ALGORITMO DE MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA PARA MÓDULO FOTOVOLTAICO IMPLEMENTADO EM PROCESSADOR DIGITAL DE SINAIS

Otávio Nobre de Assis – otavio@cpdee.ufmg.br
Thiago Perez de Paula Franco Bueno –perez@cpdee.ufmg.br
Marcos Antônio Severo Mendes – marcoss@cpdee.ufmg.br
Universidade Federal de Minas Gerais, Centro Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica
Lauro de Vilhena Brandão Machado Neto – Lvilhena@pucminas.br
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Grupo de Estudos em Energia

3.4 Outros Componentes de Sistemas Fotovoltaicos

Resumo. Este artigo apresenta o estudo e implementação de um circuito eletrônico de máxima transferência de potência entre carga e módulo fotovoltaico com o objetivo de possibilitar um melhor rendimento energético. O projeto utiliza um Processador Digital de Sinais - DSP e um conversor Buck-Boost. Os parâmetros de controle são a corrente e tensão do módulo fotovoltaico e o parâmetro controlado é o ciclo de trabalho do conversor. A variação do ciclo de trabalho do conversor resulta no casamento de impedância entre o módulo fotovoltaico e a carga, possibilitando assim a máxima transferência de potência no sistema. São apresentados o algoritmo utilizado na programação do DSP, os respectivos resultados na sua aplicação em um sistema real (módulo, conversor Buck-Boost, carga) e um algoritmo de validação do sistema através da excursão da curva de potência do módulo fotovoltaico. Essa curva é adquirida com o auxílio de um simulador de carga, que será implementado na programação do DSP, e contém o valor máximo de potência instantânea que o módulo consegue fornecer, possibilitando a verificação da eficiência do algoritmo aplicado. Na execução deste projeto foram abordados os seguintes tópicos: técnicas de comando e instrumentação em conversores eletrônicos de potência, sistemas geradores de energia fotovoltaica e conversores estáticos de potência. O trabalho foi desenvolvido em uma parceria do Grupo de Estudos em Energia – GREEN da PUC Minas e o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica – CPDEE da Universidade Federal de Minas Gerais.

Palavras-chave: *Energia Solar, MPPT (Máxima Transferência de Potência), DSP (Processador Digital de Sinais), Conversor, Gerador Fotovoltaico.*

1. INTRODUÇÃO

Os algoritmos de máxima transferência de potência são largamente utilizados nos sistemas que envolvem módulos fotovoltaicos. Seu principal objetivo é garantir o casamento de impedância entre o módulo e a carga possibilitando assim um maior aproveitamento da energia fornecida pelo mesmo. Esse casamento é realizado através do comando de elementos chaveadores em circuitos conversores de energia (*Buck*, *Boost* e *Buck-Boost*) alterando assim a impedância da carga vista pelo módulo.

Existem diversos algoritmos para este propósito, alguns mais complexo, capazes de avaliar radiação solar, temperatura, tensão e corrente, outros mais simples, realizando o controle baseado apenas no cálculo da potência fornecida pelo módulo.

Este projeto implementa um algoritmo que trabalha com base na potência fornecida pelo módulo através do gerenciamento da tensão e corrente do mesmo. O algoritmo é aplicado em um Processador Digital de Sinais (DSP) da *Texas Instruments* – DSP320F2812PGFA. Os sinais de

tensão e corrente são acompanhados por duas entradas equipadas com Conversores Analógico-Digital (ADC). Através destes dados a potência é calculada e comparada com valores anteriores, o resultado desta comparação resulta em incrementos ou decrementos na largura do pulso da saída PWM que comanda o elemento chaveador do circuito conversor de energia. A variação do ciclo de trabalho deste conversor altera a impedância da carga vista pelo módulo, possibilitando assim o casamento desta impedância com a do módulo. Este casamento resulta na máxima transferência de potência entre o módulo e a carga.

2. ANÁLISE DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

Os módulos fotovoltaicos são estruturas capazes de converter radiação solar em energia elétrica. Diferentes arranjos podem ser implementados na construção de um módulo, os mais utilizados são: amorfo, policristalino e monocristalino. No caso deste projeto foi utilizado o módulo multicristalino KC50 da Kyocera, sendo suas curvas de potência apresentadas pelo Fig. 1 e suas características técnicas pela Tab. 1.

