UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-BRASILEIRA

INSTITUTO DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS

TCHILATCHI PAULINO CÓ

SIMULAÇÃO DE UM CONVERSOR BOOST DE ALTO GANHO UTILIZANDO DUAS CÉLULAS DE ACOPLAMENTO MAGNÉTICO

REDENÇÃO

2026

TCHILATCHI PAULINO CÓ

SIMULAÇÃO DE UM CONVERSOR BOOST DE ALTO GANHO UTILIZANDO DUAS CÉLULAS DE ACOPLAMENTO MAGNÉTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia de Energias, do Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito parcial para a obtenção do Título de Graduação em Engenharia de Energias.

Orientador: Prof. Gustavo Alves de Lima Henn.

REDENÇÃO
2026

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira Sistema de Bibliotecas da UNILAB Catalogação de Publicação na Fonte.

Có, Tchilatchi Paulino.

C652s

Simulação de um conversor boost de alto ganho utilizando duas células de acoplamento magnético / Tchilatchi Paulino Có. - Redenção, 2026.

57f: il.

Monografia - Curso de Engenharia De Energias, Instituto De Engenharias E Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção,

2026.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Alves de Lima Henn.

1. Acoplamento magnético. 2. Conversor Boost de alto ganho. 3. Conversor entrelaçado. I. Título

CE/UF/BSCA CDD 621.825

TCHILATCHI PAULINO CÓ

SIMULAÇÃO DE UM CONVERSOR BOOST DE ALTO GANHO UTILIZANDO DUAS CÉLULAS DE ACOPLAMENTO MAGNÉTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia de Energias, do Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito parcial para a obtenção do Título de Graduação em Engenharia de Energias.

Aprovada em: 01/10/2026.

BANCA EXAMINADORA

_____
Prof. Dr. Gustavo Alves De Lima Henn (Orientador)
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

_____
Prof. Dr. Hermínio M. de O. Filho
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

_____
Prof. Dr. Ranoyca Nayana Alencar Leao E Silva Aquino
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

A Deus.

Aos meus pais, Paulino Có e Senabú Bampoque, e a todos familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Meus profundos agradecimentos vão aos meus pais, Paulino Có e Senabú Bampoque, por me trazerem a este mundo e, sobretudo, por acreditarem em mim. Mesmo diante de poucos recursos, investiram naquilo que tinham de mais importante a oferecer: a educação, o amor, o carinho, a atenção e o tempo dedicado a acompanhar cada um dos meus passos. A vocês dois, devo grande parte de quem sou e de tudo o que eu conquistei.

Ao meu professor e orientador, Dr. Gustavo Alves de Lima Henn, pela paciência, motivação e confiança, não apenas durante o desenvolvimento deste trabalho, mas ao longo dessa trajetória no curso. Para mim, é um guia e um modelo a ser seguido. Agradeço pelos ensinamentos, pelo apoio, pelo incentivo e, sobretudo, por sempre acreditar no meu potencial.

Às minhas irmãs, Hernestina, Raquela, Aissatu, Regina, Sabado e Flaviana, e a toda a minha família, pela confiança, pelo carinho e por estarem sempre ao meu lado. Vocês são fonte de inspiração e um dos principais motivos que me fazem continuar caminhando, mesmo diante das dificuldades.

Ao corpo docente do IEDS, especialmente ao Dr. José Willamy M. de Araújo, ao Dr. Sabi Y. M. Bandiri e ao Dr. Hermínio M. de O. Filho, pelos conhecimentos compartilhados e pelas contribuições ao longo desta jornada acadêmica. Agradeço também ao engenheiro Leopoldo Assis de Oliveira e ao Rafael, pelas informações, orientações e contribuições fornecidas durante este percurso.

À UNILAB, minha profunda gratidão pela oportunidade de realizar um sonho que por tanto tempo almejei. Esta instituição não apenas me proporcionou formação acadêmica, mas também contribuiu significativamente para o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus amigos, colegas e companheiros de caminhada, Rachide, Hélio, Jacob, Maurício, Antony H. L. Santos, Valdir, Vladimir, Binhanfisana, Midana Cá, Daimara Cá, Agostinho, Lígio, Dionísio, Micail, Laudinha, Fonseca, Itú, Abene e Albertino, e a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que eu chegasse até aqui, deixo o meu sincero agradecimento. Cada conversa, cada apoio, cada ensinamento e cada momento compartilhado fizeram parte desta caminhada e permanecerão como boas lembranças.

Por fim, agradeço a Deus, Criador, pela vida, pela força, pela proteção e por ter me permitido chegar até este momento.

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo e a simulação de um conversor Boost de alto ganho, baseado na topologia proposta por Henn (2008), à qual foi adicionada uma segunda célula de acoplamento magnético, com o objetivo de obter elevado ganho estático sem a necessidade de operar com razões cíclicas excessivamente altas. A topologia proposta é constituída por um conversor Boost entrelaçado, com defasagem de 180° entre os sinais de acionamento das chaves semicondutoras. Para a avaliação da topologia, foram adotados os parâmetros de tensão de entrada, frequência de chaveamento e razão cíclica utilizados por Henn. O dimensionamento dos componentes foi realizado a partir das equações de dimensionamento adotadas de Henn, e a simulação foi realizada utilizando o software PSIM, considerando componentes ideais, de modo a desconsiderar as perdas e facilitar a análise do comportamento da topologia. Os resultados obtidos por meio da simulação apresentaram boa concordância com os valores calculados, com erros relativos inferiores a 0,2% para todas as grandezas analisadas. As tensões nos capacitores apresentaram valores próximos aos previstos no dimensionamento, resultando em uma tensão de saída simulada de aproximadamente 300 V a partir de uma tensão de entrada de 28 V. Os resultados obtidos demonstram a concordância entre os valores calculados e os resultados da simulação, evidenciando o potencial da topologia para proporcionar elevado ganho de tensão com razão cíclica de 53,33%.

Palavras-chave: Conversor Boost de alto ganho; acoplamento magnético; conversor entrelaçado; conversor CC-CC.

ABSTRACT

This work presents the study and simulation of a high-gain Boost converter based on the topology proposed by Henn (2008), to which a second magnetic coupling cell was added, with the aim of achieving high static gain without the need to operate at excessively high duty cycles. The proposed topology consists of an interleaved Boost converter, with a 180° phase shift between the drive signals of the semiconductor switches. For the evaluation of the topology, the input voltage, switching frequency, and duty cycle parameters used by Henn were adopted. The component design was carried out based on the design equations adopted from Henn, and the simulation was performed using the PSIM software, considering ideal components in order to disregard losses and facilitate the analysis of the topology's behavior. The simulation results showed good agreement with the calculated values, with relative errors below 0.2% for all analyzed quantities. The capacitor voltages presented values close to those predicted during the design process, resulting in a simulated output voltage of approximately 300 V from an input voltage of 28 V. The results demonstrate the agreement between the calculated values and the simulation results, highlighting the potential of the topology to provide high voltage gain with a duty cycle of 53.33%.

Keywords: High-gain boost converter; magnetic coupling; interleaved converter; DC-DC converter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Representação de um conversor Boost Convencional 17

Figura 1.2 – Topologia de conversor Boots de alto ganho Henn (2008) 18

Figura 2.1 – Representação de dois conversores Boost conectados em cascata 22

Figura 2.2.1 – Representação da Célula de acoplamento magnético do conversor Boost de alto ganho 24

Figura 2.2.2 – Ilustração da célula de acoplamento magnético, topologia proposta no presente trabalho 24

Figura 2.3 – Topologia do conversor boost de alto ganho 25

Figura 2.4 – Primeira etapa de operação 27

Figura 2.5 – Segunda etapa de operação 28

Figura 2.6 – Terceira etapa de operação 29

Figura 2.7 – Quarta etapa de operação 30

Figura 2.8 – Variação do ganho estático em função da razão cíclica e relação de espira 32

Figura 2.9 – Comparação do ganho estático em função da razão cíclica 33

Figura 3.1 – Topologia do Conversor Boost de Alto Ganho 36

Figura 3.2 – Forma de onda da tensão e corrente de saída do conversor Boost de alto ganho 42

Figura 3.3 – Formas de onda da modulação PWM, dos sinais de acionamento e das tensões nas chaves 43

Figura 3.4 – Formas de onda da corrente de entrada (I1) 44

Figura 3.5 – Formas de onda das correntes nos indutores primários L1p e L2p 44

Figura 3.6 – Formas de onda das tensões nos capacitores 45

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros de Dimensionamento do Conversor Boost de Alto Ganho 37

Tabela 3.2 – Parâmetros calculados para o dimensionamento do conversor Boost de alto ganho 40

Tabela 3.3 – Valores simulados das grandezas elétricas e respectivas ondulações do conversor proposto..... 46

Tabela 3.4 – Apresentação dos valores teóricos e simulados das principais grandezas elétricas da topologia proposta 47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
AIE	Agência Internacional de Energia
IRENA	Agência Internacional de Energia Renovável
MPPT	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência
PWM	Modulação por Largura de Pulso
MCC	Modo de condução contínua

LISTA DE SÍMBOLOS

V_i	Tensão de entrada	Volt
V_o	Tensão de saída	Volt
μ	Micro	
I_i	Corrente de entrada	Ampère
I_o	Corrente de saída	Ampère
Δ	Variação	
P	Potência	Watt
ΔV_c	Ondulação da Tensão de Pico a Pico nos capacitores	Volt
ΔI_{L1P}	Ondulação da corrente de Pico a Pico nos indutores	Ampère
F_s	Frequência de chaveamento	Hertz
L_{1p}	Enrolamento do primário no inductor 1	Henry
L_{2p}	Enrolamento do primário no inductor 2	Henry
L_{1s1}	Primeiro enrolamento do secundário no inductor 1	Henry
L_{1s2}	Segundo enrolamento do secundário no inductor 1	Henry
L_{2s1}	Primeiro enrolamento do secundário no inductor 2	Henry
L_{2s2}	Segundo enrolamento do secundário no inductor 2	Henry
I_{L1p}	Corrente Médio no indutor primário 1	Ampère
I_{L2p}	Corrente Médio no indutor primário 2	Ampère
C_1	Valor da capacitância 1	Farad
C_2	Valor da capacitância 2	Farad
C_3	Valor da capacitância 3	Farad
C_4	Valor da capacitância 4	Farad
C_5	Valor da capacitância 5	Farad
V_{c1}	Tensão no capacitor C1	Volt
V_{c2}	Tensão no capacitor C2	Volt
V_{c3}	Tensão no capacitor C3	Volt
V_{c4}	Tensão no capacitor C4	Volt
V_{c5}	Tensão no capacitor C5	Volt
R_o	Carga resistiva	Ohm
D	Razão cíclica	
V_{ts1}	Amplitude da portadora triangular 1	Volt

V_{ts2}	Amplitude da portadora triangular 2	Volt
V_{ref}	Amplitude da tensão de referência nos controladores	Volt
t_o	Tempo inicial da primeira etapa de operação	s
t_1	Tempo ao fim da primeira etapa de operação	s
t_2	Tempo ao fim da segunda etapa de operação	s
t_3	Tempo ao fim da terceira etapa de operação	s
t_4	Tempo ao fim da quarta etapa de operação	s

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS IX
LISTA DE TABELAS X
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS XI
LISTA DE SÍMBOLOS XII
CAPITULO 1 16
INTRODUÇÃO 16
1.1 OBJETIVOS 19
1.1.1 Objetivos Geral 19
1.1.2 Objetivos Específicos 19
CAPITULO 2 20
CONVERSORES BOOST DE ALTO GANHO 20
2.1 INTRODUÇÃO 20
2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21
2.2.1 Conversores Boost Conectados Em Cascata 21
2.2.2 Conversores Boost Entrelaçado 22
2.2.3 TOPOLOGIA PROPOSTA 23
2.3 ETAPAS DE OPERAÇÃO 25
2.3.1 Primeira Etapa de Operação 26
2.3.2 Segunda Etapa de Operação 27
2.3.3 Terceira Etapa de Operação 29
2.3.4 Quarta Etapa de Operação 29
2.4 GANHOS ESTÁTICOS 31
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 34
CAPITULO 3 35
DIMENCIONAMENTO E SIMULAÇÃO DO CONVERSOR BOOST DE ALTO GANHO 35
3.1 INTRODUÇÃO 35
3.2 DIMENSIONAMENTO E PARÂMETROS DO PROJETO 37
3.3 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 41
3.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS TEÓRICOS E SIMULADOS 47
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 48
CAPITULO 4 49
CONCLUSÃO 49
CAPITULO 5 52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 52
APÊNDICE 55

(CIRCUITO DO CONVERSOR BOOST DE ALTO GANHO, PROPOSTO NESSE TRABALHO) 55

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

Os desafios relacionados à consolidação das fontes renováveis evidenciam o papel fundamental da energia no desenvolvimento humano. Nesse contexto, a substituição de recursos esgotáveis, tradicionalmente utilizados como base da produção energética, por alternativas renováveis tem se tornado uma questão central na busca por um futuro mais seguro para as próximas gerações, segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA, 2024). Apesar das evidentes ameaças do aquecimento global, de acordo com Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023) e das disputas pela posse de recursos energéticos entre as grandes potências, conforme Agência Internacional de Energia (AIE, 2024), a energia consolidou-se como elemento central das economias modernas, exercendo impacto direto no cenário geopolítico.

Apesar dos avanços tecnológicos observados nas últimas décadas, a matriz energética global permanece predominantemente baseada em hidrocarbonetos derivados do petróleo, os quais constituem a principal fonte de energia para os setores industrial e de transportes (AIE, 2022). Entretanto, por se tratarem de recursos finitos, cuja taxa de reposição é significativamente inferior à taxa de consumo, a manutenção dessa dependência configura um cenário de crescente vulnerabilidade energética no médio e longo prazo (BP, 2021).

Conforme o Relatório de Síntese do Sexto Ciclo de Avaliação (AR6) do IPCC, publicado em março de 2023, projeta-se que a emissão global de gases de efeito estufa atinjam seu pico até 2025, sendo necessária uma redução de aproximadamente 43% até 2030, em relação aos níveis de 2019, com o objetivo de limitar o aumento da temperatura média global a 1,5 °C (IPCC, 2023). Nesse contexto, a transição energética emerge como uma estratégia fundamental para a mitigação das mudanças climáticas (IPCC, 2023).

Adicionalmente, os incentivos à inserção de fontes renováveis na matriz energética estão diretamente associados ao desenvolvimento e à otimização de tecnologias, visando ao aumento da eficiência dos sistemas energéticos, à melhoria da qualidade do fornecimento e à viabilização econômica frente aos elevados custos iniciais de implementação (IRENA, 2022).

Nesse contexto, torna-se necessária a obtenção de níveis de tensão mais elevados nos sistemas de geração de energia, especialmente em aplicações baseadas em fontes renováveis. Em sistemas fotovoltaicos isolados, por exemplo, pode ser necessária a associação de diversos módulos fotovoltaicos em série para alcançar níveis de tensão compatíveis com as exigências da carga, de acordo com o dimensionamento e a configuração do sistema.

