizando o software PSIM[®]. Estes gráficos fornecerão a base para uma análise comparativa e qualitativa entre os métodos.

Palavras-Chave – sistema fotovoltaico, técnicas de MPPT, simulação computacional.

IMPLEMENTATION OF TECHNIQUES IN MPPT PHOTOVOLTAIC SYSTEMS USING A PLATFORM COMPUTING PSIM[®]

Abstract - In this work the analysis and computer simulation of the main control techniques responsible for extracting the maximum power available during a typical PV system will be presented. These techniques, known in the literature as MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), are essential for proper operation of photovoltaic systems when they are connected to the grid. Relevant details of the techniques implementation and the graphic results of computer simulations using PSIM[®] software will provide the basis for a comparative and qualitative analysis between the methods.

Keywords - Photovoltaic system, MPPT techniques, computer simulation.

I. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a preservação ambiental reflete atualmente em todos os setores da indústria, que buscam alternativas para reduzir a agressão ao meio ambiente em seus processos produtivos. Essa tendência também é verificada no setor elétrico, que tende a se adaptar a essa nova realidade. A extração de recursos energéticos, tais como o petróleo, carvão, biomassa ou hidroeletricidade, tem implicações em mudanças nos padrões de uso do solo, recursos hídricos, alteração da biodiversidade e na composição atmosférica. A necessidade e dependência de energia elétrica aumentam no mesmo ritmo em que, a preocupação de suprir tal bem seja de maneira sustentável.

Este fato tem motivado várias empresas, como a CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) a investirem no desenvolvimento tecnológico dos meios de obtenção de energia elétrica, em que se aplicam as fontes convencionais e alternativas.

A energia elétrica proveniente dos painéis fotovoltaicos (PV) é atualmente considerada uma fonte primária não poluente, silenciosa, abundante e que necessita de pouca manutenção. A irradiância incidente sobre a superfície da terra é da ordem de dez mil vezes maior do que o consumo energético mundial. Em relação ao Brasil o desenvolvimento do setor industrial, e a maior utilização de energia elétrica em diversas atividades humanas aumentaram, significativamente, a demanda por energia nos últimos anos. Como exemplo, a Alemanha é um dos países com maior utilização de energia fotovoltaica, e apresenta índices de irradiância bem inferior aos do Brasil, onde na região mais favorecida da Alemanha tem aproximadamente 140% vezes menos radiação solar do que na região menos favorecida do Brasil [1-3].

Entretanto, a baixa eficiência de conversão dos módulos solares e o alto custo de instalação são os maiores obstáculos deste tipo de geração. Em consequência, torna-se necessário o uso de técnicas de controle para viabilizar a utilização dessa tecnologia. A potência gerada por painéis fotovoltaicos é dependente da carga, temperatura e radiação incidente. Como essas variáveis se alteram constantemente, variações no ponto de máxima potência (MPP) ocorrerão a todo o momento. Com isso são utilizadas as técnicas MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) que rastreiam, continuamente, o ponto de máxima potência do painel, drenando assim o máximo de energia possível para a rede. Os valores de tensão e corrente referentes ao MPP em certas condições específicas são utilizados para alterar a curva de impedância de entrada do conversor estático a fim de que ela intercepte o ponto de máxima potência instantaneamente.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo principal a simulação e avaliação das principais técnicas tradicionalmente utilizadas para MPPT. Essas técnicas serão analisadas, implementadas e simuladas em ambiente computacional de forma a fornecer meios para uma análise qualitativa e comparativa a respeito da eficiência entre os métodos na extração da potência disponibilizada pelos painéis.

II. ESTRATÉGIA DE CONTROLE

A Fig. 1 apresenta o diagrama de blocos simplificado de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCCR) típico [4].

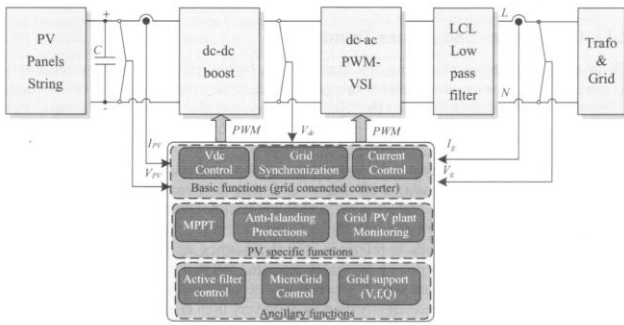


Fig. 1 - Diagrama de Blocos de um SFCR típico.

