

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DIOGO HIRAIWA DE OLIVEIRA

**CONVERSOR CC-CC BIDIRECIONAL BOOST INTERLEAVED A CAPACITOR
CHAVEADO**

PONTA GROSSA

2026

DIOGO HIRAIWA DE OLIVEIRA

**CONVERSOR CC-CC BIDIRECIONAL BOOST INTERLEAVED A CAPACITOR
CHAVEADO**

Bidirectional DC-DC Boost Interleaved Converter with Switched Capacitor Cell

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Elétrica, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Prof. Dr. Carlos Henrique Illa Font.

PONTA GROSSA

2026



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

DIOGO HIRAIWA DE OLIVEIRA

Conversor CC-CC Bidirecional Boost Interleaved a Capacitor Chaveado

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica, da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 26/junho/2026

Carlos Henrique Illa Font
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Helio Voltolini
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Francisco José Viglus
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2026

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à minha família, pelo apoio, incentivo e compreensão ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. Em cada etapa da graduação, especialmente nos momentos de maior dificuldade, pude contar com o suporte, os conselhos e a confiança daqueles que sempre acreditaram em mim. Esta conquista também é de vocês.

À minha namorada, agradeço o carinho, paciência e companheirismo durante esse período. Sua presença foi fundamental para tornar essa caminhada mais leve, especialmente nos momentos de cansaço, incertezas e dedicação intensa à conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos, agradeço pela parceria, pelas conversas, pelo apoio e pelos momentos compartilhados ao longo da graduação. Cada amizade construída nesse período contribuiu, de alguma forma, para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Henrique Illa Font, agradeço a orientação, disponibilidade e pelos conhecimentos transmitidos durante o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso. Suas contribuições foram essenciais para a construção e aprimoramento deste estudo.

Aos professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, agradeço pelos ensinamentos ao longo da graduação e pela contribuição na minha formação como engenheiro eletricista.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão desta importante etapa da minha vida.

Resumo

O crescente uso de fontes renováveis em microrredes em corrente contínua tem impulsionado a necessidade de sistemas de armazenamento de energia capazes de garantir estabilidade, confiabilidade e qualidade da energia fornecida. Nesse contexto, os Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) desempenham papel fundamental na compensação da intermitência das fontes renováveis e no gerenciamento do fluxo de potência da microrrede. Para viabilizar a integração entre os sistemas de armazenamento e o barramento CC, são necessários conversores eletrônicos de potência que apresentem elevado ganho de tensão, alta eficiência e reduzida ondulação de corrente. Assim, este trabalho apresenta o estudo, o projeto e o dimensionamento de um conversor CC-CC bidirecional do tipo Boost interleaved com célula a capacitor chaveado, aplicado a sistemas de armazenamento de energia em baterias. A topologia proposta combina a técnica de interleaving com uma célula passiva a capacitor chaveado, possibilitando a elevação do ganho estático de tensão, a redução dos esforços elétricos sobre os semicondutores e a diminuição da ondulação de corrente nos elementos de armazenamento. Inicialmente, são apresentados os conceitos relacionados às microrredes em corrente contínua, aos sistemas BESS, aos conversores CC-CC bidirecionais e às técnicas de interleaving e capacitor chaveado. Em seguida, são desenvolvidas a análise teórica da topologia, as etapas de operação e o dimensionamento dos principais componentes do conversor, incluindo indutores e capacitores. A validação da topologia foi realizada por meio de simulações computacionais, permitindo a análise das principais formas de onda e do comportamento do conversor em regime permanente. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade da estrutura proposta, evidenciando a redução da ondulação de corrente, a adequada divisão de corrente entre as fases *interleaved* e o aumento do ganho de tensão proporcionado pela célula a capacitor chaveado. Dessa forma, conclui-se que a topologia estudada apresenta características promissoras para aplicações em sistemas de armazenamento de energia e microrredes CC, contribuindo para o aumento da eficiência e da confiabilidade desses sistemas.

Palavras-chave: conversor CC-CC bidirecional; capacitor chaveado; *interleaving*; sistema de armazenamento de energia em baterias; microrredes em corrente contínua.

