

Estudo acerca de conversores estáticos de potência em aplicações que envolvam fontes renováveis de energia

Study about static power converters in applications involving renewable energy sources

Oswaldo Jackson Silva Vieira dos Santos¹, Charles William Polizelli Pereira²,
Leonardo Bruno Garcia Campanhol³

RESUMO

Este artigo aborda o tratamento de energia quando falamos em fontes renováveis, onde em sua grande maioria a transformação de energia gera tensão em corrente contínua (CC), dessa forma se faz necessário a conversão para tensão em corrente alternada (CA), a qual atende grande maioria dos equipamentos elétricos. Além da conversão CC/CA, o tratamento dessa energia é necessário, seja para atender uma carga, seja para injetar à rede elétrica, uma vez que fontes renováveis tem sua transformação de energia sensíveis a intempéries como exemplo a energia fotovoltaica ou eólica. Para a conversão CC/CA um conversor full bridge é empregado, onde o controle de sua corrente é feito pela modulação por largura de pulso (PWM) três níveis, através dela é possível realizar o controle do barramento CC, assim, utilizando um algoritmo adequado pode-se extrair a máxima potência do sistema de geração pelo método P&O (Perturbe e observe), rastreando o ponto de máxima potência (MPPT) para maior eficiência do sistema. Por meio de software de simulação foi possível implementar e visualizar este tratamento e injeção de energia à rede elétrica e assim compreender um método de tratamento de energia, possibilitando por meio de fontes renováveis atender à crescente demanda energética.

PALAVRAS-CHAVE: Energia renovável, conversor full bridge, rastreamento do ponto de máxima potência.

ABSTRACT

This article addresses the treatment of energy when we talk about renewable sources, where the vast majority of energy transformation generates voltage into direct current (DC), so it is necessary to convert it to voltage into alternating current (AC), which meets vast majority of electrical equipment. In addition to the DC/AC conversion, the treatment of this energy is necessary, either to supply loads or for injection into the electrical grid, since renewable sources have their energy transformation sensitive to weather, such as photovoltaic or wind energy. For the DC/AC conversion, a full bridge converter is used, where the control of its current is done by pulse width modulation (PWM) three levels, through which it is possible to control the DC bus, thus, using a suitable algorithm. you can extract the maximum power from the generating system by the P&O (Perturb and Observe) method, tracking the maximum power point (MPPT) for greater system efficiency. Through simulation software, it was possible to implement and visualize this treatment and injection of energy to the electrical grid and thus understand a method of energy treatment, making it possible through renewable sources to meet the growing energy demand.

KEYWORDS: Renewable energy, full bridge converter, maximum power point tracking.

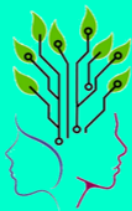
INTRODUÇÃO

Atualmente se tem buscado alternativas para atender a crescente demanda energética, minimizando os impactos ambientais e sociais causados pela geração de energia não renovável (EIA, 2021). No final do ano de 2021 as usinas hidrelétricas

¹Bolsista em Iniciação Científica - PIBIC, Fomento: Fundação Araucária. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: osvaldosantos@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 5695994762052933.

²Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE-CP). Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Cornélio Procopio, Paraná, Brasil. E-mail: charles.polizelli@gmail.com. ID Lattes: 0083994939369983.

³Docente na Coordenação de Engenharia Elétrica - COELT-AP. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Apucarana, Paraná, Brasil E-mail: campanhol@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8053457373498978.



correspondiam à 53,4% da geração total da matriz energética Brasileira, seguida do gás natural com 12,8%, geração eólica com 10,6% e o restante distribuído entre, biomassa com 8,2%, derivados do petróleo 3,5%, carvão 3,4%, solar 2,5% e outros compondo 5,6%, totalizando 679,2 TWh (EPE, 2022). Apesar do Brasil ter grande parte da matriz energética com fontes renováveis, a implementação de novas fontes de energia deve ser levada em conta pensando no impacto ambiental e social.

