

SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA INTERLIGADO À REDE COMERCIAL

Fernando Lessa Tofoli – fernandolessa@cefetsc.edu.br

Júlio César Schönell – julioschonell@yahoo.com.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Unidade Chapecó

Carlos Alberto Gallo – gallo@mecanica.ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica

Roberto Mendes Finzi Neto – finzi@eee.ufg.br

Universidade Federal de Goiás, Departamento de Ciência da Computação

Resumo: Este trabalho apresenta o estudo de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Utiliza-se o conversor buck CC-CC para reduzir a tensão proveniente de vários painéis em série. Além disso, a função deste conversor é impor uma forma senoidal à corrente que será injetada na rede elétrica pelo inversor, o que é possível em função da utilização da modulação por histerese. O inversor por sua vez é responsável pela conversão da tensão contínua dos painéis em tensão alternada, cujo nível é ajustado por meio da utilização de um transformador de baixa frequência conectado à rede elétrica. O sistema proposto é projetado e analisado por meio de simulação digital e, posteriormente, é implementado um protótipo experimental, de modo que os resultados pertinentes são apresentados e discutidos.

Palavras Chave: Distorção Harmônica, Energia Solar Fotovoltaica, Sistemas Fotovoltaicos Interligados.

1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas que a humanidade enfrentará neste século será a escassez de fontes naturais para a geração de energia, principalmente de origem fóssil. Problemas devido ao aumento do preço de petróleo gerados por questões políticas e econômicas já causaram crises econômicas significativas. Atualmente, isso é motivo de preocupação e até mesmo considerado problema de segurança nacional por governantes e pesquisadores de vários países, que buscam formas alternativas, econômicas e ecologicamente corretas para resolver tal questão.

Respeitando esses novos critérios, surge como possível solução a utilização de fontes de energia alternativa, como a energia solar. Sabe-se que a cada minuto incide sobre a superfície da Terra mais energia vinda do sol do que a demanda total de todos os habitantes de nosso planeta ao longo de um ano. Tal constatação representa um dos principais motivos do empenho de toda a sociedade do planeta em dominar a tecnologia de utilização da energia solar.

Realizando-se um tratamento adequado, essa energia pode ser empregada em diversas aplicações, desde sistemas autônomos (também denominados sistemas isolados) alimentando equipamentos em indústrias até fornecimento de energia para cidades. A energia captada nos painéis pode ser utilizada para suprir as necessidades do usuário, e quando o consumo encontra-se abaixo da energia gerada, o excedente seria injetado na rede. Esse sistema, além de proporcionar uma redução na conta de energia, seria uma fonte de arrecadação, pois a venda dessa energia já é prevista em lei em vários países e seu preço torna-se bastante atrativo.

No que se refere ao Brasil, sabe-se que a atual situação do setor energético é crítica. Enquanto o sistema opera na capacidade máxima, a demanda por energia continua crescendo e, se não forem tomadas medidas em um curto prazo de tempo, o país enfrentará sérios problemas.

Neste contexto, a energia solar surge como uma fonte inesgotável, gratuita e não poluente. Sendo assim, pode representar uma solução para parte dos problemas que abala o país. Nos países subdesenvolvidos como o Brasil, esta fonte de energia deve ser aproveitada ao máximo. Normalmente, os denominados países de terceiro mundo apresentam elevadas extensões territoriais e estão situados em zonas tropicais, ou seja, dispõem de alta incidência de radiação solar, o que torna viável o desenvolvimento de tecnologias capazes de transformar a energia solar em energia térmica, elétrica, química, mecânica, entre outras formas. Portanto, julgam-se prematuras iniciativas que vêm sendo tomadas no sentido de se incrementar no Brasil a utilização de centrais termoeletricas, nucleares e os atuais programas de eletrificação rural, sem um estudo detalhado das reais fontes alternativas, visto que o país dispõe de ótimo potencial energético de fontes renováveis quase não explorado, e ainda carece de programas intensivos de conservação de energia.

