

# ESTUDO DE TÉCNICAS DE MPPT EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Robson Ruiz Spaduto, Luiz Carlos Gomes de Freitas

Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP); Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT);  
Universidade Federal de Uberlândia (UFU); Av. João Naves de Ávila, 2160 - Bloco 3N - Uberlândia - MG - Brasil  
rspaduto@hotmail.com; lcgfreitas@yahoo.com.br

**Resumo** – Devido à natureza intermitente da energia solar, conversores estáticos destinados ao condicionamento da energia proveniente de módulos fotovoltaicos precisam ser capazes de extrair máxima potência em qualquer condição de irradiância e/ou temperatura. É neste contexto que se insere o presente trabalho que prima pelo estudo e implementação de uma técnica comumente utilizada para o Rastreamento do Ponto de Máxima Potência de módulos fotovoltaicos (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*), a qual é denominada Perturbe e Observe (P&O - *Perturb and Observe*). Os módulos fotovoltaicos foram acoplados a um conversor Boost para promover a elevação da tensão proveniente dos módulos e um Processador Digital de Sinais (DSP - *Digital Signal Processor*) foi utilizado para implementação do código de controle desenvolvido. Resultados de simulação são apresentados para comprovação da teoria exposta e um protótipo experimental foi construído em laboratório para verificação da eficácia da referida técnica de controle. Os respectivos resultados experimentais serão apresentados em trabalhos futuros.

**Palavras-Chave** – Boost, DSP, Energia Fotovoltaica, MPPT, Perturbe e Observe.

## STUDY OF MPPT TECHNIQUES IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

**Abstract** - Due to the intermittent nature of solar energy, static converters for the conditioning of energy extracted from photovoltaic (PV) modules need to be able to extract maximum power in any irradiance and/or temperature condition. It is in this context that the present work once it concerns the study and implementation of a technique commonly used for maximum power point tracking of photovoltaic modules (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*), which is called Perturb and Observe (P&O). The photovoltaic modules have been coupled to a boost converter to promote the rise of the voltage from the PV modules, and a Digital Signal Processor (DSP) was used to implement the control code developed. Simulation results are presented to prove the theory exposed and an experimental prototype was built in the laboratory to verify the effectiveness of this control technique. The

corresponding experimental results will be presented in future work.

**Keywords** – Boost, DSP, MPPT, Photovoltaic Energy, Perturb and observe.

## I. INTRODUÇÃO

No Brasil, a principal fonte de obtenção de energia elétrica baseia-se na geração hidráulica, tendo também a geração térmica com parcela significativa. As fontes alternativas e renováveis para geração de energia elétrica vêm apresentando um expressivo crescimento com o uso da biomassa, dos ventos e de pequenas centrais elétricas. Todas essas fontes foram impulsionadas principalmente pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA) [1].

Outra fonte que vem merecendo atenção devido ao significativo crescimento nos últimos anos é a energia solar. Essa energia é proveniente do sol, que pode ser utilizada como fonte térmica (aquecimento de fluidos, ambientes e para geração de potência mecânica) e como fonte de geração de energia elétrica. A primeira contribui para redução do consumo de energia elétrica principalmente em residências, onde uma das maiores fontes de gastos com energia está atrelada ao uso do chuveiro elétrico, a segunda está condicionada ao uso de módulos fotovoltaicos, os quais, dependendo do arranjo adotado, pode tornar a instalação autossuficiente em energia. Por isso o inversor solar utilizado para condicionamento da energia elétrica proveniente dos módulos é dotado de técnicas de extração de máxima potência, devido à inerente característica intermitente da energia solar.

No cenário da geração de energia elétrica a partir da energia solar, a utilização de módulos fotovoltaicos já se tornou uma realidade. Há de se destacar que a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou a Audiência Pública n. 042/2011, que busca aumentar a instalação de geração distribuída de pequeno porte e alteração do desconto nas Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e Tarifas de Uso do Sistema de Transmissão (TUST) para usinas com fonte solar.

É neste contexto que se insere o presente trabalho que, devido à necessidade de desenvolvimento de técnicas que possibilitem o uso mais eficiente da energia provinda dos painéis fotovoltaicos, tem como objetivo o estudo e implementação de técnicas de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) em sistemas inversores para painéis fotovoltaicos, utilizando, para tanto, uma plataforma didática composta por um conversor *Boost* (estágio *cc-cc*) e um inversor em ponte completa (*Full-Bridge*), consistindo, portanto, numa configuração tipicamente encontrada em sistemas inversores para painéis fotovoltaicos.



