

DESENVOLVIMENTO DO CONVERSOR CC-CC INTERLEAVED BOOST

Barbara Camargo Goncalves¹, Joel Henrique Lessi Zanetta¹, Estelio da Silva Amorim¹, Luciano de Souza da Costa e Silva¹, Edson Italo Mainardi Junior¹, Diogo Ramalho de Oliveira¹

¹Instituto Federal de Mato Grosso do Sul – Três Lagoas – MS

barbara.goncalves@estudante.ifms.edu.br, joel.zanetta@estudante.ifms.edu.br, estelio.amorim@ifms.edu.br, luciano.souza@ifms.edu.br, edson.mainardi@ifms.edu.br, diogo.ramalho@ifms.edu.br

Resumo

A produção de energia atualmente vem sendo cada vez mais estudada com foco em alto rendimento. Estudos são realizados para de fato, obter uma melhora em relação a todo o procedimento desenvolvido e implementado para se obter resultados satisfatórios. Em todos os procedimentos de conversão de energia, há perdas, impasses e intervenções que abaixam o rendimento dos processos que acontecem durante a conversão, como por exemplo nos painéis solares, há sujeiras, sombreamentos parciais e outros impasses que diminuem o rendimento nominal dos painéis. O desenvolvimento desse trabalho visa a uma nova implementação de técnicas já elaboradas com o mesmo propósito, aumentar a sua eficiência em relação a esses impasses que na maioria das vezes, diminuem o seu rendimento permanente. Foi desenvolvido um conversor de energia que somado ao algoritmo de máxima potência, consiga controlar e entregar o melhor ponto de máxima potência dentro de um ciclo quando um painel solar é submetido a um sombreamento parcial em relação a incidência de radiação solar. Para que esse algoritmo seja implementado, é necessário a sintetização do conversor físico para que a energia de forma física, seja gerada e alocada de maneira a obter sua melhor e mais alta rentabilidade. Para essa relação acontecer, os parâmetros físicos dos componentes devem atender os parâmetros máximos estabelecidos em cálculos, para que então, seja elaborada o protótipo, que é discorrido nesse projeto.

Palavra chave: Interleaved boost, conversor CC-CC, painel solar.

Introdução

Com a demanda de energia cada vez maior na vida do ser humano, sua necessidade vem sendo cada vez mais relevante. Como a matriz energética majoritária é a hidroelétrica, e por sua vez, denotada como energia limpa, mas de forma indireta, degrada-se todo um nicho ecológico, toma-se a partida de encontrar outros meios para que seja capaz usufruir de outras fontes. Uma fonte consideravelmente relevante é a energia oriunda de painéis fotovoltaicos, que são uma fonte de energia totalmente limpa e sustentável, onde o processo de transformação para produção de energia utiliza um material semiconductor para, quando as partículas de luz solar (fótons) incidirem, os elétrons do material semiconductor entrarem em movimento, gerando eletricidade, denominado efeito

fotolétrico. Os painéis fotovoltaicos, aplicados nos sistemas de microgeração e minigerção distribuída, apresentam baixo rendimento quando comparados aos outros tipos de geração de energia elétrica, muito devido às suas características de comportamento não-linear, que sob determinadas condições, podem apresentar baixos níveis de extração de potência (ESRAM et al., 2006; JAIN; AGARWAL, 2004; KOUTROULIS; BLAABJERG, 2012).

Um dos aspectos negativos é o sombreamento total ou parcial da célula fotovoltaica, fazendo com que se restrinja o fluxo de elétrons que circulam pelo módulo fotovoltaico; assim, a corrente em todo o módulo fotovoltaico é reduzida, o que significa diminuir a irradiação solar, consequentemente a geração produzida, diretamente agindo na diminuição da potência entregue. É a partir desse ponto que os inversores solares desempenham papel essencial no processo de conversão e de gerenciamento da energia elétrica produzida. O estágio de potência típico dos inversores solares é composto de dois conversores, um CC-CC, responsável por otimizar a extração de potência dos painéis fotovoltaicos e por realizar a elevação da tensão CC, e um CC-CA, responsável pela proteção contra-ilhamento, pelo sincronismo e pelo controle da corrente injetada na rede (KJAER; PEDERSEN; BLAABJERG, 2005).