Com o intuito de diversificar a matriz energética, as fontes renováveis tem ganhado destaque nos últimos anos, como os sistemas fotovoltaicos (PV - *Photovoltaic*). Esse sistema tem a função de absorver a energia do sol através de módulos fotovoltaicos, transformando a energia do sol em energia elétrica de corrente contínua (CC). Essa fonte de energia depende basicamente da irradiação solar e da temperatura e devido à essa dependência, a produção de energia fotovoltaica sofre alterações com facilidade, sendo necessário um estágio de condicionamento para o sistema. De modo geral, sistemas PV, pode operar em duas configurações basicamente, o sistema *on-grid* (*grid-tie*) e sistema *off-grid* (isolados) (PINHO; GALDINO, 2014).

Sistema *on-grid* é caracterizado por estar conectado à rede elétrica, fornecendo a máxima potência gerada nos módulos PV. O mesmo pode atuar como um compensador de energia para a rede elétrica, podendo suprir parte ou total demanda da carga. Nesta configuração, o sistema não necessariamente entrega toda a potência exigida pela carga, sendo que a rede elétrica se encarrega de atender a demanda (OLIVEIRA, 2015).

Já para locais que não possuem a disponibilidade da rede elétrica, pode-se adotar um sistema PV *off-grid*. Este realiza o trabalho de fornecer à carga local toda a energia necessária, atuando como formador de rede. Diferente do sistema *on-grid*, sempre o sistema *off-grid* precisa disponibilizar a potência drenada pela carga. Portanto, para os momentos de baixa ou nenhuma produção de energia, faz-se necessário o emprego de fontes adicionais de energia, por exemplo banco de baterias (PINHO; GALDINO, 2014).

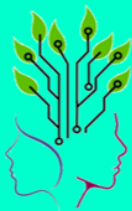
Para ambos os sistemas, faz-se necessário a utilização de conversores de potência para realização do condicionamento da energia, na conversão da energia em CC para CA, pois o módulo PV fornece apenas tensão em CC. Para isso é utilizado um conversor de energia CC/CA (MEINHARDT, CRAMER, et al. 2000) atrelado a métodos de controle de tensão e corrente (SILVA; CAMPANHOL; BACON; SAMPAIO, 2015).

Neste trabalho é apresentado os métodos de controle para os sistemas PV *on-grid* e *off-grid*. Implementação computacional são realizadas para exemplificar o funcionamento de ambos os sistemas.

METODOLOGIA

Para a conversão de energia fotovoltaica pode ser empregada duas topologias, conversão de simples estágio ou duplo estágio. Para a conversão de simples estágio existe um único conversor de energia CC/CA, este modelo exige um maior arranjo fotovoltaico para atingir uma adequada tensão de barramento CC (OLIVEIRA, 2015).

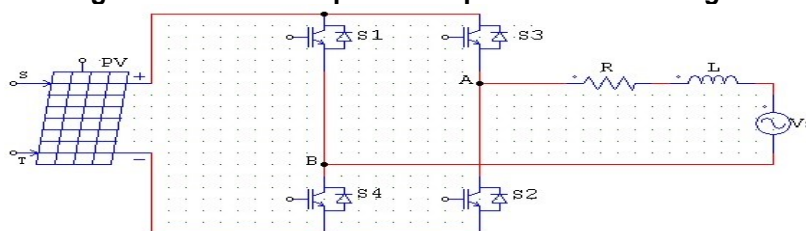
Já a conversão de duplo estágio necessita de dois conversores atuando em conjunto, um conversor CC/CC e também um conversor CC/CA. Essa configuração realiza a elevação da tensão CC no primeiro estágio e no segundo realiza a inversão da energia CC/CA, assim esse sistema permite um menor arranjo fotovoltaico, no entanto pode ocorrer maiores perdas somando os dois estágios de conversão. Neste estudo a topologia abordada é a conversão de simples estágio.