XI CEEL – ISSN 2178-8308  
25 a 29 de novembro de 2013  
Universidade Federal de Uberlândia – UFU  
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

## II. COMPOSIÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO ANALISADO

### A. Módulos Fotovoltaicos

O efeito fotovoltaico dá-se em materiais da natureza denominados semicondutores que se caracterizam pela presença de bandas de energia onde é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e de outra totalmente "vazia" (banda de condução). As células fotovoltaicas são fabricadas, na sua grande maioria, usando o silício (Si) e podendo ser constituída de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo. Uma célula individual, unidade de base de um sistema fotovoltaico, produz apenas uma reduzida potência elétrica, o que tipicamente varia entre 1W e 3W, com uma tensão menor que 1V. A maioria dos módulos comercializados é composta por 36 células de silício cristalino, conectadas em série, sendo que quanto maior for o módulo, maior será a potência e/ou a corrente disponível, ilustrado na Figura 1.

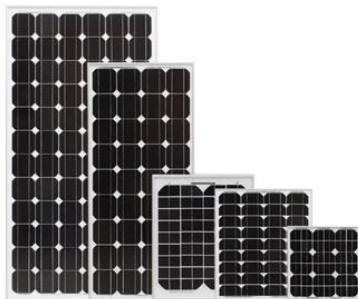


Fig. 1. Módulos fotovoltaicos

A característica de um módulo fotovoltaico, normalmente, é dada por sua potência máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ ). Devido a isso, este valor acaba sendo considerado o mais importante, quando se trata de caracterizar um determinado módulo. Porém, há outros parâmetros que também apresentam a funcionalidade do mesmo e que devem ser considerados, são eles:

- Tensão de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ ): é o máximo valor da tensão nos terminais do módulo fotovoltaico, quando nenhuma carga está conectada a ele. O seu valor é fornecido pelo fabricante para determinadas condições de radiação e temperatura;
- Corrente de curto-circuito ( $I_{cc}$ ): Corrente máxima que o painel pode fornecer, sob determinadas condições de radiação e temperatura, quando a tensão nos seus terminais é nula e conseqüentemente a potência também é nula;
- Ponto de máxima Potência (MPP): Em um painel fotovoltaico, para uma dada condição climática, só existe um ponto na curva  $I \times V$  onde a potência máxima pode ser alcançada. Este ponto corresponde ao produto da tensão de  $P_{m\acute{a}x}$  e corrente de  $P_{m\acute{a}x}$ .

A Figura 2 ilustra os parâmetros citados anteriormente. Nas Figuras 3 e 4 são apresentadas as características supracitadas para um módulo fotovoltaico da Kyocera (KD135SX-UPU). Na Figura 3 observa-se que quanto maior a temperatura, menor é a tensão nos terminais do módulo, alterando, por conseqüência, o ponto de máxima potência. Conforme evidenciado na Figura 4, o resultado de uma mudança na intensidade de irradiação é uma variação na corrente de saída para qualquer valor de tensão. A corrente

varia com a irradiação de forma diretamente proporcional. A tensão mantém-se praticamente constante.

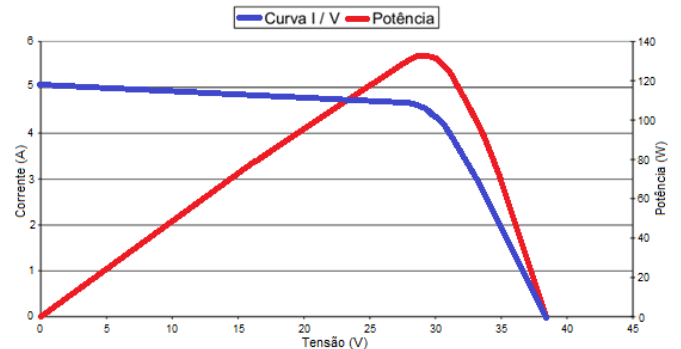


Fig. 2. Curvas características da potência e da corrente pela tensão de um módulo fotovoltaico.

