

Estudo de Conversores Three-Port para aplicação em Sistemas Fotovoltaicos com Backup de Energia

Mirella Augusto Rodrigues (UTFPR) - mirella.augusto.rodrigues@gmail.com

Nicole Polityto Cremasco (UTFPR) - nicolepolityto@gmail.com

Eduardo Félix Ribeiro Romaneli (UTFPR) - felix@utfpr.edu.br

Jair Urbanetz Junior (UTFPR) - urbanetz@utfpr.edu.br

Resumo:

A utilização de sistemas fotovoltaicos configura uma solução para a utilização de fontes convencionais, que são mais poluentes e mais onerosas. Uma adaptação das topologias convencionais fotovoltaicas é o sistema fotovoltaico com backup de energia, que permite a utilização dos benefícios de cada uma delas, por meio da utilização do armazenamento de energia e da conexão à rede de distribuição elétrica. Nestes sistemas são utilizados geralmente os conversores multi-estágio, todavia há possibilidade de utilização dos conversores Three-Port. Por conta da necessidade de análise do comportamento destes conversores para esta aplicação, este artigo é um estudo de revisão a respeito de diferentes topologias propostas na literatura, bem como uma análise do funcionamento.

Palavras-chave: *Conversores CC-CC, Sistemas Fotovoltaicos com Backup de energia, Conversores Three-Port.*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Tecnologias e ensaios de inversores e outros equipamentos de eletrônica de potência*

ESTUDO DE CONVERSORES THREE-PORT PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM BACKUP DE ENERGIA

Mirella Augusto Rodrigues – mirella.augusto.rodrigues@gmail.com

Nicole Polityto Cremasco – nicnicolecrem@gmail.com

Eduardo Félix Ribeiro Romaneli – felix@utfpr.edu.br

Jair Urbanetz Júnior - urbanetz@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia

Resumo. A utilização de sistemas fotovoltaicos configura uma solução para a utilização de fontes convencionais, que são mais poluentes e mais onerosas. Uma adaptação das topologias convencionais fotovoltaicas é o sistema fotovoltaico com armazenamento de energia, que permite a utilização dos benefícios de cada uma delas, por meio da utilização de sistemas de armazenamento assim como baterias e da conexão à rede de distribuição elétrica. Nestes sistemas são utilizados geralmente os conversores multi-estágio, todavia há possibilidade de utilização dos conversores Three-Port. Por conta da necessidade de análise do comportamento destes conversores para esta aplicação, este artigo é um estudo de revisão a respeito de diferentes topologias propostas na literatura, bem como uma análise do funcionamento.

Palavras-chave: Conversores CC-CC, Sistemas Fotovoltaicos com Backup de energia, Conversores Three-Port.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Sampaio e Gonzalez (2017), por conta da relação da utilização das fontes convencionais de energia com as mudanças climáticas, é necessária a busca por fontes de energia menos poluentes para o suprimento da demanda.

Sendo assim, a energia solar é uma das alternativas energéticas mais promissoras deste milênio. Mesmo a energia solar não sendo uma fonte de energia renovável, dentro das concepções humanas de tempo de vida na terra, trata-se de uma fonte de energia inesgotável. Além disso, é uma forma de energia limpa e silenciosa, disponível em todo o planeta. Em especial, o Brasil, possui condições privilegiadas pois apresenta índices elevados de irradiação solar (Pereira *et al.*, 2017). Os Sistemas Fotovoltaicos podem ser classificados entre Sistemas Fotovoltaicos isolados (SFI) e entre Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede (SFVCR). Na primeira topologia, o consumo de energia é fundamental para que se possa estimar a demanda de energia do projeto, visto que é necessário um banco de baterias. Já, no segundo, o consumo de energia pode ser complementado com a energia da rede (Pinho e Galdino, 2014).

Tradicionalmente, os sistemas de armazenamento de energia são aplicados em sistemas fotovoltaicos isolados, onde não há conexão com a rede. Isso ocorre, pois, a luz do sol só está disponível durante o dia e assim, as baterias são utilizadas temporariamente quando não houver a luz do sol disponível. Porém, a fim de que os custos com energia sejam diminuídos, o interesse em torno dos sistemas de armazenamento aumentou e estes vem sendo utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, compondo os Sistemas Fotovoltaicos conectados a rede com armazenamento de energia. Dessa forma, a capacidade de armazenamento não necessita ser grande, apenas o suficiente para proteger o consumidor dos altos preços de energia (Rasin e Rahman, 2015).