É importante salientar que a energia disponível na saída dos painéis solares, além de ser fortemente irregular devido às variações da intensidade luminosa do sol durante o dia, é totalmente inadequada para aplicações diretas, devido exatamente a essa irregularidade. Desse modo, verifica-se claramente que o tratamento e o processamento dessa energia, com o objetivo de disponibilizá-la para os diferentes tipos de aplicações, são fundamentais. Uma vez tratada e processada, é necessário o emprego de dispositivos e métodos que permitam o controle com segurança do fluxo de energia elétrica entre dois ou mais sistemas elétricos distintos. Essa tarefa é destinada aos conversores estáticos, que compõem a estrutura de conexão entre os painéis solares e a carga (ou rede de energia elétrica). Estes exercem grande influência na determinação da confiabilidade dos sistemas de geração de energia solar fotovoltaica.

Os conversores estáticos podem ser definidos como sendo equipamentos capazes de transformar a energia elétrica, de modo que, dispondo de uma energia na forma *A*, é possível transformá-la em uma forma *B* (BARBI, 2000). Existe

uma grande variedade de topologias, as quais podem ser classificadas como:

- conversores CA-CC (retificadores);
- conversores CC-CC (*choppers*);
- conversores CC-CA (inversores);
- conversores CA-CA (cicloconversores).

Dentro destes grandes grupos, os tipos mais amplamente utilizados são os conversores CC-CC e CC-CA. Apesar de resultarem um impacto percentualmente reduzido nos custos do sistema (RÜTHER, 2000), os conversores estáticos determinam a eficiência do aproveitamento da energia disponibilizada pelos painéis solares e a qualidade da energia injetada na rede elétrica e/ou entregue à carga.

Há diversas configurações de sistemas monofásicos para utilização em conversão fotovoltaica, empregando as mais diversas topologias de conversores estáticos, operando com chaveamento em baixa ou em alta frequência. De acordo com Rodrigues et al., (2000), pode-se classifica-las basicamente em quatro grupos:

- topologias não isoladas com um único estágio inversor;
- topologias isoladas com um único estágio inversor;
- topologias não isoladas com múltiplos estágios de inversão;
- topologias isoladas com múltiplos estágios de inversão.

Diante do exposto, pode-se mencionar algumas características desejáveis em um sistema fotovoltaico, que são:

- custo, peso e volume reduzidos;
- alta eficiência;
- isolamento galvânica entre os painéis e a rede;
- complexidade reduzida;
- injeção de corrente senoidal na rede elétrica com conteúdo harmônico reduzido.

Deve-se ressaltar que nem sempre é possível agregar todas estas vantagens em um mesmo sistema. Por exemplo, a operação em altas frequências implica a redução de peso e volume dos elementos magnéticos, tais como indutores e transformadores. Entretanto, para tais frequências as perdas por comutação podem se tornar significativas e, portanto, exigir a utilização de circuitos de auxílio à comutação, o que aumenta a complexidade do sistema (OISHI et al., 2002). Assim, os critérios de projeto devem ser prévia e claramente estabelecidos.

Neste contexto, a proposta deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema fotovoltaico isolado de dois estágios interligado à rede, o qual deve apresentar custo e complexidade reduzidos, além de enviar à rede corrente senoidal com baixo conteúdo harmônico.

2. SISTEMA FOTOVOLTAICO PROPOSTO

O arranjo proposto é mostrado na Figura 1, sendo formado por um conversor *buck* CC-CC associado a um inversor CSI tiristorizado.

O conversor *buck* é uma das topologias mais conhecidas em eletrônica de potência, e apesar de sua simplicidade é uma estrutura que apresenta um excelente desempenho para várias aplicações dentro da engenharia elétrica. Em geração fotovoltaica, pode ser bem aproveitado como carregador de baterias, que consiste em uma das principais atividades da área fotovoltaica (WEBER; MARTINS, 2000).

No sistema da Figura 1, o conversor *buck* operando em alta frequência é responsável não só pelo abaixamento da tensão dos vários painéis conectados em série, mas também pela imposição de uma forma senoidal à corrente que será injetada na rede elétrica pelo inversor. Para isto, pode-se utilizar técnicas clássicas de controle da corrente, como a modulação por histerese e por valores médios da corrente. Entretanto, visando à simplicidade, pode-se adotar a modulação por histerese, uma vez que não há a necessidade de projetar controladores de corrente do tipo proporcional-integral, mas apenas ajustar as faixas de histerese por meio de divisores resistivos (ROSSETO et al., 1994).

