

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O CONVERSOR BOOST TRADICIONAL E O CONVERSOR BOOST ENTRELAÇADO UTILIZANDO A TÉCNICA DE MPPT P&O PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

FERNANDO M. DE OLIVEIRA, GABRIEL WEISS

*Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Universitário Dinâmica das Cataratas - UDC
Rua Castelo Branco, 349, Centro, Foz do Iguaçu-PR, CEP 85852-010*

E-mails: fernandomarcos.eng@hotmail.com, gabrielweiss@live.com

Abstract— This paper presents a comparative study between DC-DC voltage converters applied in grid-connected photovoltaic systems. Photovoltaic systems have low efficiency and a voltage level that must be adjusted for applications in grid tie. Voltage-step up converters are responsible for the suit of the voltage level and must present a good efficiency and response to the photovoltaic system. Among the voltage converters most commonly used in photovoltaic systems are the conventional boost converter and the interleaved boost converter. For the purpose of comparative analysis in this work was implemented by simulation these two converters along with the technique of maximum power tracking Perturb and Observe (P & O). Flow efficiency, system dynamics and traceability were analysed.

Keywords— Converters step up, Pv systems , MPPT, Efficiency, grid tie.

Resumo— Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre dois conversores CC-CC elevadores de tensão utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Os sistemas fotovoltaicos apresentam baixa eficiência e um nível de tensão que deve ajustado para aplicações em conexão com a rede. Os conversores elevadores de tensão são os responsáveis pela adequação do nível de tensão e devem apresentar uma boa eficiência e resposta ao sistema fotovoltaico. Dentre os conversores elevadores de tensão os mais empregados em sistemas fotovoltaicos são eles o conversor *boost* convencional e o conversor *boost* entrelaçado. Para fins de análise comparativa neste trabalho foi implementado via simulação estes dois conversores juntamente com a técnica de rastreamento de máxima potência Perturba e Observa (P&O). Foram analisadas a eficiência dos conversores, a dinâmica do sistema e a rastreabilidade.

Palavras-chave— Conversores elevadores, sistemas PV, MPPT, eficiência, conexão com a rede elétrica

1 Introdução

A matriz energética atual é composta predominantemente por combustíveis fósseis. Carvão, petróleo e gás natural são responsáveis por mais de 67% da geração de energia mundial (EPE, 2016). A queima dos combustíveis libera na atmosfera o dióxido de carbono (CO₂) o qual provoca o aquecimento do planeta o chamado efeito estufa. Além do mais, por se tratarem de fontes não renováveis, a sua utilização é limitada.

Para sanar os problemas relacionados a sustentabilidade, pesquisadores tem investido esforços na busca de uma geração de energia menos agressiva ao meio ambiente, aprimorando técnicas e eficiência na geração e condicionamento de energias como eólica, solar, biomassa e das marés, recursos estes inesgotáveis.

Segundo o MME (2017), o Brasil ocupa a 4^o posição do ranking mundial de geração de energia renovável. Contudo, mesmo com a maior parte de sua energia sendo renovável, o Brasil apresenta um potencial ainda em crescimento na parte de geração fotovoltaica e desenvolvimento tecnológico (CEPEL e CRESESB, 2014).

A fonte de energia alternativa fotovoltaica, a qual se destaca sem dúvida por ser uma das fontes primárias menos poluentes, se sobressai também por ter grande vida útil ser de fácil manutenção e não emitir poluentes durante a geração, podendo ser instalada no local de consumo, reduzindo o custo com transporte de energia, possibilitando que a eletricidade chegue a

regiões remotas além de ter baixo impacto na fauna e flora (RIBEIRO, 2011).

A utilização de sistemas fotovoltaicos (PV - *Photovoltaic*) caracteriza-se como uma das fontes de energia renováveis bastante cotadas para a contribuição de geração de energia elétrica na matriz nacional. Além disso, estas possuem alta confiabilidade. Contudo, muitos países têm investido em sistemas PV conectados à rede elétrica, por causa dos benefícios encontrados no suprimento extra de energia (BANGYIN, SHANXU e TAO, 2011) (LI et al, 2011) (AGORRETA et al, 2011) (SERBAN, SERBAN, 2010).