A fim de promover uma diminuição dos custos com energia, nesta concepção de sistemas fotovoltaicos o sistema de armazenamento poderá atuar reduzindo o pico de demanda, cuja ultrapassagem poderá ocasionar uma multa ao consumidor. Além disso, desde janeiro de 2018, consumidores atendidos em baixa tensão cujo consumo médio mensal é de 250 kWh, poderão optar pela Tarifa Branca. Nesta modalidade o valor da tarifa varia ao longo do dia, sendo mais barata no período fora ponta e mais cara no período ponta. Dessa forma, o sistema de armazenamento poderá ser carregado durante o dia e utilizado no horário ponta (ANEEL, 2010)(ANEEL, 2016)(Marcos *et al.*, 2017).

Nestes sistemas são usualmente utilizados conversores multi-estágio, que são compostos por diferentes conversores conectados, sendo um para o painel, um para o banco de baterias e outro para a saída. Todavia, para Zhang, Sutanto e Muttaqi (2016), há possibilidade de utilização dos conversores *Three-Port*, que permitem a obtenção de uma tensão compatível com a tensão da rede de distribuição de energia elétrica, de acordo com os requisitos técnicos e de segurança, além de comportar o sistema de armazenamento.

Os conversores *Three-port* podem ser classificados em não isolados, isolados ou parcialmente isolados. Os primeiros são geralmente derivados dos conversores *buck*, *boost* ou *buck-boost*, enquanto os segundos são derivados em geral de topologias em ponte ou possuindo pelo menos um transformador como componente (Chen *et al.*, 2013)(Zhu *et al.*, 2015).

Segundo Zhu *et al.* (2015), algumas das vantagens da utilização dos conversores não isolados em relação a utilização dos isolados são os maiores valores de rendimento, densidade de potência e o fato de que são mais compactos.

Sendo assim, o objetivo deste artigo foi a realização de estudo de diferentes conversores *Three-Port* propostos na literatura, levando em consideração a forma de funcionamento e arquitetura de cada um.

Sendo assim, a seção 2 descreve alguns estudos referentes a arquitetura multiestágio, a seção 3 realiza a análise de conversores *Three-Port* isolados, a seção 4 descreve as características de alguns conversores *Three-Port* parcialmente isolados propostos na literatura e a seção 5 realiza análise dos conversores *Three-Port* não-isolados. Além disso, a seção 6 apresenta a comparação entre os conversores isolados, parcialmente isolados e não-isolados.

2. ARQUITETURA MULTI-ESTÁGIO

Tradicionalmente, as fontes de energia renovável são conectadas com a carga através de um conversor CC-CC tradicional e a fonte de armazenamento de energia é conectada à outra porta de entrada através de um outro conversor CC-CC tradicional bidirecional. A principal desvantagem dessa solução é a baixa eficiência devido a utilização de um conversor adicional para o Sistema de armazenamento. Além disso, a utilização dessa solução pode resultar em topologias de tamanhos grandes, baixa densidade de potência e em alto custo (Zhang, Sutanto e Muttaqi, 2016). Na Figura 1 pode-se observar a estrutura básica da arquitetura multi-estágio.

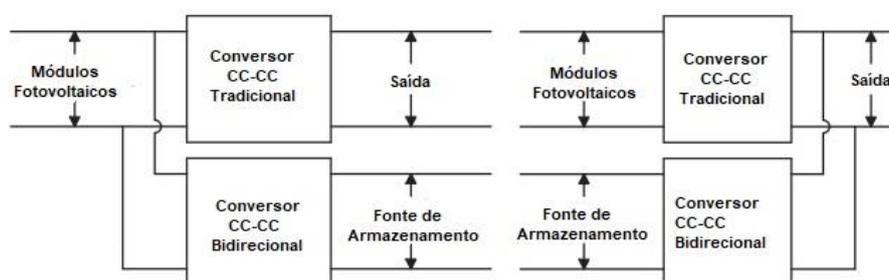


Figura 1 - Arquitetura Multiestágio
Fonte: (Zhang, Sutanto e Muttaqi, 2016)

O Sistema proposto em (Lueangamornsiri, Wichakool e Chalermyanont, 2017) apresenta um controlador de carga para módulos fotovoltaicos o qual é composto por três conversores CC-CC tradicionais. No estágio conectado ao modulo tem-se um conversor *boost*, no estágio para executar o carregamento da bateria primária e no estágio para executar o carregamento da bateria secundária tem-se um conversor *Buck-Boost*. Na Figura 2 pode-se observar o conversor em questão:

