

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR SEPIC PARA CONDICIONAMENTO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Walbermark Marques dos Santos – walbermark@inep.ufsc.br

Ricardo César Marcon – cacomarcon@gmail.com

Denizar Cruz Martins – denizar@inep.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Instituto de Eletrônica de Potência, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. Neste trabalho apresentam-se os passos desde o projeto, construção e teste de um conversor Sepic para condicionamento da energia solar fotovoltaica. O conversor serve como MPPT (Maximum Power Point Tracker) fazendo com que os módulos fotovoltaicos operem sempre no ponto de máxima potência. É utilizado um algoritmo baseado na característica do conversor para controlá-lo. Para validar a proposta foram realizadas simulações computacionais no software PSIM, onde se pôde emular, através do recurso de DLL (Dynamic Link Library), um microcontrolador. Foi construído um protótipo e obtidos resultados experimentais que são apresentados.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Conversor Sepic, Seguidor de Máxima Potência.

1. INTRODUÇÃO

Impulsionada pelos avanços na tecnologia e aumento da escala de produção e sofisticação, o custo da energia fotovoltaica tem diminuído continuamente desde que as primeiras células solares foram fabricadas. Essas possuíam rendimento baixíssimo, em torno de 0,5%. Na década de 50, com os estudos dos semicondutores e processos de dopagem, conseguiu-se eficiência de até 6%. Recentemente, em laboratório foi atingido a marca de 40% (Fraidenaich, *et al.*). Contudo, os módulos comerciais atuais não possuem eficiência maior que 20%. Sendo assim, é importante extrair toda potência disponibilizada pelos mesmos.

Para extrair toda a potência disponível de um painel fotovoltaico, usam-se conversores eletrônicos de potência que forcem o painel a operar no ponto de máxima potência (em inglês MPP- *Maximum Power Point*). Diversas topologias de conversores têm sido propostas na literatura para o condicionamento da energia solar fotovoltaica. Conversores básicos como o Buck e o Boost são amplamente utilizados por apresentarem poucos elementos, possuírem fácil montagem e controle.

Todavia em (Coelho, 2008) mostra-se que esses conversores não varrem toda a área de operação do painel fotovoltaico. Logo, corre-se o risco de, para alguns valores de carga ou valores de radiação solar e temperatura, perder-se a capacidade de extração da máxima potência.

Em (Coelho, 2008; Martins, D.C *et al*, 2011) mostra-se que os conversores Buck-boost, Cúk, Sepic e Zeta, conseguem varrer toda a área de operação do painel fotovoltaico. Logo, qualquer valor de tensão e corrente que determine o ponto de máxima potência, poderá ser rastreado por estes conversores.

Com base no exposto acima, este trabalho apresenta as etapas de projeto e teste de um conversor Sepic para condicionamento da energia gerada por módulos fotovoltaicos. Além dessa característica, também contribuíram para opção pelo conversor Sepic os seguintes motivos:

- Tensão de saída com a polaridade não invertida;
- Possibilidade de ser isolado;
- Corrente de entrada com baixa ondulação, se operando em condução contínua;
- Diodo na saída que não permite fluxo contrário de potência.

2. O CONVERSOR SEPIC

O conversor Sepic (*Single-Ended Primary Inductance Converter*) possui três modos básicos de operação: contínua, descontínua e crítico. Ressalta-se que quando o mesmo opera no modo de condução contínua, sua tensão de saída é independente da carga, o que é uma característica desejável na presente aplicação.

2.1 Projeto do Conversor

Para projeto do conversor Sepic, utilizou-se as equações dadas em (Martins, D.C; Barbi, I., 2006). As especificações de projeto estão resumidas na Tab. 1. Então, para atender as especificações do projeto, é necessário que o conversor processe 1000 W de potência nominal. Todavia, neste trabalho considerou-se uma potência de pico de 1400

W (potência máxima nas condições padrão do módulo fotovoltaico KC200GT) como potência para projeto do conversor.

Tabela 1. Especificações de projeto do conversor Sepic

Tensão de entrada	180 V
Tensão de saída	400 V
Potência de saída	1 kW
Frequência de chaveamento	50 kHz

A idéia inicial foi trabalhar com um conversor isolado (para diminuir as perdas de condução na chave), com razão cíclica de $D=0,5$ e rendimento de $0,9$. O conversor Sepic isolado é apresentado na Fig. 1.

