

## **ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO DE BAIXA TENSÃO ACOPLADO A UM CONVERSOR DC-DC: TOPOLOGIA BOOSTER**

Sara Maria Freitas de Alcântara, sara.kawa@uol.com.br<sup>1</sup>  
Raimundo Jorge Abreu de Jesus, rjorge@ifba.edu.br<sup>1</sup>  
Cleiton Rubens Formiga Barbosa, cleiton@ufrnet.br<sup>2</sup>  
Francisco de Assis Oliveira Fontes, francisfontes@uol.com.br<sup>2</sup>  
Andres Ortiz Salazar, andres@dca.ufrn.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Rua Emídio dos Santos, s/n, Salvador-BA.

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Campus Universitário, Laboratório de Energia, NTI, s/n, Natal-RN.

**Resumo:** *Painéis solares de alta confiabilidade geram energia em baixa tensão, devido principalmente a redução das associações em série nas configurações das células fotovoltaicas. A geração em baixa tensão requer dispositivos conversores DC/DC de alto rendimento, que possibilitem elevar e regular a tensão de saída. O presente estudo analisa o desempenho de um painel fotovoltaico de 75W, configurado para gerar uma tensão em aberto de 8,5 V com uma corrente de curto circuito de 8,8A, montado na configuração de sistema fotovoltaico isolado, com e sem armazenamento de energia tendo como elemento de interface um conversor DC-DC, topologia Booster. O conversor foi confeccionado com circuitos integrados de tecnologia SMD (Surface Mounted Devices), regulando a sua tensão de saída em 14,9V, com rendimento de 87% disponibilizando à carga uma potência máxima de 20,88W. O sistema foi instalado e instrumentado para medição e aquisição de dados: luminosidade (luxímetro LUTRON), radiação média global (dados do INPE-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), temperaturas do painel solar, temperatura ambiente e a tensão de saída do módulo fotovoltaico (placa de aquisição de dados da National Instruments, DATA LOGGER, modelo NI c DAQ 9172). A tensão de saída do conversor DC-DC (multímetro digital com aquisição de dados, MINIPA BRYMEN, modelo ET-4090) e as correntes de entrada e saída (Multímetros digitais, MINIPA, modelo ET 2907). O conjunto fotovoltaico foi inicialmente ensaiado em laboratório (simulando seu funcionamento em condições ideais de operação) e em seguida submetido a testes em condições reais de campo. O ângulo da inclinação do painel foi fixado em 5,5°, compatível com a latitude da cidade de Natal. Os resultados mostraram que a radiação solar, a luminosidade, a temperatura e o valor da resistência de carga influenciaram bastante no nível de potência gerado pelo módulo fotovoltaico.*

**Palavras chave:** *energia solar, painel fotovoltaico, conversor dc/dc Boost, fonte chaveada.*

### **1. INTRODUÇÃO**

A energia fotovoltaica é a transformação da energia fornecida pelo Sol em energia elétrica. Os conhecimentos relacionados com energia fotovoltaica surgiram em 1839, com o físico francês Edmund Becquerel, que descobriu o chamado efeito fotovoltaico num eletrólito, através da constatação de que alguns materiais em contato com luz produzem pequenas quantidades de corrente elétrica.

O fator impulsionador para o crescimento da energia fotovoltaica começou na década de 80, porém com a estabilização dos mercados petrolíferos e a falta de investimentos em pesquisas aplicadas, a tecnologia dos painéis solares ficou estagnada por vários anos, Sá (2008). Nos meados da década de 90, fruto de catástrofes ambientais, principalmente causadas pela queima dos combustíveis fósseis, estimulou a conscientização de diminuir as emissões de gases poluentes para a atmosfera e ao desenvolvimento e aproveitamento de fontes renováveis de combustível como a energia solar fotovoltaica, Brito (2006).

Bazzo et al (2001), relata que mesmo os sistemas fotovoltaicos ainda apresentando um alto custo inicial, a sua alta confiabilidade, pouca manutenção e um baixo custo de operação, fazem com que seja compensador a sua aquisição. Donato et al. (2006), ressaltam que umas das formas de se maximizar a absorção de energia solar através das células solares é utilizando nas suas coberturas, vidros de baixa refletividade. Ressalta ainda, que estes sistemas de proteção devem ter composição capaz de reduzir a incidência da radiação ultravioleta a qual favorece a degradação dos painéis fotovoltaicos.

