

## Estudo de conversores não-isolados com alto ganho de tensão

### A study on non-isolated high voltage gain converters

#### RESUMO

A utilização de topologias de painéis fotovoltaicos em que o ponto máximo de potência é determinado para cada *string* ou módulo, está se tornando cada vez mais comum. Entretanto, essas topologias são caracterizadas por uma baixa tensão de saída, sendo necessário, então, o emprego de conversores com alto ganho de tensão para que esses sejam conectados à rede de distribuição. O objetivo deste trabalho é a análise da aplicação de um conversor *boost* quadrático para elevar a tensão de um painel fotovoltaico. O trabalho aborda as vantagens da utilização da topologia escolhida, como o baixo número de componentes ativos e a simplicidade, assim como as desvantagens, a alta corrente na chave semicondutora. É apresentado um método para calcular os filtros utilizados no conversor e em seguida, uma simulação é realizada para verificar a atuação dos mesmos. Os resultados encontrados apontam que o conversor obteve êxito em elevar a tensão ao valor desejado, assim como os filtros mantiveram a variação de correntes e tensão em valores determinados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Geração de energia fotovoltaica. Eletrônica de potência. Energia elétrica.

#### ABSTRACT

The application of photovoltaic panel topologies that determine the maximum power point for each string or module is becoming more common. However, such topologies are characterized by a low line voltage, which makes necessary the adoption of a high voltage gain converter, so that the system can be connected to the distribution grid. This paper's objective is to analyze the application of a quadratic boost converter to increment the photovoltaic module output voltage. It discusses the topology advantages, such as the simplicity and the small number of active components needed, and disadvantages, such as high current which pass through the semiconductor. The work presents an approach to calculate the converter filters, followed by a simulation to confirm the performance. The results showed that the converter successfully boosted the voltage to the desired value, as well as the current and voltage deviation were restricted within the defined boundaries.

**KEYWORDS:** Photovoltaic power generation. Power electronics. Electric energy.

**André Felipe Pereira Pedroso**  
[Pedroso.2016@alunos.utfpr.edu.br](mailto:Pedroso.2016@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal  
Do Paraná, Pato Branco, Paraná,  
Brasil

**Rafael Cardoso**  
[rcardoso@utfpr.edu.br](mailto:rcardoso@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal  
Do Paraná, Pato Branco, Paraná,  
Brasil

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autorial:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Questões como o aumento desenfreado do consumo de energia elétrica, dever de suprir a demanda de eletricidade em locais de difícil acesso e a preocupação na utilização de métodos não prejudiciais ao meio ambiente estão cada vez mais presentes atualmente. Para balancear essas questões, métodos limpos e alternativos para a obtenção de energia estão sendo cada vez mais utilizados (CHEN *et al.*, 2011, p. 258-278; VENKATARAMANAN; MARNAY, 2008, p. 78-82)

Nesse cenário, a utilização de fontes renováveis de energia está se tornando cada vez mais interessante, devido aos incentivos atribuídos a geração distribuída e aos benefícios relacionados a descentralização da fonte de geração de energia, como a possibilidade da utilização de fontes primárias específicas do local e a diminuição das redes de transmissão (CRAMER; IBRAHIM; KLEINKAUF, 2004, p.38-42; LI; WOLFS, 2008, p. 1320-1333). Esses fatores e a diminuição dos preços dos equipamentos, estão contribuindo para o aumento na instalação de micro, mini e pequenas instalações de geração distribuída.

A instalação de painéis fotovoltaicos, por exemplo, está desempenhando um importante papel, sendo o segmento de energia que mais cresce no mundo. Por ser um método limpo e sem emissão de poluentes, é considerada a energia renovável que pode mais influenciar a geração de energia em 2040 (KJAER; PEDERSEN; BLAABJERG., 2005, p. 1292-1306; LI; HE, 2011, p. 1239-1250).

