

Estudo de Estruturas de Conversores TPC Não Isolados Baseados nos Conversores Clássicos

1st Igor Soares Oliveira 2nd Antônio Manuel Santos Spencer Andrade 3rd Mireli Binder Vendruscolo
Universidade Federal de Santa Maria Universidade Federal de Santa Maria Universidade Federal de Santa Maria
Engenharia Elétrica Engenharia Elétrica Engenharia Elétrica
Santa Maria, RS, Brasil Cachoeira do Sul e Santa Maria, RS, Brasil Santa Maria, RS, Brasil
igor.soares@acad.ufsm.br antonio.andrade@ufsm.com mireli@inriufsm.com.br

Abstract—Este trabalho estuda conceitos de conversores CC-CC de três portas (TPC's) aplicados em sistemas fotovoltaicos não isolados. Para tal, foram apresentadas algumas classificações, modos de operação e configurações de processamento de energia. Além disso, foram realizadas também, breves comparações entre estas. Em seguida, foram apresentadas três combinações entre conversores clássicos e uma dessas combinações foi validada por meio de simulação computacional.

Index Terms—conversores CC-CC de três portas, sistemas fotovoltaicos autônomos, não isolados, conversores clássicos

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a demanda por energia elétrica tem apresentado crescimento exponencial [1]. Tal fato pode estar atrelado principalmente ao surgimento de novas tecnologias e desenvolvimento no setor industrial, que são totalmente dependentes da eletricidade. Visando atender este crescimento, bem como estar alinhado ao objetivo mundial de redução da emissão de gases potencializadores do efeito estufa, é importante que haja desenvolvimento no setor energético renovável, atribuindo destaque à energia solar, que tem ganhado espaço no Brasil e no Mundo [2]. Para sistemas fotovoltaicos autônomos, a utilização de baterias para armazenamento da energia produzida é fundamental para que a carga esteja abastecida em período integral. Destaca-se também que a aplicação de banco de baterias como armazenamento estacionário em sistemas conectados à rede também tem sido utilizada [3] [4].

A Figura 1 apresenta diversas configurações de processamento de energia em sistemas fotovoltaicos. A configuração apresentada na Figura 1 (a) trata-se de um sistema fotovoltaico autônomo sem armazenamento de energia [5]. Apesar de tratar-se de uma configuração simples, neste tipo de sistema a carga é alimentada diretamente pela energia fornecida pelos painéis, ficando desabastecida em períodos sem insolação. A Figura 1 (b) trata-se de um sistema fotovoltaico autônomo com armazenamento de energia [6]. Neste caso, o sistema conta com um banco de baterias que armazena a energia produzida que não foi consumida pela carga. Desse modo, em períodos de insolação baixa ou nula, a carga segue abastecida pelas baterias. A Figura 1 (c) apresenta um sistema fotovoltaico conectado à rede sem armazenamento de energia [7]. Este

tipo de sistema injeta a energia sobressalente na rede. Isso também garante que a carga permaneça abastecida em período integral, uma vez que em períodos de insolação baixa ou nula, a rede fornece energia para o abastecimento. Por fim, a Figura 1 (d) apresenta um sistema fotovoltaico conectado à rede com armazenamento de energia [3]. Novamente, trata-se de um sistema que garante abastecimento integral da carga, entretanto agora, a carga pode ser abastecida pela rede, pelos painéis e/ou pelas baterias. Isso garante que não hajam desabastecimentos em ocorrências de faltas, além de que permite transacionamento de energia para clientes com tarifa branca, utilizando a energia armazenada nos períodos de ponta e a energia da rede em períodos de fora ponta.