ABSTRACT

The increasing use of renewable energy sources in direct current microgrids has driven the need for energy storage systems capable of ensuring stability, reliability, and power quality. In this context, Battery Energy Storage Systems (BESS) play a fundamental role in compensating for the intermittency of renewable sources and in managing the power flow within the microgrid. To enable the integration between energy storage systems and the DC bus, power electronic converters with high voltage gain, high efficiency, and reduced current ripple are required. Thus, this work presents the study, design, and sizing of a bidirectional interleaved Boost DC-DC converter with a switched-capacitor cell, applied to battery energy storage systems. The proposed topology combines the interleaving technique with a passive switched-capacitor cell, enabling an increase in static voltage gain, a reduction in the electrical stress imposed on semiconductor devices, and a decrease in current ripple in the energy storage elements. Initially, the concepts related to DC microgrids, BESS, bidirectional DC-DC converters, interleaving techniques, and switched-capacitor converters are presented. Subsequently, the theoretical analysis of the topology, the operating stages, and the sizing of the main converter components, including inductors and capacitors, are developed. The topology was validated through computational simulations, allowing the analysis of the main waveforms and the converter behavior under steady-state conditions. The obtained results demonstrate the feasibility of the proposed structure, highlighting the reduction of current ripple, the proper current sharing between the interleaved phases, and the increase in voltage gain provided by the switched-capacitor cell. Therefore, it is concluded that the studied topology presents promising characteristics for applications in energy storage systems and DC microgrids, contributing to the improvement of efficiency and reliability in these systems.

Keywords: bidirectional DC-DC converter; switched capacitor; interleaving; battery energy storage system; DC microgrids.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Microrredes	18
Figura 2: Sistema fotovoltaico.	20
Figura 3: Comparação entre diferentes químicas de baterias de íons de lítio. ..22	
Figura 4: Configuração de uma microrrede híbrida CA/CC com múltiplos sistemas de armazenamento de energia e fontes renováveis.	24
Figura 5: Estrutura genérica de conversor Boost interleaved multifásico com N fases.	26
Figura 6: Topologia do conversor.	30
Figura 7: Topologia do conversor para a primeira e terceira etapa.	31
Figura 8: Topologia do conversor para a segunda etapa.	33
Figura 9: Topologia do conversor para a quarta etapa.	35
Figura 10: Formas de onda do conversor proposto.	37
Figura 11: Formas de onda do conversor proposto.	38
Figura 12: Corrente no capacitor chaveado para diferentes modos de operação.	44
Figura 13: Esquemático do conversor proposto.	48
Figura 14: Tensão de saída e nos capacitores.	49
Figura 15: Ondulação nos capacitores.	50
Figura 16: Corrente de entrada e nos indutores.	51
Figura 17: Detalhe da corrente de entrada e nos indutores.	51
Figura 18: Corrente no capacitor chaveado.	52
Figura 19: Tensão nos transistores S1 e S2.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre diferentes tipos de baterias	22
Tabela 2: Tensão sobre os componentes do conversor proposto.	36
Tabela 3: Especificações de projeto.....	39
Tabela 4: Intervalos para os modos de operação do capacitor chaveado.....	44
Tabela 5: Valores dos componentes armazenadores de energia.	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BESS	Battery Energy Storage System (Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias)
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCM	Continuous Conduction Mode (Modo de Condução Contínua)
EMI	Electromagnetic Interference (Interferência Eletromagnética)
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência)
PSIM	Power Simulation Software
SoC	State of Charge (Estado de Carga)
UTFR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

V_{in}	Tensão de entrada
V_0	Tensão de saída
V_{C1}	Tensão no capacitor de saída 1
V_{C2}	Tensão no capacitor de saída 2
V_{Cs}	Tensão no capacitor chaveado
I_{in}	Corrente de entrada
I_0	Corrente de saída
I_{L1}	Corrente no indutor 1
I_{L2}	Corrente no indutor 2
$\Delta I_{L\%}$	Ondulação de corrente no indutor
$\Delta V_{0\%}$	Ondulação de tensão no capacitor
L_1, L_2	Indutores
C_{01}, C_{02}	Capacitores
C_{Cs}	Capacitor chaveado
D	Razão cíclica
DC	Descarga Completa
DP	Descarga Parcial
SD	Sem Descarga
T_s	Período de comutação
P_0	Potência de saída
R_0	Resistência equivalente de carga
R_{eq}	Resistência equivalente da célula a capacitor chaveado
τ	Constante de tempo da célula a capacitor chaveado
$f_s \tau$	Produto frequência–constante de tempo
N	Número de fases do conversor interleaved