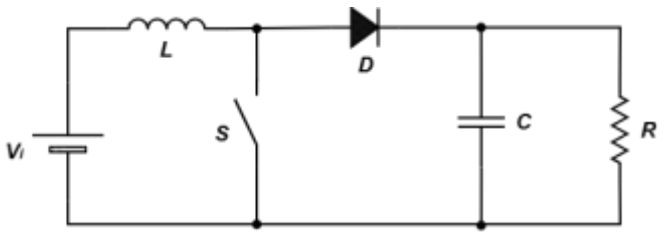
Para atender a essa necessidade, bem como às aplicações que requerem a redução ou a adequação dos níveis de tensão, são empregados os conversores CC-CC (corrente contínua–corrente contínua). Na geração de energia a partir de fontes renováveis, esses conversores constituem elementos fundamentais dos sistemas de conversão e condicionamento de energia, uma vez que permitem adequar os níveis de tensão e corrente às características da fonte e às demandas da carga. Dessa forma, essas estruturas desempenham um papel importante no gerenciamento do fluxo de potência e no aproveitamento adequado da energia disponível, contribuindo para o desempenho e a eficiência global do sistema.

No contexto da eletrônica de potência, o conversor CC-CC do tipo *Boost* convencional destaca-se entre as topologias mais amplamente empregadas, em virtude de sua simplicidade estrutural e elevada aplicabilidade em sistemas de condicionamento de energia. Essa topologia também conhecida como conversor elevador de tensão, apresenta como principal característica a capacidade de fornecer uma tensão média de saída superior à tensão de entrada, sendo que, em condição limite, essa tensão pode se aproximar da tensão de alimentação (BARBI, 2006).

Tal conversor, ilustrado na Figura 1.1, apresenta uma estrutura relativamente simples e encontra aplicação em sistemas que necessitam elevar níveis reduzidos de tensão para valores adequados à operação de diferentes cargas e estágios de conversão. Entre essas aplicações destacam-se os sistemas fotovoltaicos e os sistemas de armazenamento de energia por meio de bancos de baterias, nos quais a tensão disponibilizada pela fonte pode ser insuficiente para atender diretamente aos níveis exigidos pelo barramento ou pela carga (ERICKSON; MAKSIMOVIĆ, 2001; HART, 2011).

Nessa configuração, o indutor é conectado em série com a fonte de entrada, o que permite o armazenamento de energia durante o intervalo de condução da chave e sua posterior transferência para a carga em níveis de tensão superiores aos da fonte (BARBI, 2006).

Figura 1.1 - Representação de um conversor boost convencional



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

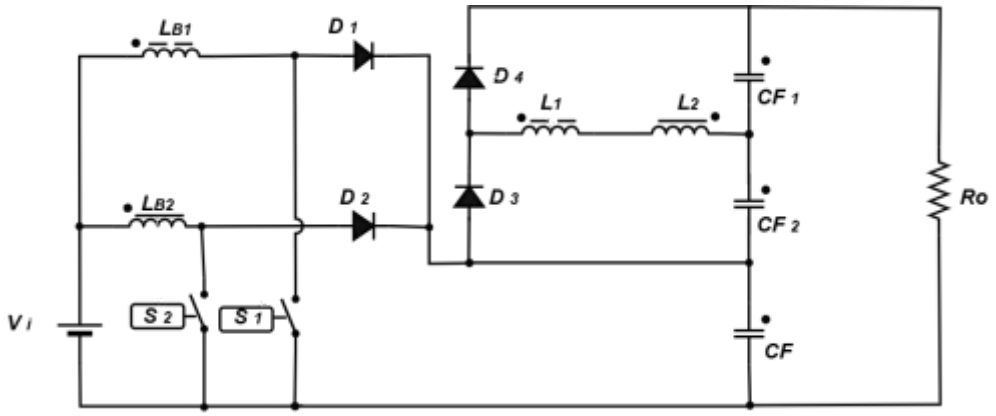
A pesar de ser uma tecnologia consolidada e amplamente empregada, sendo inclusive

abordadas em livros didáticos clássicos de eletrônica de potência, o conversor CC-CC *Boost* convencional, apresenta uma limitação intrínseca que restringe sua aplicação em sistemas que demandam elevados ganhos estáticos ou operação em extremos de razão cíclica. Para alcançar altos ganhos de tensão exige razões cíclicas elevadas tipicamente superiores a 0,9, o que resulta em aumento significativo dos esforços de tensão e corrente nos semicondutores, além da degradação da eficiência global do conversor (HENN, 2008; ERICKSON; MAKSIMOVIĆ, 2001).

Diante dessas limitações, diversas topologias têm sido propostas na literatura com o objetivo de mitigar os efeitos associados a altas e baixas razões cíclicas. Essas abordagens buscam reduzir os esforços elétricos sobre os dispositivos semicondutores, melhorar a eficiência energética e ampliar a faixa operacional dos conversores, por meio de técnicas como multiplicação de tensão, estágios em cascata e uso de elementos passivos adicionais (HENN, 2008; BARBI, 2006).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar a modelagem e a simulação de um conversor Boost de alto ganho utilizando duas células de acoplamento magnético, tomando como base a topologia proposta por Henn (2008), conforme ilustrado na Fig. 1.2. O estudo busca analisar o comportamento e o desempenho da topologia simulada sob condições ideais de operação. O foco principal consiste na modelagem e na avaliação, por meio de simulações computacionais, de uma estrutura capaz de proporcionar um ganho de tensão de saída superior ao obtido pelo conversor proposto por Henn (2008), sem a necessidade de operar com razões cíclicas excessivamente elevadas.

Figura 1.2 - Topologia de conversor Boots de alto ganho



Fonte: Adotado de Henn (2008)

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Geral

Modelar e simular um conversor Boost de alto ganho, obtido a partir da inclusão de uma célula adicional de acoplamento magnético à topologia proposta por Henn (2008), visando avaliar seu ganho estático e seu comportamento em regime permanente.

1.1.2 Objetivos Específicos

I. Propor e modelar uma configuração de conversor Boost de alto ganho, obtida pela adição de uma célula de acoplamento magnético à topologia proposta por Henn (2008);

II. Realizar a modelagem e a simulação do conversor utilizando o software PSIM;

III. Avaliar o modelo proposto por meio da comparação entre os resultados teóricos e os obtidos na simulação;

IV. Analisar o comportamento das formas de onda das tensões e correntes nos semicondutores, indutores, capacitores e na carga.

V. Avaliar o ganho estático e o desempenho da topologia proposta em regime permanente.

CAPITULO 2

CONVERSORES BOOST DE ALTO GANHO

2.1 INTRODUÇÃO

Os conversores Boost de alto ganho, também denominados conversores elevadores de tensão de alto ganho, constituem uma classe de conversores CC-CC capazes de proporcionar relações de conversão estática significativamente superiores às obtidas pelo conversor Boost convencional. Nas últimas décadas, a crescente demanda por fontes de alimentação com elevada eficiência, alta densidade de potência e ampla faixa de conversão tem impulsionado o desenvolvimento de novas topologias de conversores CC-CC (SUTIKNO et al., 2022; AMIR et al., 2019).

Entre as principais aplicações, destacam-se os sistemas fotovoltaicos conectados à rede, nos quais a tensão proveniente dos módulos fotovoltaicos pode ser insuficiente para atender diretamente aos níveis requeridos pelo estágio subsequente, e os sistemas baseados em células a combustível, que também podem apresentar baixos níveis de tensão de saída. Nesses casos, conversores CC-CC de alto ganho podem ser empregados para elevar a tensão proveniente das fontes renováveis a níveis adequados para os estágios subsequentes de conversão e conexão à rede e outras aplicações correlatas (SUTIKNO et al., 2022; JAYACHANDRAN et al., 2022).

Em aplicações que demandam elevados ganhos de tensão, o emprego do conversor Boost convencional pode resultar em condições de operação menos favoráveis. À medida que o ganho de tensão requerido aumenta, torna-se necessário elevar a razão cíclica, o que pode ocasionar aumento das perdas de condução, dos esforços elétricos sobre os dispositivos semicondutores e das perdas associadas à comutação, além de reduzir a eficiência do conversor. De acordo com Henn (2008), para razões cíclicas superiores a aproximadamente 90%, o conversor Boost convencional apresenta limitações que comprometem seu desempenho e sua viabilidade de operação.

Dessa forma, para aplicações que exigem elevados ganhos de tensão, torna-se relevante o emprego de topologias de conversores Boost de alto ganho, capazes de proporcionar elevadas relações de conversão sem a necessidade de operar com razões cíclicas extremas. Essas estruturas podem proporcionar uma distribuição mais adequada dos esforços elétricos entre os componentes e, dependendo da topologia empregada, contribuir para a redução das perdas e para o aumento da eficiência do sistema (SUTIKNO et al., 2022).

Nesse contexto, neste capítulo será apresentado um conversor Boost de alto ganho, cuja configuração foi desenvolvida a partir da topologia proposta por Henn (2008). A estrutura proposta busca obter elevados níveis de tensão de saída sem a necessidade de operar com razões cíclicas excessivamente elevadas, proporcionando condições de operação mais adequadas para os dispositivos semicondutores e contribuindo para o desempenho do conversor.

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Alcazar (2010), a necessidade de obtenção de elevados ganhos de tensão tem motivado o desenvolvimento de diferentes topologias de conversores elevadores baseadas no conversor Boost convencional. Essas topologias empregam estratégias destinadas a ampliar o ganho de tensão, reduzir os esforços sobre os dispositivos semicondutores e melhorar o desempenho do conversor. Entre essas estratégias, destacam-se a associação de estágios Boost em cascata, o entrelaçamento de células conversoras, o emprego de indutores acoplados e a utilização de células multiplicadoras de tensão.

Entre as técnicas destinadas à obtenção de elevado ganho de tensão, destacam-se os conversores Boost conectados em cascata, apresentados a seguir como uma alternativa para ampliar o ganho de tensão por meio da associação sequencial de diferentes estágios de conversão. Outra técnica relevante é o entrelaçamento, empregada na topologia estudada neste trabalho, na qual duas ou mais células conversoras operam de forma coordenada, com sinais de acionamento defasados entre si. Essa configuração permite distribuir a corrente entre as diferentes células e reduzir sua ondulação.

2.2.1 Conversores Boost Conectados Em Cascata

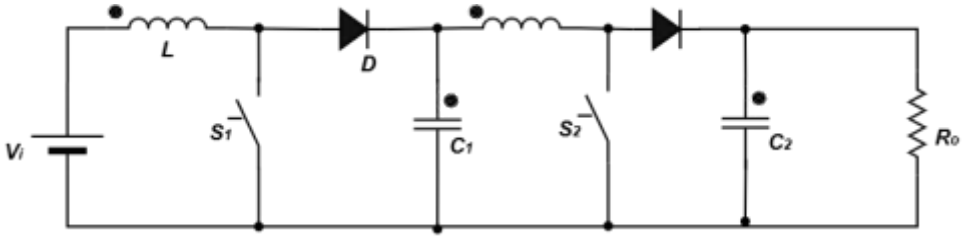
Os conversores Boost conectados em cascata, ilustrados na Figura 2.1, constituem uma configuração de conversão CC–CC de alto ganho na qual dois ou mais estágios Boost são conectados sequencialmente, de modo que a saída de um estágio alimenta a entrada do estágio seguinte, conforme apresentado por Tavares (2019). Essa configuração permite ampliar o ganho de tensão em relação ao conversor Boost convencional, sendo empregada em aplicações que requerem elevados níveis de tensão de saída, como sistemas fotovoltaicos e outras fontes de baixa tensão.

De acordo com Tavares (2019), considerando dois conversores Boost ideais conectados em cascata, o ganho estático de cada estágio (G) é dado por equação 2.1, sendo a tensão de saída representado por (V_o) e tensão de entrada por (V_i). Assim, o ganho total corresponde ao produto dos ganhos individuais, podendo ser expresso por 2.2:

$$G = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - D} \tag{2.1}$$

$$G = \frac{1}{(1 - D) * (1 - D)} = \frac{1}{(1 - D)^2} \tag{2.2}$$

Figura 2.1 - Representação de dois conversores Boost conectados em cascata



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Essa característica permite alcançar ganhos elevados sem depender exclusivamente de uma única célula Boost operando com razão cíclica muito próxima da unidade. Entretanto, a conexão em cascata também pode aumentar os esforços de tensão e corrente nos dispositivos semicondutores, especialmente nos estágios posteriores, além de aumentar o número de componentes e a complexidade do sistema, (TAVARES, 2019; GHOLIZADEH et al., 2024).

2.2.2 Conversores Boost Entrelaçado

A técnica de entrelaçamento tem sido empregada em diferentes configurações de conversores CC–CC, incluindo estruturas de alto ganho e conversores que utilizam indutores acoplados. Essa técnica permite a operação coordenada de múltiplas células conversoras, com sinais de acionamento defasados entre si, possibilitando a distribuição da corrente entre as células e a redução da ondulação da corrente de entrada (ALCAZAR, 2010; SANTOS, 2018).

Os conversores Boost entrelaçados são constituídos pela associação de duas ou mais células conversoras que operam de forma intercalada, com seus sinais de acionamento defasados entre si. Essa configuração permite distribuir a corrente de entrada entre as diferentes células e reduzir sua ondulação, além de proporcionar uma melhor distribuição dos esforços de corrente nos dispositivos semicondutores. A técnica de entrelaçamento pode ser empregada em conjunto com outras estratégias de aumento do ganho de tensão, como o acoplamento magnético, sendo aplicada em diferentes estruturas de conversores CC–CC de alto ganho (SILVA, 2009; ALCAZAR, 2010; SANTOS, 2018).

A defasagem angular entre os sinais de acionamento das células depende do número de fases empregadas e pode ser determinada por:

$$\theta = \frac{380°}{N} \tag{2.3}$$

Em que N representa o número de células entrelaçadas. Para uma configuração composta por duas células Boost, obtém-se uma defasagem de 180° entre os sinais de acionamento. Dessa forma, as células operam de maneira intercalada ao longo do período de comutação, contribuindo para a distribuição da corrente de entrada e para a redução de sua ondulação.

No caso de um conversor Boost entrelaçado convencional ideal, o ganho estático permanece determinado pela relação característica do conversor Boost, dada pela equação 2.1.

No caso do conversor Boost entrelaçado convencional, o entrelaçamento não altera, por si só, a relação de ganho estático do conversor, sendo empregado principalmente para distribuir a corrente entre as diferentes células e reduzir a ondulação da corrente de entrada. Entretanto, a associação dessa técnica com mecanismos de extensão de ganho, como indutores acoplados e células multiplicadoras de tensão, permite a obtenção de estruturas de alto ganho capazes de alcançar maiores níveis de tensão de saída sem depender exclusivamente de razões cíclicas elevadas (VALARMATHY; PRABHAKAR, 2024).

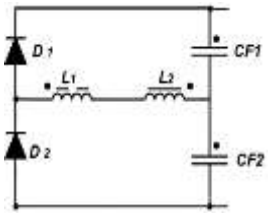
Apesar das vantagens proporcionadas pela técnica de entrelaçamento, sua utilização também apresenta algumas limitações. A associação de múltiplas células aumenta o número de componentes e a complexidade do circuito de acionamento e controle. Além disso, o adequado compartilhamento da corrente entre as fases depende da correspondência entre os componentes e da sincronização dos sinais de comando. Desequilíbrios entre as fases podem comprometer a distribuição da corrente e reduzir os benefícios proporcionados pela técnica de entrelaçamento (SANTOS, 2018; RAMASAMY et al., 2016).