Os sistemas fotovoltaicos com armazenamento de energia necessitam de um sistema de conversão com três portas ou *three-port dc-dc conversion system* (TPCS), como é apresentado na Figura 2. Tradicionalmente, tais sistemas utilizam a união de vários conversores CC-CC de duas portas [8]. Tal aplicação acarreta em baixa utilização do dispositivo, baixa densidade de potência, baixa eficiência e alto custo [9] e [10]. Visando melhor desempenho nos itens supracitados, os conversores CC-CC de três portas ou *three-port dc-dc converters* (TPC's) possuem a capacidade de atender a um sistema fotovoltaico com armazenamento de energia somente com um conversor.

II. CLASSIFICAÇÕES E CONCEITOS DOS TPC'S

De acordo com os requisitos de isolamento, os TPC's podem ser classificados em não isolados, totalmente isolados e parcialmente isolados. Os TPC's não isolados não possuem isolamento galvânica em nenhuma de suas portas. Isso impacta diretamente na redução dos custos, tamanho e simplificação do design. Os conversores totalmente isolados possuem um transformador de múltiplos enrolamentos ou vários transformadores de dois enrolamentos. Isso garante que todas as portas estejam isoladas galvanicamente entre si, entretanto, isso acarreta no aumento de tamanho, e custo dos conversores. Por fim, os TPC's parcialmente isolados possuem isolamento galvânico em somente uma de suas portas, mantendo-a isolada das outras duas. Esse tipo de conversor, por necessitar do uso de um transformador, possui, moderadamente, as mesmas car-