O controle do conversor Boost e do inversor envolve diversas funções. No entanto, este trabalho é limitado ao estudo e análise das técnicas de MPPT. As outras funções específicas desse sistema, tal como sincronização com a rede, anti-ilhamento etc fogem do escopo deste artigo e são alvo de estudos posteriores por parte dos autores.

Em um SFCR típico o conversor Boost é responsável pelo MPPT e sua estratégia de controle é baseada na Fig. 2.

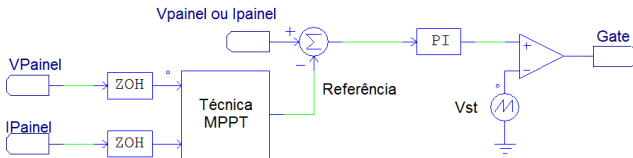


Fig. 2 - Estratégia de controle do conversor Boost aplicado em SFCR.

Dependendo do método de MPPT é necessário a aquisição da tensão e/ou da corrente do painel fotovoltaico (V_{painel} e I_{painel}). Esses sinais são utilizados pelo algoritmo do MPPT para gerar uma referência, seja, ela de tensão ou de corrente, que será utilizada na malha de controle ilustrada na Fig. 2.

O compensador proporcional-integral (PI) é sintonizado de forma a anular o seu sinal de entrada, correspondendo ao erro entre a referência gerada pelo algoritmo de MPPT e o seu sinal correspondente, seja ele a tensão ou a corrente do painel.

A saída do PI é comparada com uma onda dente-de-serra (V_{st}) de forma a gerar pulsos de ataque de *gate* do conversor Boost. Dessa forma, com a estratégia ilustrada na Fig. 2, garante-se que a tensão ou a corrente do painel fotovoltaico seja forçada a igualar-se à referência gerada pelo método de MPPT.

III. PRINCIPAIS TÉCNICAS DE MPPT

Nesta seção serão apresentadas as principais técnicas de MPPT tradicionalmente utilizadas para extração da máxima potência de painéis fotovoltaicos.

a. MÉTODO DA RAZÃO CÍCLICA FIXA

Segundo a literatura específica, o método da razão cíclica constante é considerado o mais simples no quesito de complexidade de implementação. Este método consiste em um único ajuste da resistência aparente da carga no ponto de máxima potência para determinada temperatura e radiação incidente. Para isso, a Razão Cíclica (D) do conversor é pré-

ajustada para se obter o MPP. É um método off-line, pois o valor da razão cíclica é fixa em determinado valor [1-3].

A razão cíclica escolhida dependerá da tensão de entrada e saída do conversor Boost, de acordo com a Equação 1.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (1)$$

Onde:

- D é a razão cíclica;
- V_{out} é a tensão de saída do Boost, correspondendo a ser mantida pelo inversor;
- V_{in} é a tensão de entrada do Boost, correspondendo à tensão de saída do painel para uma dada condição de irradiação e temperatura.

O módulo solar utilizado na simulação computacional é o modelo KD135-UPU, da Kyocera. Cada módulo fornece uma potência de 135 W a 17,7 V para uma irradiação de 1000 W/m² a 25 °C.

Como são utilizados oito módulos dispostos em série, a tensão resultante do conjunto é 141,6 V. Considerando que o inversor mantém a saída do conversor Boost em 400 V, logo a largura de pulso do conversor pode ser calculada por (2).

$$\frac{400}{141.6} = \frac{1}{1-D} \Rightarrow D = 0,646 \quad (2)$$

Para gerar um sinal de razão cíclica com o valor calculado pela Equação (2) compara-se uma onda dente-de-serra com valor de pico de 1 V com uma fonte constante com valor ao valor da razão cíclica desejada.

b. MÉTODO DA TENSÃO CONSTANTE

Este método consiste na regulação da tensão do módulo (V_{in}) em um valor de referência, que corresponde a tensão da máxima potência do painel para uma dada condição de irradiação e temperatura [1-5].