2.2.3 TOPOLOGIA PROPOSTA

A topologia desenvolvida neste trabalho foi baseada no conversor Boost de alto ganho proposto por Henn (2008), cuja estrutura utiliza o princípio de acoplamento magnético apresentado por Bascopé e Barbi (2000). Entretanto, visando obter um ganho estático ainda maior,

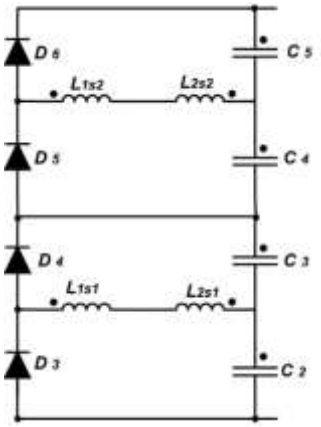
foi adicionada uma célula adicional de acoplamento magnético à estrutura original. Essa modificação resulta em um aumento do ganho estático da tensão de saída do conversor, conforme apresentado na Figura 2.2.2.

Figura 2.2.1 – Representação da Célula de acoplamento magnético do conversor Boost de alto ganho.



Fonte: Adotado de Henn (2008)

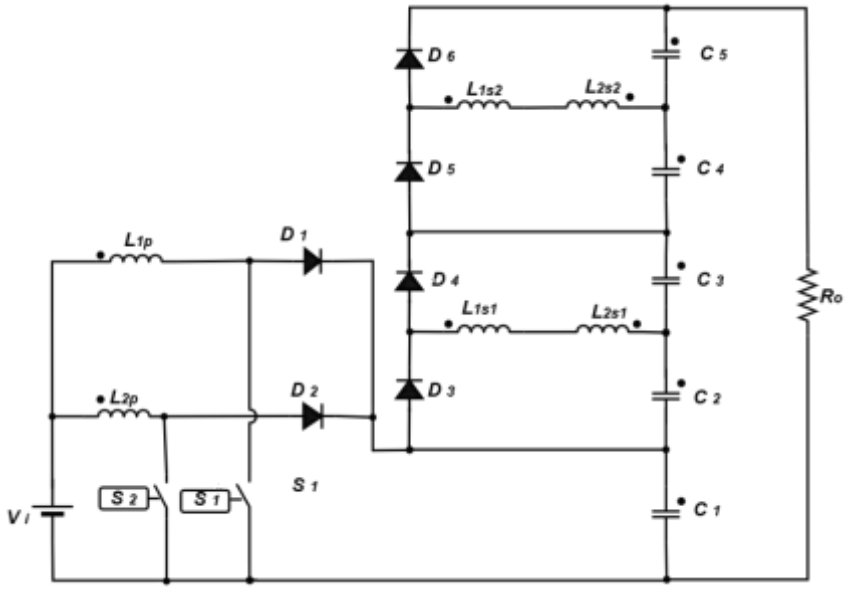
Figura2.2.2 – Ilustração da célula de acoplamento magnético, topologia proposta no presente trabalho



Fonte: Autor, 2026.

Conforme ilustrado na Figura 2.3, a topologia do conversor proposta neste trabalho é apresentada um conversor Boost entrelaçados com duas células de acoplamento magnético. O indutor L_{1p} é acoplada magneticamente com L_{1s1} e L_{1s2}, e o indutor L_{2p} acoplada magneticamente com L_{2s1} e L_{2s2}.

Figura 2.3 - Topologia proposta do Conversor de Alto Ganho



Fonte: Autor, 2026.

2.3 ETAPAS DE OPERAÇÃO

Para a análise da operação da topologia proposta, considera-se que todos os componentes eletrônicos empregados na simulação do conversor são ideais, ou seja, não apresentam perdas de condução, comutação ou conversão. Dessa forma, admite-se que a potência de entrada seja igual à potência de saída.

Além disso, para o correto funcionamento da topologia analisada, a razão cíclica deve ser superior a 50% (D>0,5), condição necessária para garantir a sequência adequada dos estados de operação e, consequentemente, o funcionamento previsto do conversor e a obtenção de elevados ganhos de tensão. Para valores de razão cíclica inferiores a 50% (D<0,5), a sequência dos estados de operação é modificada em razão do maior intervalo de bloqueio das chaves semicondutoras, alterando as condições de transferência de energia entre os elementos da topologia. Dessa forma, a operação considerada para a configuração analisada deixa de atender às condições estabelecidas para o regime de operação em modo de condução contínua (MCC), conforme discutido por Alcazar (2010).

Outro aspecto importante refere-se ao acoplamento magnético dos indutores. As relações de espiras entre os enrolamentos L_{1p}, L_{1s1} e L_{1s2}, e assim como entre L_{2p}, L_{2s1} e L_{2s2}, devem ser mantidas de forma proporcional, de modo a assegurar o comportamento adequado da topologia. Conforme descrito por Henn (2008), considerando uma relação de transformação unitária

(n=1), as tensões nos enrolamentos secundários podem ser determinadas pelas Equações (2.5) e (2.6).

O coeficiente de acoplamento magnético adotado na simulação foi (K=0,9999998), valor aproximadamente unitário, de modo a representar uma condição de acoplamento magnético idealizado.

$$n = \sqrt{\frac{L_{1p}}{L_{1s1}}} = \sqrt{\frac{L_{1p}}{L_{1s2}}} = \sqrt{\frac{L_{2p}}{L_{2s1}}} = \sqrt{\frac{L_{2p}}{L_{2s2}}} = 1 \tag{2.4}$$

$$V_{L1S1} = n * V_{L1P} \tag{2.5}$$

Nesse caso, sendo a relação de espiras unitário, a tenção nos enrolamentos secundários se dará por meio da equação 2.5, a indutância mutua será definida pela equação 2.7.

$$V_L = V_{L1S1} = V_{L1S2} = V_{L2S1} = V_{L1S1} = n * V_{L1P} \tag{2.6}$$

$$M = n * L_{1P} \tag{2.7}$$

Por fim, destaca-se que as chaves semicondutoras operam com defasagem de 180° elétricos, característica típica da técnica de entrelaçamento, que contribui para a redução da ondulação da corrente de entrada e para uma distribuição mais adequada dos esforços de corrente entre os dispositivos semicondutores, características que podem contribuir para o desempenho do conversor (HENN, 2008; Silva, 2009; HART, 2012).

2.3.1 Primeira Etapa de Operação

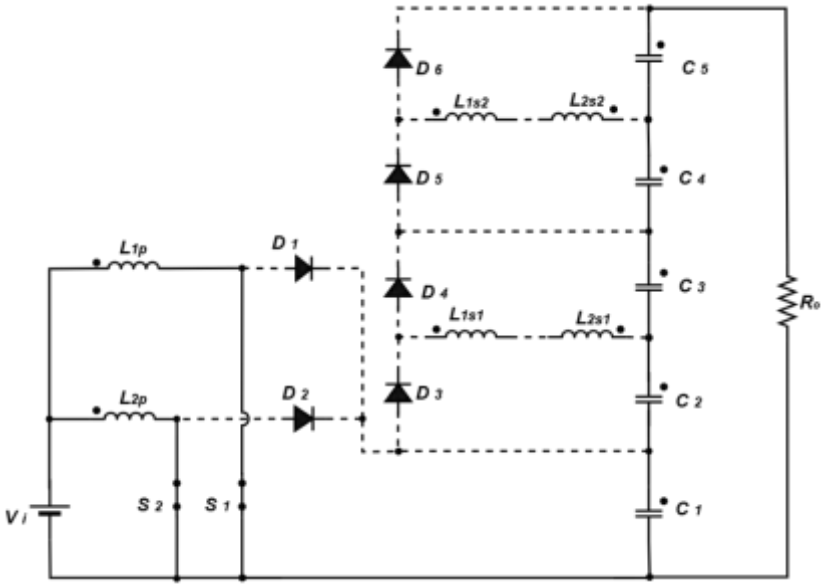
Inicialmente, devido à operação do conversor com razão cíclica superior a 50%, no instante t_0 ambas as chaves semicondutoras (S_1 e S_2) encontram-se em condução, conforme ilus-

trado na Figura 2.4. Nessa etapa, os indutores primários L_{1p} e L_{2p} armazenam energia proveniente da fonte de alimentação. Essa condição permanece até o instante t_1 quando a chave S_1 é desligada, encerrando a primeira etapa de operação, descritos pelas equações 2.8 e 2.9.

$$L_{1p} \cdot \frac{di_{L1p}}{dt} - V_i = 0 \tag{2.8}$$

$$L_{2p} \cdot \frac{di_{L2p}}{dt} - V_i = 0 \tag{2.9}$$

Figura 2.4 - Primeira etapa de operação



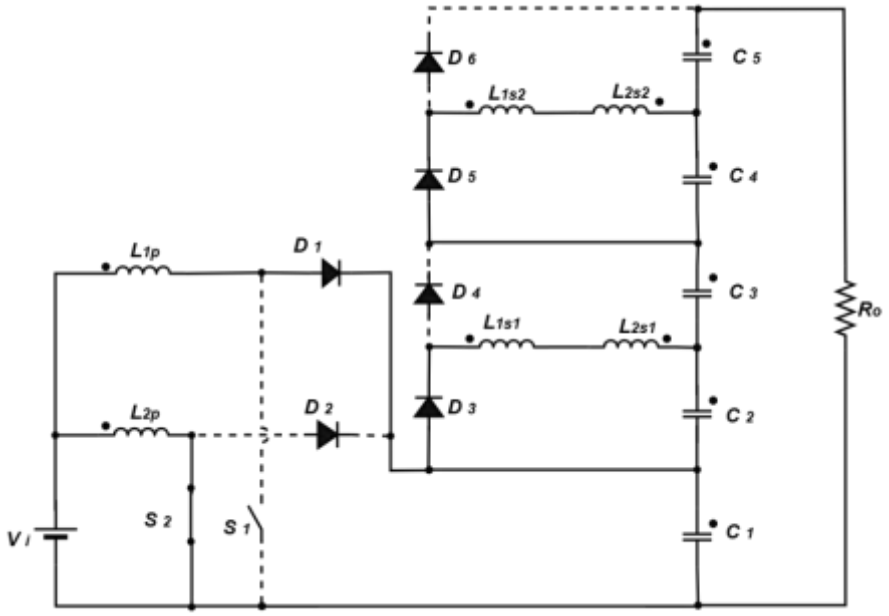
Fonte: Autor, 2026.

2.3.2 Segunda Etapa de Operação

A segunda etapa de operação inicia-se no instante t_1, com a chave S_1 desligada e a chave S_2 permanece em condução. Durante esse intervalo, o indutor primário L_{2p} continua armazenando energia proveniente da fonte de entrada, enquanto o indutor L_{1p} transfere a energia previamente armazenada por meio dos enrolamentos secundários (L_{1s1} e L_{1s2}). A energia transferida pelos enrolamentos secundários é direcionada aos capacitores (C_2) e (C_4), promovendo seu carregamento. O circuito equivalente correspondente a essa etapa é apresentado na Figura 2.5. Essa etapa se encerra no instante (t_2), quando a chave (S_1) volta a conduzir.

Com base no princípio de funcionamento apresentado por Henn (2008), as relações elétricas associadas a essa etapa podem ser descritas pelas equações a seguir. A tensão na malha formada pela fonte de entrada (V_i), pelo indutor primário (L_{1p}) e pela tensão no capacitor (V_{C1}) é representada pela Equação (2.10). A Equação (2.11) representa a relação de tensão na malha formada pela fonte de entrada (V_i) e pelo indutor primário (L_{2p}). Nessa etapa, a corrente (i_s) está associada à corrente que circula pelos enrolamentos secundários (L_{1s1}, L_{1s2}, L_{2s1} e L_{2s2}). A corrente média no diodo (D_1) é determinada pela Equação (2.12), enquanto as correntes nos diodos (D_3) e (D_5) são descritas pela Equação (2.13).

Figura 2.5 – Segunda etapa de operação



Fonte: Autor, 2026.

$$V_{C1} + L_{1p} \cdot \frac{di_{1p}}{dt} + M_s \cdot \frac{di_s}{dt} + -V_i = 0 \tag{2.10}$$

$$L_{2p} \cdot \frac{di_{L2p}}{dt} - M_s \cdot \frac{di_s}{dt} - V_i = 0 \tag{2.11}$$

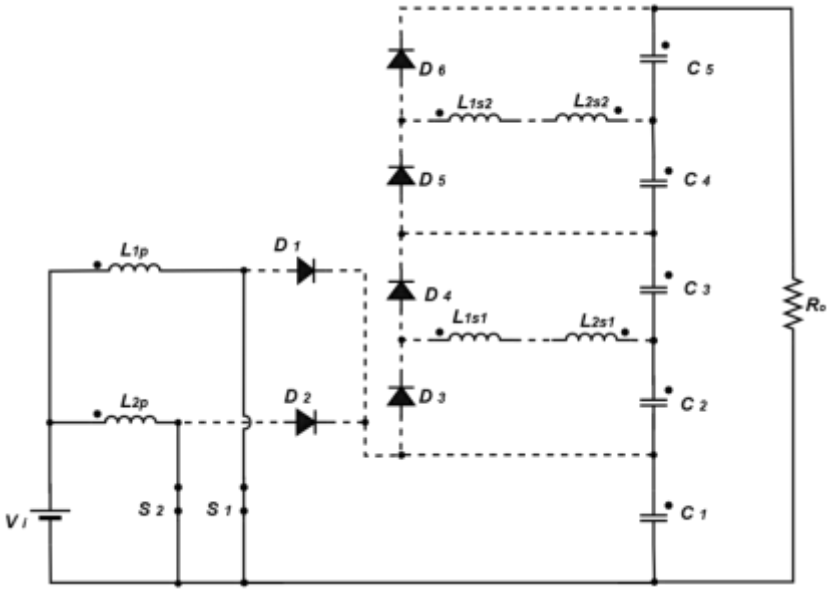
$$\frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{(1-D)\cdot T_s} \left(\frac{di_{L1p}}{dt} \cdot \Delta t + i_{L1p} \cdot (t_o) \right) \cdot dt = \frac{I_o}{2} \tag{2.12}$$

$$\frac{1}{T_s} \cdot \int_{0}^{(1-D)\cdot T_S} \left(\frac{di_s}{dt} \cdot \Delta t + i_s \cdot (t_o)\right) \cdot dt = I_o \quad (2.13)$$

2.3.3 Terceira Etapa de Operação

A terceira etapa é semelhante à primeira, uma vez que ambas as chaves (S_1 e S_2) permanecem em condução. Conforme ilustrado na Figura 2.6, os indutores primários L_{1p} e L_{2p} voltam a armazenar energia proveniente da fonte de alimentação. Essa etapa é encerrada no instante t_3 , quando a chave S_2 é desligada. Essa etapa, é descrita pelas equações 2.8 e 2.9, respetivamente.

Figura 2.6 – Terceira etapa de operação



Fonte: Autor, 2026.

2.3.4 Quarta Etapa de Operação

A quarta etapa de operação inicia-se no instante t_{13}, com a chave S_2 desligada e a chave S_1 permanece em condução. Durante esse intervalo, o indutor primário L_{1p} continua armazenando energia proveniente da fonte de entrada, enquanto o indutor L_{2p} transfere a energia previamente armazenada por meio dos enrolamentos secundários (L_{2s1} e L_{2s2}). A energia transferida pelos enrolamentos secundários é direcionada aos capacitores (C_3) e (C_5), promovendo seu carregamento. O circuito equivalente correspondente a essa etapa é apresentado na Figura 2.x. Essa etapa se encerra no instante (t_4), quando a chave (S_2) volta a conduzir.