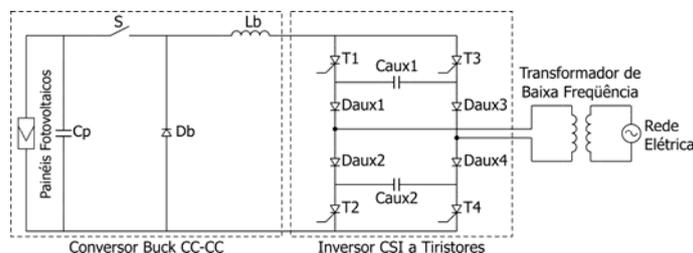


Figura 1. Sistema fotovoltaico proposto.

O conversor *buck* alimenta o inversor CSI tiristorizado, o qual por sua vez é responsável pela inversão da tensão contínua. Deve-se ressaltar que os tiristores são os semicondutores que apresentam o menor custo por kVA, sendo capazes de controlar altos valores de potência. Como no sistema proposto estes operam em baixa frequência, as perdas por comutação tornam-se praticamente nulas, o que se traduz em elevado rendimento.

A tensão de saída alternada do inversor é então elevada por meio de um transformador de baixa frequência responsável pela isolamento galvânica do sistema, o qual também corresponde à interface de conexão com a rede elétrica. Entretanto, o peso e o volume deste transformador de núcleo de aço silício consistem em uma desvantagem se for

estabelecida uma comparação com um transformador de alta frequência com núcleo de ferrite (DEMONTEI; MARTINS, 2001). Neste último caso, as perdas por comutação nos semicondutores passam a ser significativas.

3. MALHA DE CONTROLE DO SISTEMA PROPOSTO

No sistema da Figura 1, é desejável que a forma de onda da corrente injetada na rede pelo inversor seja senoidal e apresente conteúdo harmônico mínimo. Além disso, o sistema deve sempre operar no ponto de máxima potência.

Existe somente um único ponto na curva característica do módulo fotovoltaico, chamado de ponto de máxima potência (PMP), no qual o módulo gera a máxima potência. Em geral, quando a carga é diretamente acoplada ao módulo, o ponto de operação não coincide com o ponto de máxima potência, resultando em um sobredimensionamento do arranjo fotovoltaico.

Os algoritmos normalmente utilizados para a determinação do PMP são perturbação e observação, incremento na condutância, capacitância parasita e tensão constante (RIFFEL, 2005). Entretanto, a implementação de tais algoritmos implica aumento da complexidade do sistema, demandando o uso de microcontroladores.

Como forma de superar tal inconveniente, pode-se realizar um estudo estatístico para encontrar a melhor tensão fixa de operação, na qual a carga acoplada ao arranjo fotovoltaico opere, durante a maior parte do tempo, próxima ao ponto de máxima potência. Riffel (2005) utilizou resultados provenientes de mais de um ano de medições na cidade de Fortaleza-CE, com médias a cada 10 minutos, da radiação solar global e da temperatura ambiente. Esses dados foram submetidos a um modelo matemático do módulo fotovoltaico a diversos valores de tensão, encontrando-se a tensão correspondente a 14,9 V para um único painel. Este valor será considerado padrão para um único painel no caso do estudo realizado neste trabalho a título de validação da proposta.

Na Figura 2, tem-se o sistema em malha fechada. A função do capacitor C_p é manter a ondulação da tensão nos painéis dentro dos limites desejados. Para a operação do sistema com tensão constante, bem como corrente senoidal, retira-se uma amostra da tensão dos painéis por meio de divisores resistivos e compara-se a mesma a um valor de tensão de referência. O sinal de erro resultante é multiplicado por uma amostra de tensão CA da rede. Então, o sinal proveniente da multiplicação é comparado com uma amostra da corrente no indutor (obtida por meio de resistor ou sensor de efeito Hall), de modo que são gerados os pulsos de acionamento do interruptor S do conversor *buck*.