Os arranjos PV apresentam curvas características não lineares IxV (Corrente por Tensão), as quais são fortemente influenciadas pelos fatores climáticos como de radiação solar e temperatura (CRUZ, CASARO, 2008).

Outro fator importante a ser considerado está relacionado com o rendimento das células solares, que normalmente são baixos situando-se, na maioria das vezes, entre 11% e 16,5% em aplicações comerciais, dependendo do material utilizado para sua fabricação (CEPEL e CRESESB, 2014) (INMETRO, 2011).

Devido a esse baixo rendimento, e para o melhor aproveitamento da energia elétrica gerada por um arranjo PV, os componentes utilizados para o condicionamento desse tipo de energia (Conversores) devem apresentar altos rendimentos e além de técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking - MPPT*) devem ser exploradas (BRITO et al, 2013). Um destes métodos de *MPPT* é

conhecido por Perturba e Observa (*Perturb & Observe - P&O*). Este método, além de possuir um bom rastreamento de potência é também de fácil implementação (YOUNG-HYOK, 2011).

A tensão de saída de arranjos fotovoltaicos é relativamente baixa, normalmente situada entre 12V e 40V. Portanto, para sua utilização, muitas vezes é necessário um estágio de elevação de tensão para adequação ao nível requerido pelos inversores de tensão conectados à rede elétrica. A opção tradicional é a conexão de PV's em série (HUTCHENS, 2010). Todavia, transtornos em relação à incompatibilidade dos módulos em grandes sistemas e eventuais pontos de sombreamento, especialmente em áreas urbanas, interferem negativamente na potência de saída (LI e HE, 2011). Nessas situações é mais viável a utilização da conexão paralela, a qual, contudo, não eleva a tensão na saída. Pode-se, porém, evitar as desvantagens já mencionadas conectando um conversor CC-CC na saída do arranjo fotovoltaico. Além de, permitir que sistemas de microgeração com uma quantidade reduzida de painéis possam ser conectados na rede.

Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre duas topologias de conversores elevadores de tensão que podem ser utilizadas a fim de elevar a tensão contínua disponibilizada pelos painéis fotovoltaicos, observando a rastreabilidade da técnica de MPPT P&O, e esforços de corrente e tensão frente, para utilização em inversores conectados à rede elétrica. As topologias apresentadas neste trabalho são: *boost* tradicional e o conversor *boost interleaved* (Entrelaçado).

2 Conversores c.c-c.c elevadores de tensão

2.1 Conversor boost tipo clássico

A Figura 1 apresenta a topologia clássica do conversor c.c-c.c elevador de tensão, neste tipo de conversor são necessários apenas quatro elementos para seu funcionamento, sendo eles: indutor, capacitor, diodo e uma chave de potência.

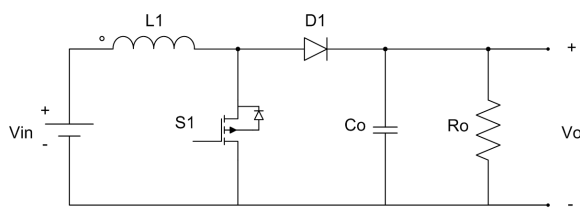


Figura 1. Conversor *boost* clássico c.c-c.c

Neste conversor a tensão de saída é sempre maior ou igual que a tensão de entrada, por isso também recebe o nome de *step up* ou *boost*. Como em seus terminais de saída a tensão é maior que a de entrada, sua corrente de saída é atenuada. A equação 1 apresenta a relação de ganho do conversor *boost*, onde D é o ciclo de trabalho do conversor.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (1)$$

Segundo Pereira, 2012 no modo de condução contínua deste conversor possui dois estados: (a) Estado 1 - Ocorre quando a chave está fechada, ou seja, conduzindo. A corrente circula pela bobina, está é magnetizada, sendo carregada com a energia da tensão de entrada. (b) Estado 2 - Ocorre quando a chave está aberta. Durante esta etapa o diodo começa a conduzir e a bobina é desmagnetizada, assim, a fonte e a bobina irão fornecer energia para a carga aumentando a tensão de saída.