O foco deste projeto concentra-se no desenvolvimento do estágio de conversão CC-CC presente nos sistemas fotovoltaicos, tendo como objetivo primordial aumentar a extração de potência destes painéis e diminuir as perdas no processo de conversão CC-CC. Portanto, a proposição do projeto concentra-se em duas vertentes; o desenvolvimento em *software* do algoritmo de controle digital responsável pelo rastreamento do ponto de máxima potência dos painéis fotovoltaicos, termo mais conhecido da sigla inglesa *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*; e a implementação em *hardware* da topologia responsável pela conversão CC-CC com baixas perdas e elevado rendimento. Este plano de trabalho específico busca atender o segundo objetivo supracitado, a partir do desenvolvimento de um conversor CC-CC elevador, que utiliza a técnica de entrelaçamento de múltiplas células conversoras, mais conhecido pelo termo inglês *Interleaved Boost (IB)*.

Quando um módulo solar fotovoltaico é sombreado parcialmente, a área sombreada age como um resistor, fazendo com que a potência gerada seja dissipada na forma

de calor, esse efeito é chamado de *hot-spots* (pontos quentes), que à longo prazo pode danificar os painéis fotovoltaicos. Com esse impasse, obteve-se a ideia de se desenvolver um conversor de energia que permita rastrear o ponto de máxima potência instantânea e tomar ações para que aquele ponto seja não percorrido pela corrente produzida, através de um componente chamado diodo de *bypass*, fazendo com que assim, não flua corrente elétrica por aquela célula parcialmente sombreada.

O conversor *Boost* é um dispositivo eletrônico que eleva a tensão de saída em relação à tensão de entrada (CC-CC). A construção básica de um conversor *Boost* envolve três componentes principais: uma chave (interruptor) que pode ser de característica IGBT ou MOSFET controlados eletronicamente por pulsos de tensão, um indutor e um capacitor. Nestas aplicações, que necessitam elevação de tensão ao barramento CC, a utilização do conversor *Boost* clássico apresenta a simplicidade como principal vantagem; contudo, quando o processamento de energia ocorre em aplicações de alta potência e elevada corrente, o conversor *Boost* clássico sofre com o aumento das perdas, com o baixo rendimento, e com o elevado peso e volume da topologia. Nestes casos, o emprego de conversores CC-CC *Interleaved Boost* (IB) apresenta vantagens comparativas, dentre as quais, citam-se a divisão dos esforços de corrente nas chaves e nos indutores, que resulta no incremento do rendimento energético e na diminuição dos elementos magnéticos e dos semicondutores de potência; o aumento da frequência da ondulação, impactando novamente na diminuição dos elementos reativos; além da promoção de melhoria na distribuição das perdas e na dissipação térmica de calor (HARTNETT et al., 2015; JUNG et al., 2010; RAM; MOULI; SCHIJFFELLEN, 2017).

Metodologia

Para construção do conversor *Interleaved Boost*, o embasamento foi no modelo clássico do conversor *Boost*. Os conversores CC-CC possuem dois modos de funcionamento, condução contínua ou condução descontínua. O modo de condução é caracterizado pela corrente no indutor. Em regime permanente, se a corrente não atinge o valor zero, então o conversor está operando no modo de condução contínua (CCM – *Continuous Conduction Mode*). Se a corrente atinge o valor zero a cada etapa de comutação, então se está operando no modo de condução descontínua (DCM – *Discontinuous Conduction Mode*) (MARTINS; BARBI, 2006).

O modo de condução mais adequado para o IB é o contínuo, pois a variação de irradiação nos painéis não deixará zerar a corrente no indutor, o que não caracterizaria o modo descontínuo. Assim, a Figura 1 mostra o modelo clássico do conversor *Boost*.

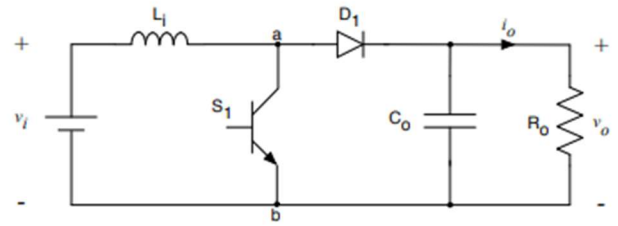


Figura 1. Conversor CC-CC *Boost* clássico. Fonte: (PETRY, 2014).

O funcionamento do conversor se dispõe em duas etapas de operação. Na etapa 1, a chave (transistor) é fechada, e com isso, a corrente no indutor L cresce, armazenando energia. O diodo D é polarizado reversamente, isolando o estágio de saída da fonte.