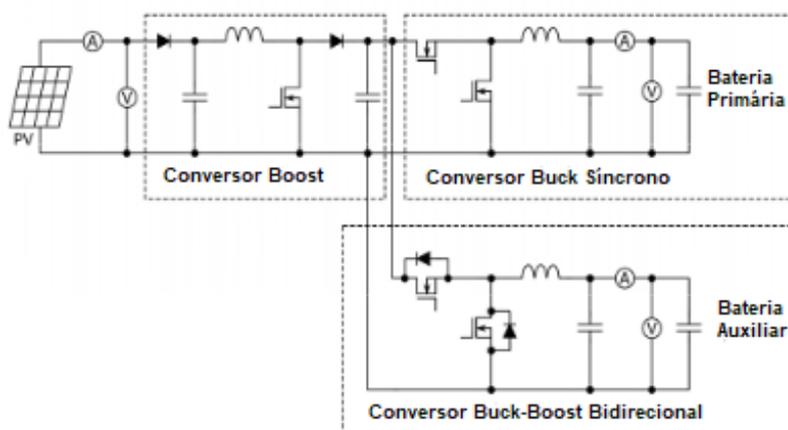


Figura 2 – Controlador de carga
Fonte: (Lueangamornsiri, Wichakool e Chalermyanont, 2017)

3. CONVERSORES THREE-PORT ISOLADOS

Os conversores *Three-Port* isolados possuem em seu circuito transformadores de alta frequência para auxiliar nos diferentes níveis de tensão entre as portas. Porém o número de componentes utilizados é maior que em outras topologias

além de que o uso do transformador torna estes conversores volumosos e aumenta as perdas através da indutância de dispersão (Zhang, Sutanto e Muttaqi, 2016).

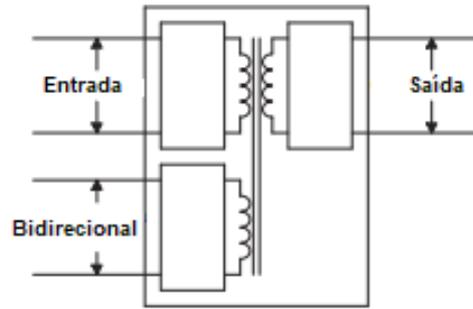


Figure 3 – Estrutura Básica de um Conversor Three-Port isolado
Fonte: Zhang, Sutanto e Muttaqi (2016).

Uma aplicação para os conversores *Three-port* isolados seriam os sistemas *V2G (Vehicle to Grid)*, em que o sistema de armazenamento de energia do carro é utilizado como back-up no sistema fotovoltaico. Em Deng *et al* (2018), o autor utiliza três conversores *Full-Bridge*, um para cada enrolamento do transformador, outro aspecto seria a não utilização de um capacitor eletrolítico no link com a rede CA, mas sim um retificador a fim de dar mais estabilidade ao sistema, como pode ser observado na Figura 4.

Em Wang *et al* (2018), ao invés de serem usadas três conversores *Full-Bridge*, é utilizado um conversor *Half-Bridge* na porta bidirecional, na qual será conectada a bateria. Outra característica empregada é o acoplamento série-ressonância na porta bidirecional através da inserção de um capacitor em série com o indutor da ponte, como pode ser observado na Figura 5.

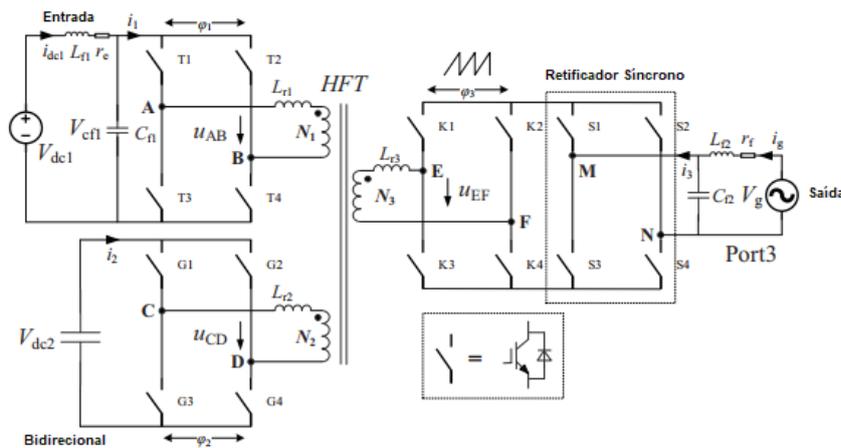


Figure 4 - Conversor Three-Port isolado com três pontes *Full-Bridge*
Fonte: Deng *et al* (2018)

