

SISTEMA DIDÁTICO DE PROCESSAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Luiz Henrique Pereira COELHO (1); Gustavo Felipe SCHNEIDER (2); Everton Luiz F. dos SANTOS (3); Clovis Antonio PETRY (4).

Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina – CEFET/SC

Departamento Acadêmico de Eletrônica – DAELN

Av. Mauro Ramos, 950, Centro, Florianópolis – SC. CEP: 88020300

E-mail: (1) luizhpcoelho@yahoo.com.br (2) gustavofelipes@yahoo.com.br

(3) everton@cefetsc.edu.br (4) petry@cefetsc.edu.br (autor para correspondência)

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um sistema de processamento de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos de baixa potência. O objetivo principal é utilizá-lo como apoio didático em aulas de laboratório e teóricas de eletrônica, eletricidade, física e demais disciplinas afins. O sistema proposto é formado por um painel de baixa potência, um conversor de interface entre o painel e o estágio de armazenamento de energia, um conversor elevador de tensão e finalmente um inversor de tensão. Além disso, para aumentar a eficiência na utilização dos painéis fotovoltaicos, utiliza-se um seguidor de máxima potência, denominado na literatura de MPPT (*maximum power point tracker*). Em sistemas de processamento de energia fotovoltaica, um dos estágios mais problemáticos é o elevador de tensão, assim, algumas topologias com esta finalidade serão discutidas. Ao final, resultados de simulação serão apresentados, mostrando o funcionamento do sistema de processamento e indicando a viabilidade da estrutura proposta neste trabalho.

Palavras-chave: co-geração, painéis fotovoltaicos, energias alternativas, sistema didático.

1. INTRODUÇÃO

O processamento eletrônico de energia é atualmente uma área de pesquisa intensa e sua aplicação ocorre no mais diversos setores, quais sejam: industrialmente no acionamento de cargas, controle de processos, co-geração de energia; no comércio em geral; na indústria de entretenimento e nas residências ou individualmente, através de eletroeletrônicos que utilizam intensamente a eletrônica para processamento de energia, sinais e dados (SIMÕES, 2007).

Dentro deste quadro, o processamento de energia como por exemplo: eólica, células de hidrogênio, fotovoltaica, entre outras; tem crescido e evoluído em países desenvolvidos e em desenvolvimento (SIMÕES, 2007).

Pesquisas recentes, conforme as referências bibliográficas, mostram a possibilidade de estudar e aplicar a tecnologia de co-geração e processamento de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos imediatamente pela indústria nacional (Gonçalves 2006, Souza 2003 e Sá Junior 2004).

Assim, propõe-se um projeto de pesquisa, exposto neste trabalho, que tenha os seguintes objetivos:

- Estudar topologias e soluções de sistemas de processamento de energia elétrica gerada por painéis fotovoltaicos;
- Implementar soluções simples e funcionais para cada bloco do sistema, visando obter um conjunto operacional;
- Permitir que o sistema obtido seja utilizado como apoio didático no ensino de disciplinas correlatas às áreas de eletrônica, eletricidade, física, dentre outras;
- Elaborar material didático e promocional desta tecnologia, visando sua difusão e aplicação pelos estudantes e pela comunidade.

Na sequência será apresentado o diagrama de blocos de um sistema de processamento de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos, com uma síntese de cada elemento. A seguir, alguns estágios serão detalhados, em especial o estágio elevador de tensão, ponto crítico no que se refere ao rendimento do conjunto. Por fim serão apresentadas algumas conclusões com base nos resultados de simulação obtidos.

2. SISTEMA DE PROCESSAMENTO

Um sistema de processamento de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos é composto dos elementos mostrados na Figura 1.

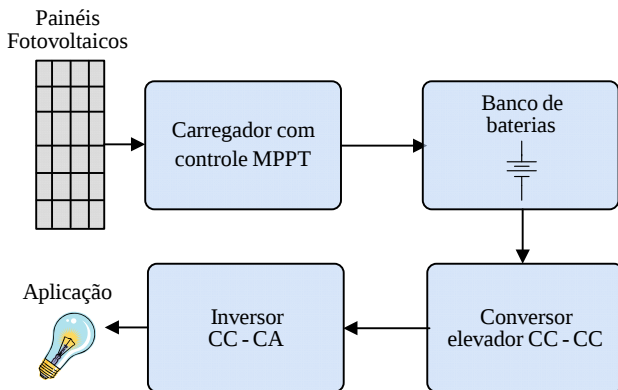


Figura 1 – Sistema básico de processamento de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos.