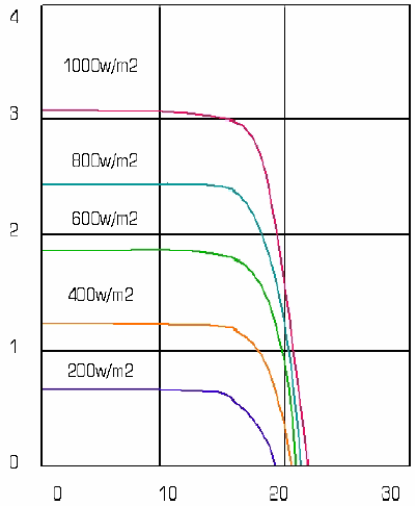


Figura 1 – Curvas de Potência do Módulo Fotovoltaico Multicristalino KC50 Kyocera

Tabela 1. Especificações Técnicas do Módulo Fotovoltaico Multicristalino KC50 Kyocera

Potência Máxima	50 W
Tensão no Ponto de Potência Máxima	16,7 V
Corrente no Ponto de Potência Máxima	3 A
Tensão de Circuito Aberto	21,5 V
Corrente de Curto Circuito	3,1 A

3. ANÁLISE DO DSP

Um Processador Digital de Sinais (DSP) é um dispositivo específico projetado em torno das operações matemáticas típicas para manipular os dados digitais que são medidos por sensores. O objetivo é processar os dados o mais rápido possível gerando assim uma seqüência de saída de novos dados em "tempo-real".

O DSP utilizado neste projeto foi o DSP320F2812PGFA da *Texas Instruments*. Este dispositivo apresenta quatro blocos funcionais: Sistema de Barramento Interno e Externo; Unidade Central de Processamento (UCP); Memória; Periféricos. A disposição interna destes quatro blocos está ilustrada na Fig. 2.

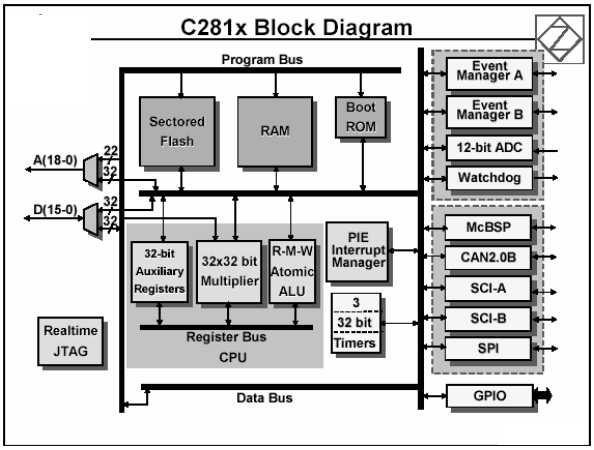


Figura 2 – Diagrama de Blocos do Processador Digital de Sinais da *Texas Instruments*.

3.1 Sistema de Barramento Interno e Externo

Para ser capaz de manipular dois operandos da memória para a central de processamento em um único ciclo de *clock*, o F2812 é equipado com dois sistemas de barramento independentes – Barramento de Programa e Barramento de Dados. Este tipo de configuração é conhecido como "Arquitetura de *Harvard*". Em função da habilidade do F2812 de ler operandos não apenas da memória de dados, mas também da memória de programa, a *Texas Instruments* da o nome de "Arquitetura de *Harvard* modificada" a esta configuração.

3.2 Unidade Central de Processamento (UCP)

A UCP do F2812 é capaz de executar grande parte das instruções de operações registrador para registrador e uma gama de instruções que são normalmente utilizadas por microcontroladores em um único ciclo de *clock*. Esta arquitetura conta também com poderosos modos de endereçamento, que permitem ao compilador assim como ao programador em assembly gerarem códigos compactos que quase sempre correspondem um-a-um ao código C.

Três *timers* de 32-bits podem ser usados para controle de tempo geral ou para gerar períodos de referência de *hardware* para sistemas de operação em tempo real. O Gerenciador Periférico de Expansão de Interrupção (PIE) permite respostas rápidas de interrupções para as várias fontes de sinais e eventos internos e externos.

3.3 Memória

O DSP F2812 trabalha com dois sistemas de endereçamento: direto e indireto. Pode acessar a memória tanto dentro quanto fora do *chip* e usa endereços de 32-bits para dados e 22-bits para programa. Desse modo, o total de memória endereçada será de 4 bilhões de palavras (1 palavra = 16 bits) para o espaço de dados e 4 milhões de palavras para o espaço de programa.