Bissochi et al (2002), afirma que fisicamente a quantidade de energia elétrica produzida será proporcional ao tamanho da placa e à luminosidade existente. De acordo com o CRESESB essa luminosidade é variável, mudando de acordo com a latitude e nebulosidade. Através desses fatores determina-se o índice de insolação de cada região.

As células fotovoltaicas disponibilizadas comercialmente são elaboradas à base de silício monocristalino, policristalino e amorfo, mas também há células fabricadas com outros materiais, como o disseleneto de cobre-indio (CIS) e telureto de cádmio (Cd Te).

Conforme Jannuzzi et al. (2009) a célula de silício monocristalino é historicamente a mais utilizada e comercializada, produzidas em fornos especiais. Segundo a ASIF(2008) as células monocristalinas chegam a uma eficiência variando de 15% a 24,7%. De acordo com a IEA (2006) as células de silício policristalino perdem um pouco a eficiência comparadas as células monocristalinas por apresentarem várias interfaces entre os vários cristais, variando entre 14% a 20,3%.

Segundo Rosemback(2004), os controladores de carga ao carregarem uma bateria, simplesmente ligam os painéis diretamente às baterias, e isto impõe aos painéis funcionarem à tensão da bateria, que tipicamente não é a tensão ideal de operação para que os mesmos possam fornecer uma máxima potência. Junior (2004) reforça a necessidade de se utilizar um conversor DC/DC neste tipo de sistema, o que possibilita o perfeito casamento da impedância elétrica entre o painel e o banco de baterias, condição necessária para que o painel possa trabalhar em níveis de máxima potência.

O objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência energética de um painel solar, acoplado a um protótipo de conversor DC/DC, topologia BOOSTER.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizou-se no experimento um painel Solarex, modelo MSX 77, acoplado a um protótipo de um conversor DC/DC, topologia Boost, projetado para elevado ganho e alta eficiência de conversão. Os ensaios foram baseados em duas condições experimentais: uma em laboratório e a segunda em condições reais de campo. Nas duas situações de testes o sistema foi avaliado com e sem armazenamento de energia. A configuração do conjunto montado foi do sistema fotovoltaico isolado CC, conforme representação da figura 1.

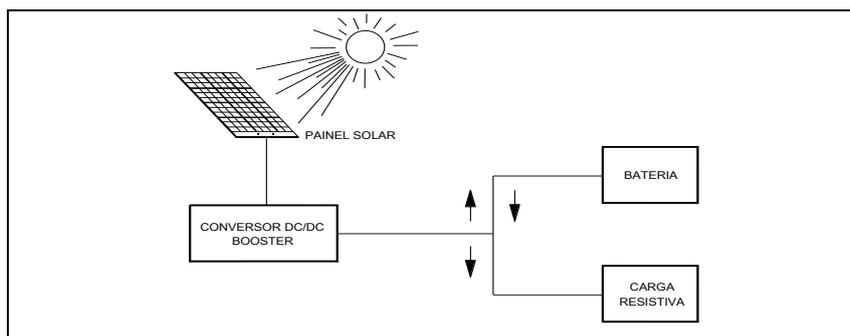


Figura 1. Configuração do sistema fotovoltaico isolado utilizado.

O presente trabalho foi realizado na cidade de Natal a uma latitude 05° 45' Sul, longitude 35°12'Oeste e altitude de 31 m acima do nível médio do mar, durante o mês de dezembro de 2009. Baseando-se pela Lei dos Cossenos de Lambert os horários escolhidos para os ensaios de campo foram entre nove da manhã às treze horas. Os dois conjuntos internos de células de silício policristalino do painel solar tiveram que ser ligados em paralelo, disponibilizando ao sistema uma maior corrente e menor tensão, atendendo assim as características de operação do conversor DC/DC. O conversor DC/DC é uma parte essencial neste sistema, pois através dele se pôde ter um valor da tensão de saída diferente da tensão fornecida pelo painel solar, como também, diferente da tensão da bateria. O conversor utilizado nos ensaios segue o modelo de uma topologia BOOST também conhecida como "STEP UP" que teve a função de elevar e regular a tensão de saída do painel.

