

Micro Geração Fotovoltaica com vistas à implantação do Programa de Geração Distribuída

Juan P. R. Balestero¹, Jacson Rodrigo Dreher², Joni Coser³ (In memoriam), Marcos Aurélio Pedroso⁴, Rafael Bregalda⁵

¹Instituto Federal de São Paulo (IFSP), Professor de Eletrotécnica, Campus Votuporanga, juan@ifsp.edu.br

²Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Professor de Eletroeletrônica, Campus Chapecó, jacson@ifsc.edu.br

³Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Professor de Eletroeletrônica, Campus Chapecó,

⁴Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Professor de Eletroeletrônica, Campus Chapecó, mpedroso@ifsc.edu.br

⁵Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Aluno de Engenharia de Controle e automação, Campus Chapecó, rafaelbregalda@hotmail.com

RESUMO

Este artigo descreve o desenvolvimento de um sistema para otimizar a operação de sistemas de geração fotovoltaicos, cuja potência de saída em uma carga variável é o parâmetro a ser otimizado. Levando isso em conta, este trabalho, realizado no Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Chapecó, apresenta a implementação de um conversor de busca do ponto de máxima potência na carga-teste, podendo servir como ponto de partida para uma futura implementação de um inversor para painéis fotovoltaicos. São apresentados resultados de testes iniciais com o algoritmo desenvolvido, avaliando as respostas do mesmo frente às variações apresentadas.

Palavras-Chave: Sistemas de geração fotovoltaicos, Conversor estático, Máxima transferência de potência.

Introdução

Diversas discussões correntes remetem ao fato de a demanda por energia elétrica estar crescendo bastante nas últimas décadas, crescimento motivado por diversos fatores que incluem o desenvolvimento da indústria e a necessidade de universalização do atendimento. A tendência é que o aumento de carga se mantenha, ou até aumente, em determinadas áreas. Uma das fontes de produção que pode ajudar a suprir a necessidade energética sem provocar grandes danos ao meio ambiente é a energia solar fotovoltaica.

Desde que o efeito fotovoltaico foi descoberto, a eficiência dos painéis solares aumentou muito, graças ao seu uso na área aeroespacial. Contudo, ainda há um custo elevado associado aos mesmos, o que dificulta a sua implantação em residências. Mesmo assim, incentivos são criados para viabilizar a instalação de painéis fotovoltaicos, o que permitirá avanços e pode reduzir esse custo de forma progressiva.

Como a geração de energia por painéis fotovoltaicos depende de condições climáticas, ocorre uma variação na potência produzida, de acordo com as variações de temperatura das

placas e da intensidade luminosa que incide sobre elas. Sendo assim, é necessária a utilização de métodos que garantam que os painéis forneçam a máxima potência possível na sua saída. Essa necessidade levou ao desenvolvimento de algoritmos capazes de encontrar o ponto de máxima potência, garantindo a eficiência da geração de energia.

Considerando esse contexto, o projeto aqui descrito teve como objetivo construir um conversor CC-CC e implementar um algoritmo de busca do ponto de máxima potência do painel fotovoltaico. A Figura 1 delimita a etapa implementada no projeto, dentro de um sistema fotovoltaico que inclui também os painéis, os conversores estáticos e a carga.