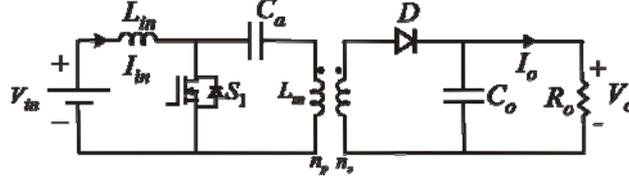


Figura 1 – Circuito equivalente do conversor Sepic isolado.

Dessa forma, são calculados os seguintes parâmetros do conversor:

Relação de transformação:

$$r = \frac{V_{out}}{V_{in}} \cdot \frac{(1-D)}{D} = 2,222 \quad (1)$$

A ondulação da tensão de saída foi arbitrada em 15%; então, a corrente média de saída e de entrada foram determinadas como:

$$\begin{cases} I_{out} = \frac{P_{out}}{V_{out}} = 3,15 \text{ A} \\ I_{in} = \frac{D}{1-D} \cdot \frac{I_{out}}{\eta} \cdot r = 7,778 \text{ A} \end{cases} \quad (2)$$

A corrente média na indutância magnetizante foi então determinada por

$$I_{L_m} = I_{in} \cdot \frac{(1-D)}{D} = 7,778 \text{ A} \quad (3)$$

A ondulação de corrente na indutância de entrada e na indutância magnetizante foi estabelecida em 15%, e a máxima carga a ser conectada foi determinada como:

$$R_{o\min} = \frac{V_{out}^2}{P_{out}} = 126,948 \Omega \quad (4)$$

A ondulação de tensão no capacitor de acoplamento foi definida em 5% da tensão de entrada, e a ondulação da tensão de saída foi definida em 5% da tensão de saída.

As indutâncias de entrada e magnetizante foram determinadas como

$$\begin{cases} L_{in} = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta I_{in} \cdot f} = 1,543 \text{ mH} \\ L_m = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta I_{L_m} \cdot f} = 1,543 \text{ mH} \end{cases} \quad (5)$$

Os capacitores de acoplamento e de saída foram determinados conforme descrito a seguir:

$$\begin{cases} C_a = \frac{D}{R_{o\min} \cdot f \cdot \left(\frac{\Delta V_{c_1}}{V_{out}}\right)} = 3,5 \mu F \\ C_o = \frac{D}{R_{o\min} \cdot f \cdot \left(\frac{\Delta V_{c_{out}}}{V_{out}}\right)} = 1,576 \mu F \end{cases} \quad (6)$$

O valor de carga crítica, ou seja, o maior valor de resistência que, se conectada na saída ainda garante a condução contínua, será de:

$$R_{\text{critico}} = 2 \cdot \left(\frac{L_{in} \cdot L_m}{L_{in} + L_m} \right) \cdot f \cdot \frac{1}{(1-D)^2} = 308,571 \Omega \quad (7)$$

2.2 Problemas encontrados

O transformador do conversor Sepic funciona de forma semelhante ao transformador do conversor Flyback, ou seja, ele acumula energia em um semi-ciclo, e a transfere no restante do ciclo. Por este motivo este transformador foi projetado da mesma forma que o indutor, porém com um segundo enrolamento acoplado.

Simulações computacionais e testes iniciais em bancada levaram à observação das seguintes situações.

- A indutância de dispersão do transformador estava causando elevadas sobretensões na chave S;
- Devido à diminuição de rendimento inserida pelo transformador, a chave era forçada a operar em uma razão cíclica muito acima da de projeto, aumentando as perdas;
- Para evitar a queima da chave por sobretensão, um circuito de grampeamento seria necessário. Porém também aumentaria as perdas do sistema.

Após a análise dos prós e contras de inserir um circuito de grampeamento e deixar a chave operar com razão cíclica muito elevada devido ao transformador, constatou-se que, se fosse retirado o transformador, as perdas oriundas pelo aumento da razão cíclica estariam abaixo das perdas provocadas caso o transformador permanecesse. Assim, optou-se por desligar o secundário do transformador, aproveitando-se somente sua indutância magnetizante.

Para a escolha do capacitor de entrada foi levada em conta que sua constante de tempo não poderia interferir na dinâmica do algoritmo de MPPT. Após varias simulações computacionais o valor do capacitor de entrada foi determinado em $220 \mu F - 400 V$. Já os capacitores de acoplamento e de saída devem suportar correntes relativamente altas, então foram utilizados capacitores disponíveis no laboratório, e que satisfaziam as especificações. Utilizaram-se capacitores de polipropileno, que possuem frequência de corte elevada e baixa resistência série (RSE). Na Tab. 2 resumem-se os valores dos principais elementos do estágio de potência do conversor. Ressalta-se que todos os componentes utilizados foram os disponíveis no laboratório.