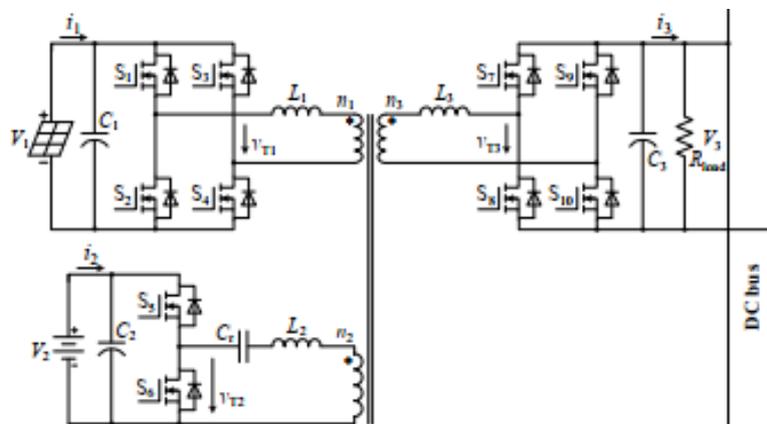


Figure 5 - Conversor Three-Port isolado com duas fontes *Full-Bridge* e uma *Half-Bridge*
Fonte: Wang *et al* (2018)

4. CONVERSORES THREE-PORT PARCIALMENTE ISOLADOS

Os conversores *Three-Port* parcialmente isolados possuem duas das três portas isoladas por um transformador de dois enrolamentos. Semelhante aos conversores isolados, podem obter um alto ganho de tensão e uma alta razão de transformação. Contudo, eles podem apresentar uma menor vida útil e uma menor confiabilidade (Zhang, Sutanto e Muttaqi, 2016). Na Figura 6 está apresentado o modelo básico de um conversor *Three-Port* parcialmente isolado.

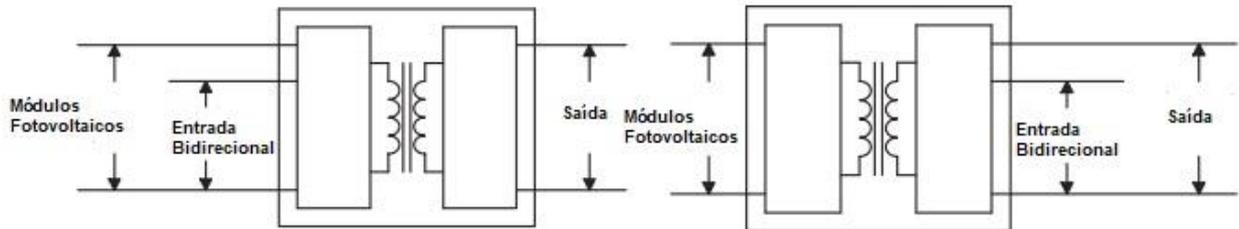


Figure 6 - Estrutura Básica de um conversor Three-Port parcialmente isolado
Fonte: Zhang, Sutanto e Muttaqi (2016).

Um dos conversores mais utilizados industrialmente é o *Full-Bridge* devido a sua característica garantida de ZVS. De acordo com Moqaddam e Hamzeh (2017), essa característica ocorre devido ao controle *Phase-Shift* e ao fluxo de corrente indutiva nas chaves, o que causa a elas baixo *stress* de tensão e consequentemente baixo consumo de energia. Assim, o conversor *Three-Port* parcialmente isolado apresentado em Moqaddam e Hamzeh (2017) apresenta um conversor *Full-Bridge* na porta de entrada das baterias e um na porta de saída. Na porta em que são conectados os módulos é utilizado um conversor *Boost Interleaved*, é o chamado conversor *DAB*, conforme pode ser observado na Figura 7.