O conjunto de painéis fotovoltaicos é responsável pela geração da energia elétrica através da incidência da luz solar. Os níveis de tensão e corrente gerados por cada célula fotoelétrica são baixos, daí a necessidade de associarem-se os mesmos em série e/ou paralelo para aumentar a capacidade de corrente e tensão do conjunto (Sá Junior, 2004).

Como a presença de luz solar não é constante durante o dia, além de estar ausente no período noturno, o armazenamento da energia gerada é realizado através de bancos de baterias, com um número adequado à potência do conjunto de painéis utilizado (Silva 2003).

A interface entre os painéis fotovoltaicos (solares) e o banco de baterias é realizada pelo carregador de baterias. Este carregador tem a finalidade de implementar determinadas características de carga adequadas às baterias e ao conjunto de painéis em uso. Além disso, para aumentar a eficiência na utilização dos painéis fotovoltaicos, utiliza-se um seguidor de máxima potência, denominado na literatura de MPPT (maximum power point tracker), conforme Silva (2003).

Para a utilização em sistemas embarcados, a energia armazenada nas baterias poderia ser aplicada diretamente ao elemento consumidor, por exemplo: sistemas de rádio, GPS, iluminação ambiente, etc. Por outro lado, para a utilização em equipamentos eletrônicos convencionais, os níveis de tensão precisam ser aumentados, além da conversão de corrente-contínua (CC-CC) para corrente-alternada (CC-CA). Daí surge a necessidade de utilizar um conversor elevador de tensão, operando no modo CC-CC e após este, um inversor de tensão (CC-CA) (Mezaroba, 1998, Demonti, 2003).

Na saída do inversor de tensão CC-CA pode-se acoplar a carga desejada, por exemplo: motores para acionamento ou bombeamento de água, refrigeradores, sistemas de iluminação, eletroeletrônicos, entre outros. Ainda, se for desejado, pode-se utilizar o sistema para co-geração, aplicando a energia vinda dos painéis fotovoltaicos e armazenada nas baterias na rede. Neste caso tem-se um sistema de co-geração de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos.

Na literatura, os módulos descritos anteriormente foram implementados de forma individual e com controle analógico. Desta forma, como metodologia de desenvolvimento do estudo, sugere-se a implementação e testes por módulo, facilitando o projeto e montagem destes.

Apesar da facilidade de estudar e implementar os módulos individualmente, como seqüência natural dos estudos, pretende-se estudar a viabilidade de controlar todos os módulos de um sistema central digital, aplicando microcontroladores ou microprocessadores. Com a utilização deste comando e controle digital, espera-se uma simplificação nas etapas de controle e comando, permitindo um gerenciamento centralizado da energia processada, bem como a comunicação com outros sistemas.

Do ponto de vista didático, é necessário tornar o sistema mais transparente no sentido de permitir ao educando e educador utilizar o mesmo de forma simples e segura, com interfaces amigáveis e partida e desligamento automático, o que não ocorreu nos sistemas estudados na literatura, isso por estes serem protótipos e, portanto versões funcionais, mas não acabadas.

3. COLETA E ARMAZENAMENTO DA ENERGIA

3.1. Painéis fotovoltaicos

Um painel fotovoltaico é um conjunto de inúmeras células solares ou fotovoltaicas, que tem a finalidade de converter a energia da luz em energia elétrica. Na Figura 2 mostra-se uma célula para painel fotovoltaico e este é mostrado na Figura 3 (Sunlab, 2007).

O efeito fotoelétrico, de acordo com a Figura 4, é obtido em materiais semicondutores quando a energia luminosa incide sobre uma junção P-N permitindo a absorção de fótons e liberando elétrons da banda de valência para a banda de condução (Sá Junior, 2004). Desta forma é originada uma corrente elétrica, que circulando pelo circuito externo poderá gerar trabalho sobre uma carga qualquer.