3.4 Periféricos

Dentre os periféricos do DSP utilizados neste projeto, podemos citar: I/O, Gerenciador de Eventos, Conversor Analógico Digital.

As portas físicas de entrada e saída do DSP são multiplexadas para diferentes funções e fica a cargo do programador selecionar a opção desejada. O mapa das portas pode ser encontrado em [1].

O Gerenciador de Eventos controla as funções temporizadas tais como: Modulação por Largura de Pulso e *Clock*. O sinal modulado por largura de pulso é gerado através da comparação de uma

onda de referência por um registrador configurado pelo programador. O F2812 disponibiliza 6 saídas PWM complementares e duas individuais. A função de C*lock* é controlada por um oscilador de 150MHz que pode ser dividido em freqüências derivadas deste valor.

4. ANÁLISE DO CONVERSOR *BUCK-BOOST*

As três configurações básicas para conversores estáticos de potência são: *buck* (abaixador de tensão), *boost* (elevador de tensão) e *buck-boost* (abaixador-elevador de tensão). Estas topologias definem como os elementos chaveadores, o indutor e o capacitor são dispostos no circuito.Neste projeto será abordado apenas o conversor *buck-boost*. O conversor abaixador-elevador fornece uma tensão de saída que pode ser menor ou maior que a tensão de entrada. Uma peculiaridade deste conversor é que a polaridade da tensão de saída é oposta à tensão de entrada, por isso, este conversor é conhecido também como regulador inversor. Existem dois modos de condução para os conversores estáticos de potência, o modo contínuo e o modo descontínuo de condução. No modo contínuo de condução a corrente flui continuamente enquanto que no modo descontínuo a corrente se anula em algum momento do período de chaveamento. Neste projeto, somente será abordado apenas o modo contínuo de condução.

4.1 Estrutura

O arranjo do circuito de um conversor *buck-boost* é mostrado na Fig. 3a. A operação do circuito pode ser dividida em dois estágios por ciclo de chaveamento. O primeiro estágio é quando o transistor "Q_1" está conduzindo e o diodo "D_m" consequentemente está reversamente polarizado. Neste estágio a corrente de entrada, que cresce, flui através do indutor "L" que é conectado diretamente a fonte e armazena energia enquanto o capacitor "C" fornece energia para a carga. No segundo estágio, o transistor "Q_1" está cortado e a corrente flui agora através de "L", "C", "D_m" e carga. Dessa forma a fonte é desligada do circuito e a energia armazenada no indutor "L" é transferida tanto para a carga quanto para o capacitor "C". Os circuitos equivalentes para os modos são mostrados na Fig. 3b. A duração de cada uma destas etapas é definida pelo ciclo de trabalho (*duty-cicle*), que é configurado de acordo com a tensão que se deseja obter na saída do conversor e é dado pela Eq. 1. Em [1] e [3] define-se por "t_{on}" o tempo em que o transistor permanece em condução e "T" o período de chaveamento.

$$k = \frac{t_{ON}}{T} \tag{1}$$

A função de transferência deste circuito conversor é apresentada na Eq. 2, de [1] e [3], onde "vo" é a tensão de saída, "vi" a tensão de entrada e "D" o ciclo de trabalho do conversor. Esta equação descreve o funcionamento do conversor *buck-boost*. Quando "k" (ciclo de trabalho) assumir valores menores que meio, o conversor funcionará como um circuito abaixador de tensão, já no caso de "k" assumir valores maiores que meio, o conversor funcionará como um circuito elevador de tensão. Caso "k" seja igual a meio, a tensão de saída será igual a de entrada. As formas de onda para as tensões e correntes em regime permanente do regulador *buck-boost* são mostradas na Fig. 3c para uma corrente de carga contínua.