De acordo com a configuração do sistema fotovoltaico adotada, os conversores DC/DC foram inicialmente testados em laboratórios por ser uma condição de trabalho mais estável, e em seguida o sistema foi ensaiado em condições reais de campo. Em ambos ensaios, determinou-se a potência fornecida na saída do conversor através da Equação 1.

$$P = V \cdot I \quad (1)$$

Onde:

P = potência elétrica fornecida pelo conversor [ W ]

V= tensão de saída [V]

I =corrente elétrica de saída do conversor [A].

Determinou-se a potência de entrada do conversor através da Equação 1.

Onde:

P = potência elétrica de entrada do conversor [ W ]

V = tensão de entrada do conversor [ V ]

I = corrente elétrica de entrada do conversor [ A ].

Determinou-se o rendimento do conversor através da Equação 2.

$$\eta = \frac{\text{Potência de saída do conversor}}{\text{Potência de entrada do conversor}} \quad (2)$$

Determinou-se a resistência ôhmica de carga através da Equação 3 .

$$R_L = \frac{V_{RL}}{I_{RL}} \quad (3)$$

Onde:

R<sub>L</sub> = Resistência ôhmica de carga [Ω]

V<sub>RL</sub> = Tensão sobre a resistência de carga [V]

I<sub>RL</sub> = Corrente de carga [A].

O circuito interno do conversor encontra-se representado na figura 2.

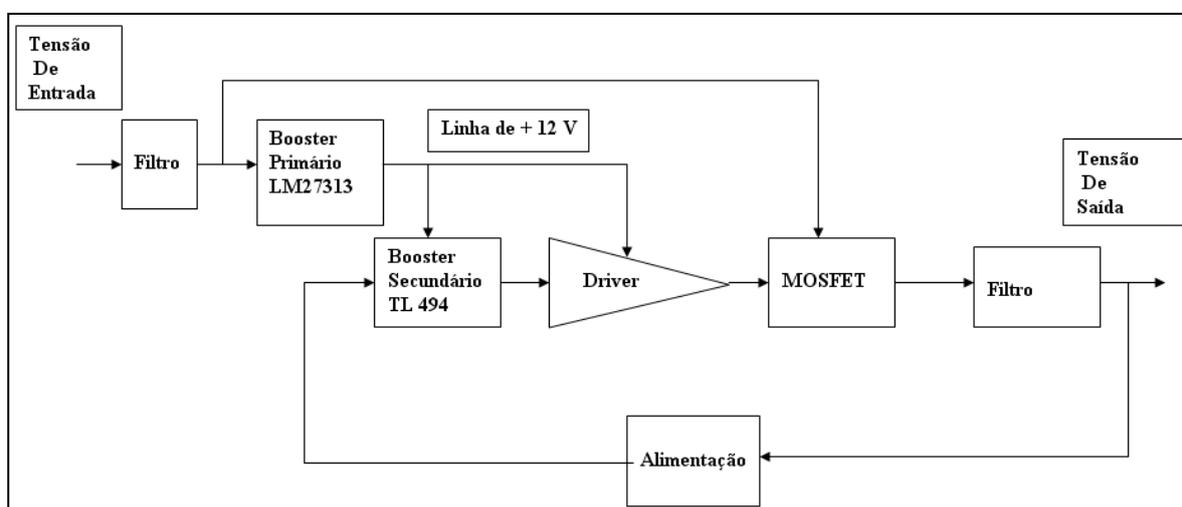


Figura 2. Diagrama em blocos do circuito eletrônico do conversor DC/DC proposto

#### Descrição da funcionalidade de cada bloco:

**Filtros-** Função de reduzir picos de tensões gerados pelo painel solar, evitando danificar dispositivos semicondutores, como o drive do MOSFET.

**Boost primário** – Fonte primária de baixa potência operando com tensão de entrada entre 2 á 9 V, gerando na sua saída uma tensão de 12 V a qual é utilizada para alimentar o Boost secundário.

**Boost secundário** – Realiza as funções principais de controle em PWM, sendo composto basicamente por: dois amplificadores A1 e A2 destinados a possibilitar o fechamento da malha de realimentação negativa; dois circuitos comparadores; um flip-flop, responsável pela alternância dos sinais de comando da base de Q1 e Q2; o bloco regulador que gera uma tensão de referência ( V referência = 5 V); um bloco oscilador, onde através dos pinos 5 e 6 (RT e CT), se ajusta a frequência de oscilação do PWM:

$$\text{Frequência de oscilação do PWM} = \frac{1,1}{RT \cdot CT} .$$

**Indutor do circuito de potência** – Transfere a tensão induzida para a saída quando o MOSFET entra no estado de corte. A tensão de saída do conversor DC/DC é a soma da tensão indutiva com a tensão de entrada.