2.4 Conversor boost tipo entrelaçado

Neste tipo de conversor seu modo de operação é semelhante com o conversor *boost* convencional, e está representado pela Figura 2. A relação de tensão de entrada e saída é a mesma.

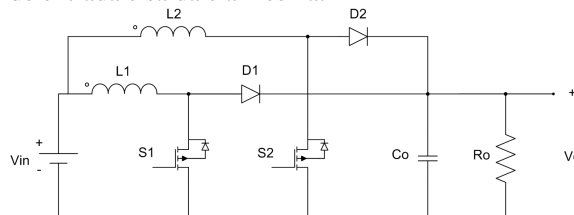


Figura 2. Conversor entrelaçado

Para a topologia entrelaçada indutores, chaves e diodos podem ser adicionados formando células ou “braços” em paralelo ao conversor *boost* convencional. É necessário que as células estejam operando na mesma frequência de chaveamento, mas defasados em uma relação de $2\pi/n$, sendo n o número de células em paralelo como mostra a Figura 3 (LE e HE, 2011).

Devido a esta característica a *ripple* da corrente de entrada, *ripple* da tensão de saída e dimensão dos componentes passivos podem ser reduzidos. Contudo, em razão da estrutura em paralelo as perdas nas chaves de comutação aumentam de acordo com o número de dispositivos de comutação (NEWLIN, RAMALAKSHMI e RAJASEKARAN, 2013).

Além das vantagens citadas anteriormente este tipo de topologia traz também as seguintes vantagens: Aumento da frequência, redução de filtros, cancelamento das harmônicas entre as células e baixa interferência eletromagnética. Como o conversor nessa topologia é ligado em paralelo, isto irá acarretar a divisão da corrente de entrada, assim diminuindo os indutores e a redução das perdas ôhmicas (KOLLURI; NARASAMMA, 2013).

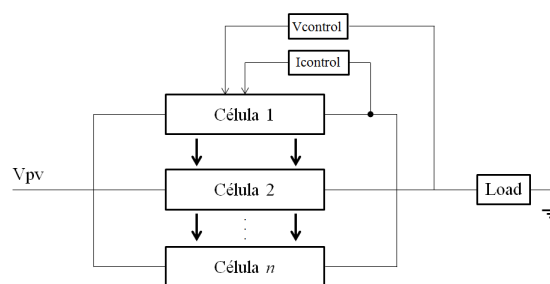


Figura 3. Conversor entrelaçado com “n” níveis

3 Características dos sistemas PV

3.1 Células fotovoltaicas

Os painéis fotovoltaicos são formados por células fotovoltaicas conectadas entre si formando os módulos. As células fotovoltaicas podem ser representadas por uma fonte de corrente com um diodo em ante paralelo, com uma resistência série e outra em paralelo (CASARO; MARTINS, 2008), como mostra a Figura 4. A saída de tensão e corrente de uma célula fotovoltaica não é linear, consequentemente a potência em seus terminais também não. A curva característica que representa a tensão em relação a corrente e a potência de saída de uma célula fotovoltaica em relação à tensão pode ser observada na Figura 5.

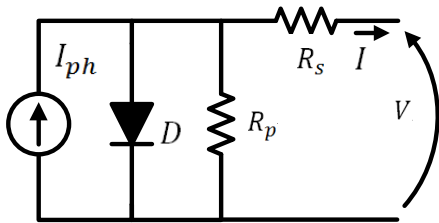


Figura 4. Modelo célula fotovoltaica

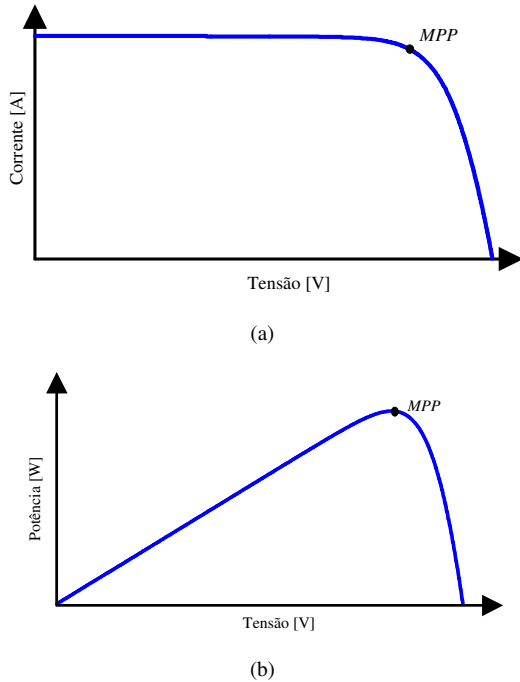


Figura 5. Curva característica da célula fotovoltaica (a) Tensão x Corrente (b) Tensão x Potência