A Fig. 3 apresenta a estratégia de controle do método da Tensão Constante.

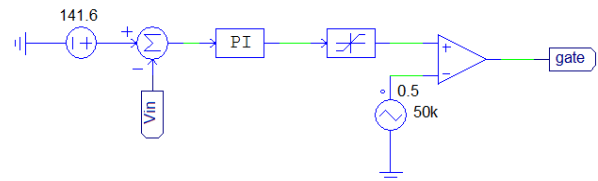


Fig. 3 - Esquema do PSIM® - Método da Tensão Constante.

Diferentemente do método da Razão Cíclica Constante, este método regula a tensão de saída do painel independente da tensão de saída do conversor Boost, o que garante uma MPPT mais eficiente.

c. MÉTODO P&O

O Método P&O (Perturbe e Observe) varia a tensão de saída do painel e verifica a sua potência extraída. O diagrama de implementação do Método P&O é apresentado na Fig. 4.

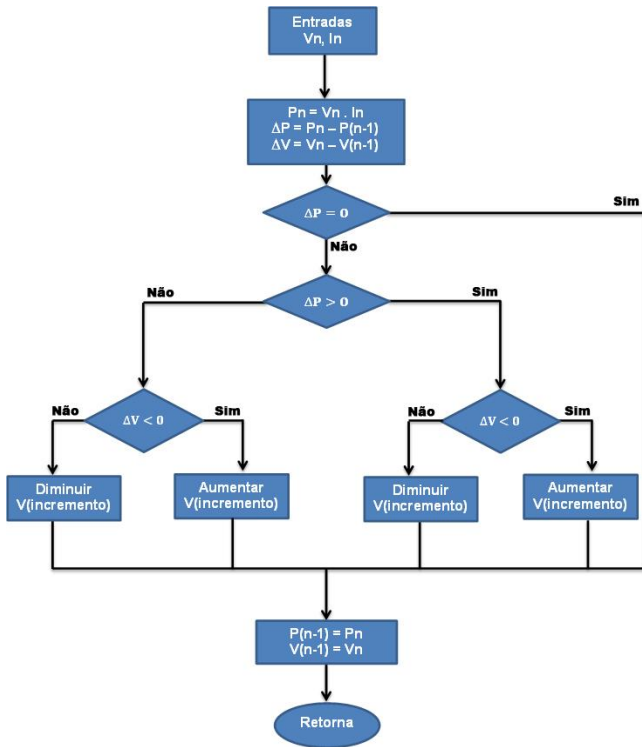


Fig. 4 – Fluxograma do Pertube e Observe (P&O).

Neste método calcula-se a potência instantânea (P_n) e compara-se com a potência obtida no ciclo anterior ($P_{(n-1)}$), gerando a diferença entre estes dois instantes (ΔP). Variações positivas de potência significam que a perturbação na tensão contribuiu para o aumento da potência e assim o próximo incremento de tensão continuará a ser positivo. Variações negativas de potência, por outro lado, significam que a perturbação na tensão não contribuiu para o aumento da potência, logo, haverá um decremento de tensão.

Sendo assim, o método opera periodicamente “perturbando” a tensão de saída do painel e quando ponto de máxima potência é atingido a tensão oscila em torno deste ponto.

O tamanho do passo de variação de tensão ($V_{\text{incremento}}$) influencia na rapidez da convergência do método e na menor oscilação em regime permanente. Logo, um valor adequado para $V_{\text{incremento}}$ é necessário para estabelecer o balanço entre estes dois fatores.

d. MÉTODO DA CONDUTÂNCIA INCREMENTAL

O método da Condutância Incremental opera de forma a buscar a máxima potência do painel analisando o ponto de derivada da potência em relação à tensão do painel. Quando a potência extraída for máxima, a derivada da potência com relação à tensão será nula, conforme (3).

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{i(t)}{v(t)} + \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0 \quad (3)$$

O fluxograma do método está representado na Fig. 5.