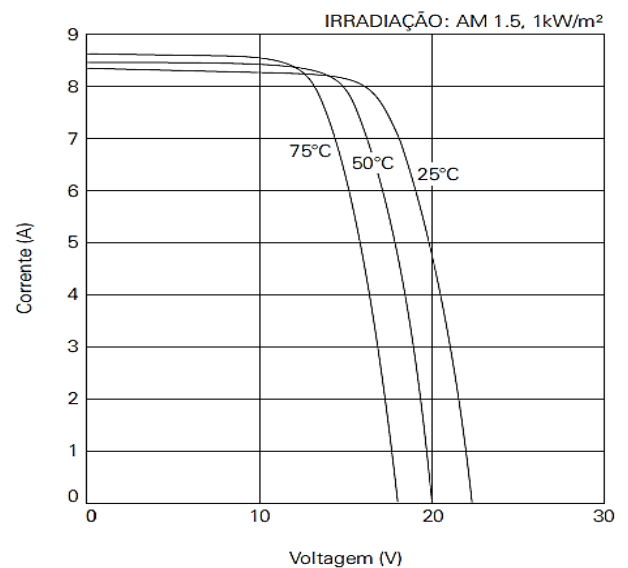


Fig. 3. Características da tensão e corrente em diferentes temperaturas – Módulo KD135SX-UPU

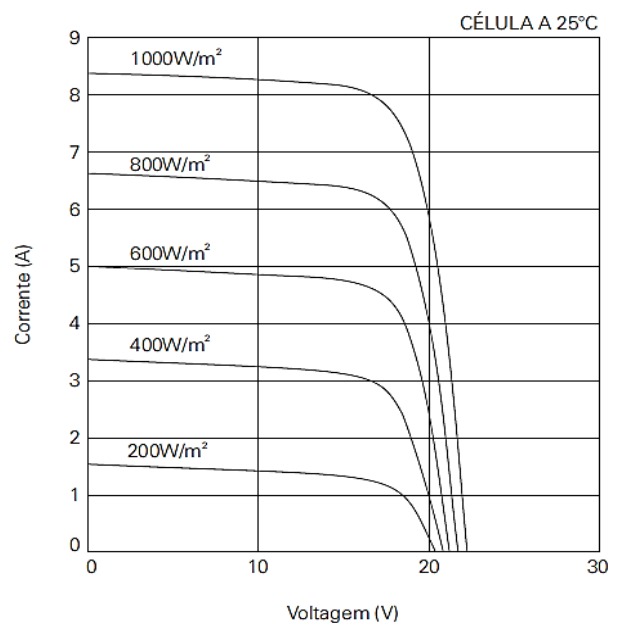


Fig. 4. Características da tensão e corrente em diferentes irradiações - Módulo KD135SX-UPU

### B. Estágio cc-cc – Conversor Boost

O conversor *cc-cc* a ser utilizado é o conversor *Boost*, também conhecido como elevador de tensão, ou seja, tem a possibilidade da elevação do nível de tensão na saída do conversor. Com o controle do tempo de condução e bloqueio da chave, controla-se a transferência da energia armazenada no indutor de entrada que, por sua vez, será transferida para a carga quando a chave estiver aberta. O conversor *Boost* a ser analisado neste trabalho, o qual deve operar como estágio *cc-cc* elevador de tensão dotado de técnica de MPPT para conexão de um inversor conectado à rede elétrica (conversor *cc-ca*) [2].

### C. Estágio cc-ca – Conversor Full-Bridge

O módulo *cc-ca* consiste em um conversor *Full-bridge* que gera uma onda senoidal a partir de uma tensão contínua. O funcionamento do inversor consiste no chaveamento em alta frequência com largura de pulso variável, de tal sorte que componentes harmônicos da tensão *ca* gerada são eliminados pelo filtro passa faixa (filtro LC) utilizado na saída do conversor. Em trabalhos futuros serão apresentados os resultados práticos a serem obtidos com a integração do estágio *cc-cc* e *cc-ca* projetados.

## III. TÉCNICA DE MPPT

Devido a não linearidade da relação entre os parâmetros de saída das células fotovoltaicas causadas por variações climáticas (irradiação solar e temperatura) é necessária a utilização de técnicas de extração da máxima potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*) para maximizar a produção de energia elétrica por um sistema fotovoltaico e aumentar a eficiência global do sistema. As Figuras 5 e 6 ilustram as curvas de potência com a variação de irradiação e temperatura, respectivamente. Analisando as figuras supracitadas, observa-se que tensão e a corrente gerada em um módulo fotovoltaico são extremamente dependentes da insolação diária e da temperatura ambiente e apresentam um comportamento não linear, surgindo, portanto, a necessidade de se implementar técnicas de controle que sejam capazes de rastrear o ponto de máxima potência (MPPT) em qualquer condição de irradiação e/ou temperatura [3].

