

# ESTUDO E PROJETO DE CONTROLADORES APLICADOS AOS CONVERSORES CC-CC BOOST E BOOST QUADRÁTICO EM APLICAÇÕES DE MPPT EM SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA.

Thyago F. Nascimento (EG), Eric N. Chaves (PQ).

Instituto Federal de Goiás, *Campus Itumbiara.*

Engenharia Elétrica.

## Resumo

Os painéis solares fotovoltaicos são compostos por arranjos de células solares fotovoltaicas e exibem, em seus terminais de saída, tensões e correntes dependentes da irradiância solar e temperatura ambiente. A potência de operação do painel fotovoltaico está relacionada aos seus parâmetros de saída e pode ser controlada pelo ganho estático de um conversor CC-CC, colocado entre o painel e a carga, que, por sua vez, está relacionado à sua razão cíclica. A razão cíclica do conversor CC-CC pode ser ajustada de maneira controlada, visando-se o aumento da potência extraída do arranjo fotovoltaico e, assim, o sistema passa a ter a capacidade de rastrear o ponto de máxima potência. Para aplicações de geração de energia fotovoltaica é necessário, portanto, um conversor eletrônico que realize o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) da associação de painéis fotovoltaicos. Um conversor tipicamente utilizado para tal aplicação é o conversor do tipo elevador (Boost), contudo, o ganho estático do conversor Boost é limitado pelas perdas de condução quando a razão cíclica ( $D$ ) se aproxima da unidade. Tendo em vista a necessidade de ampliar a faixa de conversão dos conversores CC-CC, foi criado o conversor Boost Quadrático, no qual o ganho de tensão possui dependência quadrática com  $D$ . Contudo, o conversor Boost Quadrático apresenta dificuldades técnicas de controle em virtude de sua dinâmica, caracterizada por ser um sistema de quarta ordem. Dessa forma, no intuito de pesquisar métodos que melhorem a controlabilidade dos conversores CC-CC em aplicações de MPPT, este projeto propôs o estudo e desenvolvimento de controladores aplicados aos conversores Boost e Boost Quadrático, avaliando seu desempenho através de resultados de simulações computacionais e de acordo com as necessidades de um sistema a ser conectado à rede elétrica.

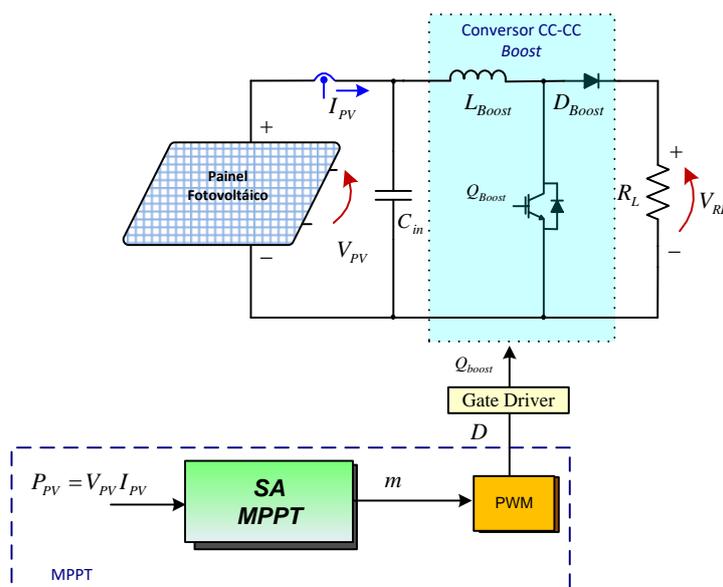
**Palavras-chave:** *Conversor Boost, Conversor Boost Quadrático, Rastreamento do Ponto de Máxima Potência, Sistemas Fotovoltaicos.*

## Introdução

Para aplicações de geração de energia fotovoltaica é necessário um conversor eletrônico que realize o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) da associação série e/ou paralela do arranjo de painéis fotovoltaicos. Um conversor tipicamente utilizado para tal aplicação é o conversor CC-CC do tipo elevador (Boost), contudo, o ganho estático do conversor Boost é limitado pelas perdas de condução quando a razão cíclica ( $D$ ) se aproxima da unidade [2]. O conversor CC-CC do tipo elevador (Boost) na configuração para aplicações em MPPT está apresentado na Figura 1.