$$v_O = -v_i \cdot \frac{D}{1-D} \tag{2}$$

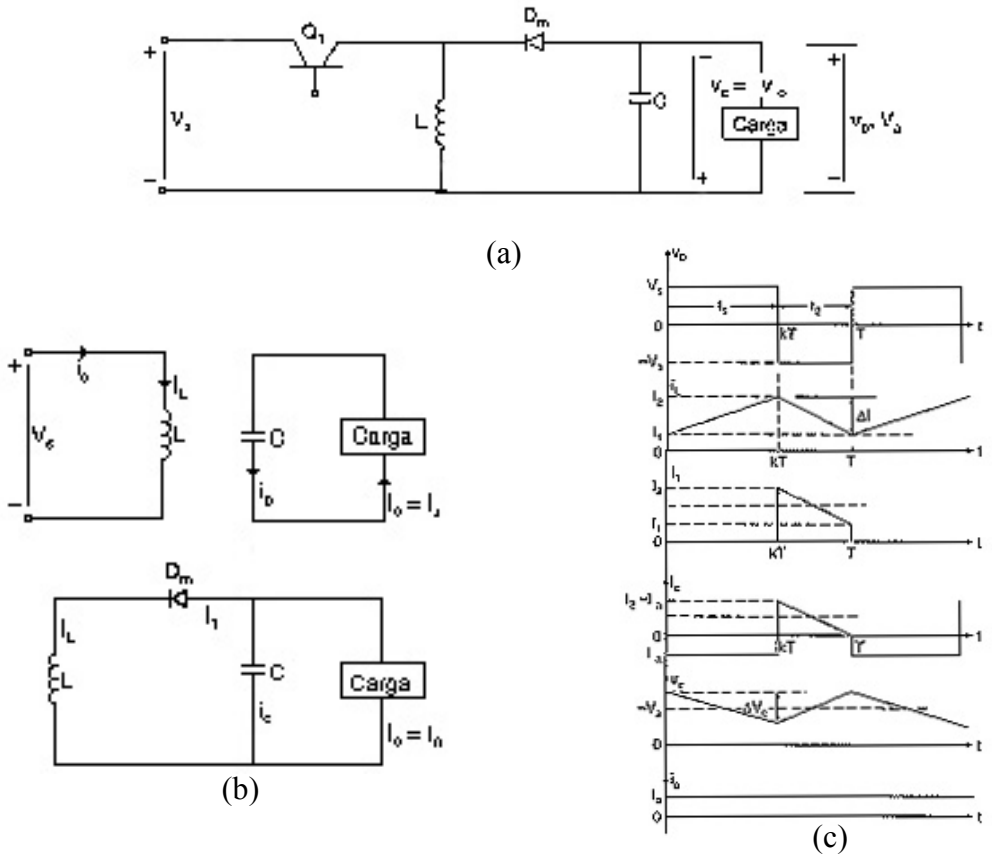


Figura 3 – Funcionamento do circuito *buck-boost*, onde:
(a) Circuito completo, (b) Estágios de funcionamento, (c) Formas de onda.

4.2 Simulação

Para validar o procedimento de projeto foram realizadas simulações do conversor *buck-boost* nos modos abaixador e elevador. Para tal utilizou-se a ferramenta *simulink* do programa MATLAB 7.0.

Na Fig. 4 estão mostradas as formas de onda de tensão de saída para "R =10Ω", "L =15μH", "C =100μF" e "V_{in} =20V" . Como esperado a tensão de saída se apresenta negativa pelo fato da fonte ter valor positivo. Na Fig. 4, curva (a), observa-se o conversor trabalhando no modo abaixador de tensão, na Fig. 4, curva (b), no modo elevador e na Fig. 4, curva (c), trabalhando com um ciclo de trabalho igual a 50%.

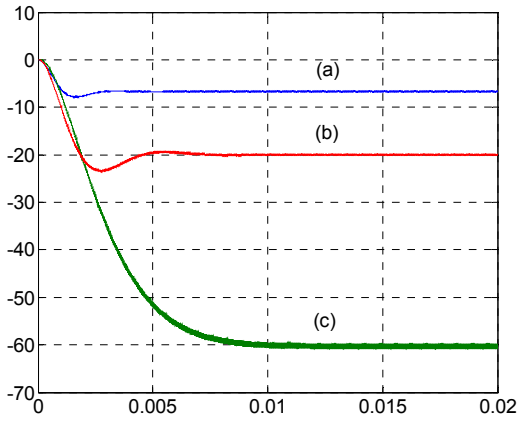


Figura 4 – Formas de onda do conversor *buck-boost* nos modos:
(a) abaixador, (b) elevador e (c) entrada igual a saída.