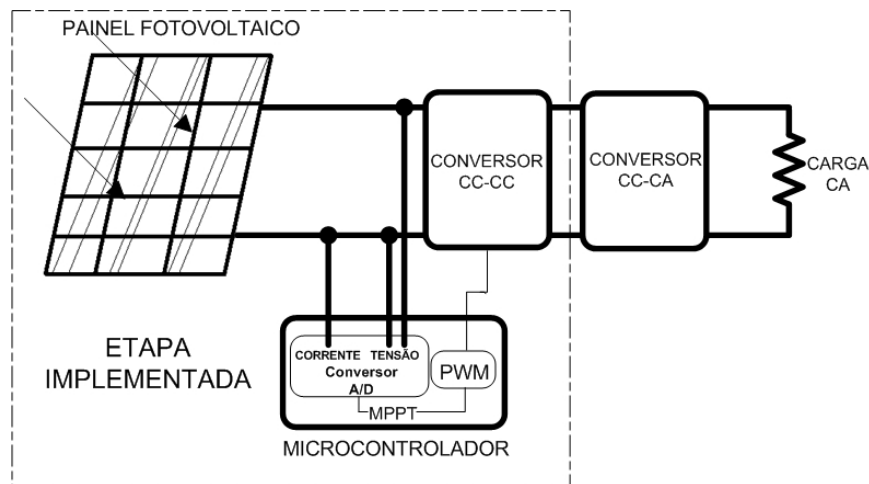


Figura 1 – Etapa de conversão implementada no trabalho

Na sequência deste artigo, na metodologia, são apresentadas as referências para a comparação entre as abordagens existentes e alguns procedimentos adotados no estudo, bem como os detalhes do projeto; em seguida, os resultados obtidos na primeira fase de testes, as discussões e as conclusões.

Metodologia

Painéis fotovoltaicos geram tensão contínua quando são expostos à luz, porém a potência máxima que pode ser fornecida depende da temperatura dos painéis e da irradiação solar. Essas características geram as curvas de potência do painel, cujo exemplo pode ser visto na Figura 2. Para o máximo aproveitamento da energia gerada, conversores CC-CC devem ser controlados por um sistema de busca do ponto de máxima potência (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*), implementados por algoritmos específicos, e, em seguida, outros conversores (CC-CA) para modular a tensão no nível desejado (BONIFACIO, 2010), também já mostrados na citada Figura 1. Esses algoritmos modulam a impedância do conversor CC-CC

para alcançar a maior potência possível, podendo melhorar o rendimento da geração em níveis que variam entre 15% e 30% (IMHOFF, 2007)

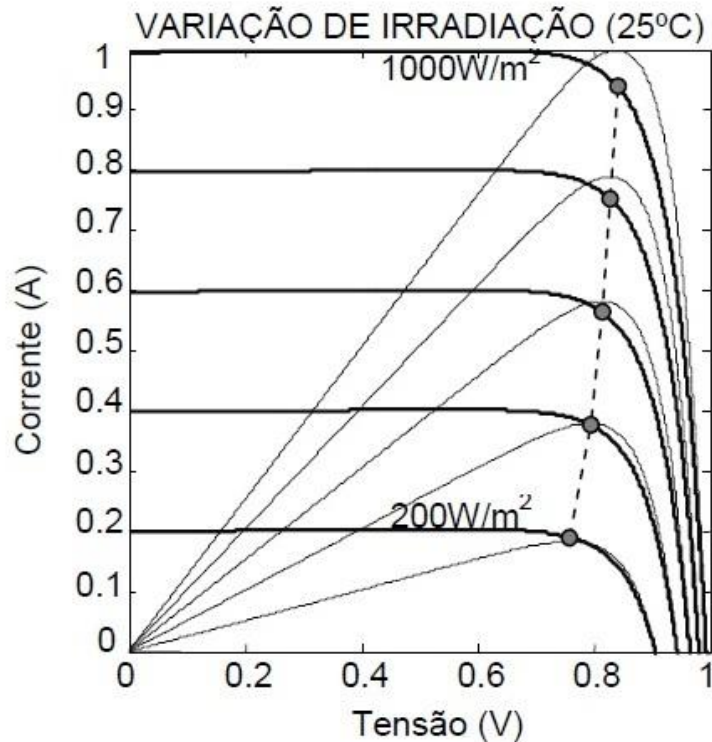


Figura 2 – Curvas de Corrente x Tensão para Variações de Irradiação
Fonte: Dreher (2012)

Técnica utilizada

As técnicas de MPPT mais utilizadas, segundo Faranda *et al.* (2008), são Tensão Constante (CV - *Constant Voltage*), Condutância Incremental (“*IncCond*” - *Incremental Conductance*) e Perturbação e Observação (“*P&O*” - *Perturbation and Observation*). As que possuem melhor eficiência, contudo, segundo Seguel (2009) e Imhoff (2007), são “*P&O*” e “*IncCond*”, sendo esta a que apresenta menor oscilação de potência. Apesar de sua implementação ser mais complexa, foi escolhida, portanto, a técnica “*IncCond*” para controlar o conversor deste trabalho.