**Driver do MOSFET** – Tem a função de aumentar à corrente de gate, incrementando a velocidade de comutação do MOSFET.

**MOSFET** – Dispositivo chaveador de alta velocidade de comutação entre o corte e a saturação.

**Circuito de realimentação**– Obtém uma amostra da tensão de saída, onde o divisor de tensão determina o valor da tensão de saída.

**Carga-** elemento que vai consumir a energia gerada pelo circuito conversor DC/DC.

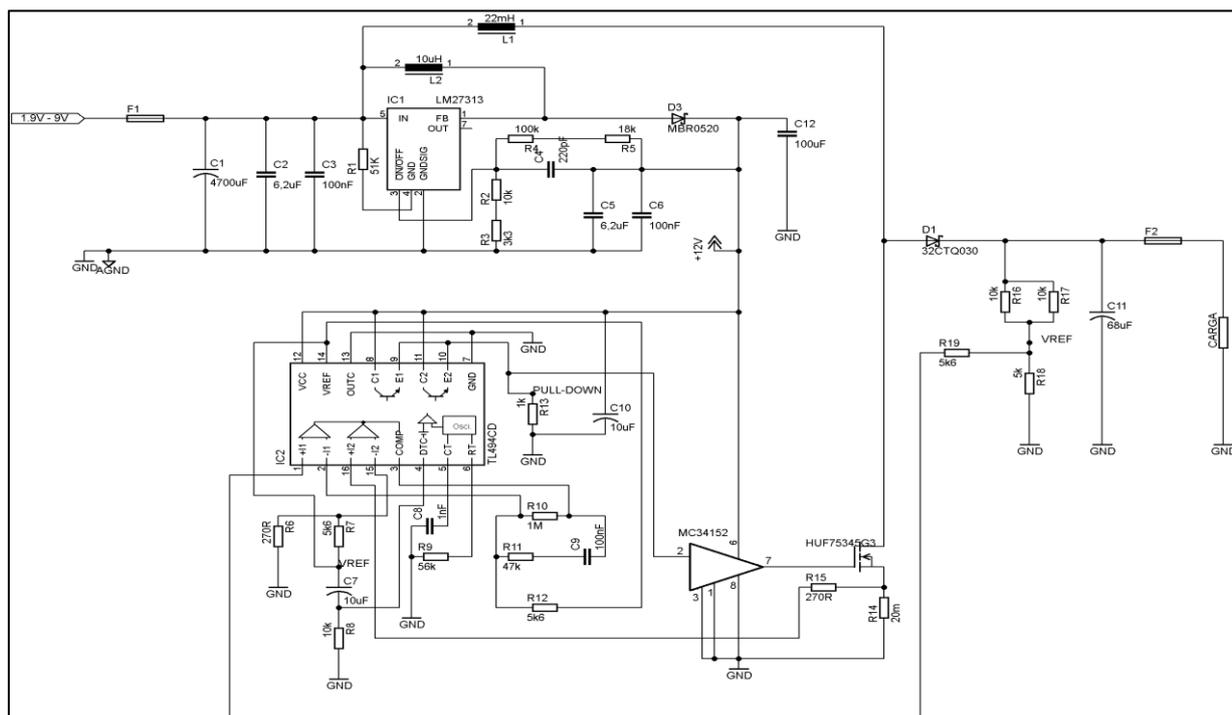


Figura 3. Esquema do circuito eletrônico do Proposto Conversor DC/DC, topologia Boost.

Os ensaios feitos com este conversor foram realizados em duas etapas: a primeira foi deixando a tensão de entrada fixa variando-se a resistência de carga (de modo que esta variação não possibilitasse a ultrapassagem os limites máximos de rendimento, potências e correntes). Analisou-se o comportamento das tensões e freqüências das formas de ondas geradas no sistema, buscando realizar os ajustes necessários, principalmente na medição dos picos de tensão na entrada e saída do conversor.

Depois de melhorada a filtragem na entrada do conversor ajustou-se uma tensão na entrada (simulando a tensão do painel solar) visualizando o nível da regulação e qualidade da tensão contínua gerada na saída do Boost primário quando desacoplado do Boost secundário. Verificou-se o comportamento da variação freqüência do circuito de controle PWM em função da resistência de carga (fixa e variável).