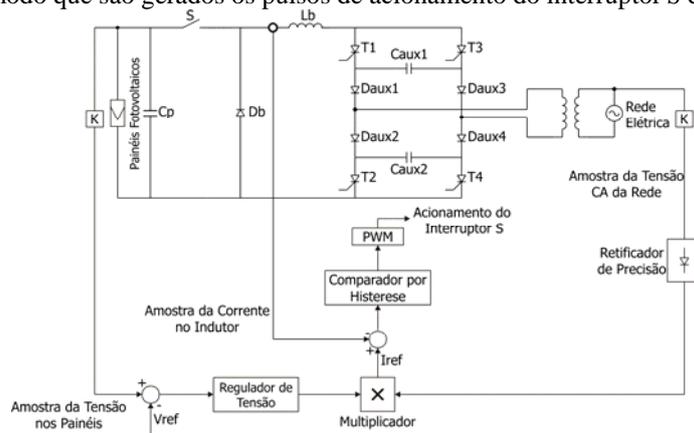


Figura 2. Sistema proposto operando em malha fechada.

4. PROCEDIMENTO DE PROJETO

As especificações preliminares do projeto do sistema fotovoltaico são dadas na Tabela 1.

Tabela 1. Especificações do projeto.

Parâmetro	Valor
Tensão mínima nos painéis	$V_{i(max)}=100$ V
Tensão máxima nos painéis	$V_{i(min)}=120$ V
Frequência de comutação do conversor <i>buck</i>	$f_s=20$ kHz
Razão cíclica mínima do interruptor S	$D_{min}=0,37$
Razão cíclica máxima do interruptor S	$D_{max}=0,444$
Máxima corrente de pico no indutor <i>buck</i>	$I_{Lb(pico)}=7,07$ A

Frequência de comutação dos tiristores (rede comercial)	$f=60$ Hz
---	-----------

O capacitor de entrada é dado por:

$$C_p = \frac{I_{i(pico)} \cdot D_{max}}{\Delta V_{Cp} \cdot f_s} \tag{1}$$

onde ΔV_{Cp} é a ondulação da tensão nos painéis.

A indutância *buck* é dada por:

$$L_b = \frac{D_{min} \cdot (1 - D_{min}) \cdot V_{i(max)}}{2 \cdot f_s \cdot I_{o(min)}} \tag{2}$$

onde $I_{o(min)}$ é a corrente de saída mínima.

Utilizando o modelo da chave PWM de Vorpérian (MELLO, 2000), a função de transferência entre a tensão nos painéis e a corrente no indutor *buck* pode ser determinada como sendo:

$$\frac{v_{Cp}(s)}{i_{Lb}(s)} = \frac{D_{max} (1 + C_p \cdot r_{SE} \cdot s)}{C_p \cdot s} \tag{3}$$

onde r_{SE} é a resistência série intrínseca ao capacitor de entrada.

Baseado nos dados da Tabela 1, pode-se determinar os elementos que compõem o sistema fotovoltaico, os quais por sua vez são listados na Tabela 2.

Tabela 2. Componentes empregados no sistema fotovoltaico.

Parâmetro	Valor
Capacitor de entrada	$C_p=1$ mF
Indutância <i>buck</i>	$L_b=1,4$ mH
Interruptor <i>S</i>	IRFP264
Diodo <i>buck</i>	MUR820
Tiristores $T_1...T_4$	S2800N
Capacitores auxiliares	$C_{aux1}=C_{aux2}=10$ nF
Diodos auxiliares $D_{aux1}...D_{aux4}$	MUR810

De posse da Equação (3), é possível traçar o lugar das raízes e o diagrama de Bode da função de transferência do compensador de tensão, mostrado na Figura 3.