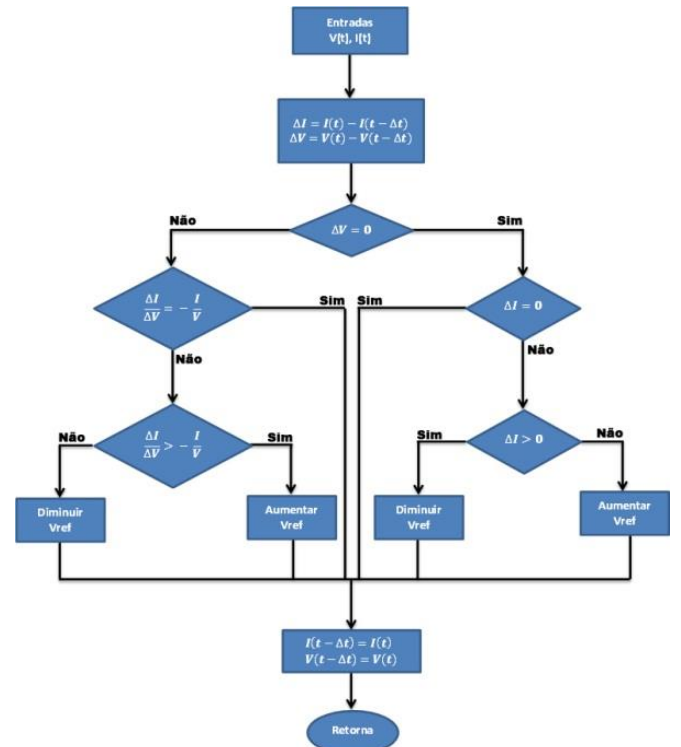


Fig. 5 - Fluxograma do Método Condutância Incremental.

Quanto mais distante do MPP o painel opera maior será o valor da derivada de potência pela tensão. Ao analisar este valor é possível modificar a tensão do módulo com o objetivo alcançar o ponto de derivada nula da potência em relação à tensão [5-7].

e. MÉTODO BETA

Este método baseia-se na aproximação do ponto de máxima potência por meio do equacionamento de uma variável comumente chamada de Beta (β), conforme (4).

$$\beta = \ln(I_o + c) = \ln\left(\frac{I_{pv}}{V_{pv}}\right) - cV_{pv} \quad (4)$$

Para realização do estudo da variável Beta utilizou-se do modelo parametrizado dos oito painéis solares em série. Para diferentes temperaturas e radiações incidentes no painel, o software apresenta os valores de corrente e tensão correspondentes ao MPP (Fig. 6). Logo, é possível calcular β para diferentes condições.

A Tabela 1 mostra o comportamento da variável Beta a diferentes condições para o conjunto dos oito painéis solares em série.

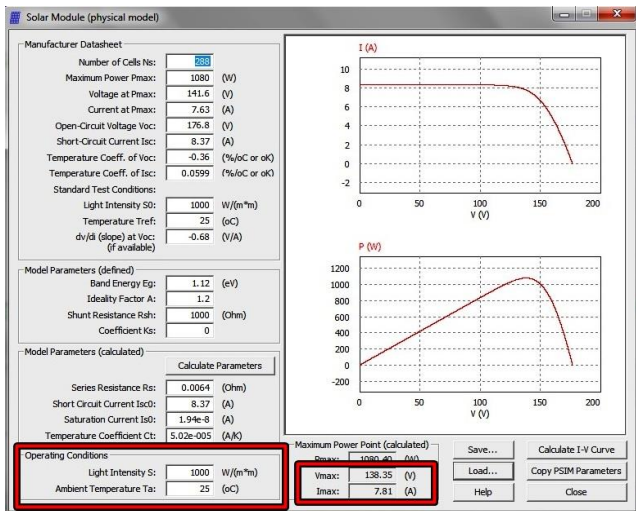


Fig. 6 - Tensão e Corrente do MPP no PSIM®.

Tabela 1 – Valores de Beta para diferentes condições de insolação e temperatura.