Tabela 2. Componentes do estágio de potência do conversor Sepic.

Indutor de entrada (L_{in})	1,75 mH
Indutor de magnetização (L_m)	1,7 mH
Capacitor do filtro de entrada (C_{bar})	220 $\mu F - 400 V$
Capacitor de acoplamento (C_a)	47 $\mu F - 400 V$
Capacitor de saída (C_o)	2 $\mu F - 1 kV$
Diodo (D)	RURG30120
Mosfet (S)	IXFK44N60

2.3 O Hardware montado

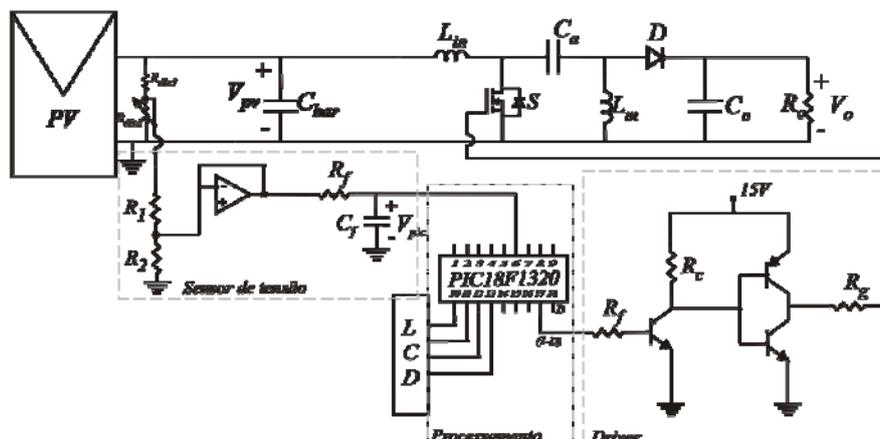


Figura 2 – Circuito completo em malha fechada.

Para realizar o controle do sistema, foi utilizado o microcontrolador PIC18F1320, que dentre outras características possui uma porta de entrada analógica/digital e um módulo PWM, periféricos necessários à esse projeto. Também tem suporte de hardware para conexão de um display de LCD, que foi utilizado para visualização da tensão de entrada, da tensão de saída e da razão cíclica.

Como o microcontrolador não tem capacidade de corrente para acionar o Mosfet, foi desenvolvido um circuito de *Driver* com transistores na configuração *Totem-pole* para acionar a chave. O circuito completo em malha fechada é apresentado na Fig. 2.

O algoritmo de MPPT utilizado foi o proposto por (dos Santos, *et al*, 2010), o qual usa somente um sensor de tensão e aproveita a impedância do Sepic vista pelo painel fotovoltaico. Esse algoritmo foi desenvolvido em linguagem C e gravado no microcontrolador.

Sabe-se que no conversor Sepic, a máxima tensão sobre a chave “S” é a soma da tensão de saída com a tensão de entrada. O Mosfet utilizado (vide Tab. 2) tem como máxima tensão suportável $V_{dss}=600$ V. Por questões de segurança limitou-se a tensão sobre o Mosfet à $2/3$ de V_{dss} , o que resulta em 400 V. Dessa forma nas simulações computacionais realizadas e nos testes experimentais usou-se somente 3 módulos KC200GT em série, o que totaliza aproximadamente 78 V_{mpp} nas condições padrão.

2.5 Simulações Computacionais e Resultados Experimentais

As simulações computacionais foram realizadas com o software PSIM, utilizando um recurso chamando DLL (*Dynamic Link Library*), que emula um microcontrolador. Assim é inserido em linguagem C o algoritmo que executa o algoritmo de MPPT.

A primeira situação foi simulada para avaliar a dinâmica inicial do rastreador, partindo o sistema do repouso e mantendo constante temperatura e radiação. A primeira condição de operação foi chamada de Condição 1, descrita abaixo.

Condição 1.

- $G = 950 \text{ W} / \text{m}^2$ Intensidade de radiação;
- $T = 50^\circ \text{C}$ Temperatura dos módulos;
- $R_o = 160 \Omega$ Resistência de carga;

Na Fig. 3, mostra-se o resultado de simulação para partida do conversor. O sistema iniciou com o painel em tensão de circuito aberto, corrente nula. Com a atuação do algoritmo de MPPT, o ponto de operação foi deslocado para o MPP. Nesta situação, o valor da tensão e corrente de máxima potência teórica é de 68,2 V e 7,23 A respectivamente. O sistema levou aproximadamente 3 segundos para se estabilizar.