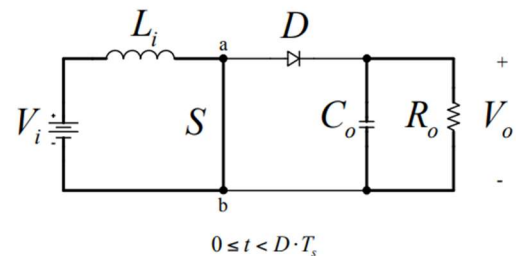


Figura 2. 1º etapa de funcionamento. Fonte: (PETRY, 2014).

Na segunda etapa, a chave S é bloqueada e o diodo D passa a conduzir corrente, a energia armazenada no indutor L é transferida para saída, como mostra a Figura 3.

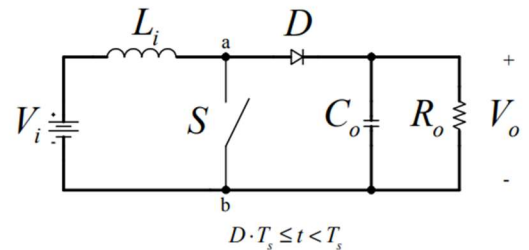


Figura 3. 2º etapa de funcionamento. Fonte: (PETRY, 2014).

O ganho de tensão G do conversor *Boost* é obtido resolvendo-se a Lei de Kirchhoff das tensões, considerando os respectivos valores médios, na malha que envolve a fonte de entrada V_i , o indutor L_i , e a chave S . Como, em regime permanente, o valor da tensão média em um indutor é nulo, a tensão média na chave é igual à tensão média da fonte, como indicado em (1). Em (2), relaciona-se as tensões de saída e de entrada, para se obter o ganho do conversor. A especificação da razão cíclica D do conversor é apresentada em (3), como função do ganho do conversor G .

$$V_s = V_i = V_o \cdot (1 - D) \quad (1)$$

$$G = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - D} \quad (2)$$

$$D = 1 - \frac{1}{G} \quad (3)$$

Sendo:

- V_s - Tensão média na chave;
- V_o - Tensão média de saída;
- V_i - Tensão média de entrada;
- D - Razão cíclica;
- G - Ganho de tensão do conversor.

A razão cíclica determina o tempo em que a chave opera em condução de corrente; isso determina diretamente o carregamento do indutor e, portanto, a quantidade de corrente que será entregue no seu descarregamento presente na Figura 4.

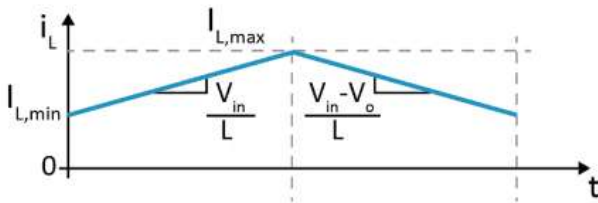


Figura 4. Variação de corrente no indutor. Fonte: (MORAES, 2023).

Como são duas etapas de operação, a fase de carregamento e a fase de descarregamento é dividida em dois ciclos, nos quais a chave S e o diodo D dividem a condução de corrente para a carga, mostrado na Figura 5.

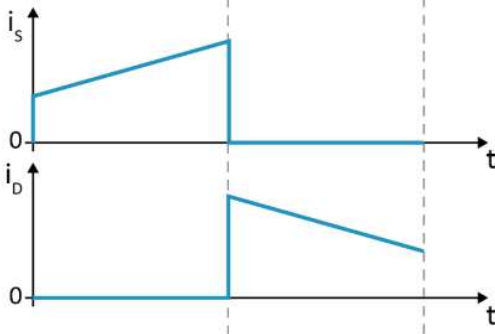


Figura 5. Corrente na chave S e corrente no diodo D . Fonte: (MORAES, 2023).

Para dimensionamento do indutor, é necessário determinar a corrente e a ondulação de corrente que será submetido a ele, e para isso, utiliza-se as relações apresentadas em (4) e (5).

$$\Delta I_L = \frac{V_i}{L \cdot f_s} \cdot D \quad (4)$$

$$I_L = \frac{I_o}{(1-D)} = \frac{P_o}{(1-D) \cdot V_o} \quad (5)$$

Sendo:

- ΔI_L - Ondulação de corrente no indutor;
- L - Indutância;

- f_s - Frequência de chaveamento;
- I_L - Corrente média no indutor;
- I_o - Corrente média na carga;
- P_o - Potência na carga.