SUMÁRIO

1. Introdução	13
1.1. Objetivos do trabalho	14
1.2. Objetivos específicos	14
1.3. Metodologia proposta	15
1.4. Organização do trabalho	15
2. Revisão Bibliográfica	17
2.1. Microrredes Elétricas	17
2.2. Fontes Renováveis em Microrredes	19
2.3. Sistema de Armazenamento de Energia (BESS)	21
2.3.1. Tipos de Sistemas de Armazenamento	21
2.3.2. Requisitos Elétricos para Integração com Conversores CC-CC	23
2.4. Conversores CC-CC em Microrredes	23
2.5. Técnica de <i>Interleaving</i> em Conversores CC-CC	25
2.6. Conversores com Capacitor Chaveado	27
3. Desenvolvimento	30
3.1. Etapas de Operação	30
3.2. Formas de onda do conversor proposto	36
3.2.1. Ganho Estático	38
4. Projeto e dimensionamento	39
4.1. Cálculos preliminares	40
4.2. Dimensionamento dos elementos armazenadores de energia	41
4.2.1. Cálculo dos indutores	41
4.2.2. Cálculo do capacitor	41
5. Resultados da simulação	48
6. Conclusão	54
7. REFERÊNCIAS	56

1. Introdução

Desde a revolução industrial, o sistema elétrico global tem evoluído continuamente. Originalmente, redes elétricas eram isoladas em pequena escala (*mini-grids*), e apenas posteriormente se tornaram grandes sistemas interligados para gerar e distribuir energia de forma centralizada. Esse desenvolvimento histórico começou no final do século XIX e consolidou o uso da corrente alternada (CA) como padrão, principalmente pela facilidade de transformação de tensões e distribuição eficiente em longas distâncias (ERICKSON; MAKSIMOVIĆ, 2001).

Nas últimas décadas, porém, surgiram desafios significativos à operação de redes centralizadas, impulsionados pela necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e aumentar a participação de fontes renováveis distribuídas, como a solar e a eólica. Esses recursos, apesar de sustentáveis, são intrinsecamente intermitentes, o que gera impacto direto na estabilidade e na qualidade da energia disponível ao consumidor final.

Dentro desse contexto de transformação energética, as microrredes elétricas, especialmente aquelas operando em corrente contínua (CC), têm sido reconhecidas como uma abordagem inovadora para integração eficiente de fontes renováveis e sistemas de armazenamento de energia. Microrredes operam de forma autônoma ou conectada ao sistema elétrico maior, permitindo maior flexibilidade, resiliência e eficiência energética, especialmente em regiões remotas ou com alta penetração de geração distribuída (DRAGIČEVIĆ et al., 2016; ELSAYED; MOHAMED; MOHAMMED, 2015).

Entretanto, a integração dessas fontes renováveis e de sistemas de armazenamento de energia, como baterias de íons de lítio, depende fortemente da capacidade de controlar o fluxo de energia de modo eficiente e bidirecional. Isso é obtido por meio de conversores eletrônicos de potência, especialmente os conversores CC-CC bidirecionais, que possibilitam tanto a elevação quanto a redução de tensão, conforme a necessidade do sistema.

Apesar da ampla adoção de conversores bidirecionais em aplicações industriais e de tração (como em veículos elétricos e híbridos), muitas topologias ainda apresentam limitações, como elevada ondulação de corrente na interface com baterias e necessidade de filtros passivos volumosos para redução do *ripple*. Essa realidade tem motivado estudos e propostas de novas topologias com foco em maior eficiência, maior densidade de potência e menor impacto na vida útil das baterias.

1.1. Objetivos do trabalho

Assim, este trabalho se concentra no estudo de um conversor CC-CC bidirecional do tipo *Boost*, aplicado ao gerenciamento de energia em microrredes com fontes renováveis, empregando a técnica de *interleaving* no lado de baixa tensão e uma célula a capacitor chaveado no lado de alta tensão, de modo a melhorar o desempenho do conversor frente às demandas tecnológicas atuais.