As equações que representam a corrente de saída de uma célula fotovoltaica podem ser dadas por (2), (3), (4) e (5).

$$I_{ph} = [I_{sc} + \alpha(T - T_r)] \frac{G_{sun}}{1000} \quad (2)$$

$$I_r = I_{rr} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 e^{\left[\frac{qE_G}{\eta k} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (3)$$

$$I_{rr} = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{\frac{qV_{oc}}{e\eta k T_r}} \quad (4)$$

$$I = I_{ph} - I_r \left[e^{q \left(\frac{V + IR_s}{\eta k T} \right)} - 1 \right] - \frac{(V + IR_s)}{R_p} \quad (5)$$

Onde V é a tensão da célula fotovoltaica, I_{ph} , I_r e I_{rr} são a fotocorrente, a corrente reversa de saturação e a corrente reversa do diodo; R_s e R_p são as resistências série e paralela respectivamente; q a carga do elétron; η o fator de idealidade da junção p-n; k é a constante de Boltzman; T representa a temperatura ambiente em Kelvin; G_{sun} a radiação solar incidente sobre a célula; I_{sc} a corrente de curto circuito.

3.2 Técnica de MPPT P&O

Dentre várias, uma das técnicas bastante utilizada para a realização de MPPT é o algoritmo conhecido por P&O. O princípio de funcionamento deste método está na busca do ponto de máxima potência observando as variações de tensão e potência do painel, onde sua operação consiste em incrementar ou decrementar o sinal de saída do referido algoritmo (BRITO et al., 2013). O fluxograma deste método está mostrado na Figura 6.

O início do algoritmo é feito por meio das leituras de corrente e tensão do painel, onde em seguida é calculada a potência. Na sequência, são verificadas as variações de potência e tensão obtidas pela comparação das grandezas atuais com aquelas encontradas no passo anterior. Após esse processo, os sinais das diferenças de potência e tensão são verificados. Com isso, se a potência do arranjo fotovoltaico aumenta e a tensão variar o sistema de controle muda o ponto de operação nesse sentido, caso contrário muda no sentido oposto. Para que isso ocorra é incrementado um valor de referência Ref , que pode ser o valor da razão cíclica aplicada diretamente na chave do conversor, ou a referência de tensão e/ou corrente do controle pretendido.

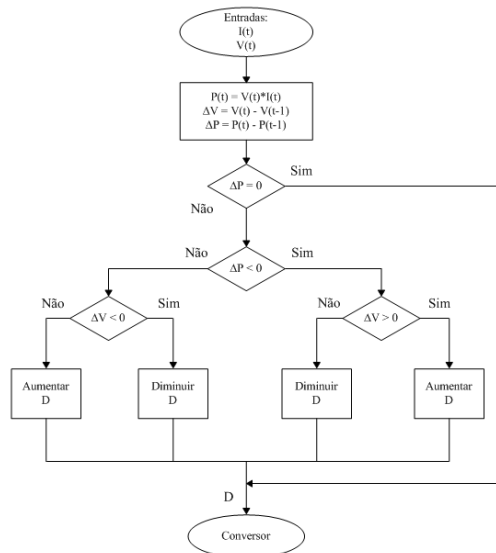


Figura 6. Fluxograma da técnica de MPPT-P&O

De acordo com a lógica do fluxograma da Figura 6, o incremento ou decremento da variável D deve ser ajustado de forma a reduzir oscilações bruscas no sistema e otimizar a busca do ponto de máxima potência.