Neste ambiente, destaca-se que há nove técnicas de MPPT amplamente difundidas na literatura, que são:

1. Razão Cíclica Fixa;
2. Tensão Constante;
3. Perturbe e Observe (P&O);
4. Perturbe e Observe (P&O) Modificado;
5. Condutância Incremental;
6. Condutância Incremental Modificada;
7. Método Beta;
8. Oscilação do Sistema;
9. Correlação de Ripple.

O desempenho de cada uma delas no que tange à eficiência no rastreamento do ponto de máxima potência e, por consequência, na produção de energia elétrica através de módulos fotovoltaicos foram avaliadas, conforme evidência a Figura 7 [4].

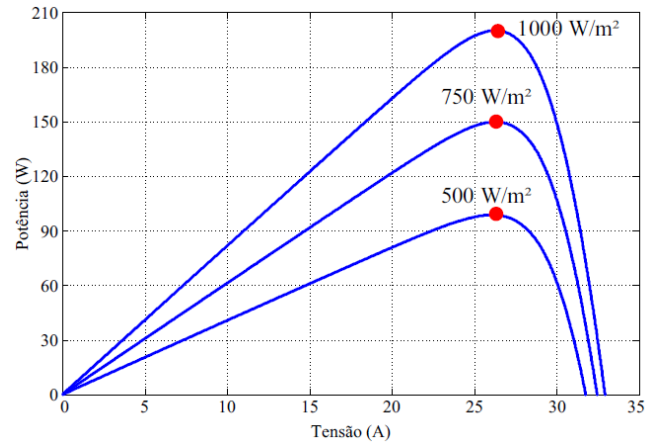


Fig. 5. Curvas de potências para diferentes irradiações [4]

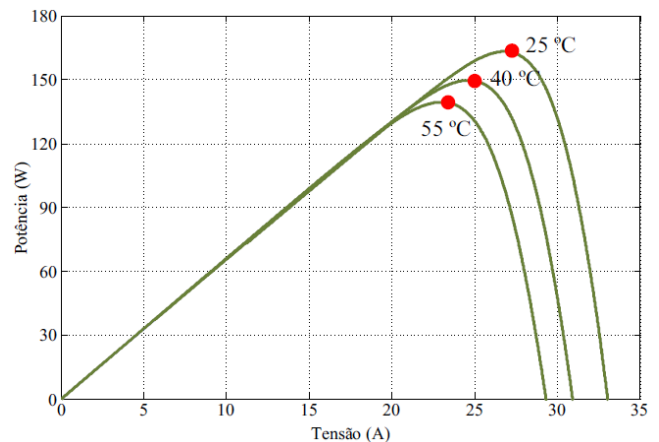


Fig. 6. Curvas de potências para diferentes temperaturas [4]

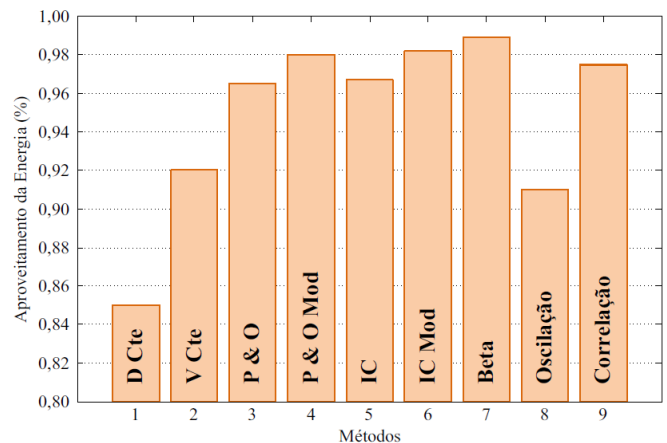


Fig. 7. Fator de rastreamento dos métodos [4]

Dentre os métodos avaliados conforme a literatura, o Beta apresentou melhor desempenho no rastreamento do ponto de máxima potência, porém, o P&O modificado merece atenção sendo este de fácil implementação. Uma das técnicas mais utilizadas para o rastreamento do MPPT é o P&O [5].

Por essa razão, no presente trabalho, devido à sua eficiência e simplicidade, a técnica de controle denominada Perturbe e Observe foi escolhida para fins de estudo e análises computacionais. A técnica P&O opera periodicamente incrementando ou decrementando a tensão de saída terminal do módulo e comparando a potência obtida no

ciclo atual com a potência do ciclo anterior. Caso ocorra alteração, como por exemplo, um aumento de potência, o ponto de operação é movido nesta direção caso contrário, o ponto de operação é movido na direção oposta. O fluxograma básico deste método é apresentado na Figura 8.