Em relação a instalação dos painéis, o método de inversor centralizado é muito empregado. Caracterizado por seu baixo custo e alta eficiência, a instalação desse é feita por meio de várias *strings* conectadas em paralelo e ligadas a um único inversor. Entretanto, esse método pode sofrer uma grande diminuição na potência do conjunto devido a sombreamento e a diferença de tensão que pode ocorrer entre as *strings* (CRAMER; IBRAHIM; KLEINKAUF, 2004, p.38-42, REITER *et al.*, 2012, p. 1-5).

A instalação de painéis em locais residenciais, portanto, pode ter sua geração de energia afetada devido ao fato que esses locais podem ser alvo de sombreamento total ou parcial ocasionalmente, causados por nuvens ou até mesmo folhas de árvores. Isso torna interessante a instalação por meio do método *multi-strings*, *string inverters* ou *module integrated inverter* (CRAMER *et al.*, 2004, p.38-42; LI; WOLFS, 2008, p. 1320-1333; REITER *et al.*, 2012, p. 1-5).

A utilização destes métodos melhora a geração do sistema, pois cada *string* terá seu próprio ponto de máxima potência (MPP – *maximum power point*) definido individualmente. Portanto, caso ocorra o sombreamento parcial, o sistema ainda poderá trabalhar com a máxima potência possível no estado em que está.

Apesar das vantagens na utilização da conexão em paralelo dos módulos, essas são caracterizadas por uma baixa tensão de saída, comuns aos painéis fotovoltaicos. Logo, para que ligação com o barramento CC, que irá conectá-los ao inversor, seja possível, é necessário a utilização de um conversor com alto ganho de tensão (KJAER; PEDERSEN; BLAABJERG., 2005, p. 1292-1306; LI; HE, 2011, p. 1239-1250; REITER *et al.*, 2012, p. 1-5).

Este trabalho analisou a aplicação de conversores não isolados de alto ganho para aplicações fotovoltaicas, em específico, o conversor boost em cascata com

ganho quadrático. Serão discutidas as vantagens e limitações da utilização deste conversor e, em seguida, será apresentada uma metodologia para o dimensionamento dos componentes que compõem o mesmo. Serão exibidos os resultados de uma simulação utilizando o conversor projetado, demonstrando o desempenho do conversor assim como o efeito dos filtros dimensionados. As Conclusões finalizam o trabalho resumando os aspectos técnicos abordados no mesmo.

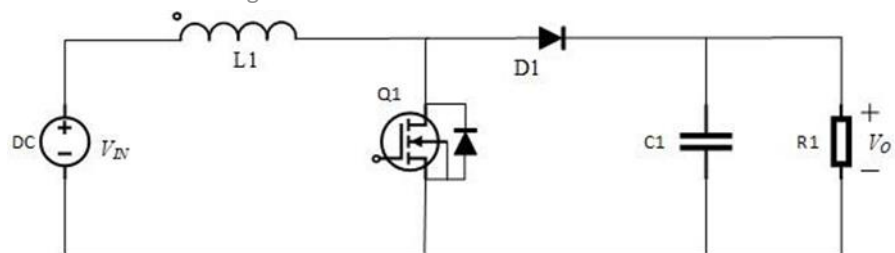
### CONVERSOR BOOST

Conversores *boost* com alto ganho de tensão são amplamente utilizados em sistemas de potência modernos. Desde sistemas de energia renováveis (Chen *et al.*, 2012, p. 1809-1817; LI; HE, 2011, p. 1239-1250) a carros elétricos (TOFOLI *et al.*, 2015, p. 2044-2057). Assim como toda eletrônica moderna, são cada vez mais desejáveis equipamentos com alto rendimento, baixo custo e pequeno porte. Para atender esses requisitos, vários tipos de conversores *boost* foram desenvolvidos. Todos possuindo seu mérito e limitações, como apresentado em (FOROUZESH *et al.*, 2017, p. 9143-9178; LI; HE, 2011, p. 1239-1250; TOFOLI *et al.*, 2015, p. 2044-2057).