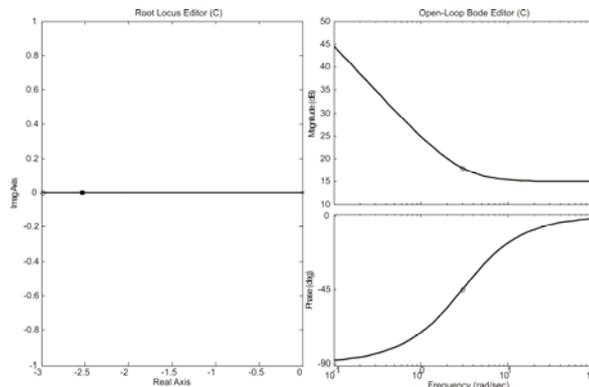


Figura 3. Lugar das raízes e diagrama de Bode da função de transferência do compensador de tensão.

5. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DIGITAL

De posse dos valores da Tabela 2, o sistema fotovoltaico proposto foi simulado, de modo a se obter as formas de onda que validam seu funcionamento correto. Deve-se ressaltar que os diodos e o interruptor utilizados na simulação são ideais.

Na Figura 4, é apresentada a forma de onda da corrente no indutor *buck*, a qual é aproximadamente senoidal e está

em fase com a tensão da rede. A ondulação em alta frequência deve-se à comutação do interruptor S , sendo que sua minimização é possível em termos do aumento do tamanho do indutor L_b , embora isto implique aumento do custo, peso e volume do sistema fotovoltaico.

O espectro harmônico da forma de onda da corrente injetada pelo inversor é dado na Figura 5, sendo que a distorção harmônica total considerando as primeiras cinquenta componentes de baixa frequência é 5,5%.

Na Figura 6, tem-se as formas de onda que demonstram a comutação do interruptor S , a qual ocorre de forma dissipativa.

A Figura 7 demonstra a ação do compensador de tensão projetado. Em $t=5$ s, a corrente no painel sofre um degrau positivo de 50%, o que corresponde a um aumento intensidade luminosa do sol. Então, o compensador atua no sentido de manter a tensão nos painéis constante, de modo a assegurar a operação com máxima potência.

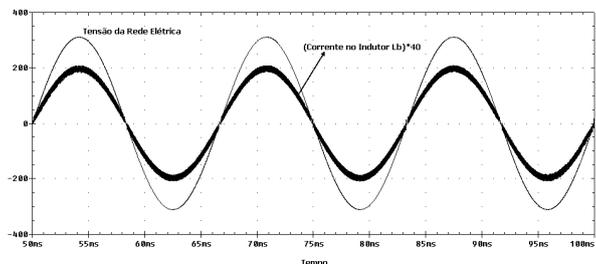


Figura 4. Corrente injetada pelo inversor e tensão da rede elétrica.

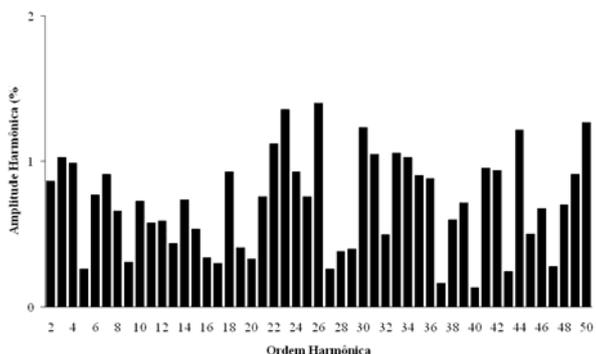


Figura 5. Espectro harmônico da corrente no indutor desconsiderando a componente fundamental.

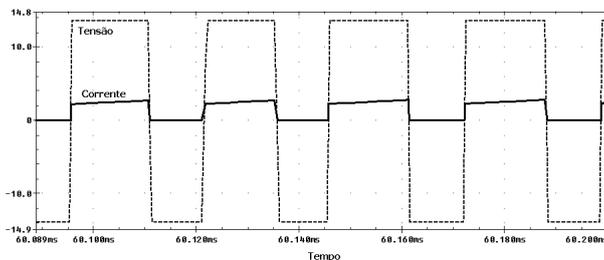


Figura 6. Corrente e tensão no interruptor S .