SISTEMA ON-GRID

O conversor de energia que compõe o sistema *on-grid*, deve atuar como compensador para a rede elétrica, garantindo sempre a máxima potência disponível no PV, dessa forma o sistema atua como fonte de corrente (FC) senoidal, onde o conversor é conectado com a rede elétrica a partir de um acoplamento indutivo, o que permite a malha de controle ajustar o ciclo de chaveamento do conversor. Podemos compreender esta configuração através do circuito equivalente para conversor CC/CA *on-grid* na Figura 1.

Figura 1 – Circuito equivalente para conversor *on-grid*.



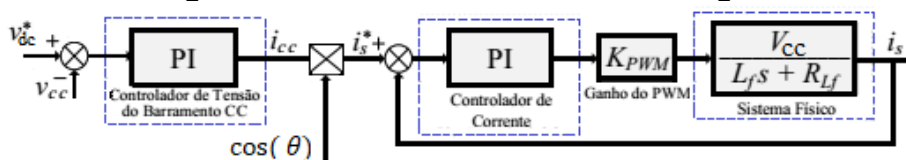
Fonte: Próprio autor.

Para controle das chaves de potência do inversor é implementado uma modulação por largura de pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*) três níveis, que possibilita obter na saída do conversor uma tensão variando entre 0 e $+V_{CC}$, 0 e $-V_{CC}$, resultando na tensão média entre os pontos A-B (V_{AB}) (HOLTZ, 1992; MOHAN, 1995). Dado a razão cíclica das chaves de potência e considerando que a frequência de chaveamento é muito maior que a frequência da rede, podemos dizer que a tensão da rede (V_s) é constante em um período de comutação, podendo ser representada como uma grandeza CC, assim aplicando perturbações na razão cíclica das chaves e na corrente média do circuito conseguimos chegar à função de transferência ($G_{FC}(s)$) para o sistema *on-grid*, conforme Eq. 1.

$$G_{FC}(s) = \frac{i(s)}{d_{FC}} = \frac{V_{CC}}{L_{FC} * s + R_{FC}} \quad (1)$$

De posse da função de transferência do circuito, é possível estabelecer a malha de controle, composta pela malha de tensão do barramento CC, conectada à malha de controle de corrente do conversor, como ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Malha de controle do sistema *on-grid*.



Fonte: Próprio autor.

Como o sistema *on-grid* deve atuar como compensador de energia, é preciso aplicar métodos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT – Maximum Power Point Tracking) ao sistema, e uma das formas de se alcançar esse objetivo é com a implementação de um algoritmo P&O (Perturbe e observe). Este algoritmo tem a responsabilidade de monitorar a potência instantânea disponível no PV, para que a malha de controle, através do controle das chaves de potência, possa garantir que o conversor extraia a máxima potência disponível no PV (SILVA; CAMPANHOL; BACON; SAMPAIO, 2015). A figura 3 ilustra como é feita essa implementação.

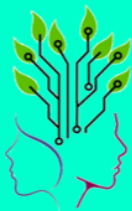
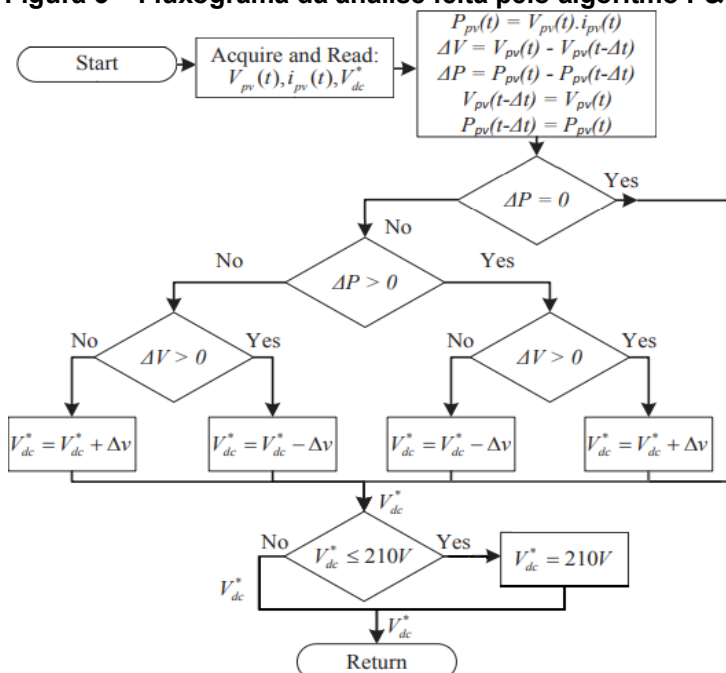