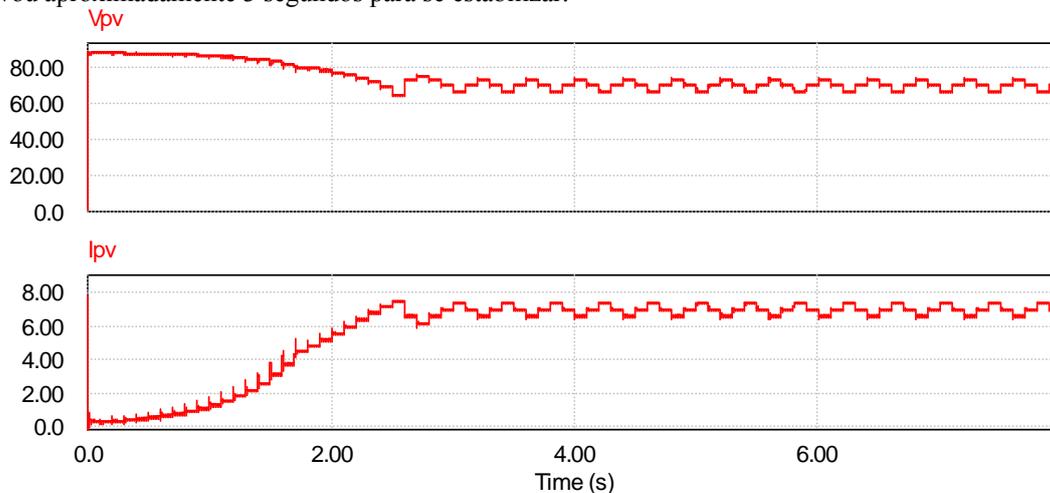


Figura 3– Resultados de simulação da tensão no painel (V_{pv}) e corrente no painel (I_{pv}) destacando a inicialização do sistema.

Na Fig. 4, mostra-se o resultado experimental para a tensão e corrente do painel para o sistema operando em regime permanente. Destaca-se a considerável similaridade das formas de onda quando se compara com a simulação. A aquisição desta curva se deu com uma intensa radiação solar, sem nenhum sombreamento nas células do módulo, e também com a temperatura estabilizada. Na Fig. 4 também se mostra a potência gerada pelo painel fotovoltaico durante esse teste. Ressalta-se da Fig. 4, o bom comportamento em regime permanente do algoritmo utilizado.

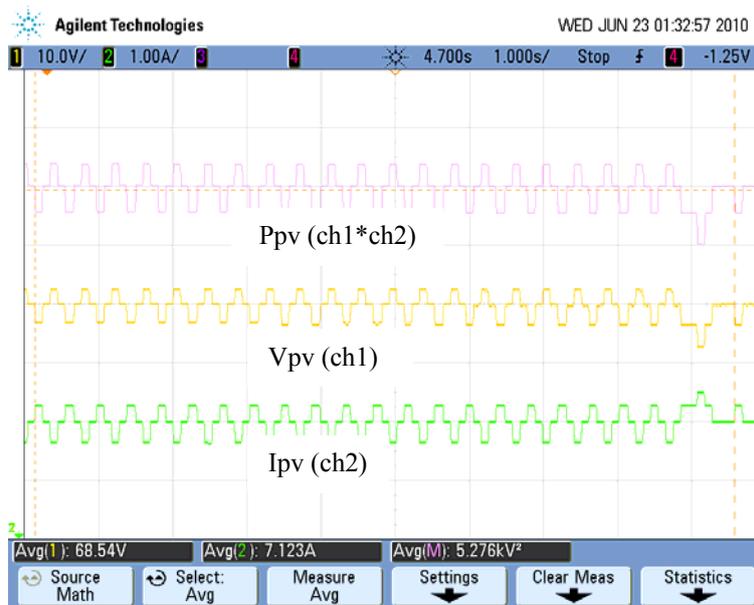


Figura 4 – Resultados experimentais da tensão no painel $V_{pv}(\text{ch1})$ 10 V/div, corrente no painel $I_{pv}(\text{ch2})$ 1 A/div, potência fornecida pelo painel em regime permanente (Ppv).