3.3 Descrição do sistema PV

Neste trabalho será considerado uma *string* de 4 painéis para avaliar o desempenho dos conversores *boost* convencional e *boost interleaved* onde os dois serão controlados pela técnica P&O de rastreamento da máxima potência. O sistema PV será submetido a uma radiação solar de $1000W/m^2$, $700W/m^2$ e $500W/m^2$ com uma temperatura de $25^{\circ}C$.

A Figura 7 apresenta a potência máxima disponível no arranjo fotovoltaico considerando os 3 diferentes níveis de radiação solar.

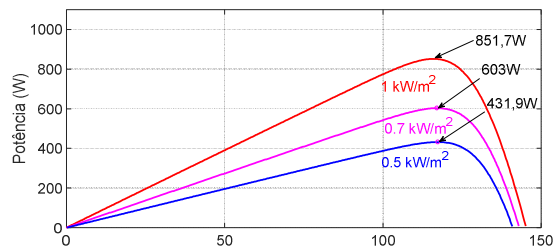


Figura 7. Potência disponível no sistema fotovoltaico considerando $1000W/m^2$, $700W/m^2$ e $500W/m^2$.

A Tabela 1 mostra os parâmetros dos módulos fotovoltaicos utilizados neste trabalho.

Os sistemas analisados estão representados na Figura 8 e os parâmetros utilizados nos conversores estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 1. Parâmetros dos módulos fotovoltaicos em condições de teste padrão $1000W/m^2$ e $25^{\circ}C$

Parâmetro	Valor
Potência máxima por módulo	213,15W
Número de células por módulo	60
Tensão de Circuito Aberto	36,3V

Corrente de curto-circuito	7,84A
Tensão no ponto de máxima potência por módulo	29V
Corrente no ponto de máxima potência	7,35A

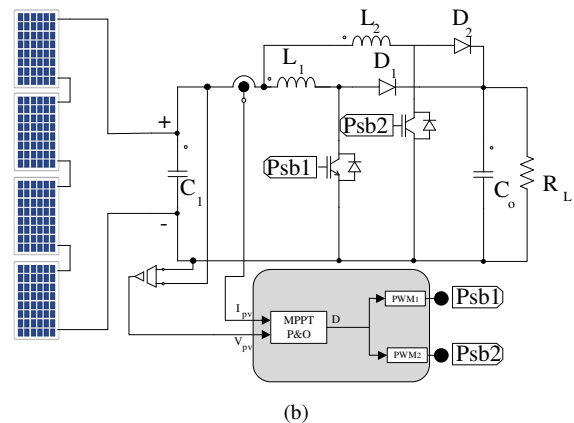
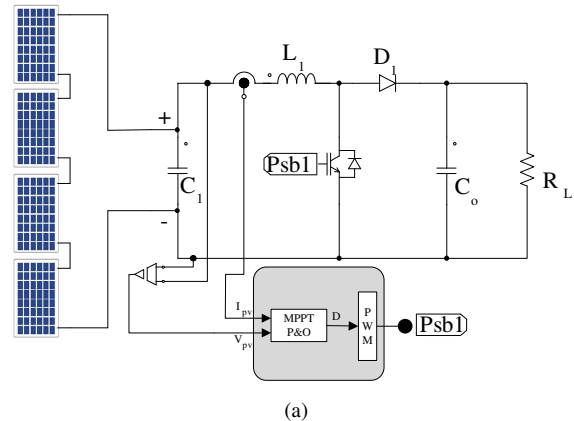


Figura 8. Sistema Fotovoltaico (a) com conversor *boost* convencional e (b) com *boost interleaved*

Tabela 2. Parâmetros dos conversores implementados para avaliação do sistema fotovoltaico.

Parâmetro	Valor
Frequência de Chaveamento	50kHz
Indutor L_1	13,3mH
Indutor L_2	13,3mH
Capacitor C_1	100 μ F
Capacitor C_o	1,7905 μ F
Resistência de Carga R_L	46,9153 Ω
Incremento de passo da razão cíclica do P&O	0,0001

4 Resultados de Simulação

O sistema fotovoltaico em estudo foi implementado no software MatLab/Simulink®. A figura 9 mostra a corrente que circula no indutor do conversor *boost* convencional comparada com as correntes do *boost interleaved* considerando três níveis diferentes de radiação solar: $1000W/m^2$, $700W/m^2$ e $500W/m^2$ com uma temperatura de $25^{\circ}C$. Pode-se observar que

o *boost* convencional tem uma resposta mais lenta quando comparado com o *boost interleaved* no início do rastreamento da máxima potência do sistema. Além de, durante as transições de radiação solar apresentar maior oscilação de corrente.