Basicamente, os conversores *boost* utilizam métodos para conservar a energia fornecida pela fonte de entrada e liberar para a saída do circuito com uma tensão superior. A energia é conservada através de campos magnéticos ou elétricos, com o emprego de indutores e capacitores, e a transferência dessa energia é realizada por meio de interruptores e diodos (FOROUZESH *et al.*, 2017, p. 9143-9178).

Conversores isolados são preferíveis em casos de alta potência, alto ganho de tensão e quando a isolamento galvânico é necessário (KJAER; PEDERSEN; BLAABJERG., 2005, p. 1292-1306; YAO, 2011, p. 2599-2613). As perdas por condução e comutação, além da interferência eletromagnética são comuns na utilização de topologias não isoladas, especialmente em aplicações com alto nível de potência. Apesar disso, a sua simplicidade e baixo custo dos conversores não isolados tornam uma boa escolha em casos de baixa e média potência (KJAER; PEDERSEN; BLAABJERG., 2005, p. 1292-1306; FOROUZESH *et al.*, 2017, p. 9143-9178). Entretanto, o conversor *boost* convencional, representado na Figura 1, tem seu rendimento afetado devido à alta tensão no diodo de saída e no transistor, o que provoca perdas por comutação relevantes (SOLTANI, 2016, p. 2665-2673).

Figura 1 – Conversor boost não isolado.



Fonte: Autoria própria (2020).

As limitações do conversor *boost* não isolado convencional também se estendem ao incremento da tensão proporcionada pelo conversor. Apesar da

teoria demonstrar um aumento infinito da tensão conforme a razão cíclica ( $D$ ) se aproxima de 1, como mostra a Eq. (1) (RADISH, 2011, p. 254), não é esse o resultado encontrado na prática. Em aplicações reais, deve-se considerar a resistência intrínseca ao indutor, o que resulta em uma deficiência no funcionamento do conversor para um  $D$  próximo de 1, causando uma diminuição no ganho do conversor.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (1)$$

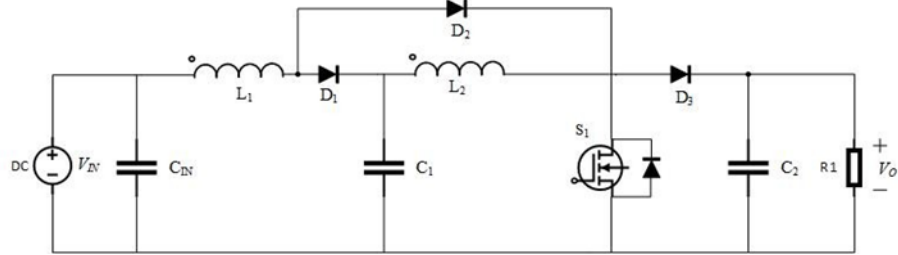
Devido a essa característica, vários métodos para atender as aplicações de conversores com alto ganho não isolados foram propostas, tais como, conversores em cascata (LUO; YE, 2004, p. 590-606; WALKER; SERNIA, 2004, p. 1130-1139), conversores a partir de redes de indutores e capacitores chaveados (SALVADOR *et al.*, 2018, p. 161-170), conversores com indutores acoplados (KIM *et al.*, 2011, p. 1-6) entre outros (AXELROD; BERKOVICH; IOINOVICI, 2003; SOLTANI, 2016, p. 2665-2673; YANG; LIANG; CHENG, 2009, 3144-3152; ZHAO; LEE, 2002, 65-73). Uma análise das aplicações desses métodos pode ser encontrada em (TOFOLI *et al.*, 2015, p. 2044-2057). Essas variações do conversor *boost*, também podem ajudar a diminuir o desgaste nos elementos do circuito, evitando que uma tensão ou corrente de valor elevado esteja presente em apenas um componente (FOROUZESH *et al.*, 2017, p. 9143-9178).