Por se tratar de uma topologia bidirecional, os termos entrada e saída dependem do sentido do fluxo de potência. No escopo deste TCC, a análise é concentrada no modo elevador de tensão: o lado de baixa tensão, associado ao banco de baterias de 60 V, é tratado como entrada, enquanto o lado de alta tensão, associado ao barramento CC de 360 V, é tratado como saída. A investigação completa do modo abaixador é indicada como continuidade do estudo.

1.2. Objetivos específicos

Diante do contexto apresentado na introdução e dos objetivos definidos para este estudo, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Propor um conversor CC-CC com elevada capacidade de elevação de tensão, possibilitando a obtenção de altas taxas de conversão sem a necessidade da utilização de ciclos de trabalho extremos;
- Viabilizar a operação do conversor com tensões de saída mais elevadas, minimizando os esforços de tensão impostos aos dispositivos semicondutores;

- Analisar e projetar um conversor CC-CC *Boost* bidirecional integrado a uma célula de capacitor chaveado no lado de alta tensão e com *interleaving* no lado de baixa tensão;
- Realizar simulações numéricas como forma de complementar e validar a análise teórica desenvolvida.

1.3. Metodologia proposta

A metodologia adotada neste trabalho é estruturada nas seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica, contemplando o histórico, os conceitos fundamentais e o estado da arte relacionados ao tema;
- Análise teórica do conversor proposto, bem como da sua estrutura e potencialidades;
- Dimensionamento do conversor;
- Realização de simulação numérica computacional.

1.4. Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos, estruturados de forma a apresentar a fundamentação teórica, o desenvolvimento da topologia proposta, o projeto do conversor e a análise dos resultados obtidos por simulação.

O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, contextualizando a importância dos conversores CC-CC bidirecionais em sistemas de armazenamento de energia e microrredes em corrente contínua. Também são apresentados os objetivos gerais, os objetivos específicos, a metodologia proposta e a organização do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, abordando os principais conceitos necessários para o entendimento do tema. São discutidas as microrredes elétricas, as fontes renováveis, os sistemas de armazenamento de energia em baterias, os conversores CC-CC aplicados a microrredes, a técnica de *interleaving* e os conversores com capacitor chaveado.

O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento do conversor proposto. Nesse capítulo são descritas a topologia analisada, as etapas de operação, as principais formas de onda e a análise matemática do conversor em modo de condução contínua,

incluindo a obtenção das expressões fundamentais de funcionamento e do ganho estático.

O Capítulo 4 trata do projeto e dimensionamento do conversor. São apresentados os cálculos preliminares, as especificações adotadas e o dimensionamento dos principais componentes do estágio de potência, incluindo indutores, capacitores e a célula a capacitor chaveado.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos por meio de simulação computacional. São analisadas as formas de onda de tensão e corrente nos principais componentes do conversor, com o objetivo de verificar o comportamento da topologia proposta e validar os parâmetros definidos na etapa de projeto.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho, destacando os principais resultados alcançados, as limitações observadas e possíveis sugestões para trabalhos futuros.

Ressalta-se que este trabalho corresponde à etapa inicial de desenvolvimento da topologia proposta, concentrando-se na análise teórica, no dimensionamento dos elementos armazenadores de energia e na validação por simulação do modo elevador de tensão. A análise completa da operação bidirecional, incluindo estratégias de controle em malha fechada, validação experimental e integração direta com sistemas BESS, é indicada como continuidade natural do estudo.