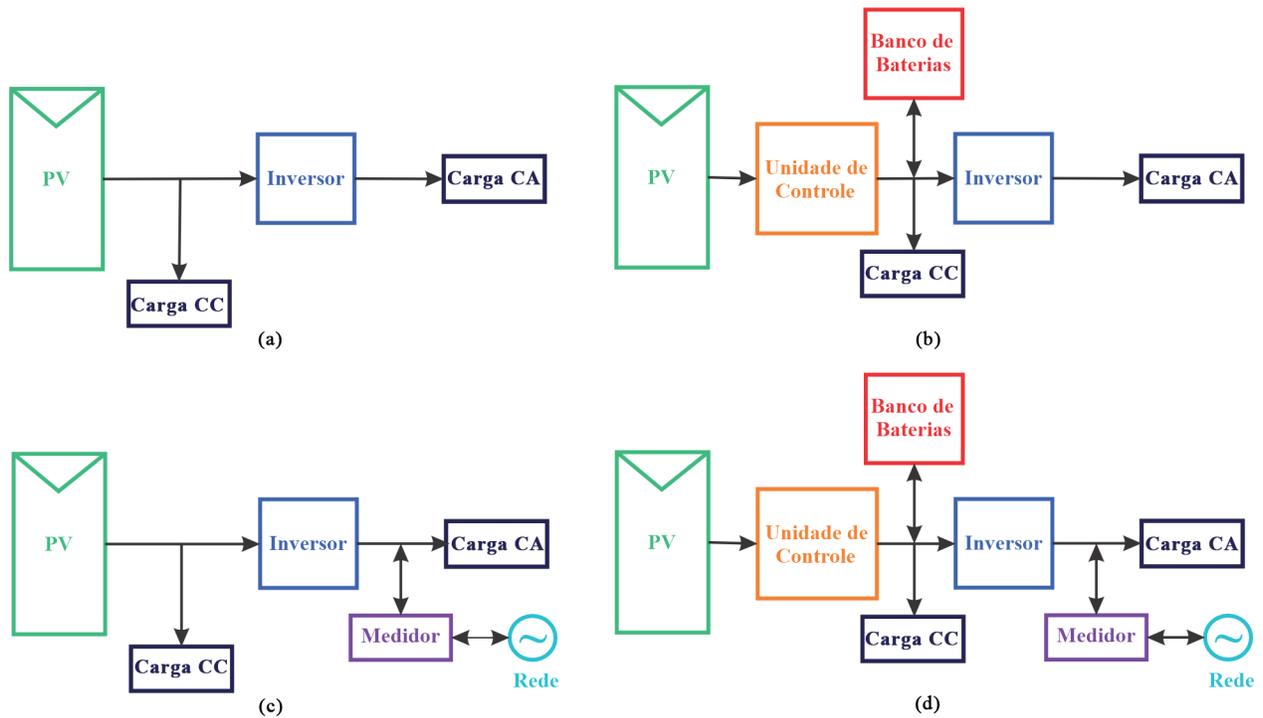


Fig. 1. Configurações de sistemas fotovoltaicos. "(a)" Sistemas autônomos sem armazenamento de energia. "(b)" Sistemas autônomos com armazenamento de energia. "(c)" Sistemas conectados à rede sem armazenamento de energia. "(d)" Sistemas conectados à rede com armazenamento de energia.

acterísticas de alto custo e tamanho dos conversores totalmente isolados.

Em relação as ramificações de potência dos sistemas fotovoltaicos com utilização de conversores CC-CC de três portas, existem três principais ocorrências: DO (*Dual Output*), DI (*dual input*) e SISO (*Single Input, Single Output*). O modo DO acontece quando ocorrem duas ramificações de saída de potência do sistema, incluindo o fornecimento de potência do painel para a bateria (P2B) e do painel para a carga (P2L). O modo DI acontece quando o sistema está operando com a bateria e painel fornecendo energia para a carga. Para esse caso, existem duas ramificações de entrada de potência, da bateria para a carga (B2L) e do painel para a carga (P2L). Por fim, o modo SISO possui uma ramificação de potência de entrada e uma de saída, podendo ocorrer assim, três

situações isoladas: painel fornecendo somente para a carga (P2L), bateria fornecendo somente para a carga (B2L) ou painel fornecendo somente para a bateria (P2B).

Além das classificações anteriormente citadas, as topologias de TPC's podem ser classificadas ainda conforme a quantidade de estágios de conversão para o caminho primário e secundário. O caminho primário trata-se do fluxo de potência direto do painel para a carga (P2L). O caminho secundário é aquele cujo fluxo de potência vai do painel para a bateria (P2B) e, posteriormente, da bateria para a carga (B2L). A nomenclatura das classificações é composta pela letra "P" seguida do número de conversões realizadas no caminho primário e pela letra "S" seguida do número de conversões realizadas no caminho secundário. A Figura 3 apresenta as estruturas de transmissão de potência dos TPC's.

A complexidade de um sistema está atrelada principalmente à quantidade de estágios de conversão presentes e se estes possuem bidirecionalidade ou não. Por exemplo, a estrutura P2S2 contém dois estágios de conversão CC-CC unidirecionais, enquanto a estrutura P1S3 possui dois estágios de conversão CC-CC unidirecionais e um bidirecional. Desse modo, pode-se considerar que a estrutura P2S2 possui menor complexabilidade se comparada a P1S3.

A eficiência de um TPC é a razão da potência das portas de saída e a porta do painel. Essa variável pode ser afetada por diversos fatores e, dentre estes, destaca-se a estrutura topológica, frequência de comutação, qualidade e quantidade de componentes, potência nominal, quantidade de estágio