Em Sun *et al* (2014), está descrito um conversor *Three-Port* o qual possui um conversor *Full-Bridge* na porta de entrada, um conversor *Half-Bridge* na porta de saída e duas indutâncias intertravadas na porta bidirecional, o que integra as características do *DAB* e do *Buck-Boost*. Além disso, permite a implementação de ZVS e controle *Phase-Shift*. Na Figura 8 tem-se o conversor *Three-Port* em questão.

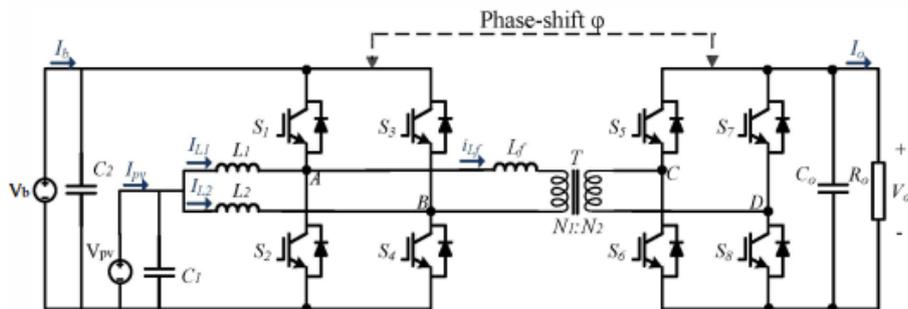


Figure 7 - Conversor Three-Port Parcialmente isolado com duas pontes Full-Bridge e um Boost Interleaved
Fonte: Moqaddam e Hamzeh (2017)

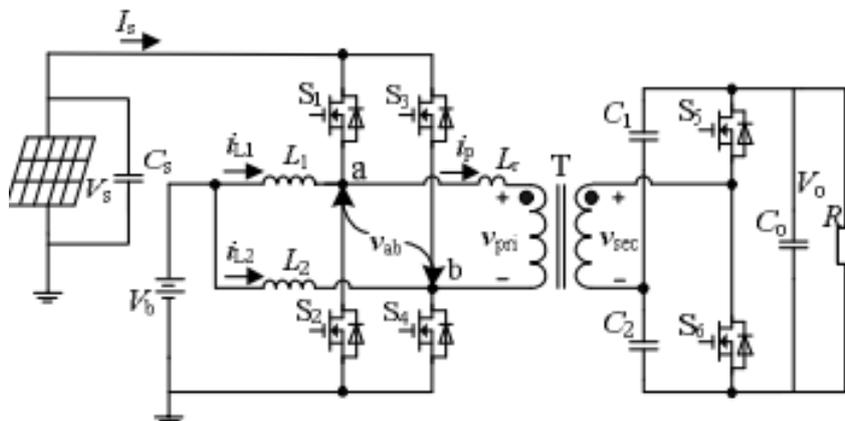


Figure 8 - Conversor Three-Port parcialmente isolado com uma ponte Full-Bridge uma Half-Bridge
Fonte: Sun *et al* (2014)

5. CONVERSORES THREE-PORT NÃO-ISOLADOS

Os conversores não isolados típicos utilizam apenas um indutor e suas topologias são derivadas de conversores convencionais assim como o *Boost*, o *Buck* e o *Buck-Boost*. Estes conversores possuem baixo ganho de tensão, para que este ganho seja aumentado, algumas topologias utilizam mais de um indutor. A vantagem dos conversores *Three-Port* não isolados é que eles possuem um número reduzido de componentes e uma estrutura compacta (Zhang, Sutanto e Muttaqi, 2016). Na Figura 9. tem-se a estrutura básica de um conversor *Three-Port* não isolado.

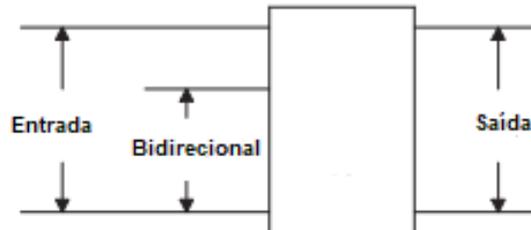


Figure 9 - Estrutura básica de um conversor Three-Port não isolado
Fonte: Zhang, Sutanto e Muttaqi (2016)

O conversor proposto por Khoramikia, Heidari e Dehghan (2018) utiliza um conversor derivado do conversor *Sepic*, chamado de novo conversor *Sepic* multiplicador, o qual combina dois conversores *Sepic* tradicionais. Combinado a este, utiliza um conversor *Buck-Boost* com uma porta bidirecional o qual funcionará como um conversor *Buck* para carregar a bateria e como um conversor *Boost* para descarregar a bateria. O conversor *Sepic* multiplicador será responsável por rastrear o ponto de máxima potência do painel. Na Figura 10, pode-se observar o conversor proposto.