Esta técnica utiliza a definição de que a derivada em um ponto de máximo é igual a zero, ou seja, para pequenas variações na potência e na tensão, existe um ponto onde a derivada é zero e que, conseqüentemente, será o ponto de máximo da função potência. Um modelo deste algoritmo está representado na Figura 3.

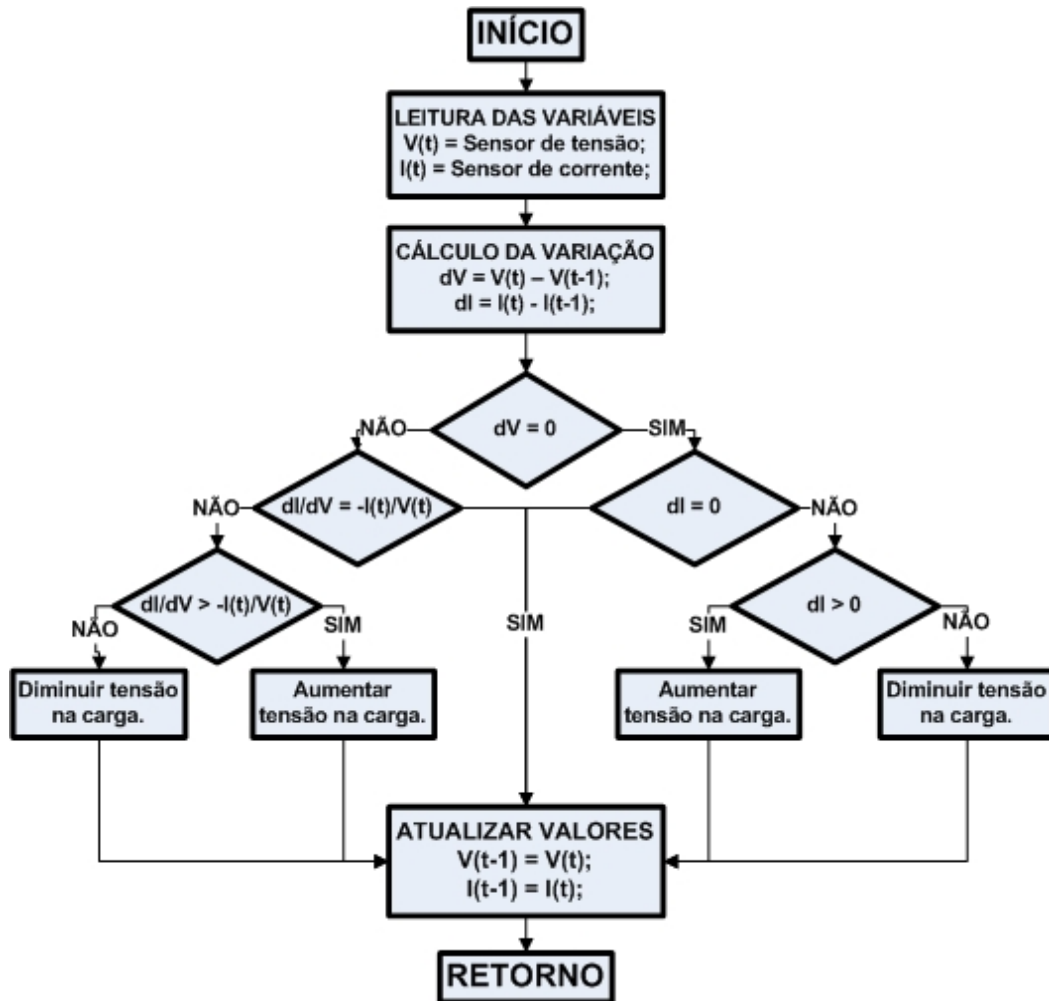


Figura 3 – Algoritmo de condutância incremental

Para que a implementação seja possível, têm-se dois blocos principais: (a) o **circuito de controle**, que deve medir a corrente e a tensão instantâneas, implementar o algoritmo de MPPT e modular o pulso do sinal empregando a técnica PWM (*Pulse Width Modulation*); (b) o **circuito de potência**, o qual irá variar os níveis de tensão e corrente CC.