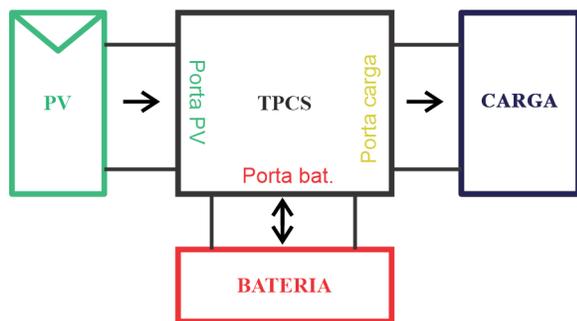


Fig. 2. Estrutura de um TPCS

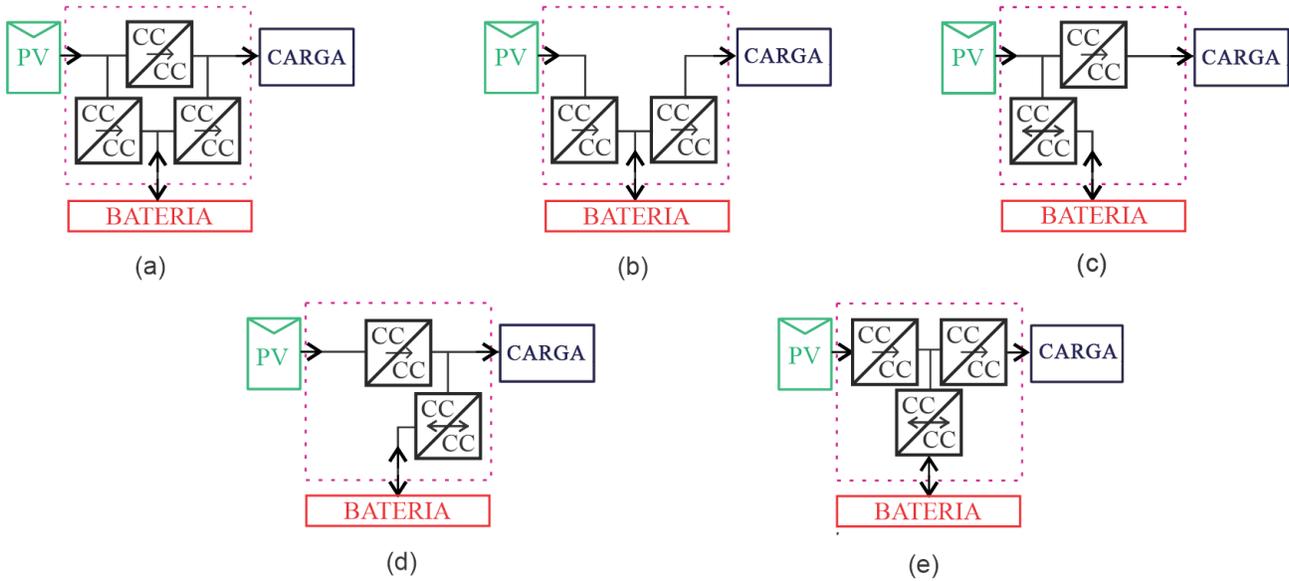


Fig. 3. Estruturas de transmissão de potência dos TPC's. "(a)" estrutura P1S2. "(b)" estrutura P2S2. "(c)" estrutura P1S3-I. "(d)" estrutura P1S3-II. "(e)" estrutura P2S24.

TABLE I
TABELA DE COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTRUTURAS

	P1S2	P2S2	P1S3-I	P1S3-II	P2S4
Complexidade topológica	alta	muito baixa	baixa	baixa	muito alta
Complexidade de controle	ruim	bom	bom	ruim	ruim
Eficiência	muito bom	ruim	bom	bom	muito ruim

de conversão, dentre outros. Por exemplo, considerando a quantidade de estágios de conversão, pode-se dizer que a estrutura P2S2 é mais eficiente que a P2S4.

A complexidade de controle do sistema está atrelada principalmente à quantidade de controladores. Desse modo, as estruturas P1S2 e P2S4 possuem maior complexidade que as demais. Os dados de complexidade do sistema, de controle e de eficiência estão apresentados na Tabela I.

III. PROPOSTA ESTUDADA

Este artigo estuda três combinações entre topologias amplamente exploradas na literatura: Boost, SEPIC, Zeta e Cuk. A Figura 4 (a) apresenta a primeira combinação, sendo esta entre o conversor SEPIC e o *Boost*. Nota-se que este TPC não possui isolamento galvânica, o que acarreta na redução de custos e tamanho do sistema. Além disso, sua estrutura de transmissão de potência possui um estágio de conversão no caminho primário e três no secundário, sendo então, P1S3-II, com desempenho considerado bom nos três requisitos anteriormente estudados.