A energia gerada pelo elemento semiconductor é pequena, por isso da associação em inúmeras células formando um painel, para que se tenha potência da ordem de alguns watts. Para suprir consumidores que exigem potências da ordem de centenas ou milhares de watts será necessária a associação de diversos painéis fotovoltaicos. Além disso, como a insolação sobre o conjunto de painéis é diferente durante o dia e durante a noite, armazena-se a energia gerada em baterias, para posterior aproveitamento conforme desejado.



Figura 2 – Célula para painel fotovoltaico.



Figura 3 – Painel fotovoltaico de baixa potência.

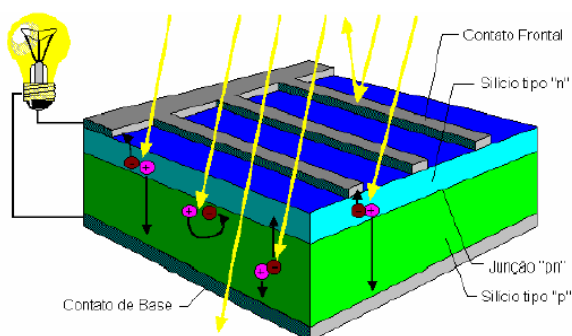


Figura 4 – Efeito fotoelétrico conforme: Sá Junior (2004) apud GTEF (Grupo de Trabalho de Energia Solar). Energia Solar Princípios e Aplicações. CRESESB/CEPEL, 2003.

3.2. Seguidor de máxima potência (MPPT)

A característica de saída de um painel fotovoltaico é mostrada na Figura. 5. Pode-se verificar que para um determinado nível de insolação tem-se a curva 1, e nesta curva existe um ponto de máxima potência (MPP – *maximum power point*) que pode ser extraída do painel.

No entanto, para outro nível de insolação, a característica de saída será dada pela curva 2, e aí tem-se um outro ponto de máxima potência fornecida pelo painel.

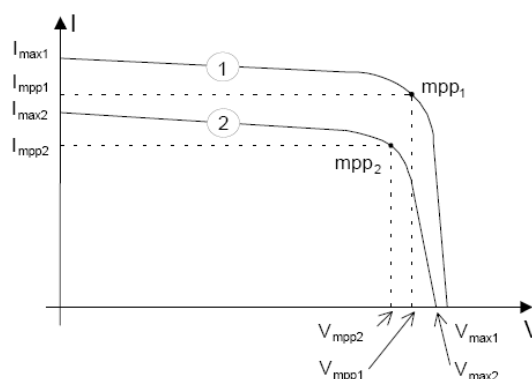


Figura 5 – Característica de tensão versus corrente de um painel fotovoltaico (Silva, 2003).

Justifica-se pela observação da curva da Figura 5 que é necessário determinar a corrente a ser solicitada do painel conforme o nível de insolação, e isto é conseguido implementando-se um seguidor de máxima potência (MPPT – *maximum power point tracker*).

Além disso, para que seja possível implementar o MPPT, é necessário realizar a modelagem dos painéis fotovoltaicos, para que se tenha um modelo equivalente e com este modelo possa ser projetado o conversor CC-CC que irá atuar como MPPT.

Normalmente a função de MPPT é realizada pelo conversor que faz o papel de carregador de baterias. Existem inúmeros algoritmos para implementar o seguimento do ponto de máxima potência, sejam analógicos ou digitais. Na primeira versão do sistema didático será utilizada a versão analógica, medindo-se a tensão de entrada e ajustando-se a razão cíclica do conversor *Buck* (carregador de baterias), conforme mostrado na Figura 6.

3.3. Carregador de baterias

Um painel fotovoltaico gera energia elétrica conforme os níveis de insolação sobre o mesmo, como pode ser visto pela Figura 5. Assim, durante o período diurno a energia gerada pelos painéis

deve ser armazenada em baterias, para posterior utilização pelas cargas. Em sistemas de co-geração, a energia pode ser injetada no sistema de energia elétrica, sem a necessidade de armazenamento em baterias (Gonçalves, 2006 e Souza, 2003). De qualquer forma, algum elemento armazenador, como capacitores de alto valor, por exemplo, devem ser utilizados após o circuito MPPT, para que a partir destes elementos armazenadores se possa injetar a energia na rede elétrica usando conversores adequados para isso.