Como a tensão sobre o capacitor é a própria tensão de saída, seu dimensionamento é dado pela ondulação de tensão de saída, como indicado em (8).

$$\Delta V_C = \frac{I_o}{C \cdot f_s} \cdot \frac{V_i - V_o}{V_o} \quad (8)$$

Sendo:

- ΔV_C - Ondulação de tensão no capacitor;
- C - Capacitância;

Analogamente ao conversor *Boost*, o *Interleaved* obedece a critérios para seu dimensionamento de componentes, sendo adaptado para sua versão com 3 células de comutação (Chave-Indutor-Diodo), e como apresentado na Figura 4 e Figura 5, a divisão de condução de corrente ocorre nos componentes chave S e diodo D , aumentando a quantidade de componentes que executam essa função, diminuindo os esforços, e com isso, diminuindo o peso e volume da topologia.

Resultados e Discussão

Os parâmetros de entrada para a especificação do conversor *Interleaved Boost (IB)* estão relacionados ao número de células de comutação N , potência nominal total P_o , potência nominal por célula de comutação P_C , tensão nominal de entrada V_i , tensão de saída V_o , frequência de chaveamento f_s , ondulação de corrente no indutor ΔI_L e ondulação de tensão no capacitor ΔV_C , indicados a seguir.

- Número de células: $N = 3$;
- Potência nominal total: $P_o = 1,5 \text{ kW}$;
- Potência nominal por célula: $P_C = 500 \text{ W}$;
- Tensão de entrada nominal: $V_i = 123,2 \text{ V}$;
- Tensão de saída nominal: $V_o = 200 \text{ V}$;
- Frequência de chaveamento: $f_s = 50 \text{ kHz}$;
- Ondulação de corrente no indutor: $\Delta I_L(\%) = 10\%$ da corrente média de cada indutor;
- Ondulação de tensão no capacitor de saída: $\Delta V_C(\%) = 10\%$ da tensão média.

Com esses parâmetros, pode-se dimensionar os componentes que atenderão a demanda de potência estabelecida. A seguir, apresenta-se na Figura 6 o modelo em malha aberta do

circuito de potência do conversor *Interleaved Boost* com 3 células de comutação.

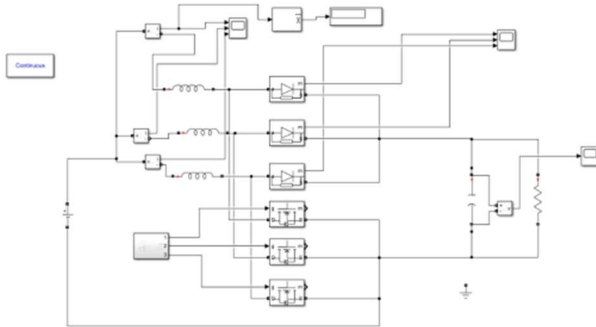


Figura 6. Circuito de potência do modelo feito via *Matlab* com 4 chaves (Transistores de potência). **Fonte:** Próprio Autor, 2023.

Para o funcionamento de forma eficaz e sem perturbações do conversor, foi feita uma simulação via *Matlab*; nele, foi desenvolvido o circuito de potência e o circuito de disparo das chaves, como apresentado na Figura 7.

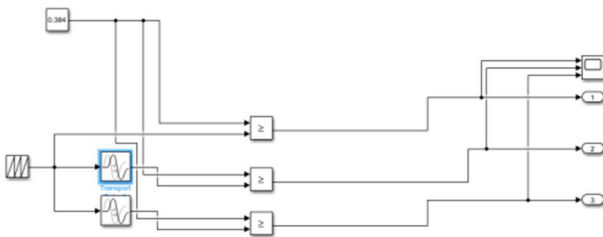


Figura 7. Defasamento das chaves. **Fonte:** Próprio Autor, 2023.

A verificação da comutação de corrente é feita a partir da análise de corrente em cada célula de comutação. Como pode-se notar no resultado de simulação apresentado na Figura 8, as correntes estão defasadas entre si de 120° . Na Figura 9, esta relação de defasagem fica mais evidente, já que as formas de onda das três correntes são apresentadas na mesma posição referencial.