Este método necessita dos sensores de corrente e de tensão para obtenção dos valores instantâneos da corrente ( $I_{PV}(t)$ ) e da tensão ( $V_{PV}(t)$ ) nos terminais do módulo ou arranjo de módulos fotovoltaicos utilizados.

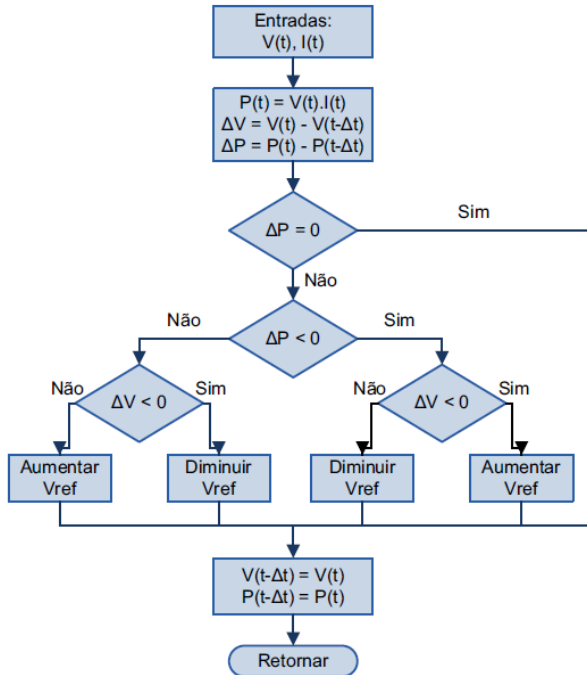


Fig. 8. Fluxograma do método P&O [4].

#### IV. ANÁLISE COMPUTACIONAL

O código que proporciona o rastreamento do ponto de máxima potência, aplicado no conversor *Boost* utilizando um controlador por Histerese e um controlador do tipo PI (Proporcional Integral) são apresentados a seguir. Estes códigos foram implementados na plataforma PSIM utilizando-se a ferramenta “C\_BLOCK”. Na etapa de análise experimental, este será transferido ao DSP para fins de verificação da eficácia da técnica de controle analisada.

```
static float V = 0;
static float I = 0;
static float P = 0;
static float V_ant = 0;
static float P_ant = 0;
static float VRef = 19;
static float deltaV = 0.25;
static float erro_P = 0;
static float erro_V = 0;
```

```
V = x1;
I = x2;
P = V*I;
erro_P = P - P_ant;
erro_V = V - V_ant;
```

```
if (erro_P == 0)
else
    {if (erro_P < 0)
        {if(erro_V < 0)
            VRef = VRef + deltaV;
        else
            VRef = VRef - deltaV;}}
else
    {if(erro_V < 0)
        VRef = VRef - deltaV;
    else
        VRef = VRef + deltaV;}}
V_ant = V;
P_ant = P;
y1 = VRef;
y2 = P;
```

Para fins de análise computacional, utilizou-se nesse trabalho a plataforma computacional *PSIM*<sup>®</sup>. Esse programa possui recursos muito eficientes para a implementação de módulos fotovoltaicos, tornando possível a utilização de um modelo físico de módulo fotovoltaicos disponíveis no mercado. Através da ferramenta Solar Module pode-se realizar a simulação de módulos com as características reais fornecidas pelos fabricantes, fornecendo resultados condizentes com a realidade.

Neste cenário, três simulações foram feitas utilizando o conversor *Boost*. As duas primeiras consistem no circuito de potência de um conversor *Boost* tendo como fonte um módulo fotovoltaico real com técnica de controle digital implementada através da ferramenta “C\_BLOCK”. Na primeira simulação, conforme ilustra a Figura 9, foi utilizado um controlador PI para determinação dos pulsos de comando da chave do conversor *Boost* e, por consequência, controle da tensão nos terminais do módulo fotovoltaico. Para tanto, são utilizados sensores de tensão e corrente para leitura destes parâmetros nos terminais do módulo. A Figura 10 evidencia que a tensão nos terminais do módulo fotovoltaico segue a referência de tensão, conforme desejado.