Como se pode observar na Figura 1,  $I_{PV}$  e  $V_{PV}$  são, respectivamente, a corrente e a tensão, extraídas do painel fotovoltaico,  $D$  é a razão cíclica ou ciclo ativo da chave (IGBT) e  $P$  é a potência extraída em um dado instante de tempo. Dessa forma, sempre que houver perturbações nas variáveis de entrada, que ocorrerão em  $I_{PV}$  ou  $V_{PV}$  com o ajuste da razão cíclica, estas visam o aumento de  $P$ .

Tendo em vista a necessidade de se ampliar a faixa de conversão dos conversores CC-CC, em [3] foi apresentado o conversor CC-CC Boost Quadrático, no qual o ganho de tensão possui dependência quadrática com  $D$  sendo que outras topologias de conversores, com as mesmas características, foram apresentadas em [4] e [5].



**Figura 1** - Diagrama do circuito de um conversor CC-CC Boost conectado a um painel fotovoltaico.

Com o intuito de reduzir as perdas de comutação e emissão de ruídos eletromagnéticos (EMI), foram desenvolvidos conversores Boost Quadráticos com comutação suave em [6-9] e diferentes técnicas de controle foram apresentadas em [10-15]. Nesses estudos são propostos métodos de controle para o conversor Boost Quadrático, o qual apresenta dificuldades técnicas de controle em virtude de sua dinâmica, caracterizada por ser um sistema de quarta ordem. Aliado a isso, quando a variável a ser controlada é a tensão de entrada do conversor ( $V_{PV}$ ) – caso típico em algoritmos de MPPT que operam em malha fechada para as variáveis de interesse – a dinâmica do mesmo é marcada pela presença de polos conjugados complexos próximos ao eixo imaginário, do plano  $s$ , e dois zeros conjugados complexos no semiplano direito, que invertem a resposta temporal desse sistema, quando sob a ação de compensadores PI. Essas questões são abordadas em [16] onde é analisado o uso do conversor Boost Quadrático para o rastreamento do MPP e aplicado ao mesmo um controlador PID, somado à ação de um filtro supressor de ruído, do tipo Notch, que minimiza o efeito dos polos próximos ao eixo  $j\omega$ .

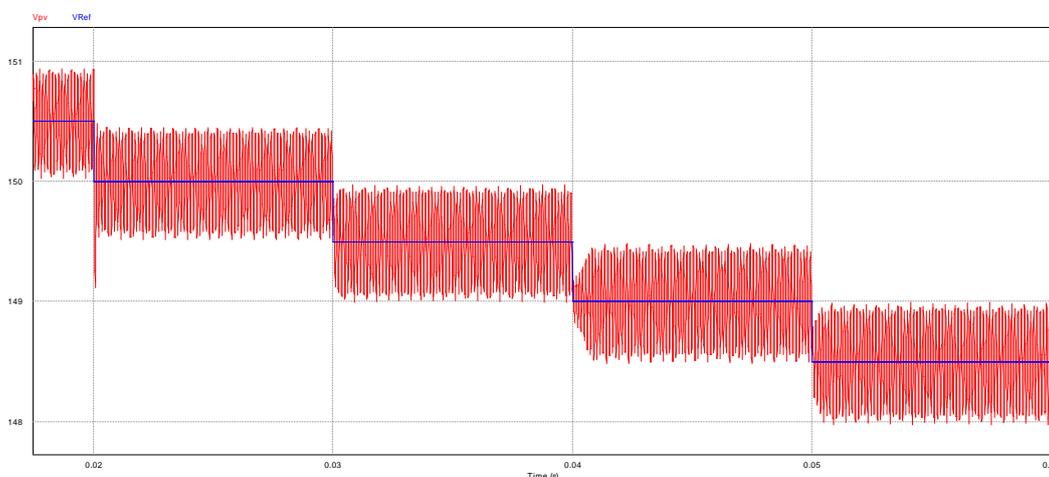
Todavia, com o intuito de pesquisar métodos que melhorem a controlabilidade dos conversores CC-CC em aplicações de MPPT, ou seja, operando em malha fechada para as variáveis  $V_{PV}$  e/ou  $I_{PV}$ , é proposto, através deste trabalho, o estudo e o projeto de controladores aplicados aos conversores Boost e Boost Quadrático, avaliando seu desempenho através de resultados de simulações computacionais, visando à verificação da viabilidade de sua aplicação em sistemas fotovoltaicos e de acordo com as necessidades de um sistema a ser conectado à rede elétrica monofásica, no tocante ao nível da tensão do barramento CC.