A Figura 4 (b) apresenta a segunda topologia, sendo esta a combinação dos conversores *Zeta* e *Boost*. Novamente,

trata-se de um TPC não isolado, com classificação P1S3-II. Por fim, a Figura 4 (c) trata-se da combinação entre os conversores *Cuk* e *Boost*, e apresenta exatamente as mesmas classificações dos outros dois TPC's, apresentando também as mesmas vantagens.

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A topologia apresentada na Figura 4 (a), que combina o conversor SEPIC e o *Boost* foi validada por meio de simulação computacional. Para tal, foi considerada uma bateria com tensão nominal de 48V, um painel, representado inicialmente por uma fonte de tensão de corrente contínua, com tensão nominal de 30V e uma carga com tensão de abastecimento de aproximadamente 120V. Além disso, foram realizadas três simulações isoladas para validar as três principais ramificações de potência dos sistemas fotovoltaicos com utilização de TPC's.

A primeira, que está apresentada na Figura 5, considera que a bateria e o painel estão fornecendo potência para carga. Isso acontece quando a energia produzida nos painéis não é suficiente para abastecer a carga. Nesta situação, tem-se um sistema operando no modo DI (*Dual Input*), onde o painel e a bateria estão com fluxo de potência no sentido de entrada do conversor e a carga, no sentido de saída. Além disso, torna-se possível observar também que, em regime permanente, o conversor foi capaz de manter a tensão constante no valor nominal da carga.

A segunda simulação, que está apresentada na Figura 6, considera que somente a bateria está fornecendo potência para a carga. Isso acontece em períodos de insolação nula. Para este caso, temos um sistema operando no modo SISO (*Silgle Input, Single Output*), onde a corrente do painel é nula, a bateria está com fluxo de potência no sentido de entrada no conversor e a carga, no sentido de saída. Nota-se também que o