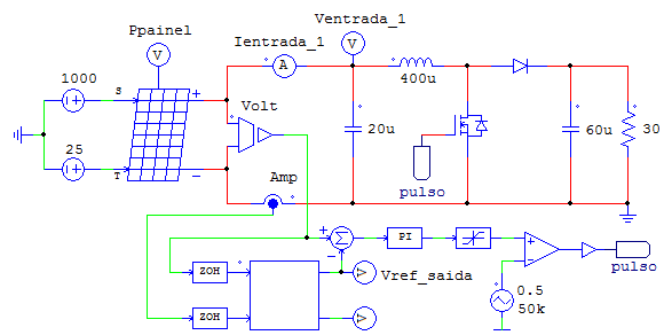


Fig. 9. Simulação de um conversor *BOOST* tendo como fonte um painel solar real com controle em DSP e controlador PI

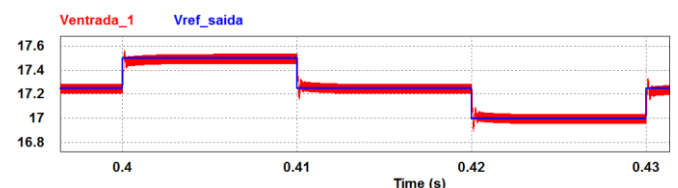


Fig. 10. Formas de onda da tensão procurada e tensão de referência utilizando PI

Na segunda simulação, o controlador PI foi substituído por um controlador por Histerese, conforme ilustra a Figura 11. Esta evidencia que a tensão nos terminais do módulo fotovoltaico deve seguir a referência de tensão imposta, conforme mostra a Figura 12.

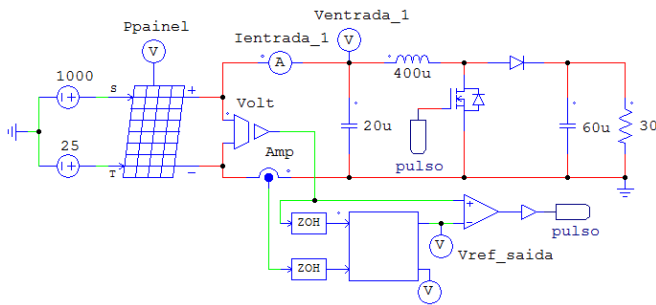


Fig. 11. Simulação de um conversor BOOST tendo como fonte um painel solar real com controle em DSP e controlador por Histerese

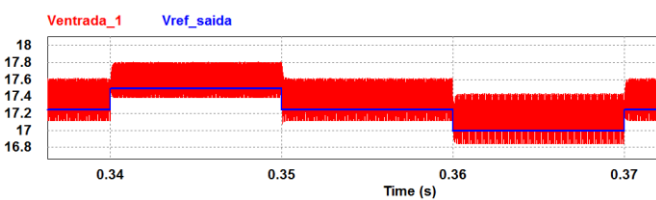


Fig. 12. Formas de onda da tensão procurada e tensão de referência utilizando histerese

Salienta-se que, devido à utilização de um comparador por Histerese, observa-se uma pequena mudança na amplitude da resposta dos incrementos e decrementos de tensão. Tal fato evidencia que, tanto a técnica de MPPT quanto o controlador utilizados, proporcionam desempenho diferente no que tange à eficiência no rastreamento do ponto de máxima potência.

Para uma comparação entre o controle por PI com por Histerese, são mostrados nas Figuras 13.a e 13.b um detalhe dos sinais de tensão de referência e tensão nos terminais do módulo durante as perturbações realizadas. Conclui-se, portanto, que o controle com PI possui uma menor variação em torno da referência desejada, reduzindo as perdas na extração da máxima potência quando comparado ao desempenho do controlador por Histerese.

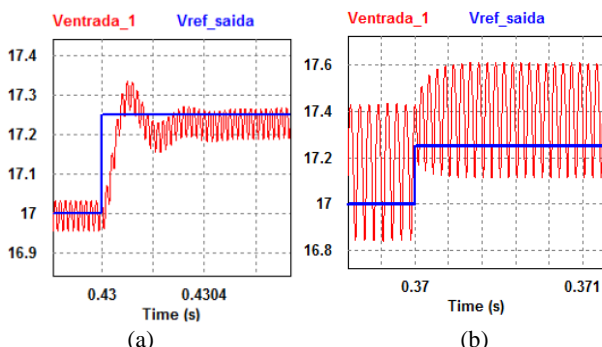


Fig. 13. Formas de onda da tensão procurada e tensão de referência a) PI; b) Histerese