5. ANÁLISE DO ALGORÍTIMO DE MPPT

A alteração do ciclo de trabalho do conversor ligado entre o módulo e a carga é comandada pelo algoritmo que decide se o ciclo deve ser aumentado ou diminuído de acordo com a variação da potência fornecida pelo módulo para cada valor de ciclo aplicado. A potência é obtida da leitura dos valores de tensão e corrente de saída do módulo fotovoltaico a cada reconfiguração do ciclo de trabalho e depois comparada com o valor obtido no ultimo ciclo configurado. O algoritmo tem o objetivo de rastrear o ponto de potência máxima através deste processo.

O algoritmo desenvolvido neste projeto conta com uma rotina que implementa uma varredura da curva de potência do módulo fotovoltaico para determinada radiação e temperatura em relação à variação da impedância de entrada. Esta varredura tem como objetivo identificar o ponto de máxima potência, possibilitando a confirmação da regulação do algoritmo principal e se necessário uma reconfiguração do ponto de potência máxima, e assim validar o processo.

A Fig. 5 apresenta um fluxograma do funcionamento do algoritmo de MPPT. O primeiro *looping* do fluxograma realiza a varredura da curva de potência enquanto que o *looping* após a segunda decisão realiza a regulação do ponto de MPPT em tempo real. No intuito de tornar o programa mais claro e simplificado é utilizado o processo de Programação Modular, onde diferentes partes do projeto são separas e utilizadas como funções a serem chamadas pelo programa principal. Esse método de programação separa configurações diferentes em áreas distintas, o que torna a visualização do processo mais fácil, assim como a correção de possíveis erros no programa.

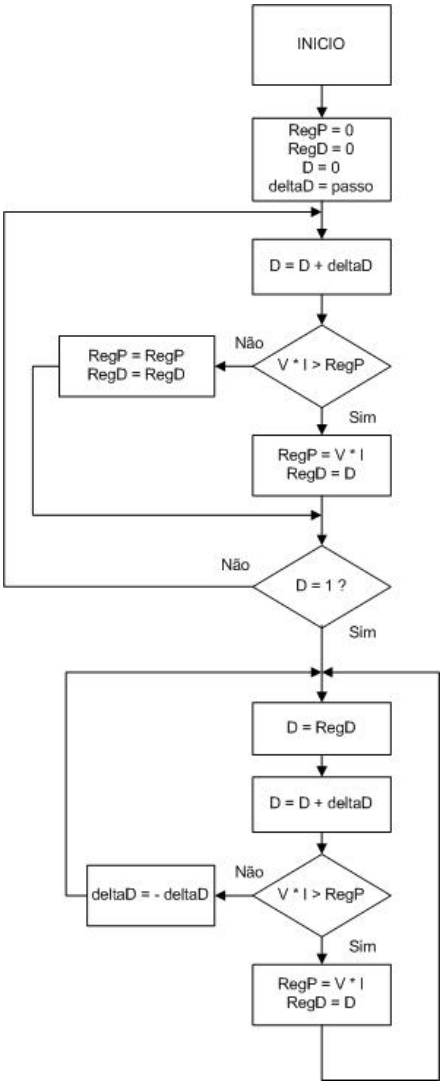


Figura 5 – Fluxograma do Algoritmo de MPPT.

A ferramenta de programação é o *Code Composer Studio DSK Version* 2.12.00 da *Texas Instruments*.

São utilizadas duas entradas ADC que fazem a leitura da tensão e corrente do módulo fotovoltaico. Ambos os valores são armazenados em registradores. A potência é então calculada e armazenada em outro registrador. A comparação entre o valor atual e o valor anterior de potência faz com que a largura de pulso do sinal PWM seja incrementada ou decrementada.

6. SISTEMA PROPOSTO

A comprovação experimental do algoritmo proposto foi realizada empregando-se um protótipo de um conversor *buck-boost* controlado por um DSP. Os valores e modelos dos componentes aplicados no conversor são os mesmos utilizados na simulação, sendo apresentados na Tab. 2.

O módulo fotovoltaico fornece corrente e tensão para o sistema de acordo com o sinal de controle PWM que comanda o transistor. A medida de tensão de entrada é realimentada na entrada AD do DSP através de um divisor de tensão, já a corrente é realimentada através de um sensor de efeito hall. A saída PWM do DSP é ligada ao driver do transistor comandando assim seu funcionamento, variando do corte à saturação. O diagrama em blocos do sistema proposta está apresentado na Fig. 6.