Foram utilizados sistema de aquisição de dados para as seguintes grandezas: temperatura do painel solar e ambiente, tensão e corrente de saída do painel solar, tensão de saída do conversor (registraram dados a cada segundo) radiação global, Iluminância ( registraram a cada minuto). As demais foram registradas pontualmente por instrumentos digitais. Os ensaios foram feitos do dia 01 a 22 de dezembro de 2009. Os dados foram processados utilizando o MAT LAB. Para aumentar a corrente do painel foram ligadas em paralelo as duas series interna de células fotovoltaicas. A figura 4 representa a bancada de teste para os ensaios em condições reais de campo.

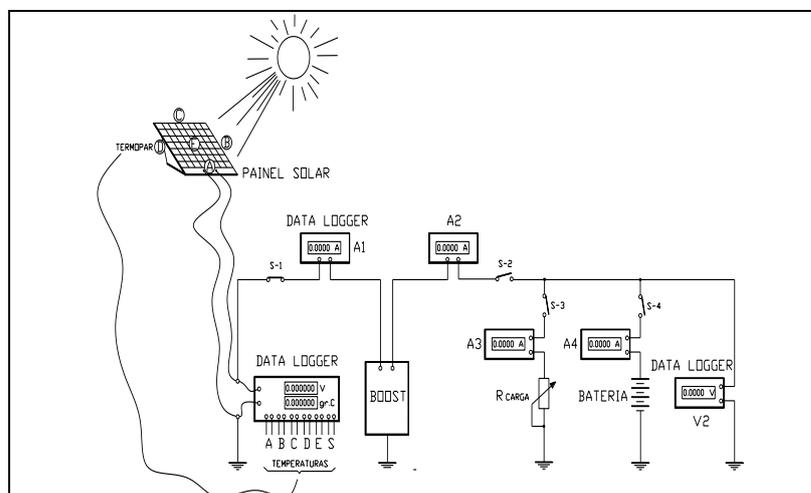


Figura4: Diagrama da bancada de testes (ensaios de campo).

O painel solar foi instalado com face voltada para o norte geográfico, a uma altura de 1 metro do solo (parte mais alta do cavalete), com ângulo de inclinação igual a latitude local (05° 45' Sul). Segundo Gnoatto (2003), os painéis solares instalados com um ângulo de inclinação igual à latitude local, evita o acúmulo de sujeira como possibilita uma maior exposição do painel a radiação solar acarretando numa maior eficiência do sistema fotovoltaico.

As medições dos níveis de radiação global foram feitas através do piranômetro da KIPP & ZONEN instalado na Estação Solarimétrica de Natal pertencente ao Laboratório de Variáveis Ambientais Tropicais. Diante da cidade de Natal disponibilizar de uma Estação Solarimétrica o nível médio de iluminância foi feito de duas maneiras. O primeiro foi realizado no local, através do luxímetro da LUTRON, modelo LX-102. O segundo foi feito através do medidor de luminosidade de luz direta e das quatro direções fabricado pela Campbell localizado na Estação Solarimétrica do Laboratório de Variáveis Ambientais Tropicais (LAVAT).

Sendo a cidade de Natal uma das localidades do Brasil com o maior número de dias de Sol, tornou-se este local favorável a realização dos ensaios de campo. De acordo a construção dos gráficos da radiação solar global, se pôde observar a presença de longos intervalos de tempo em que o valor médio medido ultrapassou um poucos mais que o valor admitido para a radiação do sol pleno, 1000 w/m<sup>2</sup>. A figura 5 representa a bancada de teste montada para realização dos ensaios de campo.