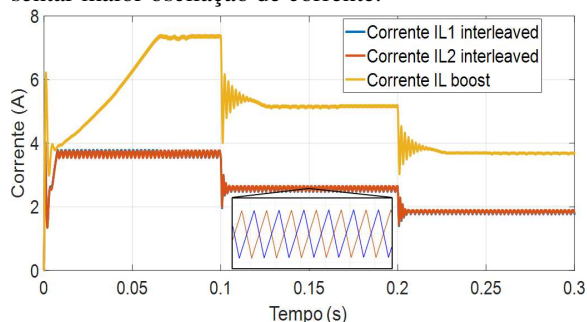


Figura 9. Corrente drenada dos painéis fotovoltaicos que circulam pelos indutores dos conversores *boost* e *boost interleaved*.

A figura 10 apresenta a potência drenada do sistema fotovoltaico comparada com a potência entregue a carga considerando a topologia *boost* convencional. Apesar de, o *boost* convencional apresentar uma resposta mais lenta, a sua eficiência permanece elevada ficando na casa de 98%.

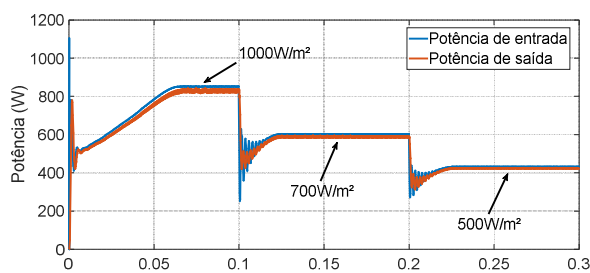


Figura 10. Potência drenada do sistema fotovoltaico e potência entregue a carga considerando o conversor *boost* convencional.

Já a figura 11 apresenta a potência drenada do sistema fotovoltaico comparada com a potência entregue a carga considerando a topologia *boost interleaved*. A eficiência desta topologia também foi elevada na faixa de 99%.

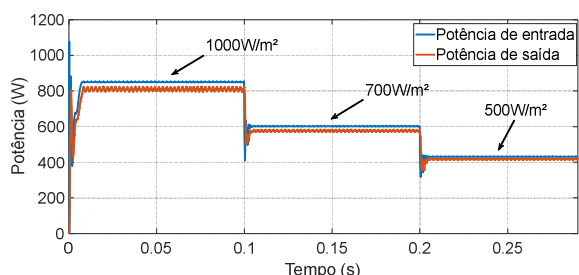


Figura 11. Potência drenada do sistema fotovoltaico e potência entregue a carga considerando o conversor *boost interleaved*.

A tabela 3 mostra a eficiência de rastreamento para cada topologia estudada considerando os três casos de radiação apresentados. Ambas as topologias apresentaram uma alta taxa de rastreamento, que relaciona a potência disponível no arranjo fotovoltaico e a potência real extraída. Apenas o conversor *boost* apresentou

uma baixa rastreamento no início da busca do MPPT, ficando na faixa de 86%.

A eficiência pode ser definida através da potência total extraída pelo sistema pela potência máxima fornecida pelos painéis.

Tabela 3. Eficiência da rastreamento das topologias *boost* e *boost interleaved* aplicado em sistemas fotovoltaicos

Eficiência		
Casos	<i>Boost</i>	<i>Boost Interleaved</i>
Caso 1 - 1000W/m ²	0,8638	0,9832
Caso 2 - 700W/m ²	0,9756	0,9945
Caso 3 - 500W/m ²	0,9781	0,9956
Rastreabilidade Total	0,9391	0,9911

5 Conclusão

Neste trabalho foi apresentado uma análise comparativa entre duas topologias de conversores cc-cc elevadores de tensão: *boost* convencional e *boost* entrelaçado aplicados em sistemas fotovoltaicos. Os dois conversores foram submetidos as mesmas características e condições de teste.