Uma forma de verificar se realmente o sistema está operando na máxima potência, é traçar a curva $I \times V$ do painel fotovoltaico. Com o osciloscópio utilizado isso foi possível, mostrando a tensão no eixo x, e a corrente no eixo y. Na Fig. 5 mostra-se o momento em que o sistema é inicializado, quando a corrente ainda é nula, e o traçado feito na tela ao passo que o rastreamento acontece, desenha exatamente uma parte da curva de carga do painel para a Condição 1. As escalas são de 10 V e 1 A por divisão, nos respectivos eixos x e y.



Figura 5 – Resultado experimental da Curva $V_{pv}(\text{ch1})$ 10 V/div x $I_{pv}(\text{ch2})$ 1 A/div para a Condição 1.

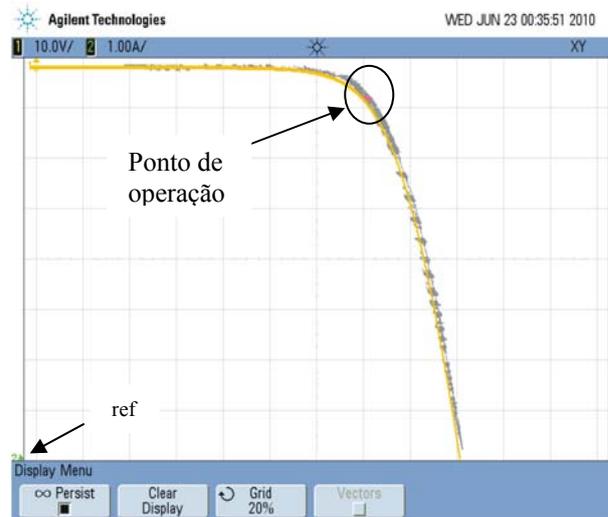


Figura 6 – Sobreposição da curva teórica (amarela) e experimental (hachurada). $V_{pv}(\text{ch1})$ 10 V/div x $I_{pv}(\text{ch2})$ 1 A/div para a Condição 1.

Nota-se que depois de atingido o regime permanente, o ponto de operação se encontra no joelho da curva, e é destacado pelo ponto em rosa, traçado pelo próprio aparelho. A fim de mostrar a semelhança entre a curva experimental e a curva teórica, na Fig. 6 mostram-se as duas sobrepostas. Observa-se que realmente o sistema opera no ponto de máxima potência do painel. O que valida tanto o projeto do conversor quanto o algoritmo utilizado.

A outra condição de operação, simulada e experimentada, foi chamada de Condição 2. Nessa, a resistência de carga inicia com valor de $R_1 = 160\Omega$, vai para $R_2 = 51\Omega$ e depois retorna para o valor de R_1 . Essa condição foi utilizada para visualizar a resposta do sistema à transitórios de carga. Os estados das variáveis na Condição 2 são mostrados a seguir.

Condição 2.

- $G = 850 \text{ W} / \text{m}^2$ Intensidade de radiação;
- $T = 45^\circ \text{ C}$ Temperatura dos módulos;
- $R_1 = 160 \Omega$ Carga baixa;
- $R_2 = 160 / 75 = 51 \Omega$ Carga alta;

Nas Figs. 7 e 8 mostram-se as curvas obtidas por simulação e experimentais, respectivamente, quando se aplica um degrau de carga no tempo $t = 7 \text{ s}$, e em seguida a carga é retirada em $t = 12 \text{ s}$.