Figura 5. Instrumentação utilizada na bancada de testes dos ensaios de campo.

|                                     |                                    |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| Legenda:                            |                                    |
| 1. Resistência de Carga (reostato). | 6. Amperímetro digital             |
| 2. Voltímetro digital.              | 7. Módulos de temperatura e tensão |
| 3. Amperímetro digital.             | 8. Monitor dos gráficos.           |
| 4. Amperímetro digital.             | 9. Amperímetro Digital             |
| 5. Conversor DC/DC Proposto.        | 10. Bateria                        |

A eficiência do painel solar pode ser determinada através da equação 4. (Treble, 1980 & Overstretene Mertens, 1996).

$$n = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{I_c \cdot A} \times 100 \tag{4}$$

Onde:

I<sub>c</sub> = Irradiância solar (w/m<sup>2</sup>)

A = Área útil do painel solar ( m<sup>2</sup>)

I<sub>mp</sub> = Corrente máxima de pico ( A )

V<sub>mp</sub> = Tensão máxima de pico( V).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através dos gráficos, representados nas figuras 6 e 7 e conhecendo-se área útil do painel solar, foi possível calcular o nível da eficiência energética do painel solar quando acoplado a entrada do conversor DC/DC. Os gráficos citados representam respectivamente os dados da radiação solar média e as grandezas elétricas do painel solar(tensão, corrente

e potência). Esses valores foram determinados através dos cálculos da integração das áreas executados através das funções matemáticas disponibilizadas no software do MAT-LAB.

Pôde-se observar que a potência gerada pelo painel se comportou numa relação direta com o comportamento da radiação solar. Na grande maioria das vezes que a radiação solar reduzia seu nível de insolação a corrente de saída do painel solar aumentava enquanto a sua tensão reduzia. Verificou-se também que o conversor usado nesta experiência necessitava de um circuito que fizesse o seu transistor de alta potência (MOSFET) parar de funcionar nos intervalos em que a radiação atingia baixos níveis de irradiação solar. Esta condição de trabalho exigiu que o mesmo permanecesse no estado de saturação, forçando-o a trabalhar em regime de máxima potência, o qual poderia tê-lo levado á “queima”. Esse circuito seria o circuito eletrônico Brow - out, semelhante à função que executa nos micros controladores. Quando a tensão de alimentação dos micros controladores desce de um determinado nível, o circuito Brow - out força-os ao reset, colocando-os de volta ao funcionamento quando a mesma volta a assumir um valor aceitável.

Outro fator de grande interferência na conversão de energia foi quando a carga, acoplada a uma bateria, solicitou uma potencia sobre maior que 10 W ( 50% da potencia máxima do conversor). A partir desse ponto de trabalho, cada vez que a mesma solicitava uma potencia maior, mesmo o painel gerando 24 W (conforme dados do gráfico da figura 7), o conversor não mais foi capaz de fornecer energia para carregar tanto a carga como a bateria. A partir desse nível de dissipação de energia, o conversor começou a funcionar como uma fonte de corrente constante. A corrente da carga passou a ser a soma da corrente de saída do conversor mais a corrente gerada pela bateria.

A necessidade de uma filtragem capacitiva de boa qualidade se fez necessário para garantir a redução do ripple da tensão continua na saída, da diminuição dos picos de tensão no drive do MOSFET e da melhoria na regulagem da tensão entregue á carga. Esse ajuste foi obtido com o uso de capacitores de baixa indutância na entrada do conversor.

Percebeu-se que método de controle PWM do conversor proposto, manteve a sua frequência constante ao longo dos ensaios, os semi períodos *ton*. e *t off* se alternaram, quando um aumentava o outro diminuía, garantindo assim o período do circuito de modulação constante.

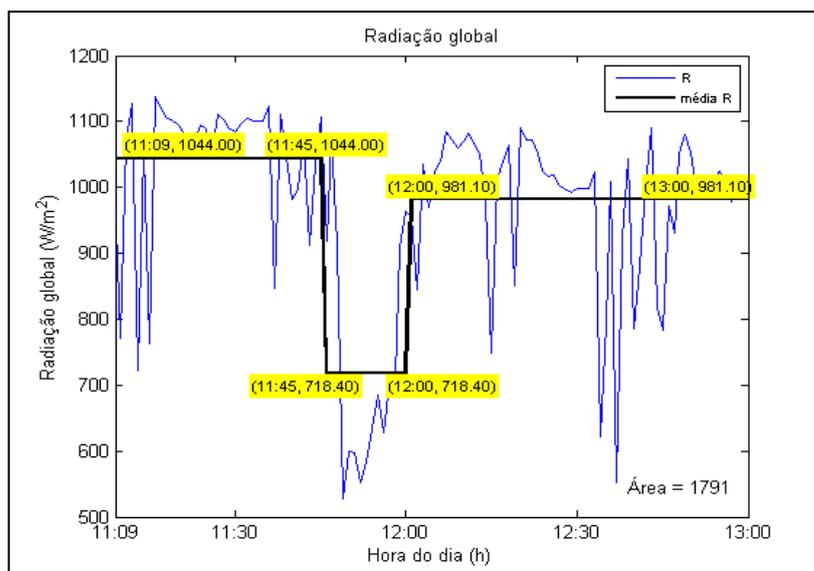


Figura6. Gráfico da radiação solar global média.