### CONVERSOR BOOST QUADRÁTICO

O conversor *boost* quadrático faz parte dos conversores em cascata. Esses são formados através da combinação em série de conversores idênticos ou que utilizam métodos diferentes para elevação da tensão (híbridos) (FOROUZESH *et al.*, 2017, p. 9143-9178). Os conversores quadráticos utilizam apenas conversores iguais em cascata, o que gera um ganho quadrático de tensão em relação ao ganho normal do conversor utilizados (FOROUZESH *et al.*, 2017, p. 9143-9178; WALKER; SERNIA, 2004, p. 1130-1139; LUO; YE, 2004, p. 590-606).

Tradicionalmente o conversor *boost* quadrático é formado por dois conversores, como o apresentado na figura 1, em cascata. Para diminuir a complexidade do circuito, uma variação deste foi proposta. Trocando a chave do primeiro circuito por um diodo, pode-se obter o mesmo ganho do conversor *boost* quadrático de dois estágios, mas com a utilização de apenas um componente ativo, como ilustrado na Figura 2. Entretanto, a alta corrente, soma das correntes dos dois indutores  $I_{L1}$  e  $I_{L2}$ , que irá passar por  $S_1$  irá gerar perdas por condução, diminuindo a eficiência do conversor (FOROUZESH *et al.*, 2017, p. 9143-9178; ORTIZ-LOPEZ *et al.*, 2008, p. 478-487; LUO, 2006].

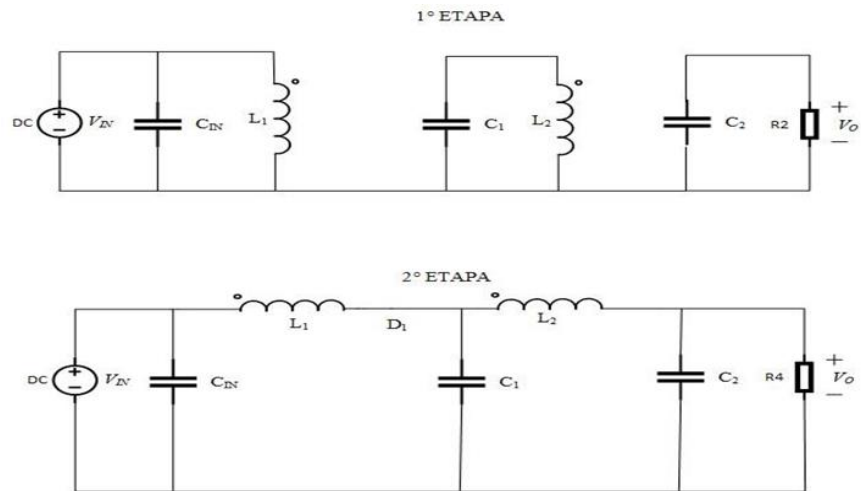
Figura 2 – Conversor *boost* quadrático com a utilização de apenas uma chave.



Fonte: Autoria própria (2020).

As etapas de funcionamento do conversor *boost* quadrático são duas, como mostrado na Figura 3. Na primeira etapa, no momento em que a chave estiver fechada, a energia é transferida da fonte de entrada para o indutor  $L_1$  e simultaneamente, a energia do capacitor  $C_1$  é transferida para o indutor  $L_2$ . Nesse momento, o capacitor  $C_2$  mantém a tensão de saída praticamente constante. Na segunda etapa, os indutores transmitem sua energia para a carga, provocando a elevação de tensão (RADISH, 2011, p. 299; LUO, 2006, p. 314). Essas etapas tem a duração de  $TD$  e  $T(1-D)$ , respectivamente, onde  $D$  é a razão cíclica e  $T$  o período de comutação.

Figura 3 – Etapas de funcionamento do conversor *boost* quadrático



Fonte: Autoria própria (2020).