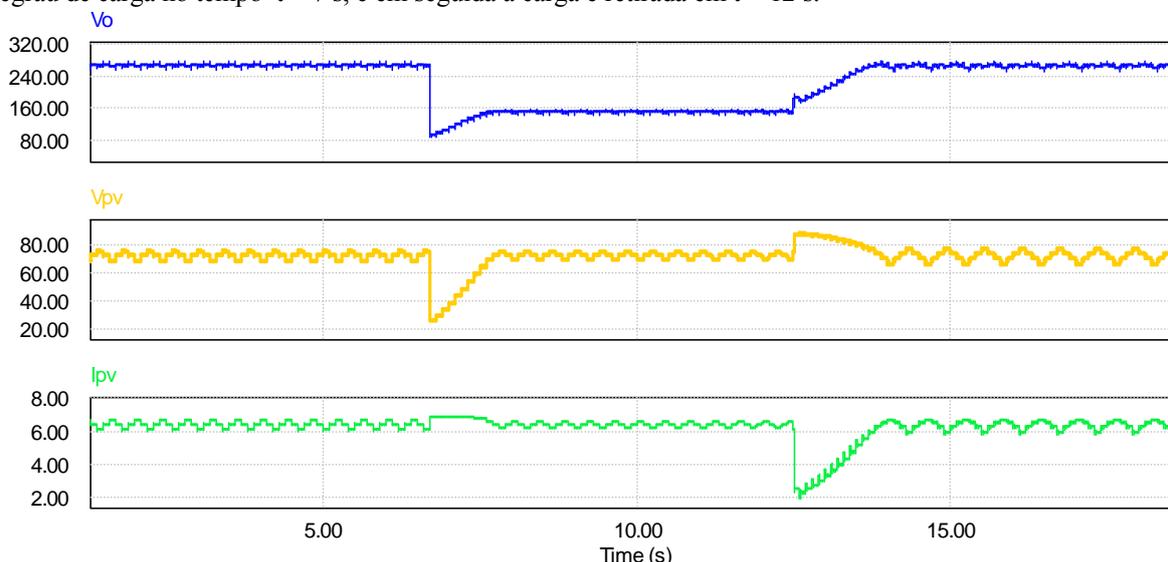


Figura 7 – Resultados de simulação da tensão na carga (V_o), tensão no painel (V_{pv}) e corrente no painel (I_{pv}) para degraus de carga.

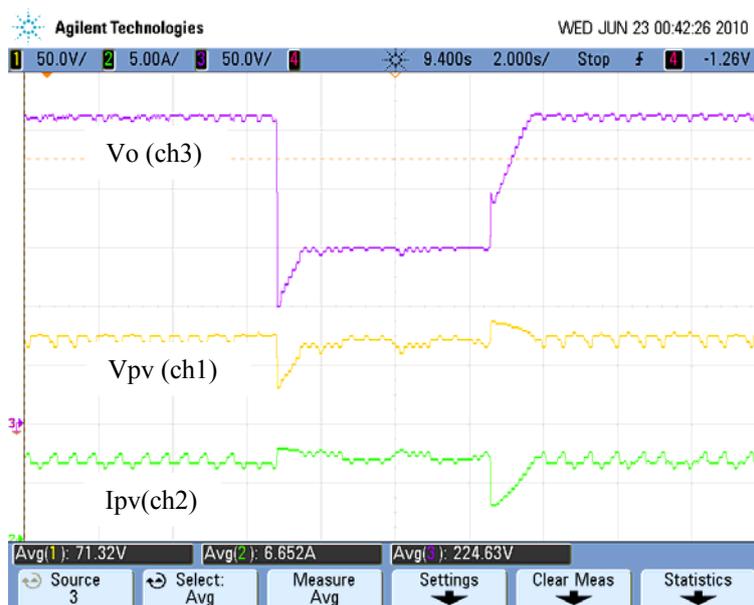


Figura 8 - Resultados experimentais da tensão na carga (V_o (ch3) 50 V/div), tensão no painel (V_{pv} (ch1) 50 V/div) e corrente no painel (I_{pv} (ch2) 5 A/div), para degraus de carga.

Em referência às Figuras 7 e 8, comenta-se que inicialmente o sistema está em regime, operando no MPP com uma carga de 160Ω (carga baixa). Quando a carga muda para 51Ω (carga alta) em $t=7 \text{ s}$, a corrente de saída aumenta fazendo com que a tensão na carga caia. Neste momento, no lado do painel a tensão cai e a corrente sobe, tirando o painel do MPP. Porém observa-se que o controle restabelece a tensão no painel, para o ponto de máxima potência.

Em $t=12 \text{ s}$ a carga muda novamente de 51Ω para 160Ω . Instantaneamente a tensão no painel sobe e a corrente desce. Todavia observa-se que o controle novamente restabelece o sistema no MPP.

Pode-se analisar a potência processada de duas formas distintas. A primeira é fazendo o cálculo utilizando a tensão e corrente do painel. É possível ver claramente que o nível médio de tensão e corrente do painel permanece inalterado após o transitório de carga. Outra forma é utilizando a tensão de saída, de posse do valor da resistência de carga. Os cálculos em (8) e (9) mostram a primeira e segunda forma de calcular a potência respectivamente.