Figura 3 – Fluxograma da análise feita pelo algoritmo P&O

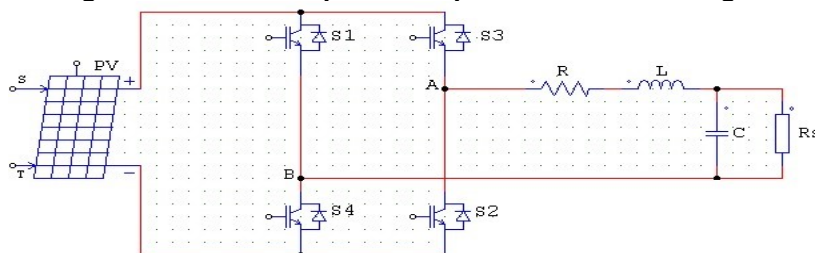


Fonte: Adaptado de SILVA; CAMPANHOL; BACON; SAMPAIO, 2015

SISTEMA OFF-GRID

O conversor para o sistema off-grid atua como fonte de tensão (FT) senoidal, o que exige um acoplamento indutivo e capacitivo. Isso ocorre pela necessidade de se monitorar a tensão de saída do sistema, novamente possibilitando que a malha de controle ajuste o ciclo de chaveamento do conversor, agora entregando uma tensão senoidal a carga. Podemos compreender sua conexão através do circuito equivalente ilustrado na figura 4.

Figura 4 – Circuito equivalente para o conversor off-grid.



Fonte: Próprio autor.

Partindo da mesma analogia utilizada para definir a função de transferência do sistema on-grid, podemos obter a função de transferência ($G_{FT}(s)$) para o sistema off-grid, como mostra a equação 2.

$$G_{FT}(s) = \frac{V_{RS}(s)}{d_{FT}} = \frac{V_{CC}}{(L_{FT} * C * s^2 + R_{FT} * C * s + 1)} \quad (2)$$

Diferente do sistema *on-grid*, a malha de controle para o sistema off-grid não possui um algoritmo de MPPT, pois agora o sistema deve atuar como um formador de rede atendendo integralmente a carga com uma tensão senoidal (V_{Rf}). Sua malha de controle completa é representada pela figura 5.

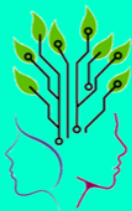
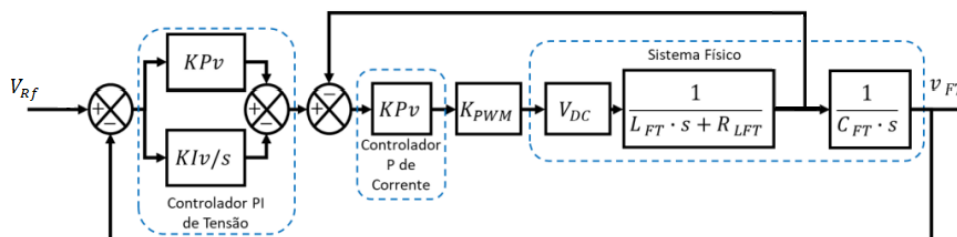