Para um conversor operando em modo de condução contínua (CCM), em que não há diferença entre a variação de corrente nos indutores durante as duas etapas do circuito o ganho do mesmo pode ser calculado por:

$$\frac{V_{C_1}}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D)} \quad (2)$$

$$\frac{V_{C_2}}{V_{C_1}} = \frac{1}{(1-D)} \quad (3)$$

$$G_v = \frac{V_{C_2}}{V_{C_1}} = \frac{1}{(1-D)^2} \quad (4)$$

## DIMENSIONAMENTO DOS FILTROS

Para o dimensionamento dos filtros, foi utilizada a metodologia indicada em (LUO, 2006, p.315).

$$L = V_L \frac{\Delta t}{\Delta I_L} \quad (5)$$

Aplicando as informações da etapa 1 na Eq. (5),

$$L_1 = V_{in} \frac{D}{\Delta I_{L1}} \quad (6)$$

$$L_2 = V_{C1} \frac{D}{\Delta I_{L2}} \quad (7)$$

Substituindo as Eq. (2) e (3) nas Eq. (6) e (7), resulta,

$$L_1 = D \frac{(1-D)^2}{\Delta I_{L1} f} V_0 \quad (8)$$

$$L_2 = D \frac{(1-D)}{\Delta I_{L2} f} V_0 \quad (9)$$

Para os capacitores tem-se:

$$C_1 = \frac{D}{\Delta V_{C1} f} I_2 \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{D}{\Delta V_{C2} f} I_0 \quad (11)$$

Após definir alguns parâmetros do circuito, exibidos na tabela 1, define-se que os valores da razão cíclica estarão entre 0,7 e 0,75. O intervalo reduzido em que a razão cíclica irá operar é também uma vantagem da utilização o conversor *boost* quadrático (FOROUZESH *et al.*, 2017, p. 9143-9178). Foi definido que é aceitável uma variação de 40% da corrente RMS que irá passar pelos indutores. Em relação a tensão dos capacitores foi definida uma variação de 10% para o valor da tensão RMS do mesmo. Na Tabela 1, estão definidos os valores dos componentes e as demais características do circuito.

Tabela 1. Especificações dos componentes utilizados.

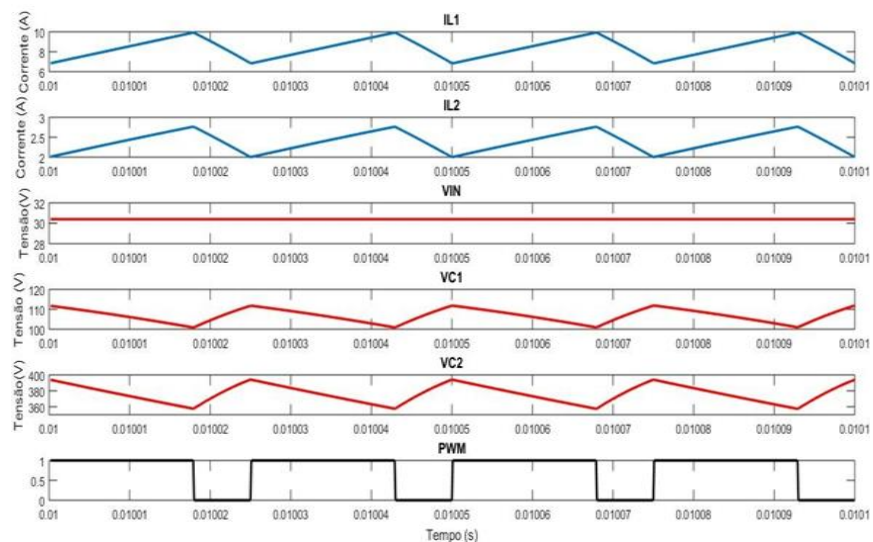
Componentes	Especificações
Tensão de saída ( $V_0$ )	380V
Frequência	40 kHz
$L_1$	202 $\mu$ H
$L_2$	2,5 mH
$C_1$	3,9 $\mu$ F
$C_2$	330 nF
$C_{in}$	10 $\mu$ F
Módulo Fotovoltaico	Modelo: <i>Canadian Solar CS6P-260</i> Potência nominal: 260W Tensão de circuito aberto: 37,5 V Tensão de máxima potência: 30,4 V Corrente de curto circuito: 9,12 A Corrente de máxima potência: 8,56A

Fonte: Autoria própria (2020).