Conforme mostrado na Figura 6, o conversor *Buck*, implementando a função de MPPT, também realiza a tarefa de operar como carregador da bateria, controlando o fluxo de energia entre os painéis e o estágio de armazenamento. A única ressalva a ser feita (Silva, 2003) é que o conversor tenha um filtro de entrada, o qual permite que a corrente suprida dos painéis fotovoltaicos seja contínua e não pulsada, como é característica do conversor *Buck*.

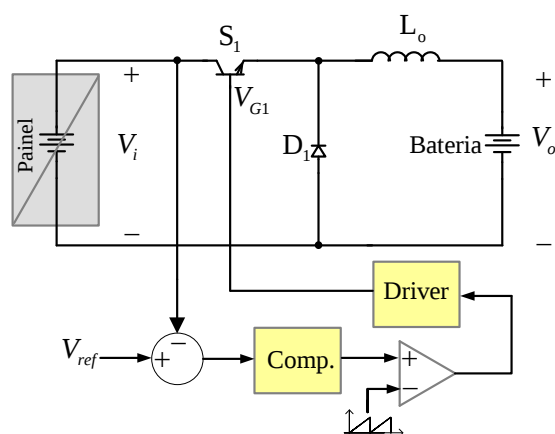


Figura 6 – MPPT integrado ao carregador de baterias.

O sistema didático, em virtude do alto custo dos painéis fotovoltaicos, irá operar com uma potência pequena, da ordem de 3 watts. Assim, o armazenamento de energia poderá ser feito em baterias de pequena capacidade e de baixo custo (bateria de motocicleta, por exemplo), em contraste com as normalmente utilizadas em sistemas de alta potência. A tensão de operação é da ordem de 16 V de entrada e na saída usam-se baterias de 12 V.

Além disso, com a disponibilidade de super capacitores por preços acessíveis, mas para baixas tensões (3,3 ou 5 V), pode-se substituir a bateria por estes elementos, visto o sistema ser didático e de baixa potência. A título de exemplo, para alimentar um carregador comercial de baterias de telefone celular a partir do sistema proposto, seria necessário utilizar uma capacitância da ordem de 2 Farads.

Outro ponto de interesse e discussão é o fato de que, atualmente, em virtude da grande variedade de pequenos consumidores (carregadores de bateria de telefone celular, câmeras fotográficas, dentre outros.) é mais conveniente disponibilizar uma tensão alternada da ordem de 100 V para alimentar estes consumidores. Do ponto de vista energético, seria mais adequado o conversor proposto carregar diretamente as baterias destes consumidores, mas em virtude da variedade de baterias comerciais, isso se torna uma tarefa bastante complexa.

4. INTERFACEAMENTO COM OS CONSUMIDORES

4.1. Conversores elevadores de tensão

Um sistema didático de geração de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos deve ser portátil, portanto é desejado que seja leve e tenha pouco volume. Assim, é recomendada a utilização de apenas uma ou duas baterias de baixa capacidade de corrente.

Por outro lado, para que cargas comuns, como lâmpadas incandescentes, eletrodomésticos, fontes, entre outras, possam ser alimentadas pelo sistema fotovoltaico, uma tensão maior, de 110 ou 220 V será necessária na saída do inversor de tensão. Então, utiliza-se um conversor elevador de tensão entre o conjunto de baterias e o inversor de tensão.

Existem diversas topologias de conversores elevadores de tensão, sendo que a mais comumente usada em sistemas fotovoltaicos está mostrada na Figura 7 (Caballeiro, 1999). Nesta figura mostra-se o conversor *Push-Pull* convencional, com entrada em tensão e isolado.

Também é frequente utilizar-se conversores elevadores com acoplamento indutivo (Petry, 2003), denominados de Conversores *Boost* Interfase. Um exemplo de um *Boost* Interfase está mostrado na Figura 8.

4.2. Inversores de tensão

A alimentação da maior parte das cargas residenciais, por exemplo, é realizada em tensão alternada senoidal. Assim, para que o sistema de geração de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos possa alimentar cargas comuns, como lâmpadas, eletrodomésticos, carregadores de bateria para telefones celulares e/ou máquinas fotográficas digitais, entre outras; é necessário converter a tensão contínua gerada pelos painéis, armazenada nas baterias e posteriormente elevada pelo conversor elevador, em uma tensão alternada

senoidal com frequência de 60 Hz e amplitude de 110 ou 220 V.