Na terceira simulação foi utilizado o conversor *Boost* com controlador PI e, adicionalmente, foram impostos degraus de irradiância para verificação da resposta dinâmica do conversor e a eficiência do controle no rastreamento do

ponto de máxima potência, conforme ilustra a Figura 14. A fim de verificar se diante de variações da irradiação solar e, por consequência, do ponto de máxima potência, são apresentados na Figura 15 os sinais de potência disponível no módulo ( $P_{PV}$ ), potência extraída do módulo ( $I_{pv} \times V_{pv}$ ), tensão nos terminais do módulo ( $V_{PV}$ ), sinal de referência de tensão ( $V_{ref}$ ) e, por fim, os sinais de corrente imposta no indutor de entrada ( $I_{ind}$ ) e corrente do módulo fotovoltaico ( $I_{pv}$ ). Analisando a Figura 15, é possível concluir que a técnica de MPPT implementada promove boa eficiência na extração da máxima potência disponível nas duas condições de irradiação solar analisadas ( $1000W/m^2$  e  $500W/m^2$ ). Observa-se ainda que a resposta dinâmica do sistema é rápida a tensão nos terminais do módulo segue o sinal de referência desejado.

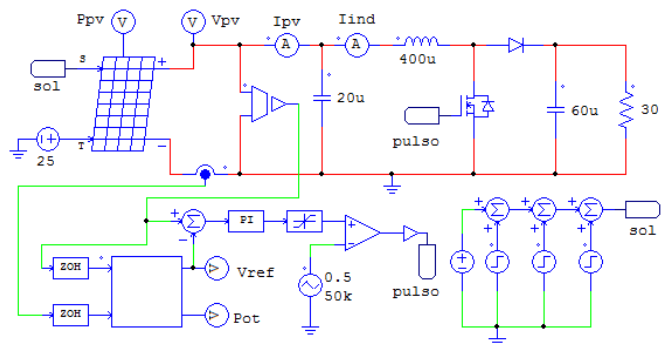


Fig. 14. Conversor *Boost* tendo como fonte um painel solar com características reais, controlado por PI e com degraus de Irradiância

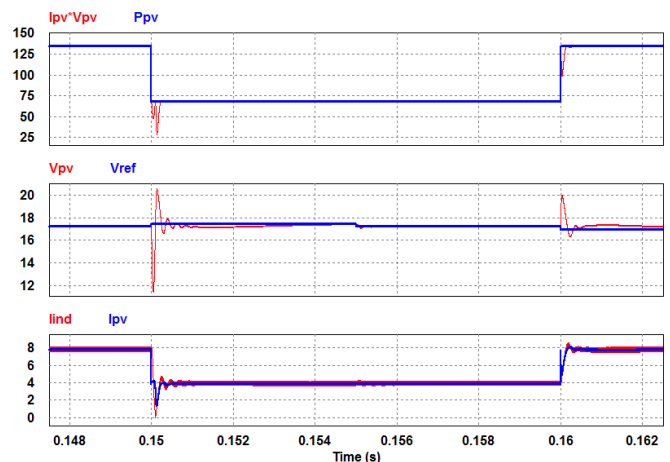


Fig. 15. Formas de onda das Potências, Tensões e Correntes na saída dos módulos fotovoltaicos comparados com as referências

## V. ANÁLISE EXPERIMENTAL

A validação experimental dos estudos teóricos realizados será baseada em uma plataforma originalmente proposta para ensino de técnicas de controle baseadas em DSP. Esta é constituída de quatro placas, sendo: um conversor *cc-cc* (*Boost*), um conversor *cc-ca* (*Full-bridge*), um kit desenvolvimento DSP F28335 Delfino da *Texas*<sup>®</sup>, uma placa de aquisição contendo um sensor de tensão e um de corrente, conforme ilustra a Figura 16.

Iniciando as confecções com o conversor *Boost*, mostrado na Figura 17. Junto ao conversor *cc-cc* foi realizado a montagem de placas de aquisição de sinais, com sensores de

tensão e corrente, ilustrado na Figura 18, no qual fornece as medições usadas no código mostrado neste trabalho. Para implementação dos códigos de controle, utilizou-se o microcontrolador DSP TMS320F28335 da Texas Instruments®, ilustrado na Figura 19.