## Resultados e Discussão ou Relato de Caso

A primeira etapa do trabalho consistiu da modelagem do conversor Boost para o projeto do controlador adequado para a tensão de saída do arranjo fotovoltaico ( $V_{PV}$ ) que será utilizada a partir do algoritmo de MPPT. O algoritmo em questão é o P&O (perturba e observa) que opera com perturbações periódicas (isto é, incrementando ou decrementando) a tensão  $V_{PV}$  e comparando a potência de saída do sistema PV com a do ciclo de perturbação anterior ( $P_{atual}$  com  $P_{anterior}$ ). Se a tensão de operação do sistema PV alterar e a potência aumentar, o P&O move o ponto de operação do sistema PV nessa direção, caso contrário, o ponto de operação é movido



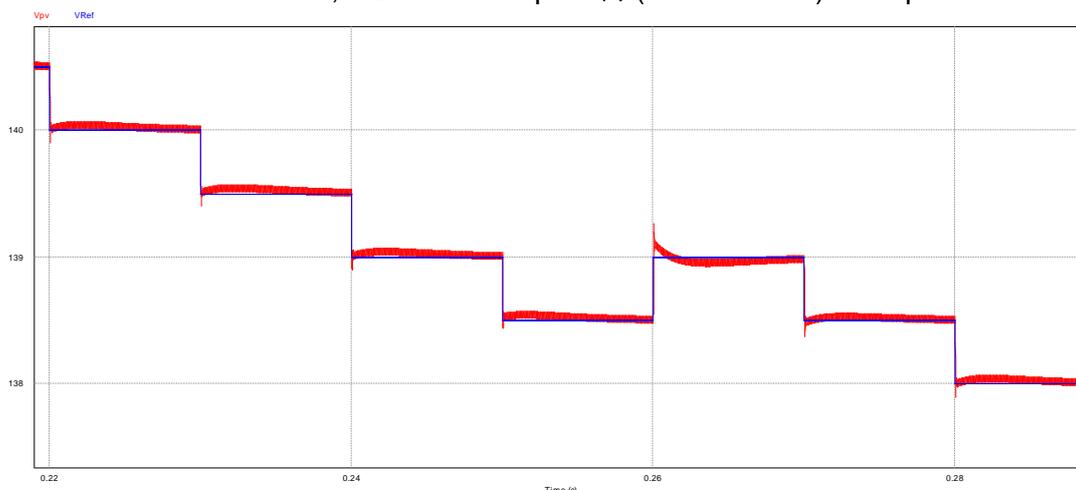
A Figura 3 mostra o resultado do MPPT alterando a tensão de referência ( $V_{REF}$  em azul) e o controlador PI (sem filtro Notch) fazendo com que  $V_{PV}$  (em vermelho) acompanhe a referência. Deve ser notado que, embora o erro em regime seja zero e o transitório seja rápido, existe uma grande oscilação em  $V_{PV}$ . A taxa de atualização do P&O MPPT é de 100 Hz e o passo em  $V_{REF} = 0,5V$



**Figura 3** – Algoritmo P&O MPPT alterando a tensão de referência ( $V_{REF}$  em azul) e o controlador PI fazendo com que  $V_{PV}$  (em vermelho) acompanhe a referência.

Fonte: Autor.

A Figura 4 mostra o resultado do MPPT alterando a tensão de referência ( $V_{REF}$  em azul) e o controlador PI com filtro Notch, fazendo com que  $V_{PV}$  (em vermelho) acompanhe a referência.



**Figura 2** - Algoritmo P&O MPPT alterando a tensão de referência ( $V_{REF}$  em azul) e o controlador PI+Notch fazendo com que  $V_{PV}$  (em vermelho) acompanhe a referência.

Fonte: Autor.

## Conclusões

A resposta do controle P&O-MPPT aplicado ao conversor Boost utilizando-se o compensador PI + Notch, apresentada na seção anterior, mostrou-se satisfatória com um ripple máximo de 0,1 V pico a pico em torno da referência.

O valor de tensão nos terminais dos painéis acompanhou fielmente o sinal de referência, fazendo com que o conversor Boost extraia a máxima potência da fonte.

No entanto, somente foram apresentados resultados dos estudos envolvendo o conversor CC-CC Boost devido à complexidade de cada etapa (e ao número de etapas) não havendo, portanto, tempo hábil para que fosse estudado o conversor Boost Quadrático.