$$\begin{aligned}
 P_{1^\circ} &= V_{pv} \cdot I_{pv} \\
 P_{1^\circ} &= 71,32 \times 6,65 \\
 P_{1^\circ} &= 474,3 \text{ W}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

$$\begin{cases} \text{carga baixa} \\ P_{2^\circ} = V_o^2 / R_1 \\ P_{2^\circ} = 270^2 / 160 \\ P_{2^\circ} = 455 \text{ W} \end{cases} \quad \begin{cases} \text{carga alta} \\ P_{2^\circ} = V_o^2 / R_2 \\ P_{2^\circ} = 150^2 / 51 \\ P_{2^\circ} = 450 \text{ W} \end{cases}
 \tag{9}$$

Os valores de tensão e corrente do painel foram obtidos pela leitura do osciloscópio, enquanto que os valores da tensão de saída foram obtidos via multímetro, pois a leitura no osciloscópio ficou dificultada pela forma de onda experimental da tensão de saída. A diferença entre a potência P_{1° e P_{2° se deve ao rendimento do conversor Sepic, e a diferença entre as potências P_{2° , de aproximadamente 1%, se deve ao erro associado ao método e sua execução. Observando-se os valores de potência obtidos em (8) e (9) verifica-se que a eficiência pontual do conversor ficou em torno de 90%.

A última situação experimentada (Condição 3) mostra o desempenho do rastreador quando o painel é submetido à variação de radiação. A aquisição desses resultados se deu no momento em que uma nuvem encobriu a superfície do painel, e assim a radiação diminuiu de aproximadamente $900 \text{ W} / \text{m}^2$ para $200 \text{ W} / \text{m}^2$. A temperatura se manteve em 50°C .

Condição 3.

- $G = [200, 900] \text{ W} / \text{m}^2$ Intensidade de radiação;
- $T = 50^\circ\text{C}$ Temperatura dos módulos;
- $R_1 = 160 \Omega$ Resistência de carga;

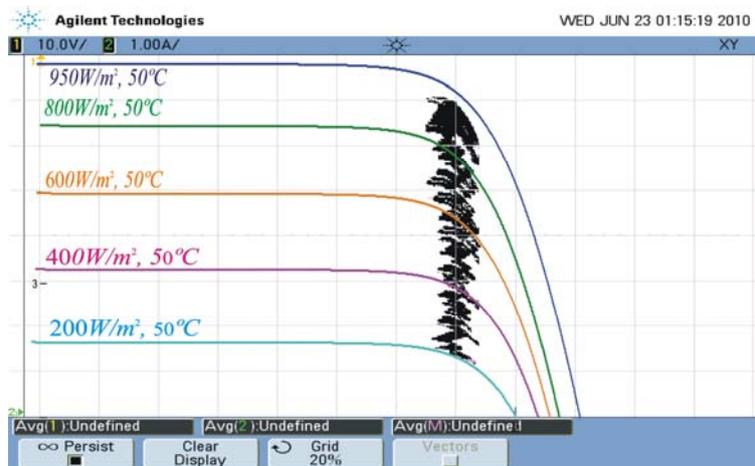


Figura 9 - Sobreposição da curva experimental (hachurada) e das teóricas (coloridas). Corrente x Tensão do painel.

Na Fig. 9 mostra-se a sobreposição da curva experimental I x V do painel traçada pelo osciloscópio, com as curvas teóricas para diversos níveis de radiação.

Verifica-se da Fig. 9 que durante a passagem de uma nuvem, sendo que a temperatura do painel se manteve constante, a tensão de operação praticamente não se alterou. Por sua vez, a corrente foi diminuindo gradualmente com a radiação. Todavia o sistema continuou mantendo o painel no ponto de máxima potência, conforme verifica-se na região hachurada escuro, que se localiza próxima dos joelhos das curvas do painel.

Na Fig. 10 mostra-se a disposição dos módulos fotovoltaicos utilizados nos testes experimentais. Os mesmos estavam orientados para o Leste e formando um ângulo de 30° com a horizontal. Na Fig. 11 mostra-se o protótipo do conversor Sepic montado, destacando seus principais elementos.

A radiação solar foi medida com o instrumento MINI-KLA PV i-V Curve Analyser. Este instrumento possui um sensor de radiação que é ligado ao mesmo através de um cabo. O sensor de radiação foi colocado na mesma inclinação dos módulos fotovoltaicos e exatamente na parte superior do módulo central, conforme se observa na Fig. 10.