Figura 5 – Malha de controle do sistema off-grid

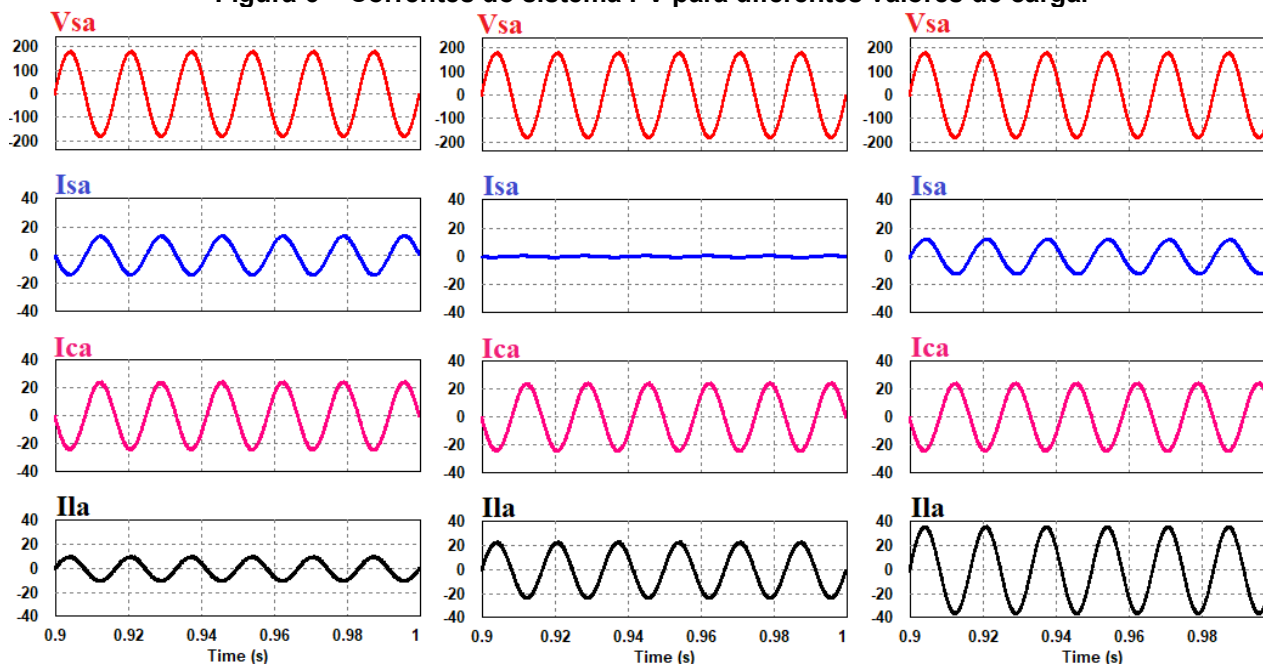


Fonte: Próprio autor.

RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Com a implementação do sistema *on-grid*, podemos verificar o comportamento da corrente do conversor (I_{ca}), a corrente da carga (I_{la}) e a corrente sintetizada na rede elétrica (I_{sa}), conforme apresentas na Figura 6.

Figura 6 – Correntes do sistema PV para diferentes valores de carga.



Fonte: Próprio autor.

Podemos observar pela Figura 6 que quando o sistema PV injeta I_{ca} maior que I_{la} , a corrente I_{sa} está em contra fase com a tensão V_{sa} . Neste caso, o sistema fornece toda a potência necessária para carga e o excedente é injetado na rede. Já para situações em que I_{ca} é menor ou igual a I_{la} , percebemos que I_{sa} está em fase com V_{sa} , ou seja, parte da energia necessária para alimentar a carga é fornecida pela rede.

Já a Figura 7 mostra os resultados para o sistema PV *off-grid*, alimentando uma carga puramente resistiva de diferentes valor ($R=10\Omega$, $R=12\Omega$ e $R=18\Omega$). Verifica-se que a malha de controle garante que o sistema forneça uma tensão alternada (V_{ca}).