Radiação Incidente (W/m ²)	Temperatura do Painel	
	Beta (β)	
	25°	45°
1000	-18,44945	-17,06155
900	-18,59758	-17,19892
800	-18,71695	-17,33664
700	-19,89718	-17,47327
600	-19,04833	-17,61187
500	-19,19866	-17,74592

Observa-se que a variável β mantém-se praticamente constante ao variar a radiação sob uma temperatura fixa. Por outro lado, seu valor é drasticamente alterado com a mudança da temperatura do módulo. Portanto, o método Beta pode ser usado como indicativo de MPP em ambientes em que a temperatura não oscila muito.

Uma das técnicas para implementação do método Beta é apresentada na Fig. 7.

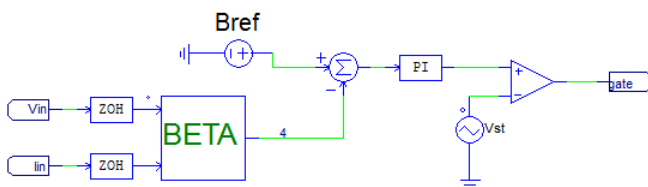


Fig. 7 - Esquema do PSIM® – Método Beta

Para uma dada condição de irradiação e temperatura calcula-se o valor de β que será utilizada como referência (β_{ref}). A partir das medições da tensão e corrente do painel é calculado o valor de β através de (4) e através da malha de controle ilustrado na Fig. 7 seu valor é forçado a igualar-se à referência (β_{ref}).

O valor do Beta escolhido como referência (-18,4494) pode ser otimizado para aumentar a eficiência do método.

Para isso é possível variar seu valor em uma faixa em torno do valor de referência e verificar a potência extraída do painel. O valor otimizado do valor de β_{ref} ocorre quando a potência extraída do painel mais se aproxima do valor máximo.

Para a variação do valor do Beta de referência utiliza-se o bloco “Parameter Sweep”. Esse bloco varia o valor do β_{ref} de um valor inicial a um valor final incrementado-o em um valor definido.

Nesta aplicação, a faixa de variação do valor do Beta será de 20% e o valor do incremento será de 0,5 V, conforme ilustra a Fig. 8.

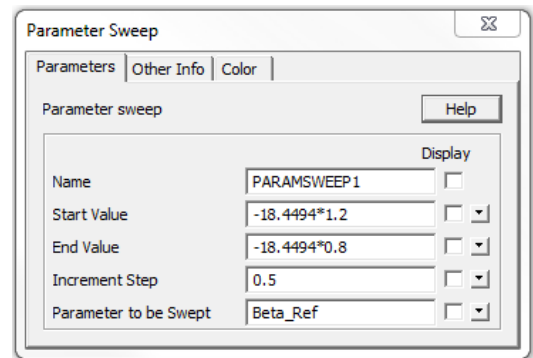


Fig. 8 - Valor dos parâmetros para variação Beta.

Portanto, ao utilizar esse bloco será gerado um gráfico (Fig. 9) da potência extraída do painel em função dos valores de Beta.

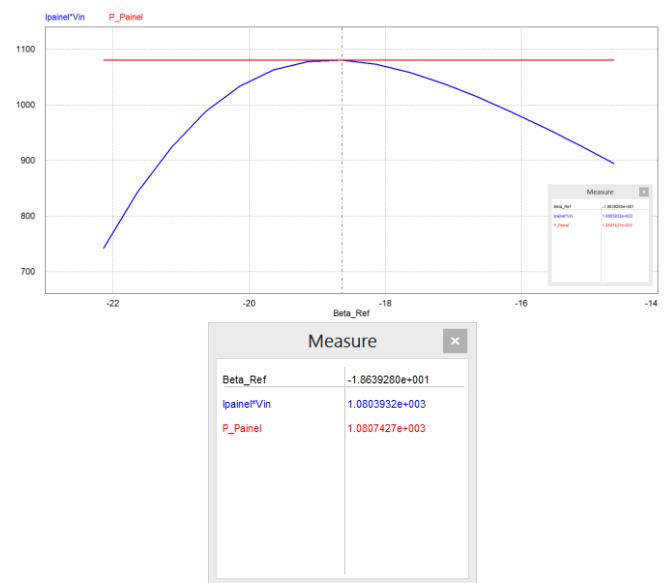


Fig. 9 - Potência extraída do painel em função do valor de Beta

Nota-se que para o valor de $\beta = -18,6392$ a potência extraída do painel atinge seu valor máximo, praticamente se igualando ao valor da potência disponível para as condições de insolação e temperatura simulados (1000 W/m² e 25 °C).