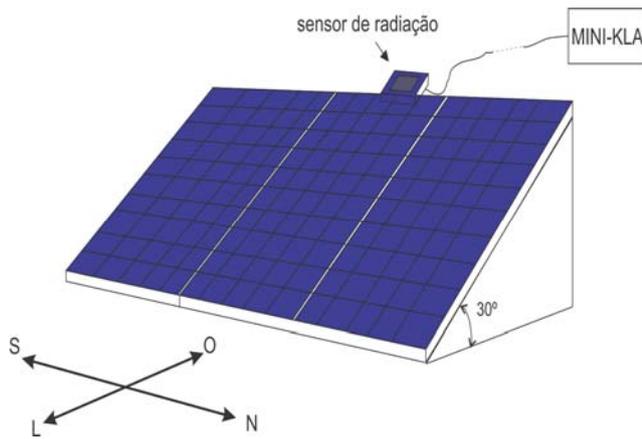


Figura 10 - Ilustração da orientação dos módulos fotovoltaicos e medição da radiação solar.

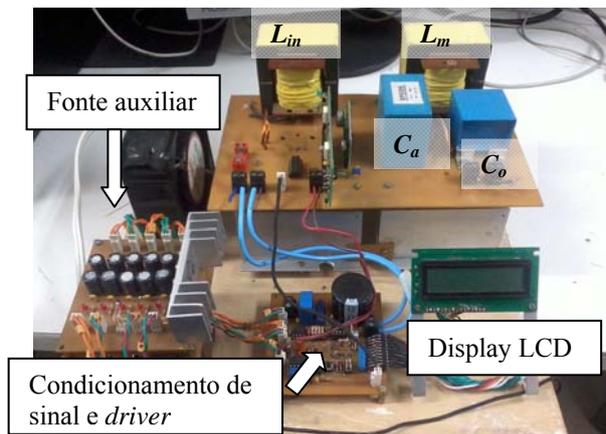


Figura 11 - Protótipo do conversor Sepic montado.

3. CONCLUSÃO

Neste trabalho mostraram-se os passos de dimensionamento, construção e testes experimentais de um conversor Sepic utilizado para condicionamento da energia solar fotovoltaica. Verificou-se que apesar do conversor Sepic ter a possibilidade de ser isolado, configuração inicialmente proposta para este trabalho, as indutâncias de dispersão e o rendimento do transformador podem interferir substancialmente nos resultados esperados. Para este trabalho, após análise, constatou-se que o ganho obtido com a diminuição de perdas, retirando o transformador, era considerável, mesmo a chave operando com uma razão cíclica maior que a de projeto. Observou-se também que a técnica de rastreamento utilizada, apesar de usar somente um sensor de tensão, funciona adequadamente, o que torna viável sua utilização.

Ressalta-se que o intuito do trabalho foi avaliar o algoritmo utilizado e o desempenho do conversor Sepic funcionando como MPPT. Dessa forma, não foi avaliado o custo de produção do sistema para uma provável aplicação comercial.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Instituto de Eletrônica de Potência (INEP) pela infraestrutura laboratorial e logística cedida, e ao CNPQ, a CAPES e a FINEP pelas bolsas de fomento e auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Coelho, R. F.(2008). Estudo dos conversores Buck e Boost aplicados ao Rastreamento de Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaicos Florianópolis. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- dos Santos, W.M; Marcon, R.C; Martins, D.C. (2010). "Proposta de MPPT para Painéis Fotovoltaicos Utilizando apenas Sensor de Tensão e Aproveitando a Impedância Característica do Sepic". XIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Bonito-Ms.
- Fraidenraich, N. *et al.* Análise Prospectiva da Introdução de Tecnologias Alternativas no Brasil. Tecnologia Solar Fotovoltaica. Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia – Grupo FAE, UFPE.
- Martins, D.C; Barbi, I. (2006). "Eletrônica de Potência: Conversores CC-CC Básicos não Isolados". 2ª ed. rev. Florianópolis: Ed. dos autores.
- Martins, D.C; Coelho, R.F; dos Santos, W.M. (2011). "Técnicas de rastreamento de máxima potência para sistemas fotovoltaicos: Revisão e novas propostas." Mini-Curso. Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (Cobep), Natal-Brasil.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A SEPIC CONVERTER TO THE CONDITIONING OF PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY

Abstract. This paper presents the step by step from design, construction and testing of a Sepic converter for photovoltaic power conditioning. The converter serves as MPPT (Maximum Power Point Tracker) making PV modules always operate at the point of maximum power. It used an algorithm based on the characteristic of the converter to control it. To validate the proposed computational simulations were performed in PSIM software, which could emulate, through the use of DLL (Dynamic Link Library), a microcontroller. After completing the simulations, a prototype was built, and experimental results are presented.

Key words: Solar Energy, Sepic Converter, Maximum Power Point Tracker