O inversor de tensão largamente empregado para, a partir de uma tensão contínua, gerar uma tensão alternada senoidal, é o conversor ponte completa com modulação PWM senoidal, mostrado na Figura 9.

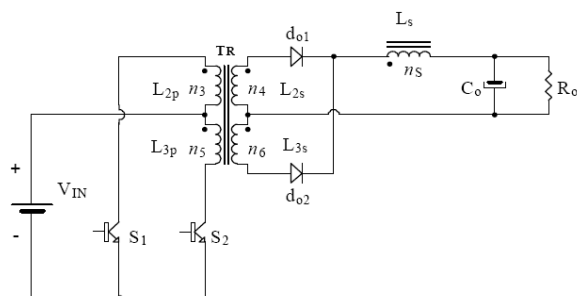


Figura 7 – Conversor Push-pull clássico.

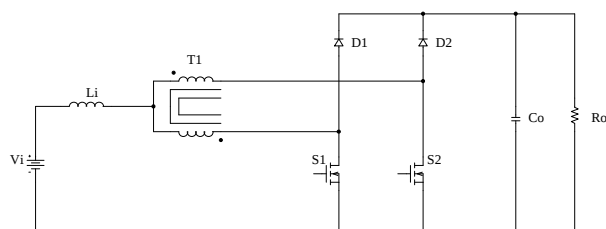


Figura 8 – Conversor Boost Interfase.

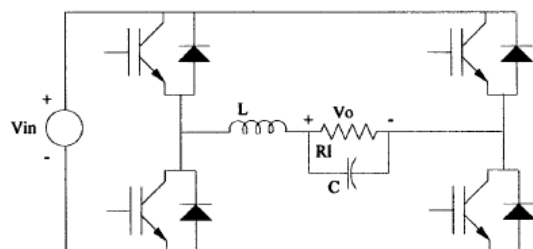


Figura 9 – Inversor de tensão ponte completa.

4.3. Conversores elevadores de tensão e inversores de tensão integrados

Nos itens anteriores apresentaram-se conversores elevadores de tensão, seguidos do inversor de tensão ponte completa. Neste caso, cada conversor tem uma tarefa distinta e bem específica. É possível integrar estes dois conversores, fazendo com que o conversor elevador também seja o inversor de tensão (Cáceres, 1997, Colling 2000 e Cardoso, 2007).

A vantagem de estruturas elevadoras e inversoras integradas é o menor número de componentes e o aumento do rendimento. No entanto, o controle destes conversores é mais complexo do que controlar o conversor elevador e o inversor independentemente.

Na Figura 10 mostra-se o inversor elevador de tensão apresentado por Cáceres (1997) e também estudado por Colling (2000).

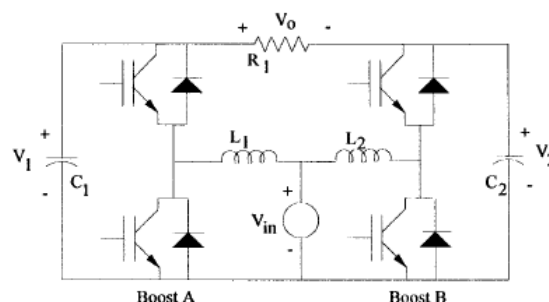


Figura 10 – Inversor elevador de tensão ponte completa.

5. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

5.1. Estágio de armazenamento de energia

As formas de onda da tensão de saída do painel (16 V), tensão na bateria (12 V) e corrente no indutor do conversor *Buck* e no filtro de entrada são mostradas na Figura 11. Pode-se verificar que o conversor opera com uma corrente de 0,2 A e mantém a tensão na bateria no valor adequado ao seu funcionamento.