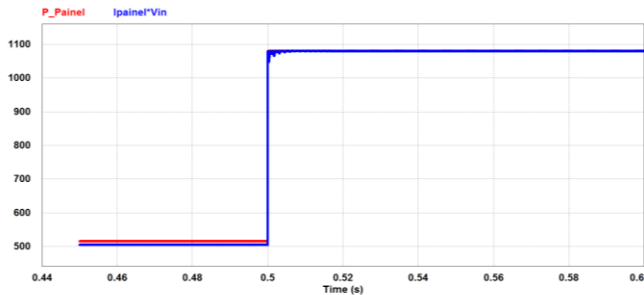
IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Nesta seção serão apresentados os principais resultados de simulação computacional dos métodos descritos na Seção III.

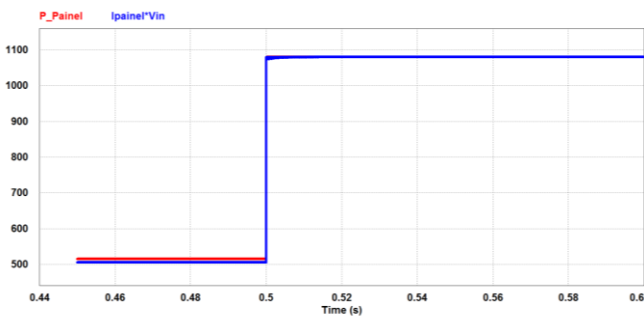
Para avaliar a eficiência do método na extração de máxima potência um conjunto de 8 módulos conectados em série da Kyocera (modelo KD135-UPU) serão simulados submetidos a degraus de irradiação e temperatura.

a. DEGRAU DE IRRADIÂNCIA

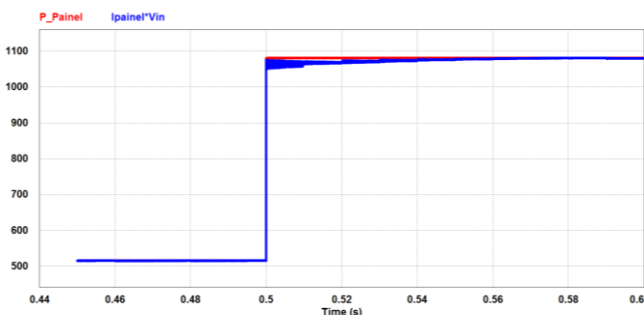
Para a avaliação da eficiência do método diante de variações de irradiação utilizou-se uma função degrau no PSIM® com o valor da irradiação variando de 500 W/m² para 1000 W/m². A Fig. 10 apresenta os resultados obtidos através da simulação dos métodos descritos na seção III.



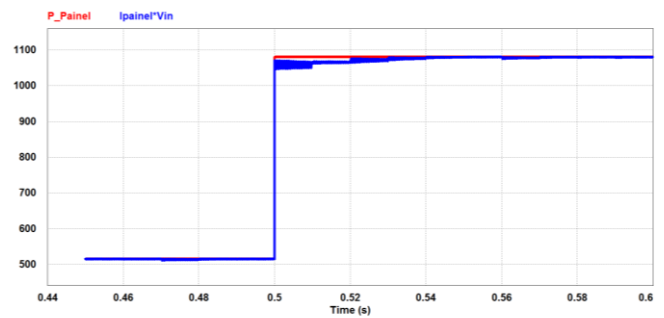
(a)



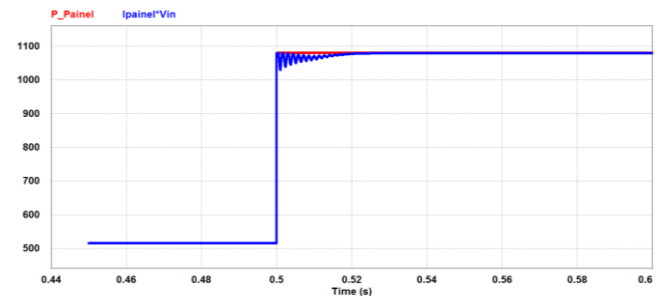
(b)