Contudo, devido à importância do tema, sobretudo no quesito aplicabilidade, estudos detalhados do Conversor Boost Quadrático serão feitos tomando como base as etapas envolvidas no estudo do Conversor Boost.

## Agradecimentos

Agradecimentos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado de Goiás – IFG *Câmpus* Itumbiara e ao NUPSE.

## Referências Bibliográficas

- [1] MARTINS, D. C., COELHO, F. R., SANTOS, W. M. **“Minicurso - Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaicos: Revisão e Novas Propostas”**. XI Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (COBEP), Setembro 11-15, 2011. 110 p.
- [2] MAKSIMOVIC, D., CUK, S. **“Switching converters with wide DC conversion range”**, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 6, pp. 151–157, 1991..
- [3] BARRETO, L. H. S. C., **“Apêndice A: Conversores Quadráticos”**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Uberlândia-MG, Brasil, 2003.
- [4] NOVAES, Y. R., RUFER, A., BARBI, I. **“A New Quadratic, Three Level, DC/DC Converter Suitable for Fuel Cell Applications”**, Power Conversion Conference – Nagoya, pages 601 – 607, 2007.
- [5] KADRI, R., GLAUBERT, J. P., CHAMPENOIS, G., MOSTEFAI, M. **“Performance Analysis of Transformerless Single Switch Quadratic Boost Converter for Grid Connected Photovoltaic Systems”**, ICEM'2010, pp. 1–7, 2010.
- [6] BARRETO, L. H. S. C., COELHO, E. A. A., FARIAS, V. J., FREITAS, L. C. de; VIEIRA JR, J. B. **“An Optimal Lossless Commutation Quadratic PWM Boost Converter”**, APEC'2002, pp. 624–629, vol. 2, 2002.
- [7] BARRETO, L. H. S. C., COELHO, E. A. A., FARIAS, V. J., FREITAS, L. C. de; VIEIRA JR, J. B. **“A Quasi-Resonant Quadratic Boost Converter using a Single Resonant Network”**, IEEE Transactions on Power Electronics, pp. 552–557, vol. 52, 2005.
- [8] VILEFORT, L. S., SILVA, F. V. R., COELHO E. A. A., FREITAS, L. C. de; VIEIRA JR, J. B. **“Conversor Boost Quadrático SR-ZVS QRC PWM”**, Eletrônica de Potência, pp. 393 – 400 vol. 17, 2012.
- [9] YANG, P., XU, J., ZHOU, G., ZHANG, S. **“A new quadratic boost converter with high voltage step-up ratio and reduced voltage stress”**, IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference – ECCE Asia, 2012.
- [10] SALDAÑA, J. A. M., QUIRINO, R. G., RAMOS, J. L, GUITIERREZ, E. E. C., LOPEZ, M. G. O. **“Multiloop controller design for a quadratic boost converter”**, IET Electr. Appl., pp. 362-367, 2007.
- [11] LOPEZ, M. G. O., RAMOS, J. L., SALDIERNA, L. H. D., IBARRA, J. M. G., GUTIERREZ, E. E. C. **“Current-mode control for a Quadratic Boost converter with a single switch”**, PESC, pp. 2652-2657, 2007.
- [12] RAMOS, J. L., LOPEZ, M. G. O., SALDIERNA, L. H. D., SALDAÑA, J. A. M. **“Switching regulator using a quadratic boost converter for wide DC conversion ratios”**, IET Power Electronics, pp. 605-613, vol. 2, 2009.
- [13] GOMEZ, M. H., ORTEGA, R., LAGARRIGUE, F. L., BETHOUX O., ESCOBAR, G. **“Robust Adaptive PI Stabilization of a Quadratic Converter: Experimental Results”**, ISIE, pp. 2999-3004, 2010.
- [14] YANG, P., XU, J., ZHOU, G., ZHANG F. **“Analysis of sensorless peak current mode controlled quadratic boost converter”**, IEEE ISIE, pp. 200-204, 2012.
- [15] SRITHONGCHAI, P., KAITWANIDVILAI, S. **“Robust Fixed-Structure Cascade Controller for a Quadratic Boost Converter”**, IMECS, 2010.
- [16] CARVALHO R. A. S., VILEFORT, L. S., SILVA, F. V. R., FREITAS, L. C. G., COELHO, E. A. A., FREITAS, L. C., VIEIRA JR., J. B. **“Estudo do Conversor Boost Quadrático para Rastreamento de Máxima Potência em Sistemas Fotovoltaicos Utilizando o Método Perturba & Observa”**, Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, UFU, 2014.