Conforme Henn (2008), o comportamento elétrico dessa etapa pode ser descrito pelas equações apresentadas a seguir.

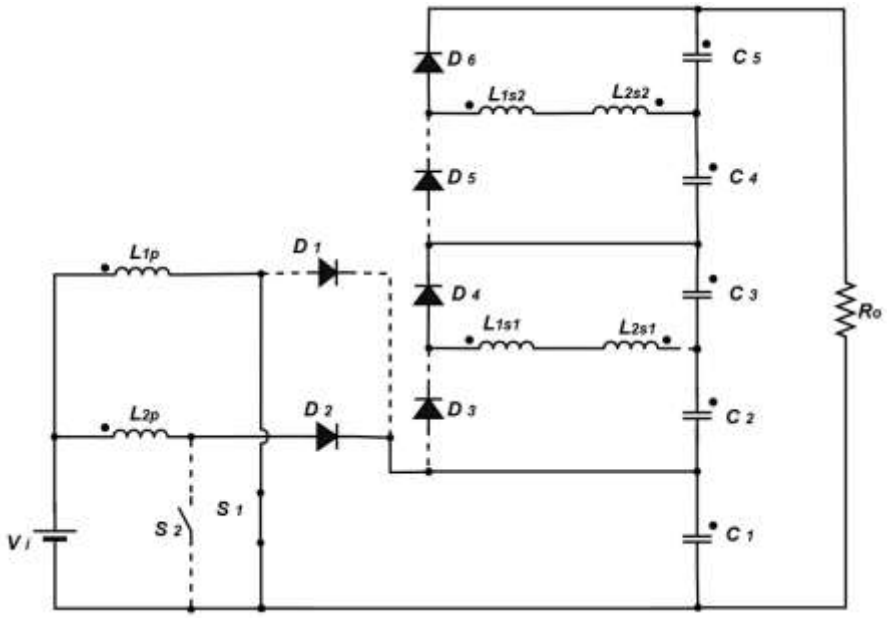
$$V_{C1} + L_{2p} \cdot \frac{di_{2p}}{dt} + M_s \cdot \frac{di_s}{dt} + -V_i = 0 \tag{2.14}$$

$$L_{1p} \cdot \frac{di_{L1p}}{dt} - M_s \cdot \frac{di_s}{dt} - V_i = 0 \tag{2.15}$$

$$\frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{(1-D)\cdot T_s} \left(\frac{di_{L12p}}{dt} \cdot \Delta t + i_{L2p} \cdot (t_2) \right) \cdot dt = \frac{I_o}{2} \tag{2.16}$$

$$\frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{(1-D)\cdot T_s} \left(\frac{di_s}{dt} \cdot \Delta t + i_s \cdot (t_2) \right) \cdot dt = I_o \tag{2.17}$$

Figura 2.7 – Quarta etapa de operação



Fonte: Autor, 2026.

2.4 GANHOS ESTÁTICOS

O ganho estático de um conversor CC-CC corresponde à relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada em regime permanente, representando a capacidade da topologia em elevar ou reduzir o nível de tensão. Em conversores Boost, esse parâmetro é amplamente utilizado para avaliar o desempenho da topologia, sendo expresso pela equação 2.1.

Nos conversores Boost de alto ganho, busca-se obter elevados valores de ganho estático sem a necessidade de operar com razões cíclicas elevadas, reduzindo os esforços sobre os dispositivos semicondutores e aumentando a eficiência do sistema.

Na topologia desse trabalho, a tensão de saída será determinada pela soma das tensões nos capacitores C_1, C_2, C_3, C_4 e C_5, conforme descrito na equação 2.18.

$$V_o = V_{C1} + V_{C2} + V_{C3} + V_{C4} + V_{C5} \tag{2.18}$$

Durante um ciclo de comutação, as tensões instantâneas aplicadas aos indutores L_{1p} e L_{2p} variam de acordo com o estado de condução das chaves semicondutoras. Em determinados intervalos, os indutores armazenam energia, sendo submetidos a tensões positivas, enquanto em outros intervalos transferem essa energia para os capacitores, passando a apresentar tensões de polaridade oposta. Entretanto, como o conversor opera em regime permanente, a tensão média aplicada a cada indutor ao longo de um período de chaveamento é nula. Desse modo a tenção no capacitor V_{C1} seria dada pela equação 2.20.

$$D \cdot V_i = (1 - D) \cdot (V_i - V_{C1}) \tag{2.19}$$

$$V_{C1} = V_i \cdot \frac{1}{1 - D} \tag{2.20}$$

Ao analisar a malha formada pelos L_{1p}, L_{1s1}, L_{1s2}, D_2 e C_2, durante a segunda etapa de operação pode se deduzir a equação 4, utilizada para determinar a tensão no capacitor 2 (V_{C2}). Considerando uma relação de espiras unitária (n=1) e a simetria existente entre as células de acoplamento magnético, as tensões nos capacitores C_1 a C_5 apresentam o mesmo valor, conforme apresentado na Equação (2.7). Para uma relação de espiras diferente da unitária (n≠1), as

tensões nos capacitores C_2 a C_5 devem ser determinadas de acordo com a Equação (2.22), em que n representa a relação de espiras do acoplamento magnético.

$$V_{C2} = n \cdot (V_i - (V_i - V_{C1}) \tag{2.21}$$

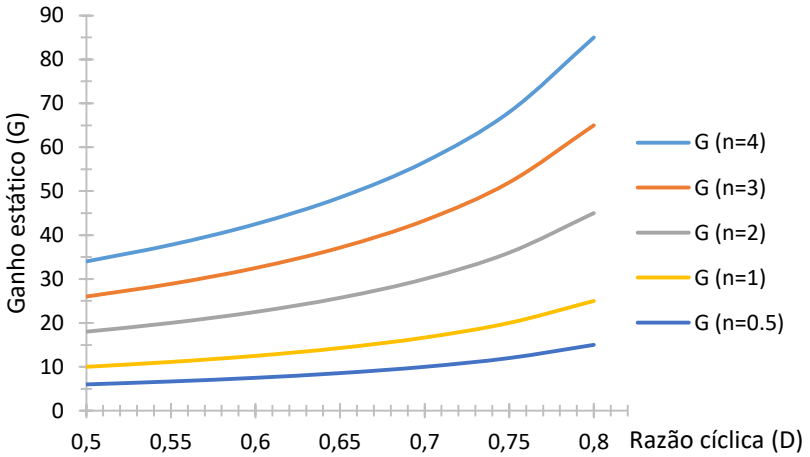
$$V_{C2} = V_{C5} = V_i \cdot \frac{n}{1 - D} \tag{2.22}$$

$$V_{C1} = V_{C2} = V_{C3} = V_{C4} = V_{C5} \tag{2.23}$$

O ganho estático do conversor Boost da topologia proposta foi obtido por meio da substituição das equações 2.23 e 2.18 em 2.22, resultando na expressão apresentada na equação 2.8.

$$G = \frac{V_o}{V_i} = \frac{4 \cdot n + 1}{1 - D} \tag{2.24}$$

Figura 2.8 – Variação do ganho estático em função da razão cíclica e relação de espira



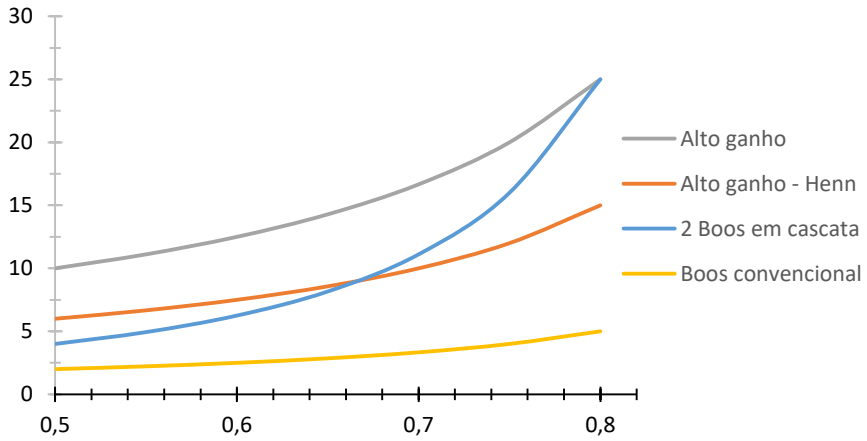
Fonte: Autor, 2026.

A Figura 2.8 apresenta a variação do ganho estático da topologia proposta em função da razão cíclica, considerando diferentes valores da relação de espiras (n). Observa-se que o ganho estático aumenta com o incremento da razão cíclica e com o aumento da relação de espiras. Para uma mesma razão cíclica, valores maiores de (n) resultam em ganhos estáticos mais elevados. Por exemplo, para (D=0,8), o ganho varia de 15 para (n=0,5) a 85 para (n=4). Esse

comportamento está de acordo com a expressão analítica obtida para o ganho estático e evidencia a influência conjunta da razão cíclica e da relação de espiras na capacidade de elevação da tensão da topologia proposta.

A Figura 2.9 apresenta uma comparação entre o ganho estático do conversor proposto neste estudo e o de diferentes topologias de referência, considerando uma relação de espiras unitária (n=1). A topologia proposta é baseada no conversor boost de alto ganho apresentado por Henn (2008), ao qual foi incorporada uma segunda célula de acoplamento magnético. Para efeito de comparação, são analisados o conversor de alto ganho de Henn (2008), dois conversores boost conectados em cascata e o conversor boost convencional.

Figura 2.9 – Comparação do ganho estático em função da razão cíclica



Fonte: Autor, 2026

Observa-se que o conversor Boost convencional apresenta o menor ganho estático em toda a faixa de razão cíclica analisada. O conversor Boost de alto ganho proposto por Henn (2008) apresenta ganhos superiores aos do Boost convencional em toda a faixa considerada, atingindo ganho estático igual a 15 para (D=0,8). Por sua vez, a associação de dois conversores Boost em cascata proporciona ganho estático ainda mais elevado, alcançando 25 para (D=0,8), porém com crescimento mais acentuado à medida que a razão cíclica se aproxima da unidade.

Para a topologia proposta neste trabalho, composta por duas células de acoplamento magnético e considerando uma relação de espiras unitária (n=1), verifica-se um ganho estático superior ao obtido pela topologia de Henn (2008) em toda a faixa de razão cíclica analisada. O ganho varia de 10 para (D=0,5) a 25 para (D=0,8), evidenciando o efeito da inclusão da segunda célula de acoplamento magnético na elevação da tensão de saída. Além disso, para (D=0,8), a topologia proposta apresenta ganho estático equivalente ao obtido pela associação de dois conversores Boost em cascata, ambos com (G=25).

Esse resultado é particularmente relevante porque a igualdade de ganho com a configuração de dois conversores Boost em cascata é obtida pela topologia proposta utilizando uma relação de espiras unitária ((n=1). Dessa forma, a elevação do ganho estático está associada à estrutura de acoplamento magnético empregada, permitindo obter elevada relação de conversão sem depender exclusivamente do aumento da relação de espiras. Essa característica evidencia o potencial da topologia proposta para aplicações que demandam elevada elevação de tensão e contribui para uma maior flexibilidade no dimensionamento do conversor.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foi apresentada a topologia de um conversor Boost de alto ganho desenvolvida a partir da estrutura proposta por Henn (2008), à qual foi adicionada uma segunda célula de acoplamento magnético. A modificação da estrutura teve como objetivo ampliar o ganho estático do conversor, mantendo a relação de espiras unitária e evitando a necessidade de operar com razões cíclicas excessivamente próximas da unidade.

A análise das etapas de operação demonstrou o princípio de funcionamento da topologia proposta, considerando a operação entrelaçada das duas células e a transferência de energia dos enrolamentos primários para os secundários e, posteriormente, para os capacitores responsáveis pela elevação da tensão de saída. A defasagem de 180° entre os sinais de comando das chaves caracteriza a operação entrelaçada e contribui para a distribuição da corrente entre as células.

A expressão obtida para o ganho estático demonstrou a influência da razão cíclica e da relação de espiras sobre a tensão de saída. Para (n=1), condição utilizada na comparação entre as topologias, o conversor proposto apresentou ganho estático superior ao conversor de alto ganho de Henn (2008) em toda a faixa analisada. Para (D=0,8), a topologia proposta apresentou ganho igual a 25, valor equivalente ao obtido pela associação de dois conversores Boost em cascata e cinco vezes superior ao ganho do Boost convencional.

Esses resultados evidenciam a contribuição da segunda célula de acoplamento magnético para a obtenção de elevado ganho estático, permitindo alcançar níveis de tensão elevados sem depender exclusivamente do aumento da relação de espiras. Dessa forma, a topologia proposta apresenta características relevantes para aplicações que demandam elevada relação de conversão de tensão. Os fundamentos teóricos e os resultados analíticos apresentados neste capítulo estabelecem a base para a modelagem e a simulação da topologia proposta, bem como para a posterior validação de seu comportamento, apresentadas no capítulo seguinte.

CAPITULO 3

DIMENCIONAMENTO E SIMULAÇÃO DO CONVERSOR BOOST DE ALTO GANHO

3.1 INTRODUÇÃO

Após a definição da topologia proposta e a dedução das principais equações que descrevem seu funcionamento, torna-se necessária a realização do dimensionamento e da simulação do conversor, com o objetivo de verificar seu comportamento sob diferentes condições de operação. O dimensionamento matemático permite representar o funcionamento do sistema por meio de equações que descrevem as relações entre as grandezas elétricas envolvidas, possibilitando a análise do desempenho da topologia antes de sua implementação experimental.

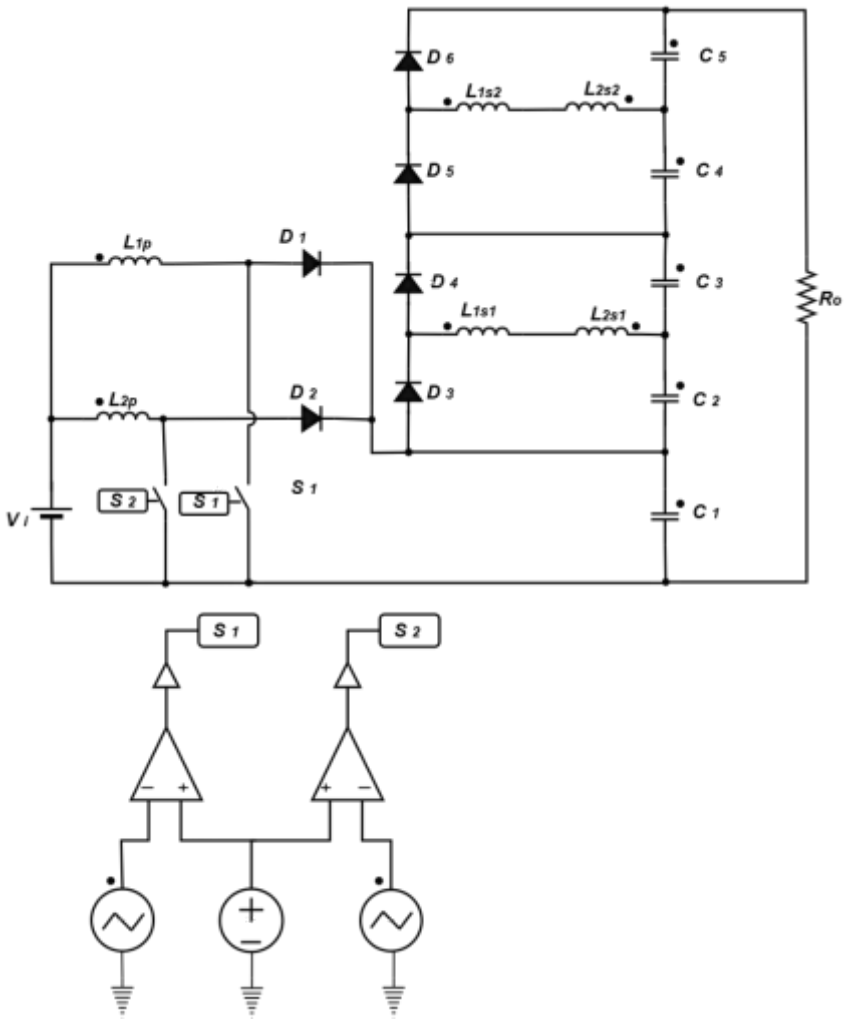
A simulação computacional ilustrada na figura 3.1, constitui uma etapa fundamental no desenvolvimento de conversores eletrônicos de potência, pois permite validar o modelo proposto, analisar as formas de onda das principais variáveis elétricas, verificar o ganho estático obtido e avaliar os esforços de tensão e corrente nos componentes do circuito. Além disso, possibilita identificar o comportamento dinâmico do conversor e confirmar a coerência entre os resultados teóricos e os obtidos por meio da simulação.