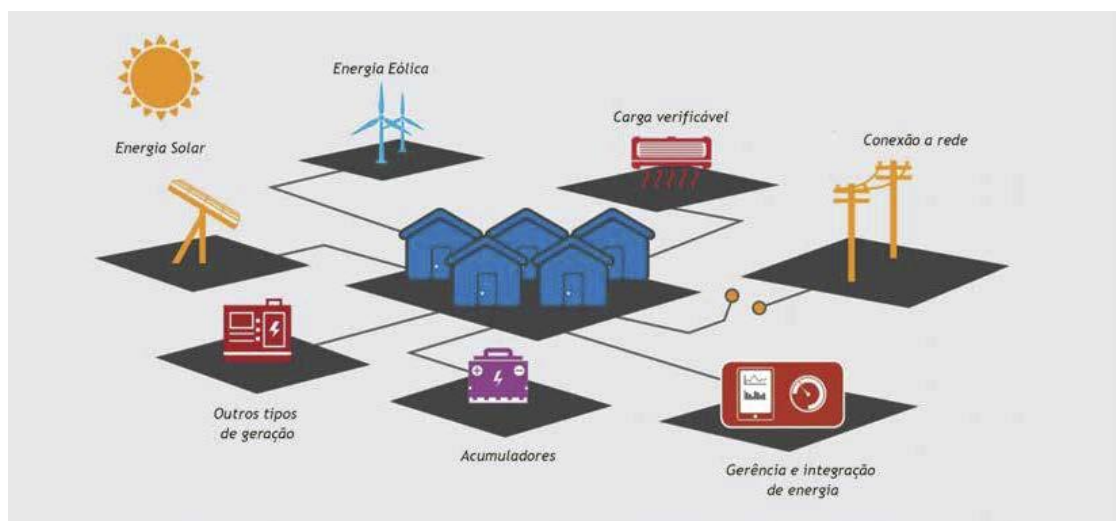
2. Revisão Bibliográfica

2.1. Microrredes Elétricas

As microrredes elétricas podem ser definidas como sistemas de energia de pequena ou média escala capazes de integrar diferentes fontes de geração distribuída, sistemas de armazenamento de energia e cargas elétricas, operando de forma coordenada e controlável. Uma microrrede possui a capacidade de operar tanto conectada ao sistema elétrico de potência convencional quanto de forma isolada (modo ilhado), garantindo maior flexibilidade e eficiência no fornecimento de energia elétrica (LASSETER, 2011; GUERRERO et al., 2011).

Do ponto de vista funcional, uma microrrede pode ser entendida como uma entidade elétrica autônoma, dotada de sistemas de controle e proteção própria, que permite o gerenciamento local do fluxo de potência e da qualidade da energia fornecida. Historicamente, o conceito de microrredes está associado à evolução dos sistemas elétricos descentralizados. Inicialmente, surgiram as chamadas *mini-grids*, amplamente empregadas em regiões remotas ou isoladas, onde a expansão da rede elétrica convencional era economicamente inviável. Essas *mini-grids* eram, em geral, baseadas em geração local e apresentavam limitada capacidade de controle e integração entre fontes (LASSETER, 2011; GUERRERO et al., 2011).

Com o avanço das tecnologias de comunicação, automação e eletrônica de potência, emergiu o conceito de *smart grids*, caracterizado pela digitalização da rede elétrica, pela bidirecionalidade do fluxo de energia e informação e pela maior participação do consumidor como agente ativo do sistema. Nesse contexto, as microrredes (Figura 1) passaram a ser vistas como blocos fundamentais das *smart grids*, permitindo a operação descentralizada, a integração de fontes renováveis e o aumento da confiabilidade do sistema elétrico como um todo.

Figura 1: Microrredes

Fonte: O Setor Elétrico (2022).

As microrredes podem ser classificadas, quanto à sua natureza elétrica, em microrredes em corrente alternada (CA), microrredes em corrente contínua (CC) e microrredes híbridas CA/CC.

As microrredes CA seguem a estrutura tradicional dos sistemas elétricos, sendo compatíveis com a maior parte das cargas convencionais e com a rede de distribuição existente. No entanto, a crescente inserção de fontes renováveis e sistemas de armazenamento, que são inerentemente em corrente contínua, tem evidenciado limitações associadas ao elevado número de estágios de conversão. As microrredes CC, por sua vez, utilizam um barramento em corrente contínua como elemento central de interconexão, permitindo a conexão direta de fontes fotovoltaicas, baterias, supercapacitores e cargas eletrônicas, como sistemas de iluminação LED, data centers e veículos elétricos.

Já as microrredes híbridas CA/CC combinam barramentos em corrente alternada e contínua, buscando explorar as vantagens de ambos os paradigmas, ao custo de maior complexidade de controle e proteção (ELSAYED; MOHAMED; MOHAMMED, 2015).

Quanto aos modos de operação, as microrredes podem operar conectadas à rede principal, compartilhando potência ativa e reativa conforme estratégias de controle previamente definidas, ou em modo ilhado, no qual a microrrede assume integralmente a responsabilidade pelo suprimento de suas cargas. O modo ilhado é particularmente relevante em situações de falhas na rede principal, permitindo a

continuidade do fornecimento de energia a cargas críticas (GUERRERO et al., 2011; DRAGIČEVIĆ et al., 2016).