Tabela 2. Parâmetros da Planta

COMPONENTE	VALOR / MODELO
Indutor	L = 1mH
Capacitor	C = 470µF
Carga	R = 100Ω
Diodo	*Dm* – 30D20B APT
Transistor	*Q1* – Mosfet IRF540
DSP	DSP320F2812PGFA
Módulo Fotovoltaico	Kyocera KC50

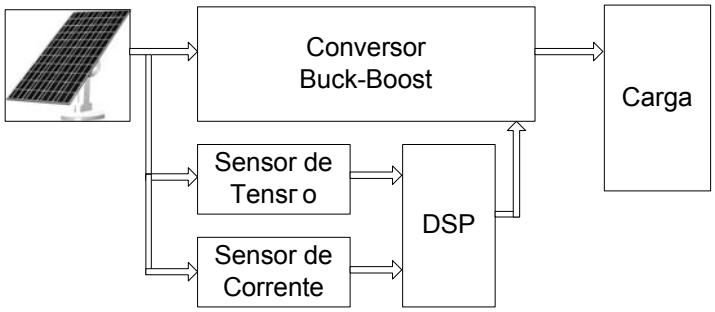
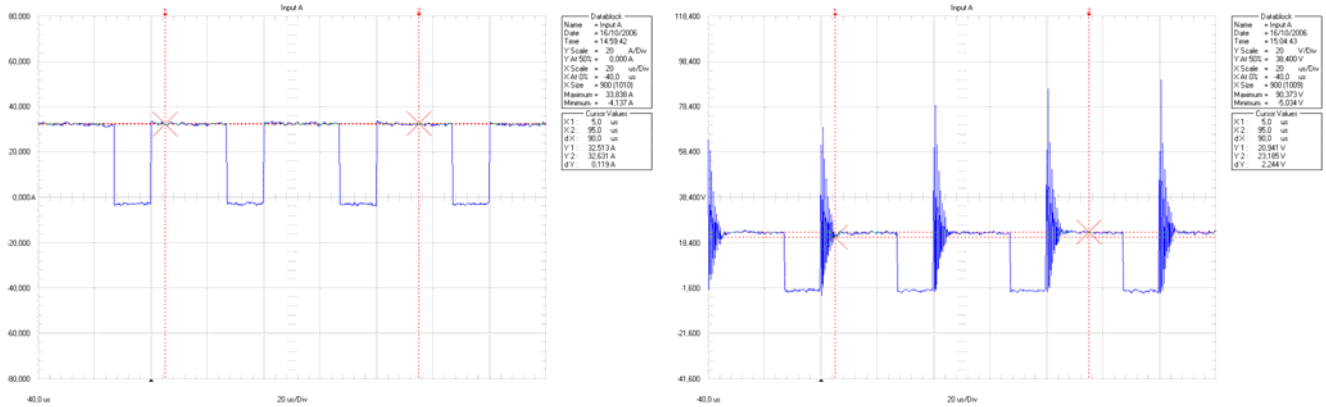


Figura 6 – Diagrama de Blocos do Sistema Proposto

7. RESULTADOS

A saída PWM do DSP é configurada de acordo com as leituras de tensão e corrente de entrada do sistema e do cálculo da máxima potência resultante do produto destes dois parâmetros. A varredura implementada neste algoritmo, onde o valor da largura do pulso varia de 0 a 100%, não poderá ser ilustrada por figuras por ser um processo dinâmico. A Fig. 7a mostra o sinal da saída PWM que comanda o transistor do conversor *buck-boost*.



(a) (b)

Figura 7 – (a) Saída PWM do DSP, (b) Tensão Dreno-Fonte do Transistor.

O comando do DSP controla o transistor através de um *driver* responsável por adaptar o sinal da saída PWM. A Fig. 7b apresenta a forma de onda da tensão sobre o transistor. Os distúrbios de tensão nas transições de subida são devido a variação de corrente no indutor. Este distúrbio acontece por um curto período de tempo e apenas nas transições, dessa forma o funcionamento não é afetado.

A corrente e tensão de saída do módulo fotovoltaico podem ser observadas na Fig. 8. Estes parâmetros variam obedecendo a dinâmica do transistor.