Neste capítulo são apresentados a dimensionamento do conversor Boost de alto ganho proposto, os parâmetros adotados na simulação e a análise dos resultados obtidos, permitindo verificar o desempenho da topologia e sua viabilidade para aplicações que exigem elevados ganhos de tensão.

A Figura 3.1 apresenta o circuito implementado para a simulação do conversor Boost de alto ganho proposto. A topologia do conversor Boost proposta, opera de forma entrelaçada, por meio das chaves semicondutoras S_1 e S_2, acionadas com defasagem de 180° elétricos.

Na entrada do circuito encontra-se a fonte de alimentação contínua V_i, responsável pelo fornecimento de energia ao conversor. Os indutores primários L_{1p} e L_{2p} armazenam energia durante os intervalos de condução das chaves, enquanto os diodos D_1 e D_2 direcionam a transferência dessa energia para as células de acoplamento magnético durante os intervalos em que as chaves são desligadas.

Figura 3.1 - Topologia do Conversor Boost de Alto Ganho



Fonte: Autor, 2026.

A elevação da tensão é obtida por meio de uma célula de acoplamento magnético composta pelos enrolamentos secundários L_{1s1}, L_{1s2}, L_{2s1} e L_{2s2}, associados aos diodos D_3 a D_6 e aos capacitores C_2 a C_5. Essa configuração promove a soma das tensões induzidas nos enrolamentos acoplados e das tensões armazenadas nos capacitores, permitindo alcançar elevados ganhos estáticos sem a necessidade de operar com razões cíclicas extremamente elevadas.

A carga do conversor é representada pelo resistor R_o, sobre o qual é obtida a tensão de saída. A combinação entre a técnica de entrelaçamento das fases e a célula de acoplamento magnético possibilita reduzir a ondulação das correntes de entrada, distribuir os esforços entre os dispositivos semicondutores e aumentar significativamente a capacidade de elevação da tensão em comparação com o conversor Boost convencional.

Na parte inferior da figura 3.1, é apresentado o circuito de acionamento das chaves semicondutoras. Os sinais de comando são gerados por duas fontes de onda triangular associadas a um sinal de referência contínuo, que são comparados por comparadores para produzir os pulsos de chaveamento de S_1 e S_2. As portadoras triangulares encontram-se defasadas de 180° elétricos, implementando a técnica de entrelaçamento e garantindo a operação alternada das duas fases do conversor.

3.2 DIMENSIONAMENTO E PARÂMETROS DO PROJETO

Para o dimensionamento do conversor foram definidos os parâmetros iniciais de projeto, tais como a tensão de entrada, a razão cíclica, a potência nominal e a frequência de chaveamento. Com base nessas especificações e considerando os componentes ideais, foram calculadas as principais grandezas elétricas necessárias ao projeto do conversor.

Além disso, foram adotados os valores de tensão de entrada, potência nominal, frequência de chaveamento, ondulação da tensão e da corrente e razão cíclica utilizados por Henn (2008), conforme apresentados na Tabela 3.1. Considerando a relação de transformação unitária (n=1:1), os parâmetros de projeto foram utilizados na expressão do ganho estático da topologia proposta, apresentada na Equação (2.24). A partir desses valores, foi determinada a tensão de saída teórica do conversor, cujo resultado é apresentado na Equação (3.2).

$$P_i = P_o \tag{3.1}$$

Tabela 3.1 Parâmetros de Dimensionamento do Conversor Boost de Alto Ganho

Grandeza	Símbolo	Valor
Tensão de Entrada	V_i	28V
Potência	P	500W
Ondulação da Tensão Pico a Pico	ΔV_C	1%
Ondulação da Corrente Pico a Pico	ΔI_{L1P}	1%
Frequência de chaveamento	F_S	50KHz
Relação de Transformação	n	1:1
Razão cíclica	D	0,5333

Fonte: Autor, 2026.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{4 \cdot N + 1}{1 - D} \;\therefore\; \frac{V_o}{28} = \frac{4 \cdot (1) + 1}{1 - 0.5333} \;\therefore\; V_o = V_i \cdot \frac{4 + 1}{1 - 0.5333} = 300\,V \tag{3.2}$$

$$P_i = P_o = V_o \cdot I_o \;\therefore I_o = \frac{P_o}{V_o} = \frac{500}{300} \approx 1{,}67\,A \tag{3.3}$$

$$I_i = \frac{P_i}{V_i} = \frac{500}{28} \approx 17{,}86\,A \tag{3.4}$$

$$R_o = \frac{V_o^2}{P_o} = \frac{300^2}{500} \approx 180\,\Omega \tag{3.5}$$

Para o dimensionamento da indutância, foi necessário determinar a corrente média nos indutores primários. Considerando que a corrente de entrada é igual à soma das correntes que percorrem os indutores L1p e L2p, a corrente média em cada indutor foi obtida conforme a Equação (3.6).

$$I_{L1P} = I_{L2P} = \frac{I_1}{2} = 8{,}93A \tag{3.6}$$

Após a determinação da corrente média nos indutores primários e da definição da variação de corrente admissível, previamente especificada na Tabela 3.1, foi possível realizar o dimensionamento da indutância por meio das equações apresentadas a seguir. Além disso, considera-se que a relação de espiras entre os enrolamentos L_{1p}, L_{1s1} e L_{1s2} é igual à relação de espiras entre os enrolamentos L_{2p}, L_{2s1} e L_{2s2}, conforme expresso na equação 3.7. Admitindo-se a relação de espiras unitária (n=1), conclui-se que todos os enrolamentos apresentam a

mesma indutância, conforme mostrado na Equação (3.8). Dessa forma, a indutância dos enrolamentos primários e secundários foi determinada por meio da Equação (3.9), conforme Henn (2008), considerando a ondulação de corrente no indutor de 1%.

$$n = \sqrt{\frac{L_{1p}}{L_{1s1}}} = \sqrt{\frac{L_{1p}}{L_{1s2}}} = \sqrt{\frac{L_{2p}}{L_{2s1}}} = \sqrt{\frac{L_{2p}}{L_{2s2}}} = 1 \tag{3.7}$$

$$L = L_{1P} = L_{2P} = \cdots = L_{1S2} = L_{2S2} \tag{3.8}$$

$$L = \frac{V_i \cdot D}{2 \cdot \Delta_{iL} \cdot F} = \frac{28 \cdot 0.5333}{2 \cdot (8.93 \cdot 0.01) \cdot 50000} = 1{,}672.533mH \tag{3.9}$$

A indutância mútua foi estimada por meio da Equação (3.10), considerando um coeficiente de acoplamento magnético (K = 0,9999998), valor adotado para representar um acoplamento praticamente ideal entre os enrolamentos. Essa hipótese permite minimizar os efeitos das indutâncias de dispersão durante a simulação, aproximando o comportamento do modelo às condições ideais de operação.

$$M = K \cdot \sqrt{L^2} = 0.9999998 \cdot 1{,}672429 \cdot 10^{-3} = 1{,}672532999mH \tag{3.10}$$

Ou seja,

$$M \approx n \cdot L1p \tag{3.11}$$

De acordo com a Equação (2.18), a tensão de saída do conversor corresponde à soma das tensões nos cinco capacitores da célula multiplicadora de tensão. De acordo com Henn (2008), considerando uma variação admissível de 1% na ondulação de tensão nos capacitores, foi possível determinar o valor da capacitância por meio da Equação (3.17).

$$Vo = 5 \cdot Vc \tag{3.12}$$

$$Vc = Vc1 = \cdots = Vc5 \tag{3.13}$$

$$Vc = \frac{300}{5} = 60V \tag{3.14}$$

$$\Delta V_c = 0.01 \cdot V_c = 0{,}60 \tag{3.15}$$

$$C = C_1 = \cdots = C_5 \tag{3.16}$$

$$C = \frac{Io \cdot D}{F \cdot \Delta \mathrm{Vc}} = \frac{1.667 \cdot 0.5333}{50000 \cdot (0.01 * 60)} = 29{,}63uF \tag{3.17}$$

Foram reunidos na Tabela 3.2, os valores obtidos nos principais parâmetros de projeto e o dimensionamento dos componentes do conversor. Essa tabela apresenta os valores calculados para indutores, capacitores, correntes e carga, servindo como base para a implementação e análise do desempenho da topologia proposta.

Tabela 3.2 Parâmetros calculados para o dimensionamento do conversor Boost de alto ganho

Grandeza	Símbolo	Valor
Corrente entrada	I_i	17,86 A
Corrente de saída	I_o	1,67 A
Tensão de saída	V_o	300 V
Indutância Primário	L_{1P}	1,672.53µH
	L_{2P}	
Indutância Secundário	L_{1S1}	1,672.53µH
	L_{1S2}	
	L_{2S1}	
	L_{2S2}	
Corrente Médio nos indutores primários	I_{L1P}	8,93 A
	I_{L2P}	
Capacitâncias	C_1	29,63 µf
	C_2	
	C_3	
	C_4	
	C_5	
Tensão nos capacitores	V_{C1}	60 V
	V_{C2}	
	V_{C3}	
	V_{C4}	
	V_{C5}	

Ondulação máxima de tensão no capacitor	Δ_{VC}	0.6V
Ondulação máxima da corrente no indutor primário	Δ_{IL1P}	89,28 mA
Carga resistiva	R_o	180 Ω

Fonte: Autor, 2026.

3.3 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

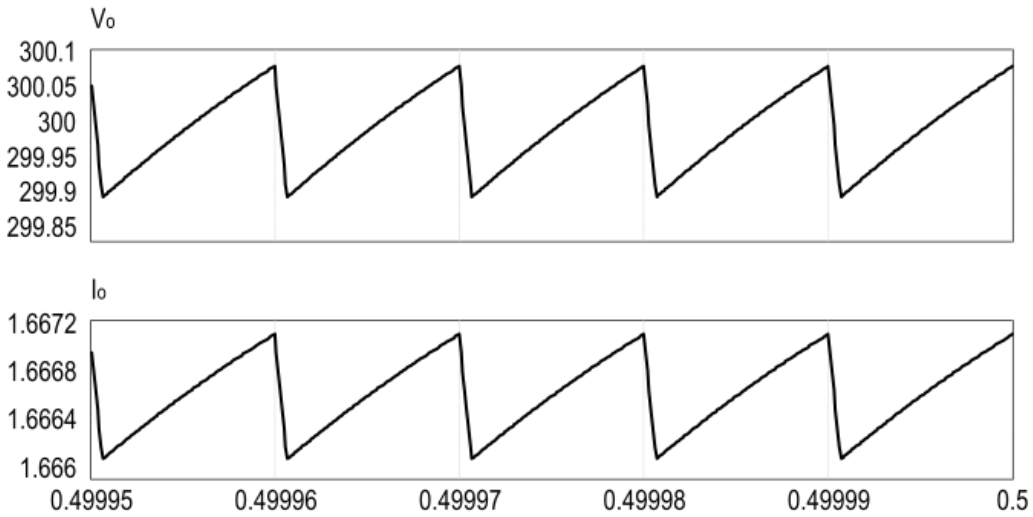
Com base nos parâmetros de projeto apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2, a topologia proposta foi implementada no software PSIM com o objetivo de avaliar seu desempenho em regime permanente. A simulação possibilitou verificar o comportamento das principais grandezas elétricas do conversor e comparar os resultados obtidos com os valores calculados a partir das equações de dimensionamento adotadas de Henn (2008). Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados da simulação, com destaque para as formas de onda das tensões e correntes, o ganho de tensão obtido e o comportamento dos principais componentes durante as diferentes etapas de operação do conversor.

A forma de onda da tensão de entrada não é apresentada, uma vez que a fonte de alimentação adotada possui tensão contínua de 28 V. Dessa forma, considera-se que a tensão de entrada permanece constante ao longo de todo o período de operação do conversor, não apresentando variações significativas.

Na Figura 3.2 são apresentadas as formas de onda da tensão e corrente na saída do conversor Boost de alto ganho. Observa-se que a tensão de saída atinge aproximadamente 300 V, valor compatível com o ganho estático previsto na análise teórica e no dimensionamento da topologia. Comparando-se esse resultado com a tensão de entrada de 28 V, verifica-se um elevado ganho de tensão, evidenciando a capacidade de elevação de tensão das duas células de acoplamento magnético empregados na topologia proposta.

Observa-se que a tensão de saída apresenta valores máximo e mínimo de (300,078V) e (299,893V), respectivamente. Dessa forma, a ondulação de tensão pico a pico é de aproximadamente (0,1847V), correspondente a (0,0616%) da tensão média. Essa ondulação é consequência do processo de carga e descarga dos capacitores da célula de acoplamento magnético durante a comutação das chaves semicondutoras e permanece dentro do limite de projeto previamente estabelecido, correspondente a 1% da tensão de saída. Esse resultado demonstra a capacidade do conversor em fornecer uma tensão elevada e praticamente constante.

Figura 3.2 – Forma de onda da tensão e corrente de saída do conversor Boost de alto ganho.



Fonte: Autor, 2026

A corrente de saída apresenta valor médio de aproximadamente (1,6666A), com valores máximo e mínimo de (1,6671A) e (1,6661A), respectivamente. A ondulação de corrente pico a pico é, portanto, de aproximadamente (1,03mA), correspondente a (0,0616%) da corrente média. Demonstrando-se que o conversor mantém a corrente de saída próxima ao valor esperado, apresentando baixa ondulação de corrente em regime permanente.