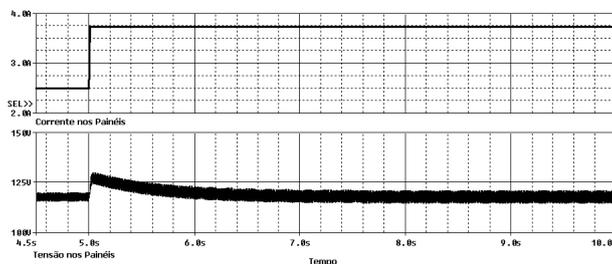


Figura 7. Variação do nível de radiação solar e comportamento da tensão nos painéis fotovoltaicos.

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

De modo a validar a proposta e estabelecer comparações com os resultados da seção anterior, foi construído um protótipo experimental do sistema fotovoltaico, o qual é mostrado na Figura 8. O protótipo foi então testado e os resultados obtidos através dos testes experimentais são discutidos a seguir.

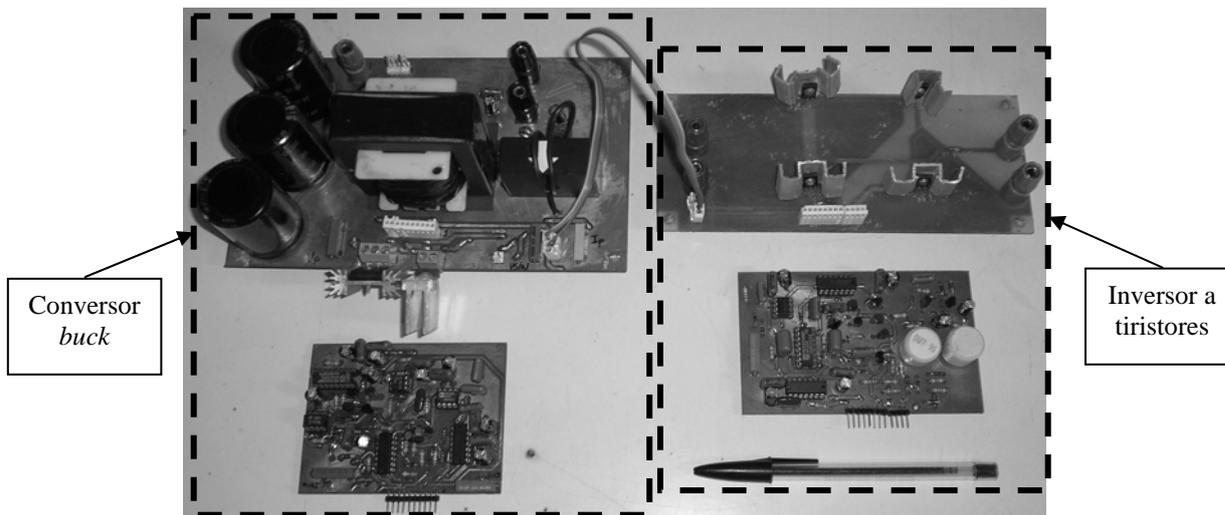


Figura 8. Fotografia do protótipo experimental implementado.

Na Figura 9, são apresentadas as formas de onda referentes à tensão de alimentação senoidal e à corrente injetada na rede, cujo formato também é senoidal em função da utilização da modulação por histerese.

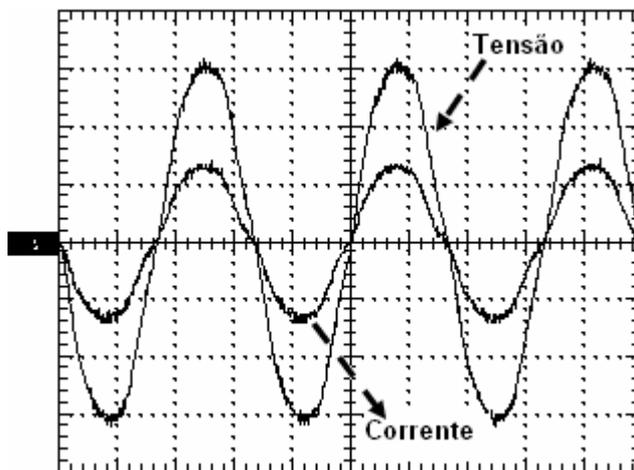


Figura 9. Corrente injetada pelo inversor e tensão da rede elétrica (escalas: 100 V/div., 5 A/div., 5 ms/div.)