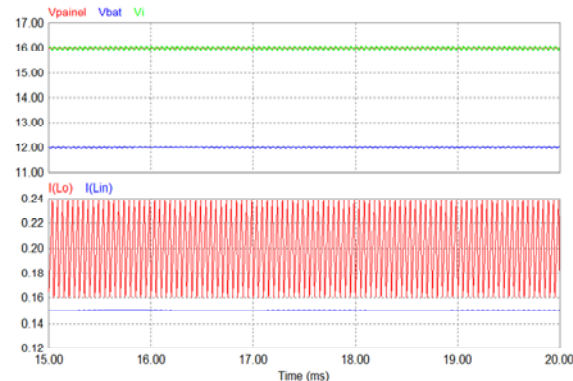


Figura 11 – Formas de onda do carregador de baterias (conversor Buck).

5.2. Estágio elevador de tensão

Para o estágio elevador de tensão, responsável por elevar a tensão da bateria de 12 V para uma tensão de aproximadamente 150 V, se tem as formas de onda mostradas na Figura 12.

Neste caso são mostradas as tensões da bateria e na saída do conversor *Boost*. Além disso, mostram-se as correntes no indutor *Boost* e no indutor do carregador de baterias (conversor *Buck*).

Verifica-se que a corrente na saída do conversor elevador é pequena, visto que a tensão é elevada.

Isto permitirá utilizar semicondutores com capacidade de corrente reduzida, o que deverá levar a um rendimento elevado destas estruturas.

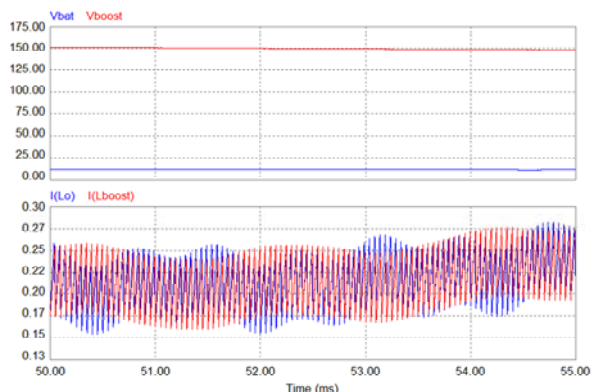


Figura 12 – Formas de onda do estágio elevador de tensão (conversor Boost).

5.3. Estágio inversor de tensão

Na Figura 13 mostram-se as seguintes tensões: na bateria, na saída do conversor *Boost* e na saída do inversor de tensão. Pode-se notar que a tensão de saída do inversor de tensão é senoidal, isto porque se utilizou modulação PWM senoidal no comando do inversor.

É importante ressaltar, como pode ser visto na Figura 13, a enorme diferença de amplitude entre a tensão necessária para alimentar os consumidores (100 V eficazes) e a tensão de armazenamento nas baterias (12 V). Isto exige um esforço grande para elevar a tensão, realizado pelo conversor *Boost*.

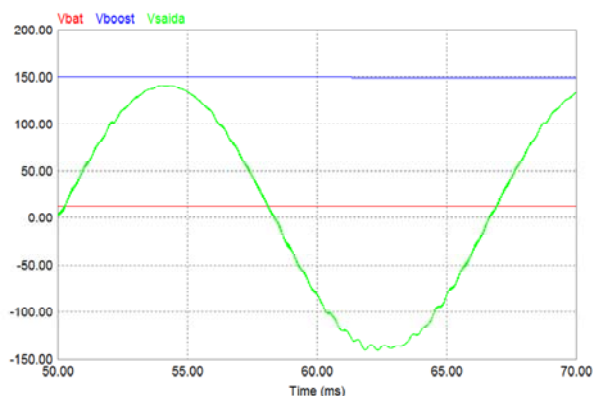


Figura 13 – Formas de onda do inversor de tensão.

Neste artigo não se explorou, através de simulação, a elevação da tensão usando conversores interfase (*Boost* Interfase), o que será realizado posteriormente.

Da mesma forma, por se tratar de um sistema didático, não é interessante utilizar os conversores elevadores integrados aos inversores, pela

complexidade de comando e necessidade de operação em malha fechada.

6. CONCLUSÕES

O uso de energias alternativas e de baixo impacto ambiental é questão crucial no combate ao desperdício e uso correto dos recursos naturais. Assim, dominar e difundir a tecnologia de processamento de energia fotovoltaica é tarefa primordial às instituições de ensino nas áreas tecnológicas.