Observa-se que o conversor *boost* convencional apresenta uma resposta mais lenta e uma maior oscilação na potência extraída do sistema PV em comparação ao *boost* entrelaçado. Ainda, a eficiência considerando a rastreamento do sistema ficou mais elevado considerando o *boost* entrelaçado (99%) já o *boost* convencional apresentou uma eficiência global de (93%). Isso indica que, apesar do sistema com conversores *boost* entrelaçado apresentarem um número maior de componentes, e com isso um custo mais elevado, quando se busca uma maior eficiência global do sistema, o conversor pode ser uma boa opção.

Referências Bibliográficas

- Agorreta J. L., M. Borrega, Lo, x, J. pez, and L. Marroyo, "Modeling and control of N-paralleled grid-connected inverters with LCL filter coupled due to grid impedance in PV plants," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 3, pp. 770–785, Mar. 2011.
- Bangyin L., D. Shanxu, and C. Tao, "Photovoltaic DC-building-modulebased BIPV system-concept and design considerations," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 5, pp. 1418–1429, May 2011.
- Brito, M.A.G.; Galotto, L.; Sampaio, L.P.; de Azevedo e Melo, G.; Canesin, C.A, "Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions*, vol.60, no.3, pp.1156,1167, March 2013.
- CEPEL; CRESESB. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: Ediouro, 2014.

- Cruz M. D.; Casaro, Marcio M. Modelo De Arranjo Fotovoltaico Destinado a Análises em Eletrônica de Potência via Simulação. *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 13, no. 3, pp. 141-146, Agosto de 2008.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética, Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2016. Disponível em: www.epe.gov.br. Rio de Janeiro: EPE, 2016.
- Hutchens, C. L., 2010. Design and control of charge-pumped reboost converter for PV applications, Dissertação de Mestrado, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, Virginia.
- INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – Inmetro. Portaria nº 004, de 04 de janeiro de 2011; Anexo – Requisitos de avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para Energia Fotovoltaica (Módulo, Controlador de Carga, Inversor e Bateria). Brasília, Brasil: 2011.
- Kolluri S. and L. Narasamma N, "A new auxiliary current injection circuit for improved transient response of step-up/step-down DC-DC converters," *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vienna, 2013, pp. 216-221.
- Li, W. and He, X., 2011. Review of nonisolated high-step-up dc/dc converters in photovoltaic grid-connected applications, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 58(4): 1239-1250.
- Li Z, S. Kai, X. Yan, F. Lanlan, and G. Hongjuan, "A modular gridconnected photovoltaic generation system based on DC bus," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 2, pp. 523–531, Feb. 2011.
- MME. Ministério de Minas e Energia. Energia Solar no Brasil e Mundo. 2016. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/17+-+Energia+Solar+-+Brasil+e+Mundo+-+ano+ref.+2015+%28PDF%29/4b03ff2d-1452-4476-907d-d9301226d26c?version=1.3>. Acesso em: 01 de outubro de 2017.
- PEREIRA, F. M. C. Conversor CC/CC elevador para painéis fotovoltaicos. 2012. 112 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. 2012.
- RIBEIRO, R. V. Sistema fotovoltaico autônomo baseado em conversores cc-cc boost. 2011. 146 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2011.
- Serban E, H. Serban, "A control strategy for a distributed power generation microgrid application with voltage- and current-controlled source converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 12, pp. 2981–2992, Dec. 2010.
- Young-Hyok J, J. Doo-Yong, K. Jun-Gu, K. Jae-Hyung, L. Tae-Won, and W. Chung-Yuen, "A real maximum power point tracking method for mismatching compensation in PV array under partially shaded conditions," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 4, pp. 1001–1009, Apr. 2011.
- D. J. S. Newlin, R. Ramalakshmi and S. Rajasekaran, "A performance comparison of interleaved boost converter and conventional boost converter for renewable energy application," 2013 International Conference on Green High Performance Computing (ICGHPC), Nagercoil, 2013, pp. 1-6.