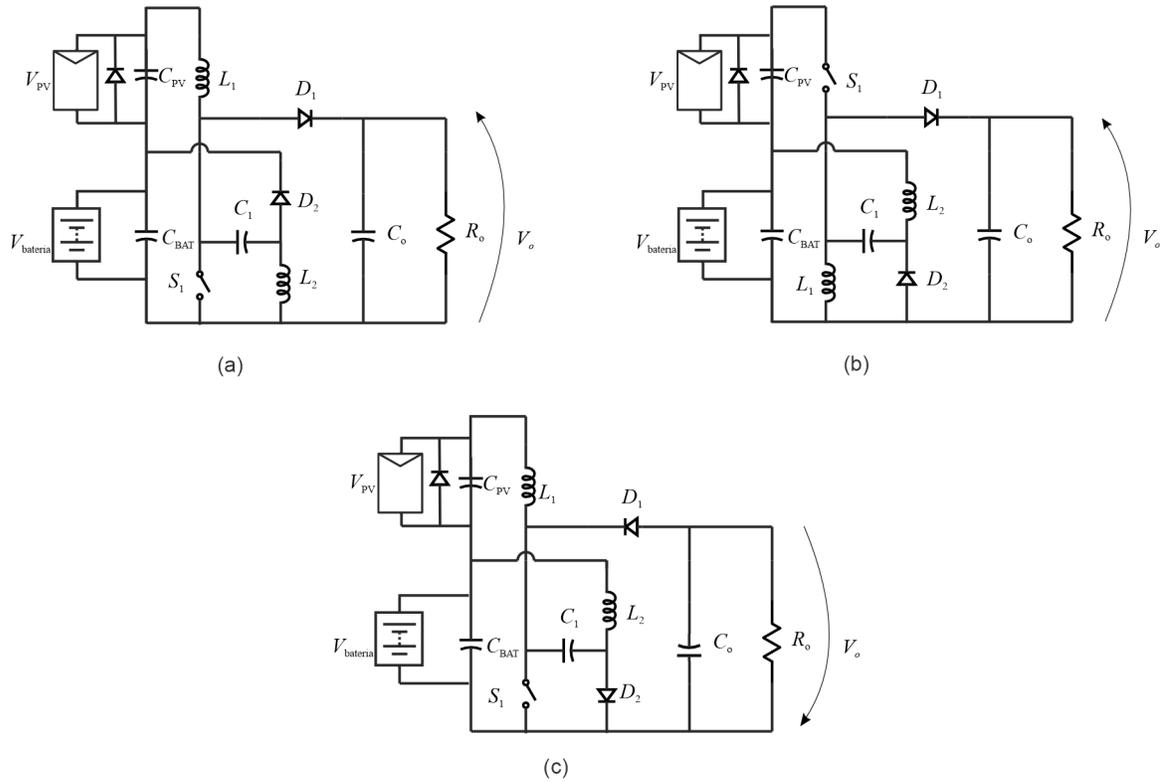


Fig. 4. Proposta. "(a)" Combinação do conversor SEPIC e Boost. "(b)" Combinação do conversor Zeta e Boost. "(c)" Combinação do conversor Cuk e Boost

conversor, operando em regime permanente, é capaz de manter a tensão constante no valor nominal da carga, mesmo com fornecimento nulo do painel.

Por fim, a terceira simulação está apresentada na Figura 7, considerando que o painel possui fluxo de potência no sentido de entrada do conversor e está fornecendo energia para a carga e para a bateria, que por sua vez possuem fluxo de potência no sentido de saída. Isso acontece quando a energia produzida nos painéis é maior que a necessidade da carga. Neste caso, temos um sistema operando no modo DO (*Dual Output*). É possível notar também que o conversor, em regime

permanente, é capaz de manter os dois níveis de tensão de saída em valores nominais constantes.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nota-se que o artigo aborda um tema de extrema importância para o futuro da geração renovável de energia. Por meio deste, foi possível estudar e avaliar conceitos sobre os conversores de três portas aplicados em sistemas fotovoltaicos. Além disso, por meio das simulações apresentadas, observou-se que a topologia que combina o conversor SEPIC e o Boost pode ser capaz de atender a um sistema de conversão de três

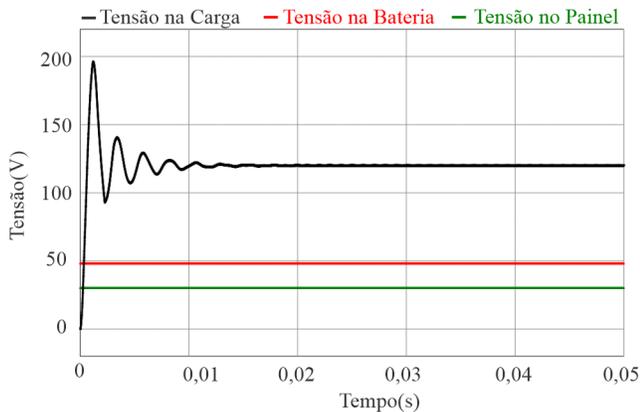


Fig. 5. Simulação da bateria e painel fornecendo para a carga (DI)

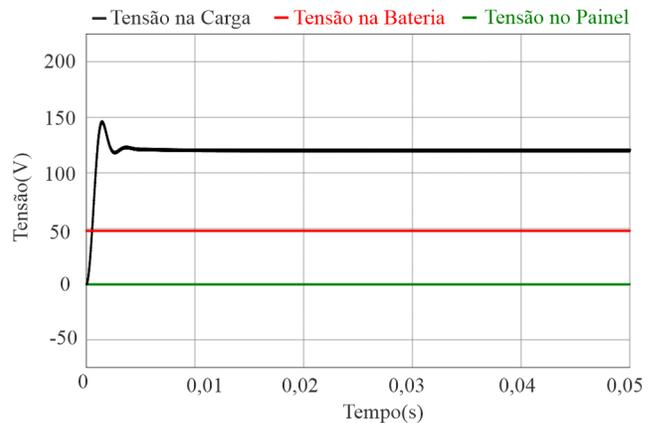


Fig. 6. Simulação da bateria fornecendo para a carga (SISO)