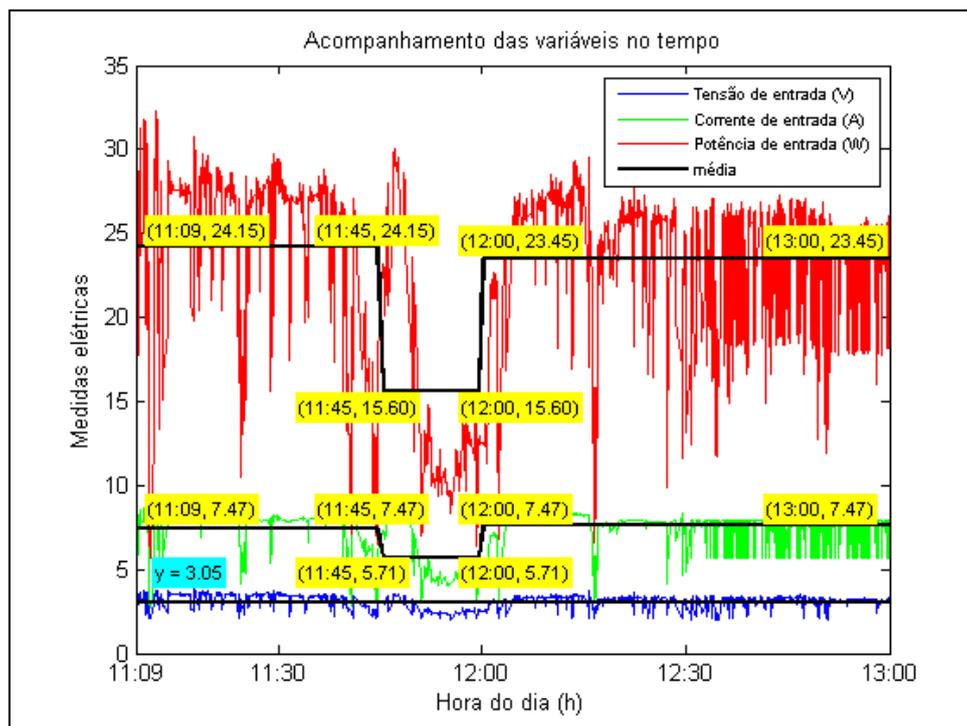


Figura 7. Gráfico dos dados de tensão, corrente e potência do painel solar.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi constatado que quando se acopla um conversor DC/DC como elemento de interface entre um painel solar e um banco de baterias, o nível de aproveitamento da conversão da energia solar em elétrica aumenta significativamente. Isso foi comprovado através do nível de eficiência energética medida entre 7 a 8 % e do rendimento do conversor que foi em média superior a 87%. O protótipo do conversor DC/DC foi projetado utilizando dispositivos fabricados com tecnologia SMD (*Surface Mounted Devices*), a qual reduziu o espaço físico da placa de circuito impresso, apresentando uma boa estabilidade da tensão fornecida à carga.

#### 5. AGRADECIMENTO

Agradecemos a UFRN, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN e a CAPES que junto ao IFBA concederam a bolsa por cinco meses a Sara Maria Freitas de Alcântara.