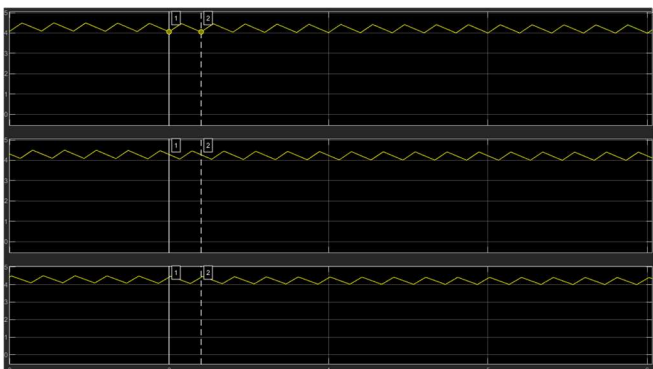


Figura 8. Correntes defasadas em cada célula de comutação.

Fonte: Próprio Autor, 2023.

O comportamento das correntes em cada célula de comutação resulta na corrente real de saída, que, ao invés de passar por apenas 1 indutor, 1 chave e 1 Diodo, passaram por 3

componentes de cada topologia, diminuindo assim o peso e volume e conseqüentemente os esforços exigidos.

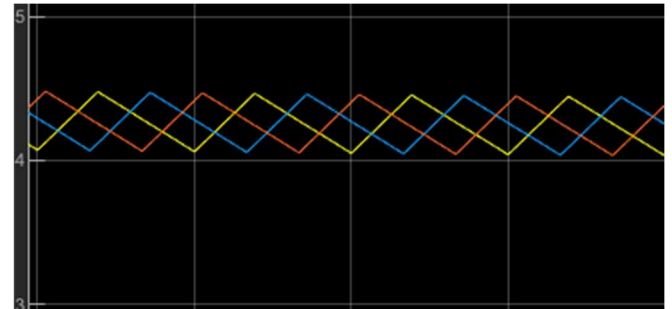


Figura 9. Corrente resultante. **Fonte:** Próprio Autor, 2023.

Após o dimensionamento dos componentes necessários para o conversor, há necessidade da criação do hardware do mesmo, e com o auxílio do software *Eagle* da *Autodesk* é possível visualizar a PCB que dará origem a criação do conversor *interleaved Boost* mostrada na Figura 10.

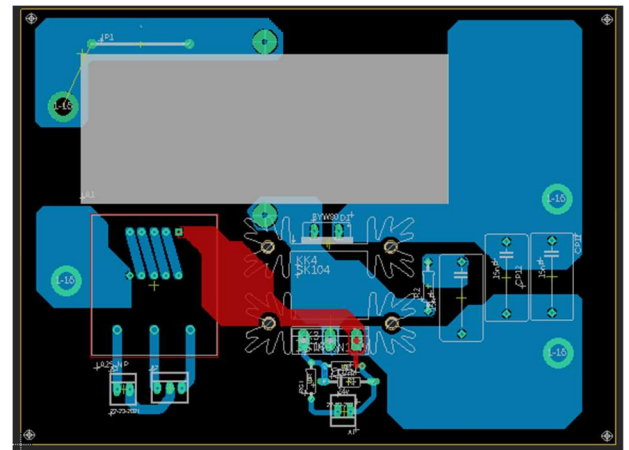


Figura 10. Placa de potência (PCB). Software Eagle – Autodesk.

Fonte: Próprio Autor, 2023.

Além da placa de potência, foram desenvolvidas as placas de Processamento Analógico de Sinais (PAS) e os circuitos de *gate drive*. A seguir, na Figura 7, a *Printed Circuit Board* (PCB) da PAS.

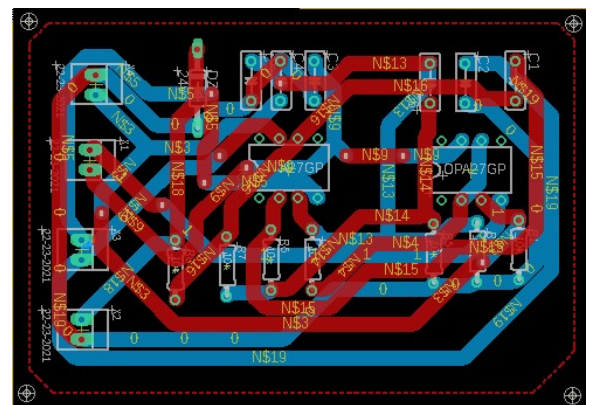


Figura 11. Placa de PAS (PROCESSAMENTO ANALÓGICO DE SINAIS) (PAS). **Fonte:** Próprio Autor, 2023.