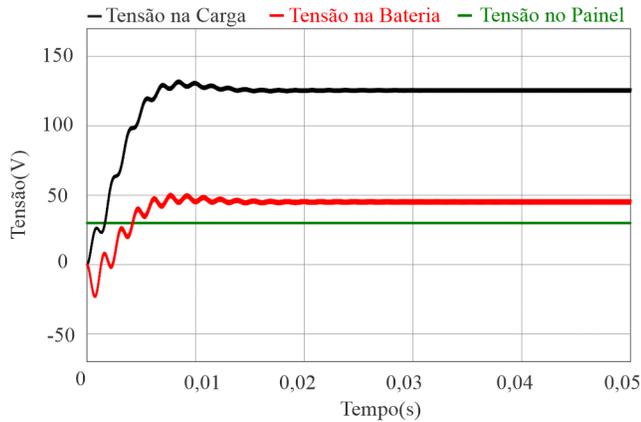


Fig. 7. Simulação do painel fornecendo para a carga e para a bateria

portas (TPCS), e possivelmente a um sistema fotovoltaico com armazenamento de energia utilizando somente um conversor.

Para expansão dos conhecimentos, como trabalhos futuros, sugere-se a realização da simulação das outras duas topologias, além da realização do MPPT e de um sistema de controle que interpreta em qual modo o sistema está operando e ajusta a razão cíclica automaticamente.

VI. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001

REFERENCES

- [1] IEA. International Energy Agency 2022. Acesso em 05 ago. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/>
- [2] ONS. Operador Nacional Do Sistema. 2022. Acesso em 05 ago. 2020. Disponível em: <http://www.ons.org.br/>
- [3] L. Xijun, R. Jiayu, Y. Libin and H. Wei, "Research on Output Controllability of Photovoltaic Grid Connected Generation System with Hybrid Energy Storage," 2017 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA), 2017, pp. 92-95, doi: 10.1109/ICSGEA.2017.44.
- [4] C. CRISTEA, M. CRISTEA, I. BIROU and R. -A. TÎRNOVAN, "Techno-economic evaluation of a grid-connected residential rooftop photovoltaic system with battery energy storage system: a Romanian case study," 2020 International Conference on Development and Application Systems (DAS), 2020, pp. 44-48, doi: 10.1109/DAS49615.2020.9108954.
- [5] M. Andam, J. E. Alami and Y. Louartassi, "Optimization of the Energy Lack and Surplus in a Stand-Alone Photovoltaic System," 2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/IRSEC48032.2019.9078210.
- [6] X. Li, Q. Zhou, Y. Qiu and Y. Hou, "Capacity Configuration Method of Hybrid Energy Storage System for Stand-Alone Photovoltaic Generation System," 2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), 2019, pp. 1704-1709, doi: 10.1109/IMCEC46724.2019.8984110.
- [7] H. Zhang, L. Shan, J. Ren, B. Cheng and H. Zhang, "Study on photovoltaic grid-connected inverter control system," 2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2009, pp. 210-212, doi: 10.1109/PEDS.2009.5385769.
- [8] Z. Wang, Q. Luo, Y. Wei, X. Lu, D. Mou, P. Sun, "Topology Analysis and Review of Three-Port DC-DC Converters" IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 11, Nov 2020.