Projeto do sistema

Com o objetivo inicial de monitorar a geração de energia de um conjunto de painéis fotovoltaicos, optou-se pela implementação de um sistema em corrente contínua. Dadas as facilidades de implementação, menores esforços de tensão e corrente nos semicondutores (em relação ao conversor *CC-CC Boost* ou *Buck-Boost*), optou-se pela implementação do conversor *CC Buck*.

Os painéis em que o sistema irá operar possuem as características dadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características Elétricas do Painel Solar YGE-60 CELL YL245P-29b (1.000W/m²)

Símbolo	Significado	Valor
P _{max}	Potência máxima	245W
V _{mpp}	Tensão no ponto de máxima potência	30,2V
I _{mpp}	Corrente no ponto de máxima potência	8,11A
V _{oc}	Tensão de circuito aberto	37,8V
I _{sc}	Corrente de curto circuito	8,63A

Fonte: Yingli Green Energy Holding Co. Ltd. 2013

O conjunto de dez (10) painéis será conectado em série, resultando em tensão CC de aproximadamente 300V, corrente máxima de 8,11A e uma potência máxima de 2,45kW. Os parâmetros para o projeto do conversor *Buck* são então dados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros do projeto do conversor

Símbolo	Significado	Valor
V _i	Tensão de entrada	300V
P _{i(M)}	Potência de entrada máxima	2,45kW
P _{i(m)}	Potência de entrada mínima	150W
I _(M)	Corrente de entrada máxima	8,11A
I _(m)	Corrente de entrada mínima	0,5A
F _s	Frequência de chaveamento	100kHz

Para controlar o sistema, optou-se pela utilização da plataforma física de código aberto Arduino® UNO (MONK, 2013), que conta com um microcontrolador ATmega-A328P-PU. Esse kit didático, a saber, é de fácil utilização e bastante versátil, possuindo seis portas analógicas e seis portas PWM.

As leituras de corrente foram feitas por um sensor de Efeito Hall ACS712 – 20, que é capaz de medir correntes alternadas de até 20A, sendo que, para melhorar a faixa de leitura pelo microcontrolador, foi utilizado um amplificador operacional do circuito integrado (CI) LM358. E as leituras de tensão foram realizadas por um divisor de tensão ligado ao segundo amplificador operacional do circuito integrado utilizado para amplificar o sinal da corrente.

Resultados e Discussões

Os resultados foram obtidos em bancada, aplicando-se o teorema da máxima transferência de potência. Conectou-se na saída de uma fonte CC uma impedância de fonte R_{fonte} (módulo resistivo). Entre os terminais de uma carga resistiva e da fonte CC, conectou-se o conversor *Buck*. O conversor *Buck* e a resistência de saída constituem a carga RL da fonte.

A máxima potência é fornecida pela fonte CC, quando houver o "casamento" de impedância (magnitude das duas impedâncias igual) entre a impedância da fonte R_{fonte} e a impedância da carga R_L . Um modelo simplificado desse circuito pode ser visto na Figura 4.

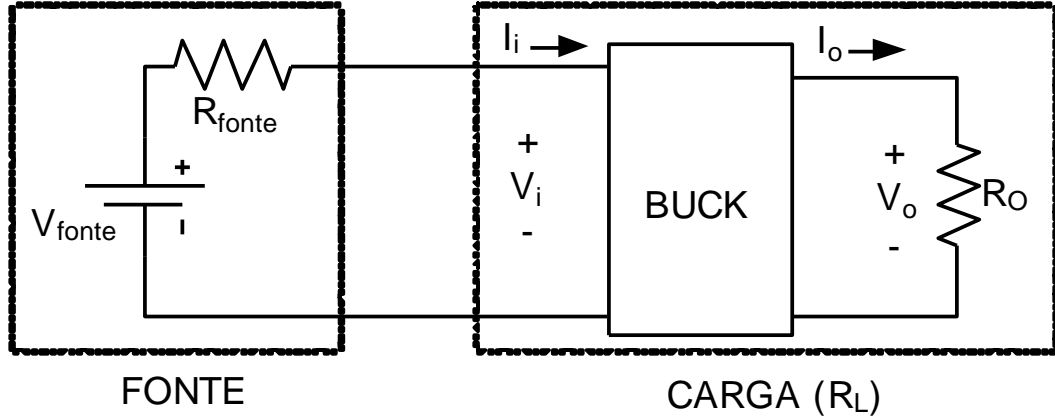


Figura 4 – Configuração do sistema para obtenção dos resultados experimentais

A impedância da carga R_L pode ser determinada pela Eq. (1):