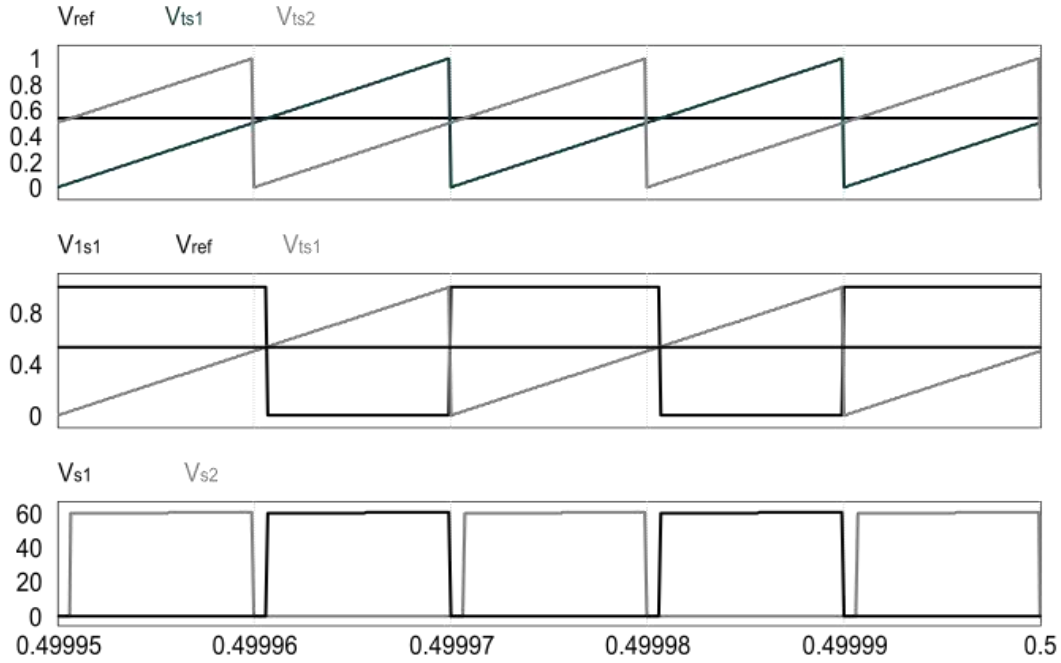
A Figura 3.3(a) apresenta as formas de onda da tensão de referência (Vref=0,5333V) e das tensões das fontes triangulares V_{ts1} e V_{ts2}, ambas com amplitude de 1 V. Observam-se que as portadoras encontram-se defasadas de 180° elétricos, característica da técnica de modulação entrelaçada. A comparação entre a tensão de referência e as portadoras triangulares é responsável pela geração dos sinais de acionamento das chaves semicondutoras.

A Figura 3.3(b) apresenta a forma de onda do sinal de acionamento da chave S_1 (V_{1s1}), em conjunto com a tensão de referência (V_{ref}) e a tensão da portadora triangular V_{ts1}. Verifica-se que o sinal V_{1s1} assume nível lógico alto (1) sempre que a tensão de referência é superior à tensão da portadora triangular. Quando a tensão da portadora ultrapassa a tensão de referência, o sinal passa para nível lógico baixo (0), permanecendo nesse estado até o início do próximo período de comutação. Esse comportamento resulta em uma razão cíclica de aproximadamente 53,33%, correspondente ao valor de referência adotado para o projeto.

Por sua vez, a Figura 3.3(c) apresenta as tensões sobre as chaves semicondutoras S_1 e S_2, representadas por V_{s1} e V_{s2}, respectivamente. Conforme os parâmetros definidos na Tabela

3.1, as chaves permanecem em condução durante 53,33% do período de chaveamento, em razão da adoção de uma razão cíclica D=0,5333. Observa-se que, enquanto uma chave permanece ligada, a tensão sobre ela é praticamente nula, característica do comportamento ideal do MOSFET durante a condução. Quando a chave é desligada, a tensão em seus terminais eleva-se para aproximadamente 60 V, valor correspondente à tensão no capacitor C1. Além disso, verifica-se que as tensões V_{s1} e V_{s2} encontram-se defasadas de 180° elétricos, evidenciando a operação entrelaçada das duas fases do conversor e confirmando o correto funcionamento da estratégia de modulação empregada.

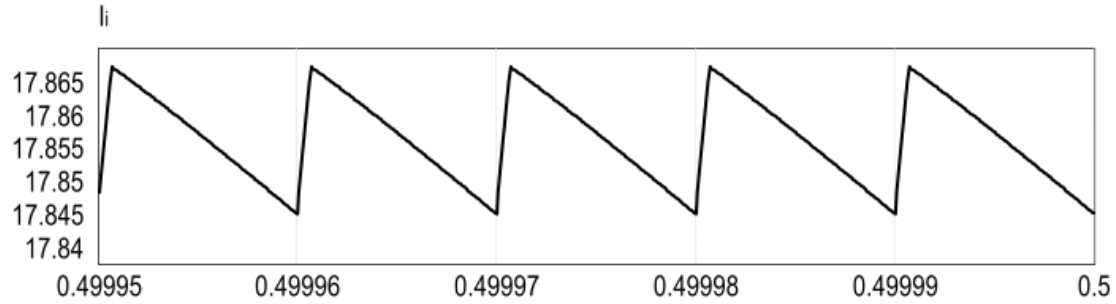
Figura 3.3 - Formas de onda da modulação PWM, dos sinais de acionamento e das tensões nas chaves semicondutoras



Fonte: Autor, 2026.

A Figura 3.4 apresenta as formas de onda da corrente de entrada (I_1). Observa-se que ela apresenta valor médio de aproximadamente (17,8565A), com valores máximo e mínimo de (17,8671A) e (17,8451A), respectivamente. Dessa forma, a ondulação de corrente pico a pico é de aproximadamente (22mA\), correspondente a (0,1232%) da corrente média. Esse resultado encontra-se abaixo do limite de 1% estabelecido como parâmetro de projeto, indicando que a corrente apresenta baixa ondulação em regime permanente.

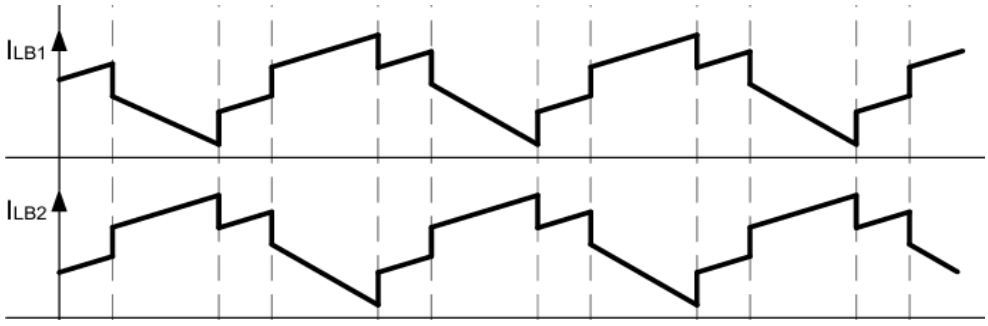
Figura 3.4 - Forma de onda da corrente de entrada (I_1)



Fonte: Autor, 2026.

As correntes teóricas dos indutores L_{1p} e L_{2p}, são ilustradas na Figura 3.6, apresentando uma defasagem de 180° elétricos, consequência direta da estratégia de acionamento das chaves semicondutoras. Durante o intervalo em que um dos indutores está armazenando energia, o outro encontra-se em processo de transferência de energia para a célula de acoplamento magnético, alternando continuamente seus estados de operação.

Figura 3.5 - Forma de onda teórica das correntes nos indutores primários L_{1p} e L_{2p}

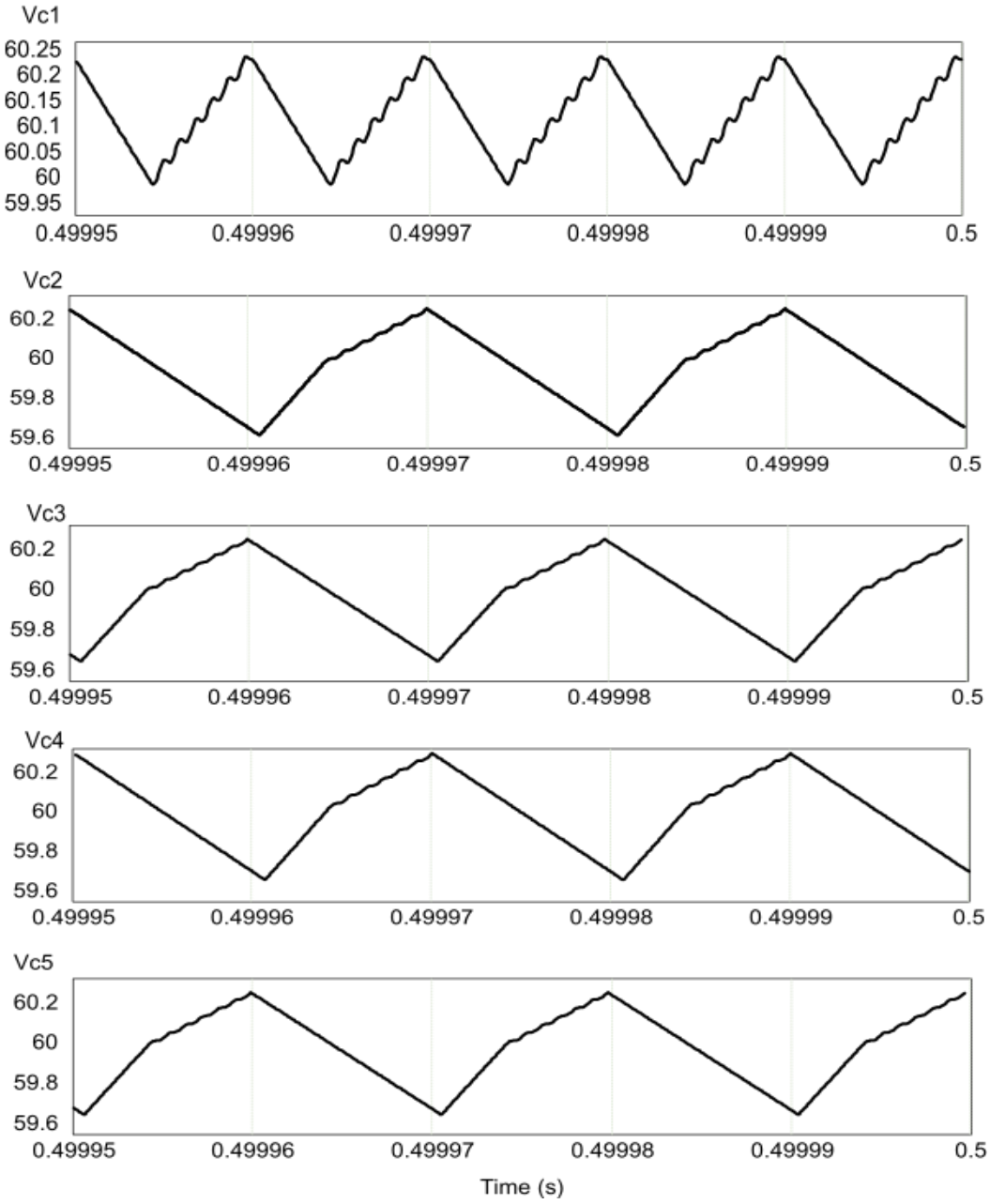


Fonte: Adotado de Henn (2008).

Observa-se que as correntes nos indutores primários não apresentam uma forma de onda triangular perfeita, como ocorre no conversor Boost convencional. Esse comportamento decorre das diferentes tensões aplicadas aos indutores ao longo das quatro etapas de operação da topologia. Como a taxa de variação da corrente é diretamente proporcional à tensão aplicada ao indutor, conforme a relação ($V_L = \frac{Ld_i}{d_t}$), as mudanças nos caminhos de circulação da corrente, provocadas pelos enrolamentos acoplados e pela célula de acoplamento magnético, alteram a inclinação da corrente durante cada intervalo de comutação, (ERICKSON; MAKSIMOVIĆ, 2001).

A Figura 3.6 apresenta as formas de onda das tensões nos capacitores C_1, C_2, C_3, C_4 e C_5. Observa-se que todos os capacitores apresentam tensões médias próximas de 60 V, resultado compatível com a análise teórica, uma vez que a tensão de saída do conversor é obtida pela soma das tensões armazenadas em cada capacitor, conforme estabelecido pela Equação (2.18). Dessa forma, a soma das tensões individuais resulta em aproximadamente 300 V, correspondente ao valor da tensão de saída do conversor.

Figura 3.7 - Formas de onda das tensões nos capacitores da célula multiplicadora de tensão



Fonte: Autor, 2026.

Quanto a tensão no capacitor (C1), apresentada na Figura 7, foi observado valor médio de aproximadamente (60,11V), com valores mínimo e máximo de (59,98V) e (60,23V), respectivamente. Dessa forma, a ondulação de tensão pico a pico é de aproximadamente (0,25V), correspondente a (0,41%\) da tensão média do capacitor. Esse resultado é inferior ao limite de (1%) estabelecido no dimensionamento, correspondente a uma ondulação máxima de (0,6V), indicando que o capacitor apresenta desempenho satisfatório quanto à filtragem da tensão.

As tensões nos capacitores da célula de acoplamento magnético apresentam valores médios próximos de 60 V, conforme previsto no dimensionamento. Para o capacitor (C2), foi obtida uma tensão média de aproximadamente (59,97V), com valores mínimo e máximo de (59,647V) e (60,243V), respectivamente. Dessa forma, a ondulação de tensão pico a pico é de aproximadamente (0,595V), correspondente a (0,992%) da tensão média. Esse resultado encontra-se ligeiramente abaixo do limite de 1% estabelecido como parâmetro de projeto, correspondente a uma ondulação máxima de aproximadamente (0,6V). Comportamento semelhante é observado nos demais capacitores da topologia, (C3), (C4) e (C5), indicando que os capacitores operam próximos às condições estabelecidas no dimensionamento.

Outro aspecto relevante é que as formas de onda apresentam comportamento semelhante, diferindo apenas no instante em que ocorre o processo de carga e descarga de cada capacitor. Esse comportamento confirma o funcionamento sequencial da célula de acoplamento magnético e evidencia que a energia é distribuída de maneira uniforme entre os capacitores, contribuindo para a obtenção do elevado ganho estático do conversor.

A Tabela 3.3 apresenta os principais resultados obtidos por meio da simulação do conversor Boost de alto ganho em regime permanente. De modo geral, observa-se que o conversor opera próximo às condições projetadas, mantendo os níveis de tensão e corrente desejados e apresentando baixas ondulações em regime permanente.

Tabela 3.3 Valores simulados das grandezas elétricas e respectivas ondulações do conversor proposto.

Grandeza	Símbolo	V máximo	V médio	V mínimo	Variação (Δ)	Ripple (%)
Vo	V	300,078	299,989	299,893	0,185	0,0616
Io	A	1,6671	1,66661	1,6661	0,001	0,0616
Ii	A	17,8671	17,8565	17,8451	0,022	0,1232
VC1	V	60,2300	60,11	59,9800	0,250	0,4100
V_{C2} a V_{C5}	V	60,2430	59,97	59,6470	0,5950	0,9920

Fonte: Autor, 2026.

3.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS TEÓRICOS E SIMULADOS

Com o objetivo de validar o modelo matemático desenvolvido, realizou-se uma comparação entre os principais parâmetros obtidos por meio do dimensionamento teórico e os resultados fornecidos pela simulação no PSIM. A Tabela 3.2 apresenta os valores das principais grandezas elétricas da topologia proposta, bem como o erro relativo entre os resultados teóricos e simulados. Essa comparação permite avaliar a precisão do modelo e verificar a consistência do dimensionamento adotado.