- [9] K. Sun, L. Zhang, Y. Xing, and J. M. Guerrero, "A distributed control strategy based on dc bus signalling for modular photovoltaic generation system with battery energy storage," IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 10, pp. 3032-45, Oct. 2011.
- [10] W. Jiang and B. Fahimi, "Multiport power electronic interface-concept, modelling, design," IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 7, pp. 1890-1900, Jul. 2011.
- [11] L. An and D. D. Lu, "Design of a single-switch DC/DC converter for a PV-battery-powered pump system with PFM+PWM control," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, no. 2, pp. 910-921, Feb. 2015.
- [12] T. Cheng, D. D. C. Lu, A. Gong, and D. Verstraete, "Analysis of a three-port DC-DC converter for PV-battery system using DISO boost and SISO buck converters," in Proc. Australas. Universities Power Eng. Conf., Wollongong, NSW, Australia, 2015, pp. 1-6.
- [13] J. Zhao, H. H. C. Lu, T. Fernando, L. An, and D. Dah-Chuan Lu, "Design of a non-isolated single-switch three-port DC-DC converter for standalone PV-battery power system," in Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst., Lisbon, 2015, pp. 2493-2496.
- [14] Y. Chen, G. Wen, L. Peng, Y. Kang, and J. Chen, "A family of cost efficient non-isolated single-inductor three-port converters for low power stand-alone renewable power applications," in Proc. 28th Annual IEEE Applied Power Electron. Conf. Expo., 2013, pp. 1083-1088.
- [15] Y. Chen, P. Zhang, X. Zou, and Y. Kang, "Dynamical modeling of the non-isolated single-inductor three-port converter," in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo., Fort Worth, TX, USA, 2014, pp. 2067-2073.
- [16] B. Zhang, P. Wang, T. Bei, X. Li, Y. Che, and G. Wang, "Novel topology and control of a non-isolated three port DC-DC converter for PV-battery power system," in Proc. 20th Int. Conf. Elect. Mach. Syst., Sydney, NSW, Australia, 2017, pp. 1-6.
- [17] G. Chen, Z. Jin, Y. Liu, Y. Hu, J. Zhang, and X. Qing, "Programmable topology derivation and analysis of integrated three-port DC-DC converters with reduced switches for low-cost applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 66, no. 9, pp. 6649-6660, Sep. 2019.
- [18] M. Al-Soeidat, H. Aljarajreh, H. Khawaldeh, D. D. Lu, and J. G. Zhu, "A reconfigurable three-port DC converter for integrated PV-battery system," IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron., to be published, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2941595.
- [19] P. Kumar and M. Rojas-Gonzalez, "Novel 3-switch dual output buck voltage regulator," in Proc. 21st Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo., Dallas, TX, USA, 2006, pp. 467-473.
- [20] Y. Sato, H. Nagata, and M. Uno, "Non-isolated multi-port converter integrating PWM and phase-shift converters," in Proc. IEEE Region 10 Conf., Penang, 2017, pp. 1097-1102.
- [21] Z. Zhou, H. Wu, X. Ma, and Y. Xing, "A non-isolated three-port converter for stand-alone renewable power system," in Proc. 38th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., Montreal, QC, Canada, 2012, pp. 3352-3357.
- [22] H. Wu, Y. Xing, Y. Xia, and K. Sun, "A family of non-isolated three port converters for stand-alone renewable power system," in Proc. 37th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., Melbourne, VIC, Australia, 2011, pp. 1030-1035.
- [23] P. Kumar and M. Rojas-Gonzalez, "Novel 3-switch dual output buck voltage regulator," in Proc. 21st Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo., Dallas, TX, USA, 2006, pp. 467-473.
- [24] P. Kumar and M. Rojas-Gonzalez, "Novel 3-switch dual output buck voltage regulator," in Proc. 21st Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo., Dallas, TX, USA, 2006, pp. 467-473.
- [25] M. Marchesoni and C. Vacca, "New DC-DC converter for energy storage system interfacing in fuel cell hybrid electric vehicles," IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 1, pp. 301-308, Jan. 2007.