Na Figura 10 (a) e (b), são mostrados os espectros harmônicos da tensão de alimentação e da corrente injetada na rede, respectivamente. Verifica-se que a distorção harmônica total da tensão de alimentação é $THD_V=3,57\%$, a qual na prática não é mais puramente senoidal como no caso da Figura 4. Isto por outro lado provoca uma maior distorção da corrente no indutor buck, de modo que é $THD_I=5,29\%$.

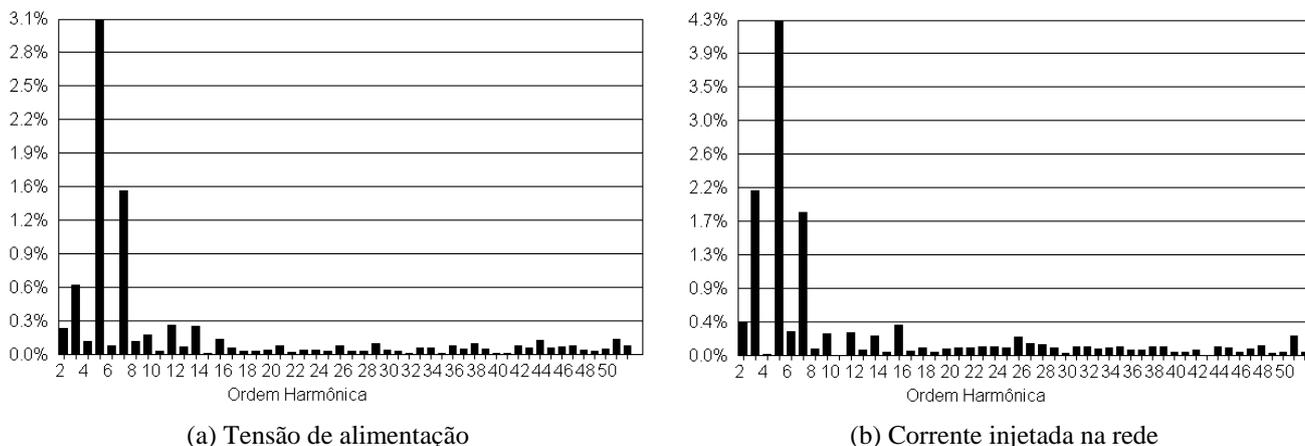


Figura 10. Espectros harmônicos da corrente no indutor desconsiderando a componente fundamental.

As formas de onda representativas da comutação do interruptor S são ilustradas na Figura 11, a qual ocorre de

forma dissipativa.

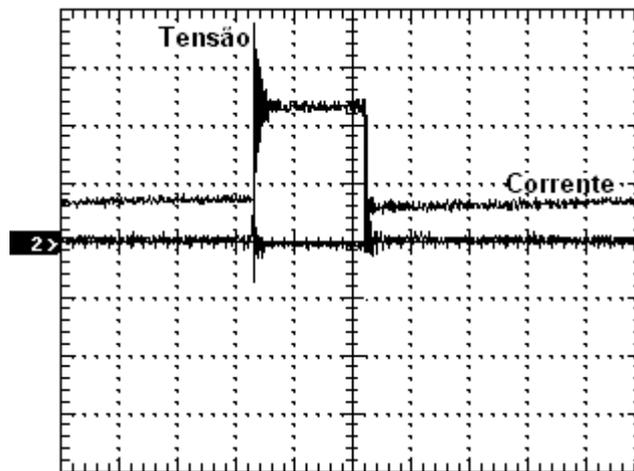


Figura 11. Corrente e tensão no interruptor S (escalas: 5 V/div., 2 A/div., 40 μ s/div.).

Por fim, verifica-se na Figura 12 a resposta do compensador de tensão projetado. A corrente no painel sofre um degrau positivo, o que corresponde a um aumento intensidade luminosa do sol. Então, o compensador atua lentamente para manter a tensão nos painéis constante e não distorcer a forma de onda da corrente de entrada.