Por outro lado, centenas de usuários ainda não possuem energia elétrica à disposição, seja para iluminação ou para refrigeração de alimentos e víveres. Assim, esforços no sentido de popularizar tecnologias recentes que utilizam energias limpas, mas que possuem alto valor agregado pelo uso intenso da eletrônica analógica e digital, é indispensável para o desenvolvimento social e sustentável de um país.

Neste contexto este trabalho propõe um sistema de conversão na área de processamento de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos, visando obter um sistema simples, didático e funcional, que permita a difusão desta tecnologia nas escolas e academias, desmistificando a não utilização de tecnologias de ponta em comunidades socialmente prejudicadas, ou seja, de baixo poder aquisitivo e alienadas tecnologicamente.

O elemento de maior custo no sistema é o painel fotovoltaico. O número de semicondutores em um sistema de processamento é grande, mas o custo dos mesmos é inferior ao do painel. Assim, para um sistema didático é necessário utilizar um painel de baixa potência, para torná-lo viável.

Do ponto de vista de dificuldades técnicas, o maior desafio reside no estágio de elevação da tensão, pois a diferença entre a tensão necessária para os consumidores e a tensão nas baterias é elevada.

Por fim, neste trabalho apresentou-se uma proposta de sistema didático de processamento de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos, de baixa potência e que pode ser aplicado no ensino de disciplinas correlatas à eletrônica e energias renováveis.

Foram apresentados alguns resultados de simulação, para um sistema convencional, utilizando os seguintes conversores: *Buck* para carregador de baterias, *Boost* como elevador de tensão e Inversor Ponte Completa para inverter a tensão e disponibilizá-la aos consumidores em 100 V eficazes.

REFERÊNCIAS

- CABALLEIRO, Domingo R. **Novo Conversor CC-CC Flyback-Push-Pull Alimentado em Corrente: Desenvolvimento Teórico e Experimental**. Tese de doutorado em Engenharia Elétrica – UFSC. Florianópolis, 1999.
- CÁCERES, Ramon O. **Família de Conversores CC-CA, Derivados dos Conversores CC-CC Fundamentais**. Tese de doutorado em Engenharia Elétrica – UFSC. Florianópolis, 1997.
- CARDOSO, Robson L. **Conversores CC-CA Bidirecionais Isolados em Alta Frequência**. Tese de doutorado em Engenharia Elétrica – UFSC. Florianópolis, 2007.
- COLLING, Ivan E. **Conversores CC-CA Monofásicos e Trifásicos Reversíveis com Elevado Fator de Potência**. Tese de doutorado em Engenharia Elétrica – UFSC. Florianópolis, 2000.
- DEMONTI, R. **Processamento da energia elétrica proveniente de módulos fotovoltaicos**. Tese de doutorado em Engenharia Elétrica – UFSC. Florianópolis, 2003.
- GONÇALVES, O. H. **Contribuição ao estudo de um sistema de dois estágios para aplicação em cogeração de energia a partir de painéis fotovoltaicos**. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica – UFSC. Florianópolis, 2006.
- MEZARоба, M. **Sistema de bombeamento de água com energia obtida de painéis fotovoltaicos**. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica – UFSC. Florianópolis, 1998.
- PETRY, C. A.; BARBI, I. **A Comparison Between the Boost and the Double Boost Converters With Inductive Coupling**. Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência – COBEP 2005. Fortaleza - CE, 2003.
- SÁ JUNIOR, E. M. **Sistema fotovoltaico para iluminação pública no período de alto pico de demanda da concessionária**. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica – UFC. Fortaleza, 2004.
- SILVA, D. P. **Sistema eletrônico para processamento de energia solar fotovoltaica, operando na máxima transferência de potência, com aplicação na alimentação de refrigeradores convencionais**. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica – UFSC. Florianópolis, 2003.
- SIMÕES, Marcelo G.; FARRET, Feliz A. **Integração de Fontes Alternativas de Energia – Mini-Curso - Tutorial**. Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência – COBEP 2007. Blumenau - SC, 2007.
- SOUZA, K. C. A. **Conversor CC-CA monofásico para interligar painéis fotovoltaicos ao sistema elétrico**. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica – UFC. Fortaleza, 2003.
- SUNLAB. **Painéis Solares Fotovoltaicos**. Disponível em: <<http://www.sunlab.com.br>> Acesso em: 10 nov 2007.