A plataforma didática em foco proporciona a aplicação de técnicas de controle para os conversores *Boost* e *Full-Bridge*, objetivando o estudo e execução de técnicas de controle *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) e de conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica. Neste projeto, o principal objetivo é o estudo e manuseio de técnicas de MPPT utilizando o conversor *Boost*, conforme já evidenciado. Esta fase dos trabalhos se encontra em fase de implementação e os respectivos resultados serão apresentados em trabalhos futuros.

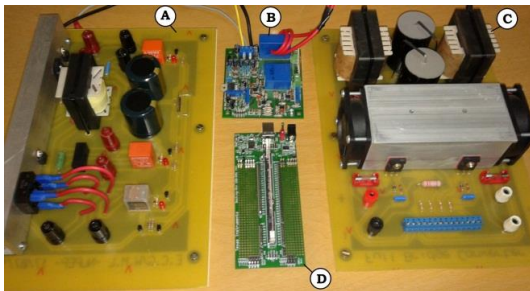


Fig. 16. Plataforma de Treinamento. a) Conversor Boost b) Placa de aquisição de sinais; c) Inversor Full-bridge; d) DSP TMS320F28335 [2]



Fig. 17. Detalhe do conversor Boost construído



Fig. 18. Detalhe da placa de sensores de tensão e corrente construída

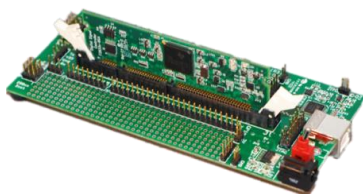


Fig. 19. Detalhe da placa do kit desenvolvimento F28335 Delfino da Texas® utilizado

## VI. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta o estudo e desenvolvimento de uma plataforma a fim de utilizar técnicas de controle de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) para extração da máxima potência proveniente de módulos fotovoltaicos. Para tanto, foram realizados estudos teóricos e análises computacionais para fins de determinação das características de desempenho das técnicas de MPPT reportadas na literatura técnica especializada. Neste cenário a técnica de controle denominado Perturbe & Observe foi escolhida para implementação na plataforma computacional PSIM, no qual o código de controle mostrado anteriormente foi avaliado.

Como visto, é possível fazer o controle dos parâmetros dos módulos solares, mesmo sabendo da não linearidade do mesmo devido à suas questões climáticas (irradiância e temperatura). E como também mostrado, é possível concluir que não somente a técnica de MPPT utilizada pode proporcionar diferentes desempenhos na extração de máxima potência, como também o tipo de controlador utilizado. No qual foi mostrado que o controlador por PI possuiu um melhor desempenho do que o por Histerese.

Também se conclui que a técnica usada promove uma velocidade na resposta e uma ótima dinâmica em condições de degraus de irradiância (de 500W/m<sup>2</sup> para 1000W/m<sup>2</sup> e de volta para 500W/m<sup>2</sup>), circunstâncias geralmente impostas pelo clima, nuvens e horário de funcionamento.

Os resultados alcançados foram animadores e motivaram a construção de um protótipo para avaliação experimental dos estudos realizados e os principais resultados a serem obtidos serão apresentados em trabalhos futuros.

## VII. REFERÊNCIAS

- [1] L. PORTO; PROINFA: “Política pública de energia renovável”. Net, Fortaleza, set. 2006. Acessado em 20 de Maio de 2012 em: [http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/galerias/arquivos/apresentacao/politica\\_publica.pdf](http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/galerias/arquivos/apresentacao/politica_publica.pdf).
- [2] H. R. Muhammad, *Eletrônica de Potência - Circuitos, Dispositivos e Aplicações*, Makron Books Ltda, 1999. W. Leão, G. Lima, L. C. Freitas, E. A. A. Coelho, V. J. Farias, L. C. G. Freitas, “Plataforma didática para desenvolvimento e aplicação de técnicas de controle baseadas em DSP em inversores monofásicos para módulos fotovoltaicos”, in Proc. Of Conferência Brasileira de Automação 2011, pp. 1-6.
- [3] D. R. Carrijo, R. S. Ferreira, S. C. Guimarães Jr., J. R. Camacho. “Uma Proposta de Técnica de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência de um Painel Fotovoltaico”. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito-MS. Setembro de 2010.
- [4] M. A. G. Brito, L. G. Junior, L. P. Sampaio, C. A. Canesin. “Avaliação das Principais Técnicas para Obtenção de MPPT de Painéis Fotovoltaicos”. *INDUSCON*; Novembro 2010.
- [5] R. Faranda, S. Leva, V. Maugeri, "MPPT techniques for PV Systems: Energetic and cost comparison"; Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, pp.1-6, July 2008.