Os resultados apresentados na Tabela 3.4 demonstram uma excelente concordância entre os valores teóricos e os valores obtidos por simulação. Observa-se que todas as grandezas analisadas apresentaram erros relativos inferiores a 0,2%, sendo a maior diferença observada na tensão do capacitor C_1, cujo erro foi de aproximadamente 0,185%. As demais variáveis apresentaram erros inferiores a 0,06%, evidenciando a precisão do modelo matemático empregado no dimensionamento do conversor.

Tabela 3.4: Apresentação dos valores teóricos e simulados das principais grandezas elétricas da topologia proposta

Grandeza	Unidade	Teorico	Simulado	Erro (%)
V_i	V	28	28	0.00000%
V_o	V	300	299.989	0.00367%
I_i	A	17.85714286	17.8564	0.00416%
I_{L1p}	A	8.928571429	8.92818	0.00438%
I_{L2p}	A	8.928571429	8.92818	0.00438%
I_o	A	1.666666667	1.66661	0.00340%
V_{C1}	V	60	60.1113	0.18516%
V_{C2}	V	60	59.9718	0.04700%
V_{C3}	V	60	59.9672	0.05467%
V_{C4}	V	60	59.9718	0.04700%
V_{C5}	V	60	59.9672	0.05467%

Fonte: Autor, 2026.

Além disso, a tensão de saída simulada apresentou valor de 299,989 V, muito próximo do valor teórico de 300 V, resultando em um erro relativo de apenas 0,0037%. Da mesma forma, as correntes de entrada, de saída e dos indutores primários apresentaram excelente concordância com os valores previstos teoricamente. Esses resultados confirmam a validade das equações desenvolvidas e demonstram que a topologia proposta é capaz de fornecer o ganho de tensão esperado, atendendo às especificações de projeto estabelecidas

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas a modelagem matemática, o dimensionamento e a simulação do conversor Boost de Alto Ganho proposto. Inicialmente, foram estabelecidos os principais parâmetros de projeto e, a partir das condições de operação definidas, foram dimensionados os componentes da topologia, incluindo os indutores, capacitores e demais elementos necessários à implementação do modelo no software PSIM.

A análise das formas de onda obtidas por meio da simulação permitiu verificar o comportamento do conversor em regime permanente e durante suas diferentes etapas de operação. As correntes nos indutores primários evidenciaram o funcionamento entrelaçado das duas fases, enquanto as tensões nos capacitores apresentaram valores próximos de 60 V, contribuindo para a obtenção de uma tensão de saída próxima de 300 V. Considerando uma tensão de entrada de 28 V e uma razão cíclica de 53,33%, os resultados confirmam a capacidade da topologia de proporcionar elevado ganho de tensão sem a necessidade de operar com razões cíclicas excessivamente elevadas.

Os resultados obtidos na simulação também demonstraram baixas ondulações nas principais grandezas elétricas do conversor. A tensão de saída apresentou valor médio de aproximadamente 299,99 V, com ondulação de aproximadamente 0,0616%, enquanto a corrente de saída apresentou valor médio de aproximadamente 1,67 A e ondulação igualmente reduzida. As tensões nos capacitores apresentaram valores médios próximos de 60 V, com ondulações inferiores ao limite de 1% estabelecido como parâmetro de projeto. Esses resultados indicam que o dimensionamento dos elementos de armazenamento de energia e filtragem foi adequado às condições de operação estabelecidas.

Por fim, foi realizada a comparação entre os principais resultados obtidos teoricamente e aqueles determinados por meio da simulação computacional. Os resultados apresentados na Tabela 3.2 demonstraram elevada concordância entre as duas abordagens, com erros relativos inferiores a 0,2% para todas as grandezas analisadas. A maior diferença foi observada na tensão do capacitor (C1), com erro relativo de aproximadamente 0,185%, enquanto a tensão de saída apresentou erro relativo de apenas 0,0037%. Esses resultados demonstram a concordância entre os valores calculados a partir das equações de dimensionamento adotadas de Henn (2008) e aqueles obtidos por meio da simulação computacional da topologia estudada.

Diante dos resultados obtidos, verifica-se que os valores calculados a partir das equações de dimensionamento adotadas de Henn (2008) apresentam boa concordância com os resultados

obtidos por meio da simulação computacional, indicando a coerência dos parâmetros dimensionados para a topologia estudada. A obtenção de aproximadamente 300 V na saída a partir de uma tensão de entrada de 28 V demonstra a capacidade do conversor de proporcionar elevado ganho de tensão, mantendo níveis reduzidos de ondulação e sem a necessidade de operar com razão cíclica excessivamente elevada. Dessa forma, os resultados apresentados neste capítulo permitem verificar, por meio da simulação computacional, a coerência do dimensionamento e o funcionamento do conversor Boost de Alto Ganho proposto.

CAPITULO 4

CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo modelar e simular um conversor Boost de alto ganho obtido a partir da inclusão de uma célula adicional de acoplamento magnético à topologia proposta por Henn (2008), visando avaliar seu ganho estático e seu comportamento em regime permanente. A proposta foi desenvolvida considerando a associação entre a técnica de entrelaçamento e duas células de acoplamento magnético, buscando obter elevada relação de conversão sem a necessidade de operar com razões cíclicas excessivamente elevadas.

Inicialmente, foram apresentados os fundamentos dos conversores CC-CC, com ênfase no conversor Boost convencional e nas limitações associadas à obtenção de elevados ganhos de tensão. Verificou-se que o aumento do ganho no Boost convencional exige razões cíclicas elevadas, podendo resultar em maiores esforços sobre os dispositivos semicondutores e em condições menos favoráveis de operação. Nesse contexto, foram estudadas diferentes estratégias de elevação de ganho, destacando-se o entrelaçamento e o acoplamento magnético, utilizados conjuntamente na topologia proposta.

A topologia estudada foi desenvolvida a partir da estrutura de alto ganho apresentada por Henn (2008), com a inclusão de uma segunda célula de acoplamento magnético. A configuração é composta por duas fases Boost entrelaçadas, cujas chaves semicondutoras operam com defasagem de 180° elétricos. Os indutores primários são magneticamente acoplados aos respectivos enrolamentos secundários na célula de acoplamento magnético. A energia armazenada nos indutores é transferida para os capacitores durante as diferentes etapas de operação, contribuindo para a elevação da tensão de saída.

A análise das etapas de operação permitiu estabelecer o princípio de funcionamento da topologia proposta. Considerando componentes ideais e operação em modo de condução contínua, verificou-se que o funcionamento analisado requer razão cíclica superior a 50%. A operação entrelaçada das duas fases proporciona uma distribuição da corrente entre os indutores primários e contribui para a redução da ondulação da corrente de entrada. A análise do ganho estático também demonstrou a influência da razão cíclica e da relação de espiras sobre a tensão de saída. Para relação de espiras unitária, a topologia proposta apresentou ganho superior ao conversor de alto ganho de Henn (2008) na faixa analisada, alcançando ganho igual a 25 para (D=0,8), valor equivalente ao obtido por dois conversores Boost conectados em cascata.

Na etapa de dimensionamento, foram adotados os parâmetros de projeto utilizados como referência em Henn (2008), considerando tensão de entrada de 28 V, potência nominal de 500 W, frequência de chaveamento de 50 kHz, relação de transformação unitária e razão cíclica de aproximadamente 0,5333. A partir dessas condições, foram determinados os principais parâmetros elétricos da topologia, incluindo as correntes, indutores, capacitores e carga resistiva, estabelecendo-se as condições necessárias para a implementação do modelo no software PSIM.

Os resultados da simulação demonstraram que, para uma tensão de entrada de 28 V, a topologia foi capaz de produzir uma tensão de saída média de aproximadamente 299,989 V, correspondente ao ganho de tensão previsto teoricamente. As tensões nos cinco capacitores apresentaram valores médios próximos de 60 V, cuja soma resulta em aproximadamente 300 V. A tensão de saída apresentou ondulação de aproximadamente 0,0616%, enquanto a corrente de entrada apresentou ondulação de 0,1232%. As tensões dos capacitores também permaneceram dentro do limite de ondulação estabelecido no dimensionamento, com valores inferiores ou próximos de 1%.

A análise das formas de onda das correntes nos indutores primários confirmou a operação entrelaçada das duas fases, com defasagem de 180° elétricos. As correntes dos indutores apresentaram valores médios próximos de 8,93 A, enquanto a corrente de entrada apresentou valor médio de aproximadamente 17,86 A, evidenciando a contribuição das duas fases para o processamento da corrente de entrada.

A comparação entre os resultados teóricos e simulados apresentou elevada concordância. A tensão de saída teórica de 300 V apresentou valor simulado de 299,989 V, correspondendo a um erro relativo de apenas 0,00367%. As correntes de entrada, de saída e dos indutores primários também apresentaram erros inferiores a 0,005%. Entre as tensões dos capacitores, o

maior erro foi observado em (C_1), com aproximadamente 0,185%, enquanto os demais valores permaneceram abaixo de 0,06%. Dessa forma, todas as grandezas analisadas apresentaram erros relativos inferiores a 0,2%, indicando boa concordância entre os valores calculados a partir das equações de dimensionamento adotadas de Henn (2008) e os resultados obtidos por meio da simulação computacional.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que os objetivos estabelecidos foram alcançados. As equações de dimensionamento adotadas de Henn (2008) permitiram determinar as principais grandezas elétricas e os parâmetros necessários ao dimensionamento da topologia proposta, enquanto a simulação no PSIM possibilitou verificar seu funcionamento em regime permanente, analisar as principais formas de onda e avaliar o ganho estático obtido. Para as condições analisadas, a combinação entre o entrelaçamento e as duas células de acoplamento magnético possibilitou obter aproximadamente 300 V a partir de 28 V, utilizando razão cíclica de 53,33%, demonstrando o potencial da estrutura para aplicações que requerem elevada relação de conversão.

Entretanto, os resultados apresentados foram obtidos considerando componentes ideais e condições de simulação. Dessa forma, efeitos relacionados às perdas de condução e comutação, resistências parasitas, indutâncias de dispersão, características não ideais dos semicondutores e limitações térmicas não foram avaliadas experimentalmente. Assim, os resultados devem ser interpretados considerando as hipóteses adotados no dimensionamento.

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se a implementação experimental da topologia para validar os resultados obtidos por simulação e avaliar seu comportamento sob condições reais de operação. Também podem ser investigados os efeitos das perdas nos dispositivos semicondutores e nos elementos magnéticos, a eficiência do conversor, diferentes relações de espiras, diferentes coeficientes de acoplamento magnético e diferentes razões cíclicas. Adicionalmente, estudos futuros podem avaliar estratégias de controle e a aplicação da topologia em sistemas fotovoltaicos e outras fontes de energia renovável.

Em síntese, os resultados obtidos demonstram que a topologia proposta apresenta potencial para a obtenção de elevado ganho de tensão com razão cíclica moderada. A concordância entre os resultados teóricos e simulados, associada à baixa ondulação das principais grandezas elétricas, confirma a coerência do modelo desenvolvido e fornece uma base para estudos futuros relacionados à implementação experimental, otimização e aplicação prática do conversor.

CAPITULO 5

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (AIE). **World Energy Outlook 2024**. Paris: International Energy Agency, 2024. Disponível em: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024. Acesso em: 30 abr. 2026.

ALCAZAR, Y. J. A. **Estudo do conversor Boost CC-CC de alto ganho de tensão baseado na célula de comutação de três estados e nas células multiplicadoras de tensão (MC)**. 2010. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

AMIR, Asim; AMIR, Aamir; CHE, Hang Seng; ELKHATEB, Ahmad; RAHIM, Nasrudin Abd. Comparative analysis of high voltage gain DC-DC converter topologies for photovoltaic systems. **Renewable Energy**, v. 136, p. 1147–1163, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.089.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência**. Florianópolis: Edição do Autor, 2006.

BASCOPÉ, G. V. T.; BARBI, I. Generation of a family of non-isolated DC-DC PWM converters using new three-state switching cells. In: IEEE POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE (PESC), 31., 2000, [local não informado]. **Proceedings [...]**, v. 2, p. 858–863, 2000. DOI: https://doi.org/10.1109/PESC.2000.879927.

BP. **Statistical Review of World Energy 2021**. London: BP, 2021.

CHAVES, Breno Bezerra; BRITO JR., Francisco J. B. de; DAMASCENO, Débora Pereira; ALMEIDA, Bruno Ricardo de; BASCOPÉ, René Pastor Torrico. **Modelo equivalente e controle digital de um conversor CC-CC boost intercalado com alto ganho de tensão**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2018. Trabalho apresentado em congresso técnico.

ERICKSON, Robert W.; MAKSIMOVIĆ, Dragan. **Fundamentals of Power Electronics**. 2. ed. New York: Springer, 2001.

GHOLIZADEH, Hossein; SHARIFI SHAHRIAR, Reza; AMINI, Saeed; RAHIMI, Tohid. An ultra-high voltage gain improved cascaded boost converter suitable for dielectric strength tests. **Energies**, v. 17, n. 15, art. 3861, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/en17153861.

HART, Daniel W. **Power Electronics**. New York: McGraw-Hill, 2011.

HENN, Gustavo Alves de Lima. **Conversor boost bidirecional de alto ganho aplicado a um sistema fotovoltaico**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2022**. Paris: IEA, 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Seventh Assessment Report (AR7)**. Genebra: IPCC, [2023–2027]. Documento em preparação.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **World Energy Transitions Outlook 2022**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2022.

JAYACHANDRAN, Divya Navamani; SATHIK, Jagabar; PADHI, Tanmay; KUMARI, Aditi. A comprehensive review of the quadratic high gain DC-DC converter for fuel cell application. **International Journal of Electronics and Telecommunication**, v. 68, n. 2, p. 299–306, 2022. DOI: https://doi.org/10.24425/ijet.2022.139882.

KASSAKIAN, John G. **Principles of Power Electronics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.

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, 2011. DOI: https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2049715.

MAKSIMOVIĆ, Dragan; ERICKSON, Robert W. **Fundamentals of Power Electronics**. 3. ed. Cham: Springer Nature, 2020.

MENDES, Lourdes Aparecida. **Comparação de desempenho dos conversores buck entrelaçado de três fases e buck baseado na célula de comutação de quatro estados**. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de São João del-Rei; Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, São João del-Rei, 2018.

OLIVEIRA, Dayane Cynthia Pinto. **Modelagem do conversor CC-CC boost ATCT-CCQE pelo método do conversor boost equivalente**. 2024. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA). **Relatório sobre a Lacuna de Emissões 2024**. Nairobi: PNUMA, 2024. Disponível em: https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report. Acesso em: 30 abr. 2026.

RASHID, Muhammad Harunur. **Power Electronics: Devices, Circuits and Applications**. 4. ed. London: Pearson, 2013.

SANTOS, Katiuscia Lopes dos. **Conversor CC/CC intercalado com indutores acoplados para alimentação de um datacenter através de um sistema fotovoltaico**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

SILVA, Ranoyca Nayana Alencar Leão e. **Célula de comutação aplicada a um conversor Boost de alto ganho**. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

SUTIKNO, Tole; PURNAMA, Hendril Satrian; WIDODO, Nuryono Satya; PADMANABAN, Sanjeevikumar; SAHID, Mohd Rodhi. A review on non-isolated low-power DC-DC converter topologies with high output gain for solar photovoltaic system applications. **Clean Energy**, v. 6, n. 4, p. 557–572, 2022. DOI: https://doi.org/10.1093/ce/zkac037.