## RESULTADOS E DISCUSÕES

Na Figura 4, estão exibidas as formas de corrente e tensão nos componentes do conversor projetado. Com a utilização do *software* PSIM, foram realizadas simulações para averiguar se os filtros foram projetados corretamente. Considera-se que o painel fotovoltaico está trabalhando em sua potência nominal, logo, a tensão  $V_{in}$  é de 30,4 V.

Figura 4 - Formas de onda geradas pelo conversor boost quadrático operando em regime permanente.



Fonte: Autoria própria (2020).

Pela Figura 4, pode-se concluir que método utilizado para dimensionamento dos filtros atingiu os objetivos do projeto. A variação das correntes  $I_{L1}$  e  $I_{L2}$  foram de 3 A (39%) e 0,7 A (32%). Já a variação de tensão dos capacitores  $V_{C1}$  e  $V_{C2}$  foram de 10,4 V (9,7%) e 36,7 V (9,6%), respectivamente, ambas se mantiveram dentro do limite determinado.

## CONCLUSÕES

Nesse trabalho foram estudados os conversores elevadores de tensão não isolados com alto ganho de tensão, devido ao seu extenso campo de aplicações e sua simplicidade em comparação aos conversores isolados.

Primeiramente, foram apresentados os benefícios e limitações da utilização do conversor *boost* convencional. Variações desse foram discutidas. Em seguida, a topologia e etapas de funcionamento do conversor *boost* em cascata com duas etapas utilizando uma chave semicondutora foram apresentadas. Um *boost* quadrático foi projetado, para ser empregado em um caso hipotético de aplicação para um painel fotovoltaico modelo *Canadian Solar CS6P-260*. Os resultados da simulação demonstraram que os filtros obtiveram êxito em manter a variação de corrente e tensão dos componentes dentro dos limites estipulados.

## REFERÊNCIAS

AXELROD, B.; BERKOVICH, Y.; IOINOVICI, A. Transformerless dc-dc converters with a very high dc line-to-load voltage ratio, *in*: Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems, 2003, Bangkok, **Anais [...]**, p. III-III, mai. 2003, Disponível em:  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/1205049?arnumber=1205049>. Acesso em: 20 jun. 2020

CHEN, C. *et al.* Smart energy management system for optimal microgrid economic operation, **IET Renewable Power Generation**, v. 5, n. 3, p. 258-267, 2011, Disponível em:  
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5743067>. Acesso em: 20 jun. 2020.

CHEN, S. *et al.* A safety enhanced, high step-up dc-dc converter for ac photovoltaic module application, **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 27, n. 4, p. 1809-1817, abr. 2012, Disponível em:  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6031927>. Acesso em: 20 jun. 2020.

CRAMER, G.; IBRAHIM, M.; KLEINKAUF, W. PV system technologies. **Refocus**, v. 5, n. 1, p. 38-42. 2004, Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1471084604000769>, Acesso em: 20 jun. 2020.

REITER, O. R. D. *et al.* Comparative analysis of series and parallel photovoltaic arrays under partial shading conditions, *in*: 2012 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, Fortaleza, **Anais [...]**, p. 1-5, 2012, Disponível em:  
[https://www.researchgate.net/publication/261040791\\_Comparative\\_analysis\\_of\\_series\\_and\\_parallel\\_photovoltaic\\_arrays\\_under\\_partial\\_shading\\_conditions](https://www.researchgate.net/publication/261040791_Comparative_analysis_of_series_and_parallel_photovoltaic_arrays_under_partial_shading_conditions), Acesso em: 23 jun. 2020

FOROUZESH, M. *et al.* Step-up dc-dc converters: a comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications, **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 32, n. 12, p. 9143-9178, dez. 2017, Disponível em:  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7872494>. Acesso em: 23 jun. 2020