Com a simulação do comportamento das correntes nos indutores, pôde-se observar e compreender que o seu funcionamento estava coerente com a analogia feita em relação aos cálculos do *Boost*, e aprimorados para a comutação de 3 células, fica estabelecido e consolidado assim a eficácia da projeção do conversor. Tendo em vista esse comportamento, os parâmetros deduzidos pelos cálculos foram atendidos de maneira satisfatória. Também foi visto que a ondulação de corrente nos indutores não explodiu ou tendeu a zero, o que mostra que os parâmetros adotados nos componentes passivos atendia a demanda e também com relação a tensão estipulada na saída, medida no capacitor em paralelo com a carga.

Com auxílio da plataforma AutoDesk, o *software Eagle* proporcionou a visibilidade de *hardware* em relação a magnitude física dos componentes e uma noção de como acomodar em relação as trilhas. Dessa forma, o dimensionamento dos componentes pôde ser feito de maneira eficaz.

Considerações Finais

O projeto do Conversor *Interleaved Boost* aplicada para o rastreamento do ponto de máxima potência (*MPPT*) em sistemas de energia solar representa uma iniciativa inovadora e relevante para o campo da energia renovável e eletrônica de potência. O uso de múltiplas células de comutação em paralelo e um algoritmo de controle avançado permite que o conversor maximize a eficiência na conversão de energia solar em eletricidade utilizável. Isso é crucial para aproveitar ao máximo o potencial das fontes de energia renovável e também este projeto tem o potencial de impulsionar a adoção de sistemas de energia solar, contribuindo para a redução das emissões de carbono e promovendo a energia sustentável. É importante destacar que a implementação bem-sucedida do *MPPT* e a otimização da eficiência energética podem ser desafios técnicos complexos, portanto, testes rigorosos e validações sob diversas condições operacionais são essenciais para garantir a eficácia do sistema. Projetos como este têm um papel crucial em abordar os desafios globais relacionados às mudanças climáticas e à escassez de recursos energéticos não renováveis e juntamente a colaboração com especialistas em eletrônica de potência e energia renovável, bem como investimentos em pesquisas e desenvolvimento, serão fundamentais para o sucesso deste projeto. Em suma, o *Conversor Interleaved Boost* de 3 Células de Comutação com foco no ponto de máxima potência é uma iniciativa tecnológica promissora que pode ter um impacto significativo na eficiência da geração de energia solar e no avanço da sustentabilidade global.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao IFMS pelo apoio financeiro cedido ao projeto, via edital nº 030/2022 - PROPI/IFMS – pesquisa aplicada, desenvolvimento tecnológico e inovação.

Referências

- ESRAM, T. et al. Dynamic maximum power point tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 21, n. 5, p. 1282–1291, set. 2006.
- HARTNETT, K. J. et al. Comparison of 8-kW CCTT IM and Discrete Inductor Interleaved Boost Converter for Renewable Energy Applications. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 51, n. 3, p. 2455–2469, 2015.
- JAIN, S.; AGARWAL, V. A new algorithm for rapid tracking of approximate maximum power point in photovoltaic systems. **IEEE Power Electronics Letters**, v. 2, n. 1, p. 16–19, 2004.
- JUNG, D. et al. **Ripple Analysis of Interleaved Soft Switching Boost Converter for Photovoltaic Applications**. The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA. **Anais...Sapporo: IEEE**, 2010.
- KJAER, S. B.; PEDERSEN, J. K.; BLAABJERG, F. A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 41, n. 5, p. 1292–1306, 2005.
- KOUTROULIS, E.; BLAABJERG, F. A New Technique for Tracking the Global Maximum Power Point of PV Arrays Operating Under Partial-Shading Conditions. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 2, n. 2, p. 184–190, abr. 2012.
- MARTINS, D. C.; BARBI, I. **Eletrônica de Potência: Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. 2. ed. Florianópolis: Edição dos Autores, 2006.
- MORAES, C. **Conversor Boost Passo a Passo**. Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/conversor-boost-mcc/>>. Acesso em: 9 out. 2023.
- PETRY, C. A. **Conversores CC-CC Não-Isolados: Conversor Boost**. Disponível em: <https://www.professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_CEFET/Eletronica_Potencia/2014_2/Apresentacao_Aula_13.pdf>. Acesso em: 9 out. 2023.
- RAM, G.; MOULI, C.; SCHIJFFELLEN, J. H. Design and Comparison of a 10-kW Interleaved Boost Converter for PV Application Using Si and SiC Devices. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, v. 5, n. 2, p. 610–623, 2017.