(c)



(d)



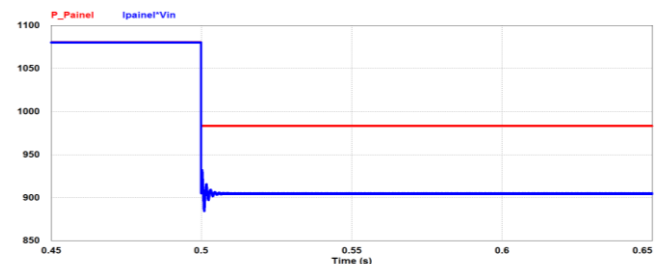
(e)

Fig. 10 – Potência extraída do painel (vermelho) comparado com a potência máxima disponível (azul) utilizando o método (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) P&O, (d) condutância incremental e (f) Beta para um degrau de irradiação de 500 W/m² para 1000 W/m².

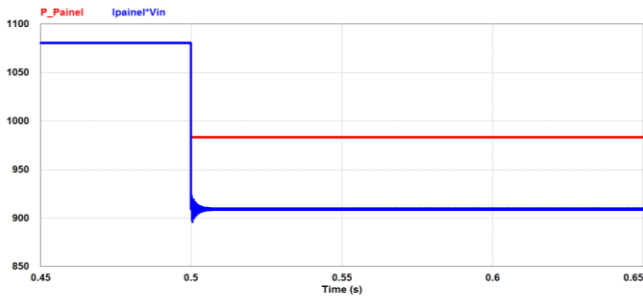
Analisando os resultados de simulação computacional nota-se que os métodos mais eficientes na extração de máxima potência são o Beta, condutância incremental e P&O. Estes métodos apresentam resultados satisfatórios em ambas condições de irradiação. No entanto, a implementação desses métodos requer a utilização de sensores de corrente e tensão, o que representa uma desvantagem quando comparado ao método da razão cíclica fixa e da tensão constante. Estes métodos utilizam menos sensores que os demais, mas são eficientes apenas na condição de irradiação utilizada no projeto. Exceto nessas condições, a extração de potência fica prejudicada, conforme ilustra a Fig. 10 (a) e (b).

b. DEGRAU DE TEMPERATURA

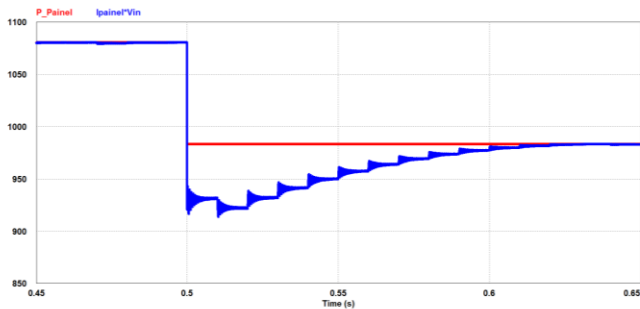
Para a avaliação da eficiência do método diante de variações de temperatura utilizou-se uma função degrau no PSIM® com o valor de temperatura variando de 25 °C para 45 °C. A Fig. 11 apresenta os resultados obtidos através da simulação dos métodos descritos na seção III.



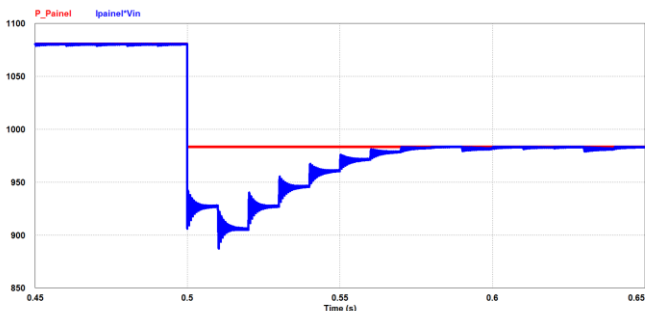
(a)