Em Vásquez *et al* (2014), foi proposto um conversor composto por quatro chaves em que cada uma delas é responsável pela operação do sistema, realizando assim o gerenciamento. Foi desenvolvido para funcionar em modo Contínuo de Condução e pode funcionar como um conversor *Boost* quando somente o painel fornecer energia para a carga, funcionará como *Buck* quando a bateria for carregada e funcionará como *Boost* quando a bateria fornecer energia para a carga. Na Figura 11 tem-se o conversor proposto.

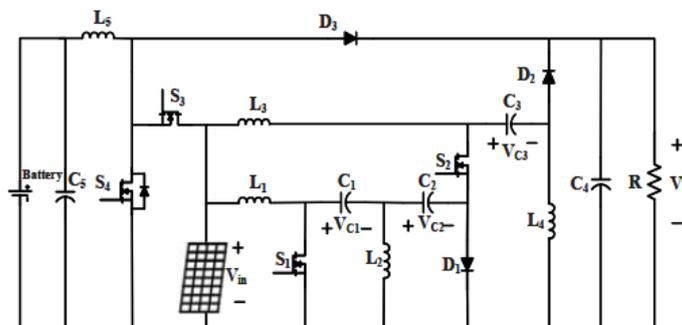


Figura 10 - Conversor Three-Port não-isolado
Fonte: Khoramikia, Heidari e Dehghan (2018)

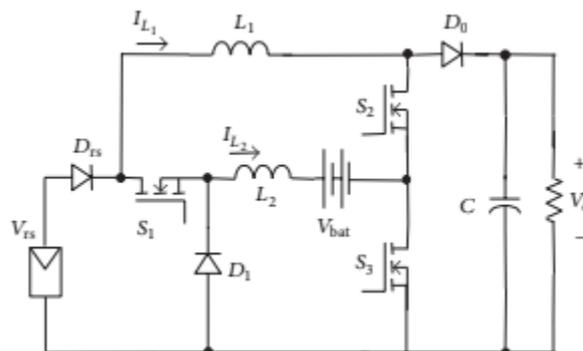


Figura 21 - Conversor Three-Port não-isolado
Fonte: Vásquez *et al* (2014)

6. COMPARATIVO ENTRE TOPOLOGIAS *THREE-PORT*

Para a determinação da topologia mais adequada para uma aplicação específica, é necessária a compreensão das principais características dos grupos propostos pela literatura de conversores *Three-Port*. Sendo assim, as principais características de cada grupo de conversor *Three-Port*, de acordo com Zhang, Sutanto e Muttaqi (2016) e Soeidat *et al.*(2018), são descritas na Tab. 1.

Tabela 1 – Principais características de cada grupo de conversor *Three-Port*

	ISOLADAS	PARCIALMENTE ISOLADAS	NÃO ISOLADAS
Quantidade de componentes	Em geral possuem maior quantidade de chaves	Possuem menos que os conversores isolados e mais que os não isolados	Menor quantidade de componentes
Isolação galvânica	Necessária em todas as portas	Necessária apenas em duas portas	Não necessária
Confiabilidade	Maior	Maior	Menor
Custo	Maior	Maior	Menor custo
Tamanho	Estruturas maiores	Estruturas maiores	Compactos
Aplicabilidade	Aplicações para altas potências	Aplicações para altas potências	Aplicações em baixos e médios valores de potência

7. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um estudo a respeito de diferentes arquiteturas de conversores *Three-Port* pertencentes aos grupos distintos deste tipo de conversor.

Os conversores *Three-Port* configuram uma solução para aplicações com mais de uma entrada e com uma ou mais saídas, sendo que possuem somente um estágio. Há três topologias distintas destes conversores, sendo elas isolado, parcialmente isolado e não isolado.

Os conversores não isolados possuem como vantagem o fato de que são robustos, utilizam menor quantidade de componentes, sendo ideias para aplicações que necessitam de menores valores de potência.

Os conversores isolados, assim como os conversores parcialmente isolados, possuem maior confiabilidade, todavia necessitam de maior quantidade de componentes, principalmente de chaves e de pelo menos um transformador.