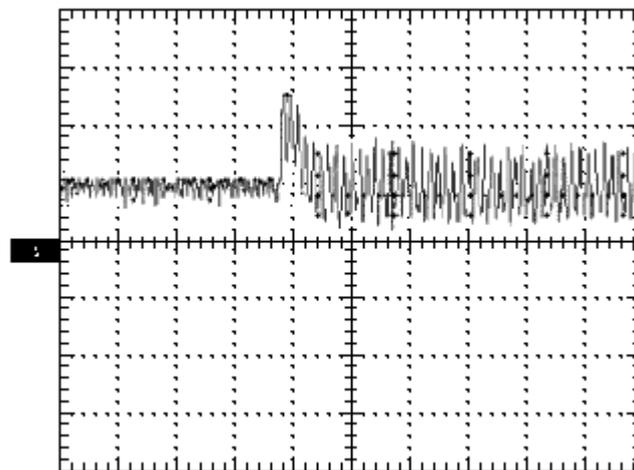


Figura 12. Variação do nível de radiação solar e comportamento da tensão nos painéis fotovoltaicos (escalas: 100 V/div., 1 s/div.).

7. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou aspectos relevantes ao projeto de um sistema fotovoltaico de baixo custo interligado à rede elétrica.

Um conversor *buck* operando em alta frequência é responsável pela modulação da corrente entregue à rede CA, a qual é aproximadamente senoidal e se encontra em fase com a tensão da concessionária. Para isto, é utilizada a modulação por histerese, de modo que é eliminada a complexidade inerente ao projeto de compensadores de corrente do tipo proporcional-integral.

Um sistema de controle em malha fechada é responsável por manter a tensão nos painéis constante frente a variações da radiação solar, de modo a assegurar a operação com máxima potência na maior parte do tempo.

Utilizando-se dispositivos semicontrolados como tiristores, é possível inverter a tensão CC dos painéis por meio de um inversor operando em baixa frequência, de modo que as perdas por comutação neste caso são desprezíveis. A isolamento entre o sistema e a rede é garantida por um transformador de baixa frequência, responsável pela interligação entre o sistema e a concessionária de energia elétrica.

8. REFERÊNCIAS

- Barbi, I. Eletrônica de Potência. 3a edição, Florianópolis, SC, Edição do Autor, 2000.
- Demonti, R.; Martins, D.C. Photovoltaic Energy Processing for Utility Connected System. In: ANAIS DO VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA (COBEP 2001). Florianópolis, Brasil. 2001. p. 735-739.
- Oishi, H.; Okada, H.; Ishizaka, K.; Itoh, R. Single-Phase Soft-Switched Current-Source Inverter for Utility Interactive

- Photovoltaic Power Generation System. In: PROCEEDINGS OF THE 2002 IEEE POWER CONVERSION CONFERENCE (PCC 2002), Osaka, Japão. 2002.
- Mello, L. F. P. Análise e Projeto de Fontes Chaveadas. 9a edição, São Paulo, SP, Editora Érica, 2000.
- Riffel, D. B. Unidade de Osmose Reversa Acionada por Energia Solar Fotovoltaica sem Baterias. 2005. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, UFC, Fortaleza.
- Rodrigues, M.; Teixeira, E. C.; Braga, H.A.C. Uma Visão Topológica sobre Sistemas Fotovoltaicos Monofásicos Conectados à Rede de Energia Elétrica, In: FIFTH LATIN-AMERICAN CONGRESS: ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION. São Pedro, SP, Brasil. Novembro de 2003. v. 1.
- Rossetto, L.; Spiazzi, G.; Tenti, P. Control Techniques for Power Factor Correction Converters. In: PROC. OF POWER ELECTRONICS, MOTION CONTROL (PEMC). 1994. p. 1310-1318.
- Rüther, R. Instalações Solares Fotovoltaicas Integradas a Edificações Urbanas e Interligadas à Rede de Energia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.
- Weber, C. L.; Martins, D. C. Estudo e Implementação de um Conversor Para Processamento de Energia Fotovoltaica com Sistema de MPP (*Maximum Power Point*). Relatório de Iniciação Científica, Florianópolis, SC, Setembro de 2000.