KIM, K. *et al.* Improved non-isolated high voltage gain boost converter using coupled inductors, *in*: 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, Beijing, **Anais [...]**, p. 1-6, 2011, Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6073553>. Acesso em: 24 jun. 2020

KJAER, S. B.; PEDERSEN, J. K.; BLAABJERG, F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules, **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 41, no. 5, pp. 1292-1306, set.-out. 2005, Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1510827>. Acesso em: 24 jun. 2020

LI, Q.; WOLFS, P. A review of the single phase photovoltaic module integrated converter topologies with three different dc link configurations, **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 23, n. 3, p. 1320-1333, mai. 2008, Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4481250>. Acesso em 24 jun. 2020

LI, W.; HE, X. Review of nonisolated high-step-up dc/dc converters in photovoltaic grid-connected applications, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 58, n. 4, p. 1239-1250, abr. 2011, Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/224138127\\_Review\\_of\\_Nonisolated\\_High-Step-Up\\_DCDC\\_Converters\\_in\\_Photovoltaic\\_Grid-Connected\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/224138127_Review_of_Nonisolated_High-Step-Up_DCDC_Converters_in_Photovoltaic_Grid-Connected_Applications). Acesso em: 24 jun. 2020

LUO, F. L.; YE, H. **Essential dc/dc converters**. 1.ed. Boca Raton: CRC Press. 2006.

LUO, F.L; YE, H. Positive output cascade boost converters, **IEEE Proceedings Electric Power Applications**, v. 151, n. 5, p. 590-606, 9 set. 2004, Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1336617>. Acesso em: 24 jun. 2020

ORTIZ-LOPEZ, M. G. *et al.* Modelling and analysis of switch-mode cascade converters with a single active switch, **IET Power Electronics**, v. 1, n. 4, p. 478-487, dez 2008, Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4694795>. Acesso em: 24 jun. 2020

RASHID, MUHAMMAD H. **Power electronics handbook: devices, circuits and applications**. 3.ed. Oxford: Elsevier, 2011.

SALVADOR, M. A. *et al.* Conversor CC-CC de alto ganho obtido pela combinação entre redes de indutor e de capacitor chaveados. **SOBRAEP**, v. 23, n. 2, p. 161-170, 2018, Disponível em: <https://sobraep.org.br/site/uploads/2018/06/rvol23no2p13.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2020

SOLTANI, M. et al. Family of step-up dc/dc converters with fast dynamic response for low power applications, **IET Power Electronics**, v. 9, n. 14, p. 2665-2673, 16 nov. 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7872494>. Acesso em: 30 jun. 2020

TOFOLI, F. L. *et al.* Survey on non-isolated high-voltage step-up dc–dc topologies based on the boost converter, **IET Power Electronics**, v. 8, n. 10, p. 2044-2057, out. 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7274067>. Acesso em: 30 jun. 2020

VENKATARAMANAN, G.; MARNAY, C. A larger role for microgrids, **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 6, n. 3, p. 78-82, mai-jun. 2008, Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4505829>. Acesso em: 30 jun. 2020

WALKER, G. R.; SERNIA, P. C. Cascaded dc-dc converter connection of photovoltaic modules, **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 19, n. 4, p. 1130-1139, jul. 2004. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1310401>. Acesso em: 03 jul. 2020

YANG, L.; LIANG, T.; CHEN, J. Transformerless dc–dc converters with high step-up voltage gain, **IEEE transactions on industrial electronics**, v. 56, n. 8, p. 3144-3152, Ago. 2009. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4926167>. Acesso em: 03 jul. 2020

YAO, C. et al. Isolated buck–boost dc/dc converters suitable for wide input-voltage range, **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 26, n. 9, p. 2599-2613, 2011. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5710987>. Acesso em: 03 jul. 2020

ZHAO, Q.; LEE, F. C. High-efficiency, high step-up dc-dc converters, **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 18, n. 1, p. 65-73, jan. 2003. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1187325>. Acesso em: 03 jul. 2020