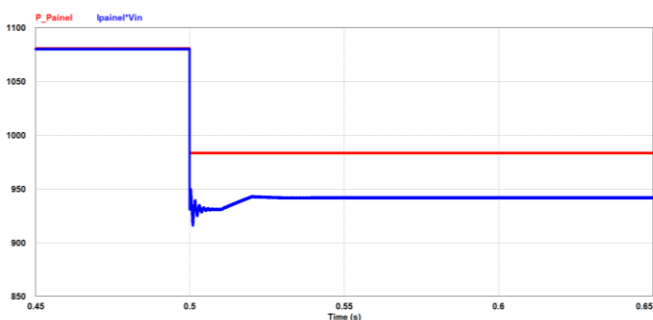
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 11 – Potência extraída do painel (vermelho) comparado com a potência máxima disponível (azul) utilizando o método (a) razão cíclica constante, (b) tensão constante, (c) P&O, (d) condutância incremental e (f) Beta para um degrau de temperatura de 25 °C para 45 °C

Analisando os resultados da Fig. 11 nota-se que os métodos da razão cíclica fixa, tensão constante e Beta são fortemente influenciados pela temperatura. Considerando que os métodos foram projetados para operar em 25 °C, a

extração da máxima potência fica prejudicada após o degrau de temperatura para 45 °C.

Por outro lado, os métodos P&O e Condutância Incremental são praticamente insensíveis à mudança de temperatura, o que justifica sua utilização em locais que experimentam grandes variações de temperaturas diárias ou anuais.

V. CONCLUSÕES GERAIS

Este artigo apresenta a análise, implementação e simulação das principais técnicas de MPPT disponíveis na literatura. Essas técnicas buscam extrair a máxima potência dos painéis fotovoltaicos para que as perdas na geração de energia do sistema sejam mínimas. Para a simulação das técnicas utilizou-se o software PSIM[®], que possui ferramentas que otimizam a implementação dos métodos de MPPT. Conclui-se que para a implementação de determinada técnica de MPPT é necessário analisar, antecipadamente, as condições meteorológicas do local, principalmente temperatura e irradiância que são fatores determinantes para o desempenho dos painéis fotovoltaicos. Um estudo da área onde o sistema de geração será instalado permite a melhor adequação do método a ser utilizado, pois, por meio dos gráficos do degrau de irradiância e temperatura é possível decidir qual técnica de MPPT desempenhará melhor função de acordo com suas características de aplicação.

Como proposta de trabalhos futuros os autores propõem a análise e simulação computacional de outros métodos de MPPT, tal como Condutância Incremental Modificada, Correlação de Ripple, Célula Piloto etc, além da implementação destes métodos em uma planta física para uma validação experimental da eficiência destas técnicas de rastreamento de máxima potência em SFCR.

REFERÊNCIAS

- [1] Moacyr A. G. de Brito, Leonardo P. Sampaio, Luigi G. Junior, Carlos A. Canesin. “Avaliação das Principais Técnicas para Obtenção de MPPT de Painéis Fotovoltaicos”, 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 2010.
- [2] Moacyr A. G. de Brito, Leonardo P. Sampaio, Luigi G. Junior, Carlos A. Canesin, “Evaluation of MPPT Techniques for Photovoltaic Applications”, IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2011.
- [3] Moacyr A. G. de Brito “Inversores Integrados Monofásicos e Trifásicos para Aplicações Fotovoltaicas: Técnicas para obtenção de MPPT, detecção e proteção de ilhamento, sincronização e paralelismo com a rede de distribuição de energia elétrica”. Tese de Doutorado – Faculdade de Engenharia Elétrica de Ilha Solteira – FEIS/UNESP, Ilha Solteira, 2013.
- [4] R. Teodorescu, M. Lisesse, P. Rodriguez, “Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems”. 1. ed., Wiley – IEEE, 2011.

- [5] K. C. Oliveira, M. C. Cavalcanti, G. M. S. Azevedo, F. A. S. Neves, “Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Systems”,IEEE Transactions on Sustainable Energy, Jan. 2013.
- [6] J. T. C. Neto, “Controle Robusto aplicado a Conversor Buck-Boost em Sistemas Fotovoltaicos”. Dissertação Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte –UFRN, Natal. Julho de 2012.
- [7] J. I. L. Seguel, “Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital”. Dissertação Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Hozizonte. Agosto de 2009.