Agradecimentos

Os autores agradecem a UTFPR pelo apoio e infraestrutura disponibilizada para esta pesquisa e a COPEL-DISTRIBUIÇÃO pelo apoio e financiamento dos recursos para a realização deste projeto de P&D “ANEEL PD 2866-0464/2017 – Metodologia para Análise, Monitoramento e Gerenciamento da GD por Fontes Incentivadas”.

REFERÊNCIAS

- Sampaio, P. G. V, González M. O. A, Photovoltaic Solar Energy: Conceptual Framework, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 74, pp. 590 – 601, 2017.
- Chen, Y., Huang, A. Q., Yu, X., A High Step-up Three-Port DC-DC Converter for Stand-Alone PV/ Battery Power Systems, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, n. 11, 2013.
- Zhu, H., Zhang, D., Zhang, B., Zhou, Z., A non-isolated Three-Port DC-DC Converter and Three-domain control method for PV-Battery Power Systems, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, n. 8, 2015
- Al-Soeidat, M., Khawaldeh, H., Aliarairah, H., Lu, D., A compact Three-Port DC-DC Converter for integrated PV-Battery System, 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), pp. 1-6,2018.

- Zhang, N., Sutanto, D., Muttaqi, K. M., A review of topologies of Three-Port DC-DC converters for the integration of renewable energy storage system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 308-401, 2016.
- Rasin, Z., Rahman, M. F., Control of DC-DC Converter for Battery Storage in Grid-Connected Quase-Z-Source PV Inverter, 2015 IEEE Conference on Energy Conversion, pp. 205-210, 2015.
- Lueangamornsiri, T., Wichakool, W., Chalermyanont, K., Solar Battery Charger using multi-stage converter, 2017 IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics, pp. 139-142, 2017.
- Deng, M., You, J., Fan, W., Liao, M., Control Strategy of TPC with a Grid Port, 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition, pp. 472-475, 2018.
- Wang, P., Zhang, S., Xu, D., A Series-Resonance-Based Three-Port Converter with unified Autonomieous Control Method in DC Microgrids, 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition, pp. 3210-3274, 2018.
- Moqaddam, M. A., Hamzeh, M., PWM Plus Secondary-Side Phase-Shift Controlled Full-Bridge Three-Port Bidirectional Converter Application in MVDC Networks, 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference, pp. 178-183, 2017.
- Sun, X., Liu, F., Wang, B., Research on Dual Buck-Boost Integrated Three-Port Bidirectional DC-DC Converter, 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific, pp. 1-6, 2014.
- Khoramikia, H., Heydari, M., Dehghan S. M., A new Three-Port non-isolated DC-DC converter of renewable energy sourcee application, 26th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 1101-1106, 2018
- Vázquez, N., Sanchez, C. M., Hernandez, C., Vázquez, E., Garcia, L. C., Arau, J. A., A diferente Three-Port DC-DC converter for Standalone PV System, vol. 2014, International Journal of Photoenergy, Hindawi Corporation, 2014.
- Pereira, E. B., Martins F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima, F. J., Rütther, R., Abreu, S. L., Tiepolo, G. M., Pereira, S. V., Souza, J. G., Atlas Brasileiro de Energia Solar – 2^a Edição, São José dos Campos, 2017.
- Pinho, J. T., Galdino, M. A., Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, Rio de Janeiro, 2014.
- Agência Nacional de Energia (ANEEL), Resolução Normativa 414/2010, 2010.
- Agência Nacional de Energia (ANEEL), Resolução Normativa 733/2016, 2016.
- Marcos, V. M. M., Martinez, M. Á. G., Gonzalez, F. B., Montero, M. I. M., A Grid Connected Photovoltaic Inverter with Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage. *Sensors-Basel Journal*, Vol. 17, ed. 8, pp. 1-18, 2017.

A Review of Three-Port Converters for Grid-Connected PV Systems with Energy Back-up

Abstract. *The use of photovoltaic systems is a solution for the use of conventional sources, which are more polluting and more expensive. An adaptation of conventional photovoltaic topologies is the energy-backup photovoltaic system, which has the benefits of each to be realized through the use of energy storage and connection to the electrical distribution grid. In these systems the multi-stage converters are generally used, however it is possible to use the three-Port converters. Due to the need to analyze the behavior of these converters for this application, this article is a review study about different topologies proposed in the literature, as well as an analysis of the operation*

Key words: *CC-CC converters, photovoltaic systems with energy backup, three-port converter*