$$R_L = \frac{V_i}{I_i} \quad (1)$$

A tensão de saída (V_o) do conversor *Buck* pode ser determinada pela equação (2):

$$V_o = DV_i \quad (2)$$

Portanto:

$$V_i = \frac{V_o}{D} \quad (3)$$

Considerando a operação do conversor sem perdas, a potência de entrada deve ser igual à potência de saída:

$$\begin{aligned} P_o &= P_i \\ V_o I_o &= V_i I_i \end{aligned} \quad (4)$$

Substituindo a equação (2) na equação (4), tem-se:

$$I_i = I_o D \quad (5)$$

Agora, substituindo as Eq. (3) e (5) na Eq. (1), obtêm-se a impedância da carga (R_L) em função da razão cíclica (D):

$$R_L = \frac{R_o}{D^2} \quad (6)$$

que leva à condição:

$$R_o < R_{fonte} \quad (7)$$

para que o conversor *Buck* possa tornar a impedância R_L igual à impedância da fonte (R_{fonte}), através da variação da razão cíclica (D).

Para facilitar a visualização dos dados, foi acrescentado ao protótipo um *display LCD* informando a razão cíclica (D) do sinal PWM, a potência na entrada do conversor e os valores de tensão e corrente.

Com as alterações feitas, puderam-se iniciar os testes do conversor, que se mostraram satisfatórios na medida em que o sistema respondeu como esperado às variações a que foi sujeito. O circuito montado pode ser visto na Figura 5, e a Tabela 3 contém alguns valores obtidos mediante testes, variando o valor das resistências.

Esses testes foram realizados mediante a variação no valor das resistências, e o algoritmo teve respostas satisfatórias em todos os casos apresentados na tabela.

Em determinadas condições, com taxas de variação extremamente rápidas, será realizada uma implementação futura de um Conversor *Buck-Boost*, tal como a abordagem sugerida por Martins (2010), que analisa esse tipo de condição relacionada a falhas com máximos e mínimos locais. Contudo, variações desse tipo são bastante improváveis de ocorrer em um sistema fotovoltaico real.