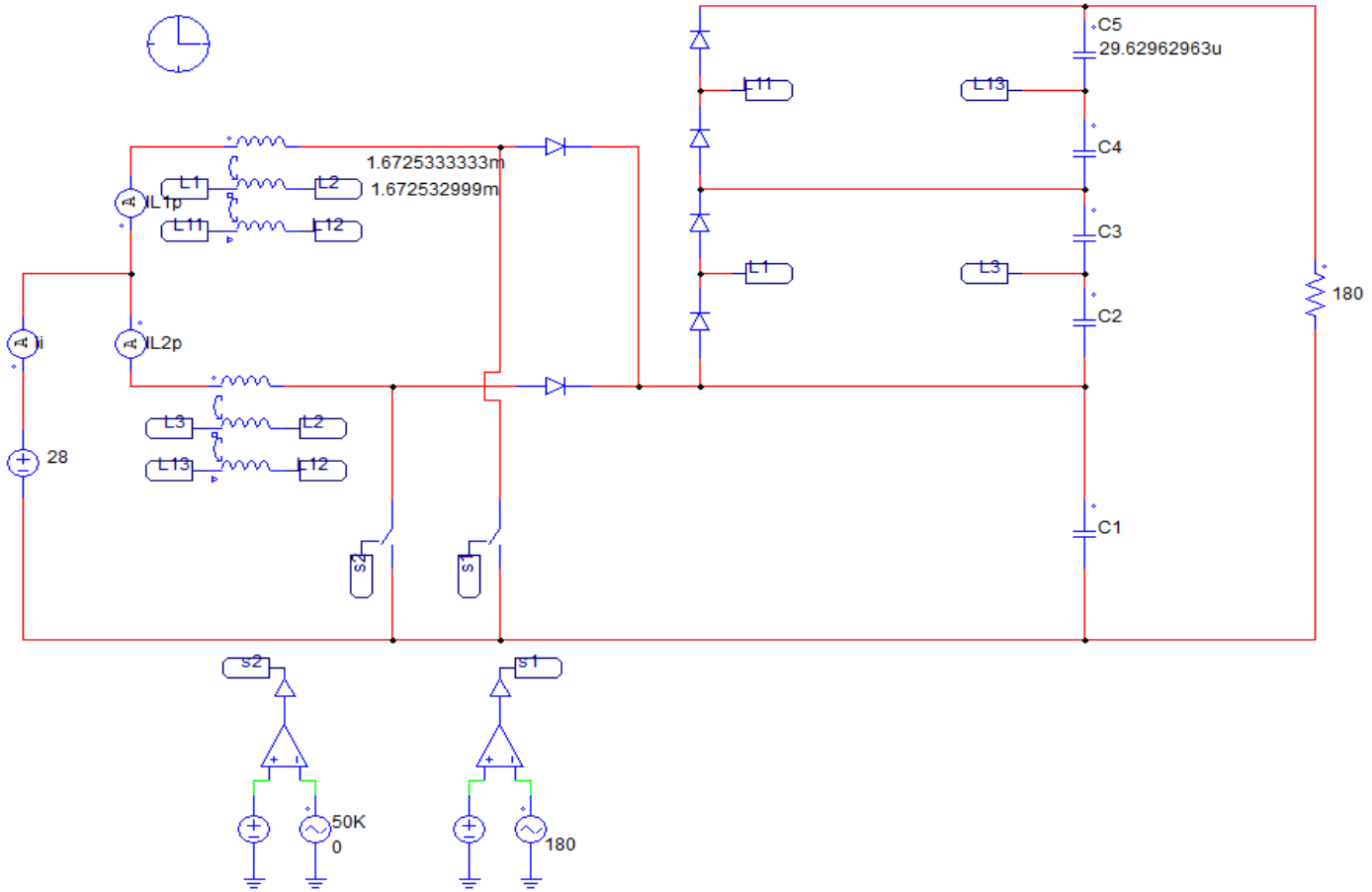
TAVARES, Douglas de Andrade. **Concepção de conversores CC-CC não isolados integrados com ampla taxa de conversão**. 2019. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de São João del-Rei; Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, São João del-Rei, 2019.

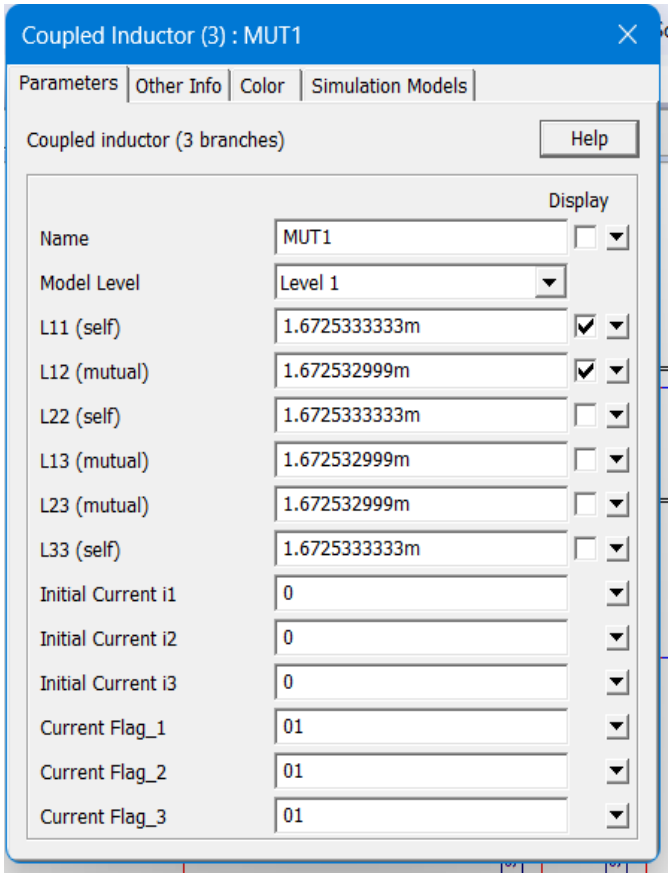
VALARMATHY, A. S.; PRABHAKAR, M. High gain interleaved boost-derived DC-DC converters: a review on structural variations, gain extension mechanisms and applications. **e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy**, v. 8, art. 100618, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100618.

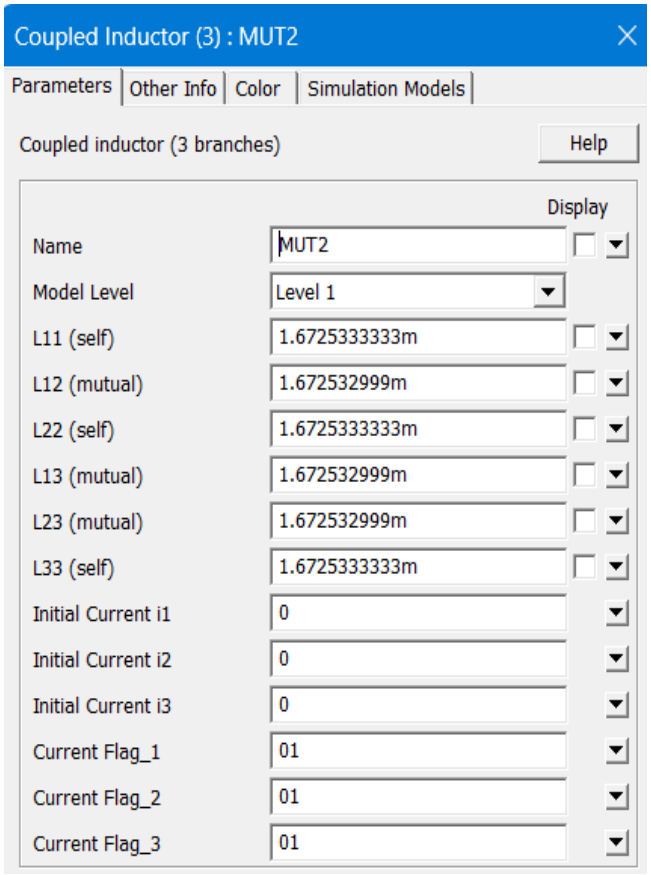
VIEIRA, Mateus Pacheco. **Conversor CC-CC Boost intercalado de alto ganho de tensão acionado por DSP**. 2018. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

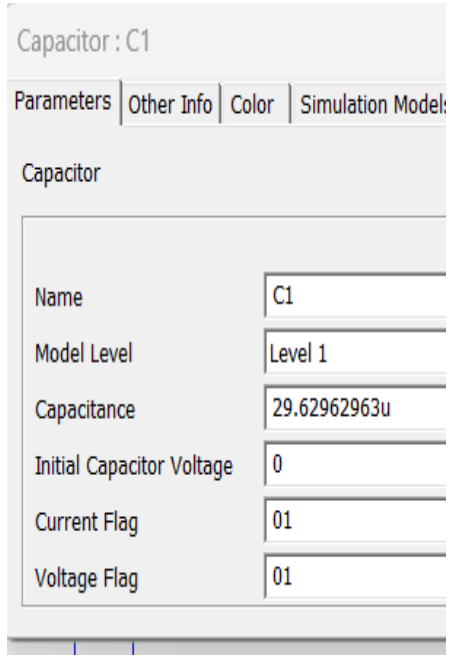
APÊNDICE

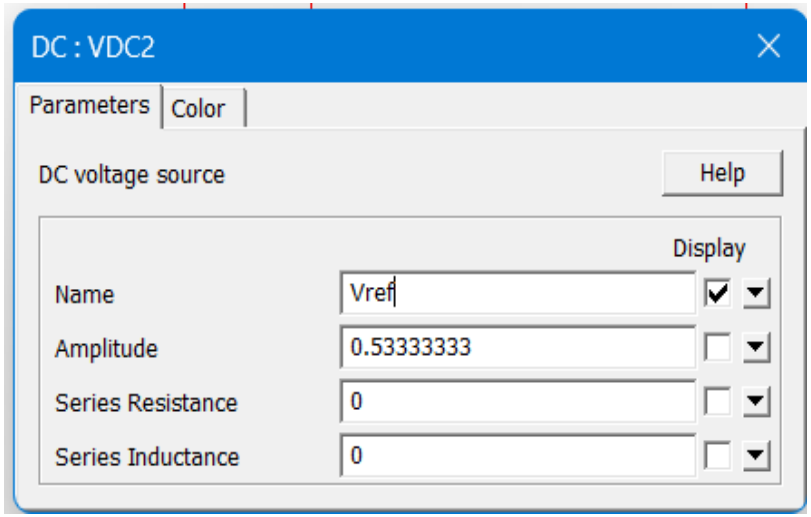
(CIRCUITO DO CONVERSOR BOOST DE ALTO GANHO, PROPOSTO NESSE TRABALHO)

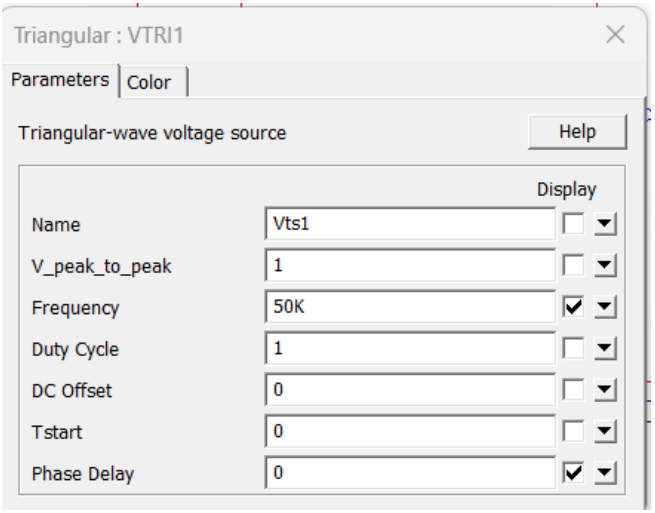


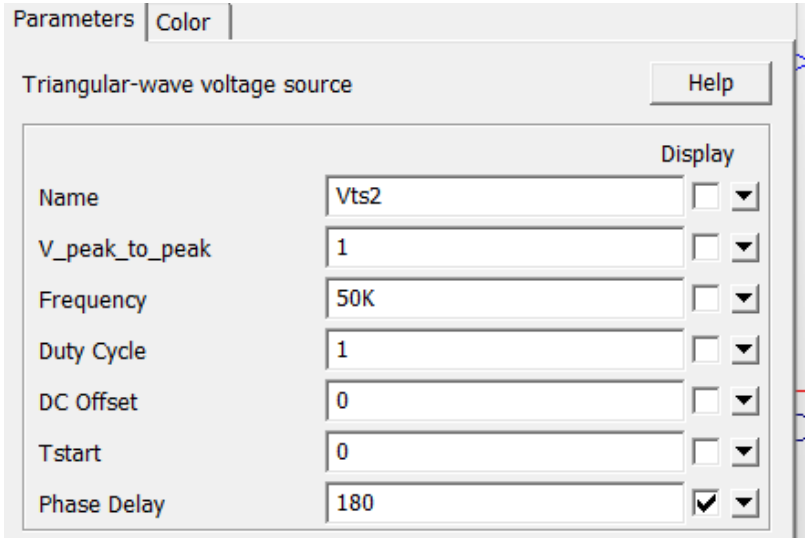

Coupled Inductor (3) : MUT1
Parameters
Other Info
Color
Simulation Models
Coupled inductor (3 branches)
Help
Display
Name
MUT1
Model Level
Level 1
L11 (self)
1.6725333333m
L12 (mutual)
1.672532999m
L22 (self)
1.6725333333m
L13 (mutual)
1.672532999m
L23 (mutual)
1.672532999m
L33 (self)
1.6725333333m
Initial Current i1
0
Initial Current i2
0
Initial Current i3
0
Current Flag_1
01
Current Flag_2
01
Current Flag_3
01


Coupled Inductor (3) : MUT2
Parameters
Other Info
Color
Simulation Models
Coupled inductor (3 branches)
Help
Display
Name
MUT2
Model Level
Level 1
L11 (self)
1.6725333333m
L12 (mutual)
1.672532999m
L22 (self)
1.6725333333m
L13 (mutual)
1.672532999m
L23 (mutual)
1.672532999m
L33 (self)
1.6725333333m
Initial Current i1
0
Initial Current i2
0
Initial Current i3
0
Current Flag_1
01
Current Flag_2
01
Current Flag_3
01


Capacitor : C1
Parameters
Other Info
Color
Capacitor
Name
C1
Model Level
Level 1
Capacitance
29.62962963u
Initial Capacitor Voltage
0
Current Flag
01
Voltage Flag
01


DC : VDC2
Parameters
Color
DC voltage source
Help
Display
Name
Vref
Amplitude
0.53333333
Series Resistance
0
Series Inductance
0


Triangular : VTRI1
Parameters
Color
Triangular-wave voltage source
Help
Display
Name
Vts1
V_peak_to_peak
1
Frequency
50K
Duty Cycle
1
DC Offset
0
Tstart
0
Phase Delay
0


Parameters
Color
Triangular-wave voltage source
Help
Display
Name
Vts2
V_peak_to_peak
1
Frequency
50K
Duty Cycle
1
DC Offset
0
Tstart
0
Phase Delay
180