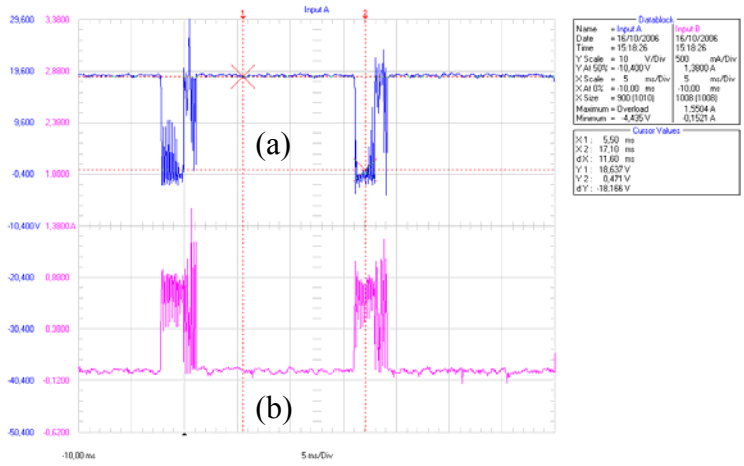


Figura 8 – Formas de Onda da Saída do Módulo Fotovoltaico.
(a) Tensão, (b) Corrente.

8. CONCLUSÕES

Os distúrbios gerados pelos elementos reativos, nas transições de subida, expõem o sistema a tensões acima das projetadas. Assim, os componentes do sistema devem ser redimensionados para suportarem, sem avarias, tensões de no mínimo seis vezes o valor nominal. Estes distúrbios poderiam ser minimizados alterando-se o posicionamento do transistor no circuito, de modo a referenciar sua fonte ao terra do sistema. Estes distúrbios são responsáveis por variações nos sinais de tensão e corrente de saída do módulo, prejudicando assim a leitura dos sensores. Para solucionar este problema, é recomendado o uso de filtros para obtenção dos valores médios dos sinais lidos.

O algoritmo de varredura proposto neste projeto deve ser utilizado apenas para validação de sistemas de máxima transferência de potência visto que neste processo a impedância vista pelo módulo varia e o sistema perde, por alguns segundos, sua configuração original. Esta alteração encontra o ponto de potência máxima, entretanto é necessário de o sistema passe por todos os demais pontos de potência.

A utilização de um conversor *buck-boost* em detrimento de um conversor *buck*, mais comumente utilizado, possibilita uma maior flexibilidade no controle da curva de potência do módulo fotovoltaico, porém, sua implementação é mais complexa.

9. REFERÊNCIAS

[1] – Erickson, Robert W. (Robert Warren), 1956. Fundamentals of Power Electronics / Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic, 2nd ed., p. cm.

[2] – Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES, 1999. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, Coleção Tópicos de Atualização em Equipamentos Elétricos.

[3] – Rashid, Muhammad H. 1999. Eletrônica de Potência – Circuitos, Dispositivos e Aplicações, São Paulo : Makron Books.
[4] – Texas Instruments. www.ti.com

MAXIMUM POWER POINT TRACKING ALGORITHM FOR PHOTOVOLTAIC MODULE IMPLEMENTED IN DIGITAL SIGNAL PROCESSOR

Abstract. *This article presents the study and implementation of an electronic circuit of maximum power transference between load and photovoltaic module with the purpose to improve energy efficiency. The project uses a Digital Signal Processor – DSP and a Buck-Boost converter. The control parameters are the current and tension of the photovoltaic module and the converter duty-cycle is the controlled parameter. The converter duty-cycle variation results in the impedance match between the photovoltaic module and the load, making possible the maximum power transference to the system. The algorithm used in the programming of the DSP, the respective results in its application in a real system (module, Buck-Boost converter, load) and an validation algorithm of the system through the excursion of the photovoltaic module power curve are presented. This curve is acquired with the aid of a load simulator that will be implemented in the DSP program and contains the maximum instantaneous power value the module is able to supply. By this curve it is possible to verify the efficiency of the applied algorithm. In the execution of this project the following topics had been boarded: techniques of command and instrumentation in power electronic converters, photovoltaic energy generating systems and static power converters. The project was developed in a partnership of Group of Energy Study – GREEN from PUC Minas and the Research and Development in Electrical Engineering Center – CPDEE from UFMG.*

Key-words: *Solar energy, MPPT (Maximum Power Point Tracking), DSP (Digital Signal Processor), Converter, Photovoltaic Generator.*