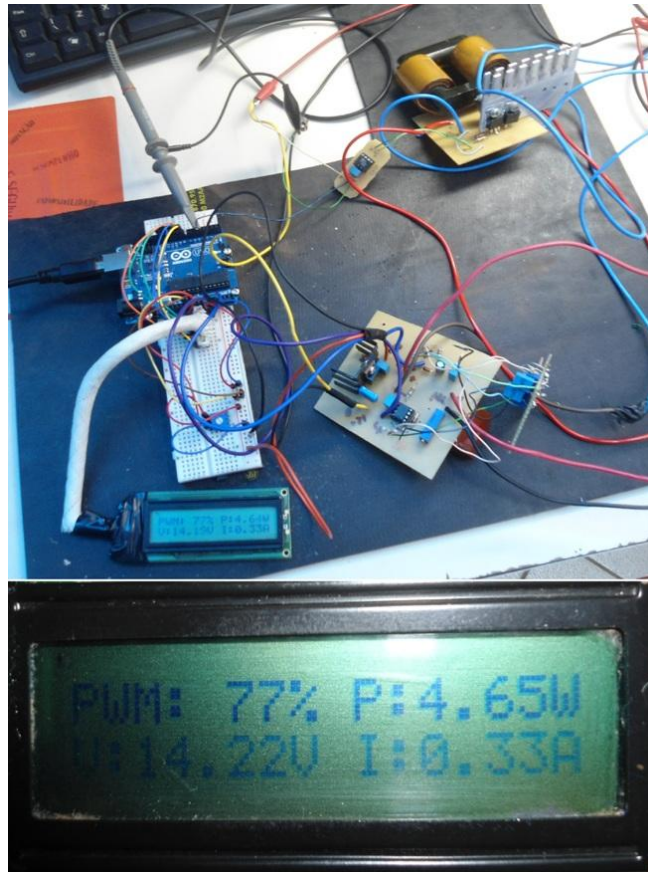


Figura 5 – Circuito montado em bancada e valores mostrados no Display LCD

Tabela 3 - Valores obtidos com $V_{\text{fonte}} = 30\text{V}$

Parâmetros		Medições		Calculado	
Rfonte(Ω)	Rcarga(Ω)	I(A)	D(%)	I(A)	D(%)
50	50	0,29	100	0,3	100
50	25	0,29	72	0,3	71
50	10	0,3	46	0,3	45
40	40	0,35	100	0,375	100
40	25	0,37	78	0,375	79
40	12,5	0,38	60	0,375	56
30	30	0,5	100	0,5	100
30	15	0,49	73	0,5	71
30	5,5	0,5	45	0,5	43

FONTE: Dados experimentais

Como o conversor utilizado é um *Buck*, inicialmente o sinal PWM deve iniciar com razão cíclica diferente de zero; pois, caso inicie em zero, a chave permanecerá aberta e não haverá variação na tensão e na corrente. Se o conversor utilizado for um *Boost*, a razão cíclica não poderá chegar à unidade, pois neste caso ocorrerá uma condição equivalente a curto-circuito na chave.

Considerações finais

A otimização de cargas para sistemas fotovoltaicos emerge um campo bastante interessante para testes e, até mesmo, para novos desenvolvimentos na área de eletrônica de potência, visando a atender os usuários futuros desses sistemas que terão demanda crescente com necessidade de aperfeiçoar a sua eficiência.

O trabalho que aqui se apresentou constitui uma etapa inicial, já testada em um protótipo físico com resultados encorajadores, que será expandida e novamente descrita em trabalhos futuros integrados ao sistema fotovoltaico a ser instalado no Campus.

Todos esses desenvolvimentos são parte de um projeto também educacional e multidisciplinar do Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC, Campus Chapecó, na área de energias renováveis.

Agradecimentos

À Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação, pela elaboração e manutenção do programa de apoio a projetos de pesquisa e inovação tecnológica.

REFERÊNCIAS

- BONIFACIO, P. J. S. Seguidor fotovoltaico: uma variação do p&o - simulação e prototipagem. **Universidade nova de Lisboa, Faculdade de ciências e tecnologia, Departamento de engenharia electrotécnica**, Lisboa, 2010.
- DREHER, J. R.. Conversores Boost-FlyBack integrados para aplicações de alto ganho de tensão. **Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**. Pato Branco, 2012.
- DS_YGE60Cell-29b_40mm_EU_EN_201211_v02.20; **Yingli Green Energy Holding Co. Ltd.** 2013.
- FARANDA, R.; LEVA,S.; MAUGERI,V. MPPT techniques for PV Systems: energetic and cost comparison. **IEEE**, 2008.
- IMHOFF, J. Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autônomos. **Universidade Federal de Santa Maria, Centro de tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica**. Santa Maria, 2007.
- MARTINS, D. Energia Solar Fotovoltaica. In SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, VII, PUCRS, PORTO ALEGRE. **Anais....** Porto Alegre, 2010.
- MONK, S. **Programação com Arduino: começando com Sketches**. Porto Alegre: Bookman (2013).
- SEGUEL, J. I. L. Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital. **Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**. Belo Horizonte, 2009.
- VILLALVA, M.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2013.
- WANG, H.; SU, J.; NAYAR, C.; ZHANG, P. Adaptive Maximum Power Point Tracker in Photovoltaic Grid-connected System. In: 2ND IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER ELECTRONICS FOR DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS. 2010. **Anais...** p. 374-377.
- YADAV, A. P. K.; THIRUMALIAH, S.; HARITHA, G. Comparison of MPPT Algorithms for DC-DC Converters Based PV Systems. **International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering**. Vol. 1, Issue 1, 2012.

Responsabilidade de autoria

As informações contidas neste artigo são de inteira responsabilidade de seus autores. As opiniões nele emitidas não representam, necessariamente, pontos de vista da Instituição e/ou do Conselho Editorial do IF-SC.