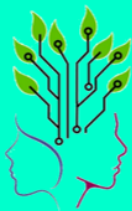
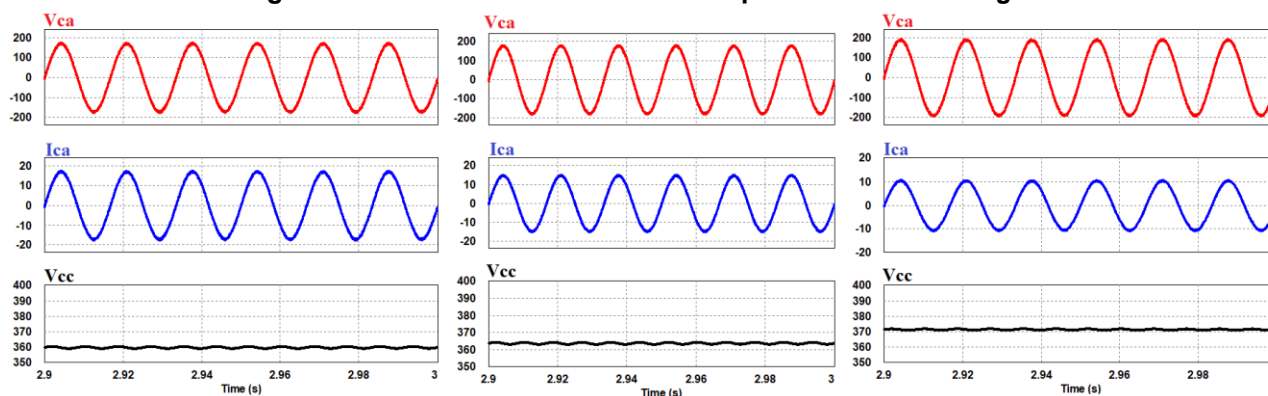


Figura 7 – Tensão e corrente fornecida pelo sistema PV *off-grid*.



Fonte: Próprio autor.

Nota-se que a tensão fornecida apresenta frequência de 60Hz e amplitude em torno de 180V de pico, comprovando que o sistema *off-grid* atua como formador de rede. Além disso, observa-se que variações de carga impactam diretamente na tensão do arranjo PV.

CONCLUSÃO

Com o estudo conseguimos implementar as duas topologias apresentadas, o sistema on-grid e o sistema off grid. Com os resultados foi possível validar a importância e eficácia desse tipo de sistema, como forma de diversificar nossa matriz energética, buscando melhor atender a crescente demanda. Como foi demonstrado, é preciso utilizar duas plantas do sistema uma para cada malha de controle. Na continuação desse trabalho espera-se obter uma única topologia em que a malha de controle irá atuar para ambos os sistemas, de forma que na presença da rede elétrica, ele atue como um conversor fonte de corrente, e na ausência da rede elétrica ele atue como um conversor fonte de tensão.

Agradecimentos

Os autores agradecem a UTFPR/PROPPG pela Bolsa de Iniciação Científica recebida por meio do EDITAL PROPPG-02/2021 PIBIC – PIBIC-AF, e aporte financeiro recebido por meio do EDITAL PROPPG 10/2021 – PAPCDT-RD.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

- BRITO, M. A. G. de et al. **Evaluation of the main mppt techniques for photovoltaic applications**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 60, n. 3, p. 1156–1167, Mar. 2013. ISSN 0278-0046.
- CASARO, M. M.; MARTINS, D. C. **Modelo de Arranjo Fotovoltaico Destinado a Análise em Eletrônica de Potência via simulação**. Eletrônica de Potência, vol. 13, no. 3, pp. 141-146, Agosto de 2008.
- EIA. International Energy Outlook 2021. **U. S. Energy Information and Administration**. EIA 2021.
- EPE. **BEN Relatório Síntese 2022** - ano base 2021. Brasil, 2022.
- HOLTZ, J. Pulse width modulation – A survey. **Industrial Electronics, IEEE Transaction on.**, v. 39, n. 5, p. 410 – 420, oct. 1992.
- MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. **Power electronics: converters, applications and design**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, Março 2014