#### 6. REFERÊNCIAS

- ASIF. Asociación de La Industria Fotovoltaica. Solar Generation V, 2008, "Electricidad Solar para Más de Mil Millones de Personas y dos Millones de Puestos de Trabajo para el Año 2020".
- Bazzo E., Ruther R., 2001, "Viabilidade de um sistema híbrido diesel/fotovoltaico para a Região Norte do Brasil." *Eletricidade Moderna*, , pág. 38-48.
- Bissochi, F., Lamounier, E., 2002, "Utilizando Técnicas de Realidade Virtual Para o Estudo da Conversão de Energia Solar em Energia Elétrica". Uberlândia:Universidade Federal de Uberlândia ,Faculdade de Engenharia Elétrica :Disponível em 26/12/2009:  
<http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/CLAGTEE2003/Papers/RNCSEP%20B-074.pdf>
- Brito, M.C and Vallêra, A., 2006, "Meio século de história fotovoltaico"
- CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Energia Solar: Princípios e Aplicações. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em: dez 2005.
- Donato, C.J., Ferriani, V.M.P., Santos, B.P., Guimarães, E.J.F., Junior, C.L.N., D'Amore, R. and Ababo, G.J., 2006, "Anais do 12º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XII ENCITA", Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil, Outubro, 16 a 19.
- Gnoatto, E., 2003, "Desempenho de painel fotovoltaico para geração de energia elétrica na região de Cascavel". Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)- UNIOESTE.
- IEA. International Energy Agency, 2006, "PVPS Annual Report".
- Jannuzzi, G.M., Varella, F.K.O.M and Gomes, R.D.M., 2009, "Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação", International Energy Initiative.

- Junior, E.M.S., 2004, “Sistema Fotovoltaico para iluminação em horário de Ponta”. Dissertação(mestrado em Engenharia elétrica) –UFCE , Fortaleza.
- Rosembach, R. H., 2004, “Conversor CC-CC Bidirecional Buck-Boost, atuando como Controlador de Carga de Baterias em um Sistema Fotovoltaico”.
- Sá, R.M.F., 2008, “Circuito de Interface para Ligação de Painel Fotovoltaico a Cargas”. Dissertação(mestrado em Engenharia Elétrica)-Universidade do Minho - Portugal.Disponível em 10.03.2010 pelo site: <http://intranet.dei.uminho.pt/gdmi/galeria/temas/pdf/38037.pdf>.
- Treble, F. C., 1991, “Generating electricity from the sun”. New York: Pergamon Press.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

### ABSTRACT

#### PERFORMANCE ANALYSIS OF A LOW VOLTAGE PHOTOVOLTAIC PANEL COUPLED TO A DC-DC CONVERTER: BOOSTER TOPOLOGY

Sara Maria Freitas de Alcântara, [sara.kawa@uol.com.br](mailto:sara.kawa@uol.com.br)<sup>1</sup>  
Raimundo Jorge Abreu de Jesus, [rjorge@ifba.edu.br](mailto:rjorge@ifba.edu.br)<sup>1</sup>  
Cleiton Rubens Formiga Barbosa, [cleiton@ufrnet.br](mailto:cleiton@ufrnet.br)<sup>2</sup>  
Francisco de Assis Oliveira Fontes, [franciscofontes@uol.com.br](mailto:franciscofontes@uol.com.br)<sup>2</sup>  
Andres Ortiz Salazar, [andres@dca.ufrn.br](mailto:andres@dca.ufrn.br)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Rua Emídio dos Santos, s/n, Salvador-BA.

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Campus Universitário, Laboratório de Energia, NTI, s/n, Natal-RN.

**Abstract.** High reliability solar panels generate energy in low voltage, mainly due to reduction of series associations in the photovoltaic cells configurations. The low voltage generation require high efficiency DC / DC converters devices, enabling increase and regulate the output voltage. This study analyzes the performance of a 75W photovoltaic panel, configured to generate a 8.5 V opened voltage with a short circuit current of 8.8 A, mounted in the configuration of isolated PV system, with and without energy storage , taking as an interface element a topology Booster DC-DC converter. The converter was fabricated using integrated circuit technology SMD (Surface Mounted Devices) that regulates its output voltage of 14.9 V, with an efficiency of 87%, available to load the maximum power of 20.88 W. The system was installed and instrumented for measurement and data acquisition: lightness (light meter LUTRON), mean global radiation (INPE data –Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), solar panel temperatures, ambient temperature and output voltage of photovoltaic module (National Instruments data acquisition, Data Logger, model NI c DAQ 9172). The output voltage of the DC-DC converter (digital multimeter with data acquisition, MINIPA BRYMEN, model ET-4090) and the input and output currents (Digital Multimeters, MINIPA, model ET 2907). The set of photovoltaic was initially tested in the laboratory (simulating its operation under ideal operating conditions) and then subjected to testing in real field conditions. The panel inclination angle was set at 5.5 °, compatible with the latitude of Natal. The results showed that solar radiation, luminosity, temperature and the value of load resistance greatly influenced in the level of power generated by photovoltaic module.

**Keywords:** solar energy, photovoltaic panel, converter dc/dc boost, switching power supply.

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.