Para que essa transição ocorra de forma estável e segura, são necessários sistemas de controle rápidos e robustos, capazes de regular tensão, frequência (no caso CA) ou tensão do barramento (no caso CC), além do fluxo de potência entre fontes e armazenamento.

As microrredes em corrente contínua apresentam vantagens significativas quando comparadas às suas contrapartes em corrente alternada. Entre os principais benefícios destaca-se a redução do número de estágios de conversão de energia, uma vez que muitas fontes renováveis e sistemas de armazenamento operam naturalmente em CC. Essa redução implica menores perdas energéticas, maior eficiência global do sistema e menor complexidade estrutural.

Além disso, as microrredes CC eliminam problemas associados à sincronização de frequência e ao controle de potência reativa, simplificando as estratégias de controle. A integração direta de sistemas fotovoltaicos, bancos de baterias e cargas em corrente contínua torna as microrredes CC particularmente atrativas para aplicações modernas, nas quais a eficiência energética e a flexibilidade operacional são requisitos fundamentais.

2.2. Fontes Renováveis em Microrredes

A crescente inserção de fontes renováveis de energia em sistemas elétricos de pequena e média escala tem impulsionado o desenvolvimento de microrredes, especialmente aquelas baseadas em corrente contínua.

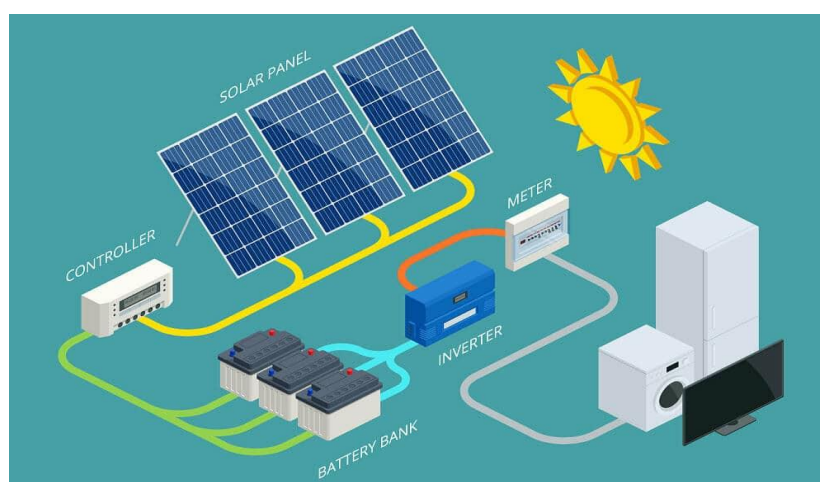
Nessas estruturas, fontes como a energia solar fotovoltaica e a energia eólica assumem papel central, uma vez que possibilitam a geração distribuída próxima às cargas, reduzindo perdas em transmissão e aumentando a confiabilidade do suprimento energético. Contudo, as características intrínsecas dessas fontes impõem desafios significativos ao controle e à estabilidade operacional das microrredes.

A energia solar fotovoltaica destaca-se como a principal fonte renovável em microrredes CC, sobretudo devido à natureza intrinsecamente contínua da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos (Figura 2). A conversão direta da radiação solar em eletricidade ocorre por meio do efeito fotovoltaico, resultando em uma tensão CC

cujo valor depende das condições de irradiância e temperatura (VILLALVA; GAZOLI; RUPPERT FILHO, 2009).

Essa dependência torna necessária a utilização de conversores de potência para adequação dos níveis de tensão ao barramento CC da microrrede, bem como para a implementação de técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência (Maximum Power Point Tracking – MPPT), visando maximizar o aproveitamento energético do sistema fotovoltaico (ERICKSON; MAKSIMOVIĆ, 2001; VILLALVA; GAZOLI; RUPPERT FILHO, 2009).

Figura 2: Sistema fotovoltaico.



Fonte: Deye (2023).

A energia eólica, por sua vez, também pode ser integrada a microrredes, ainda que com maior complexidade quando comparada à geração fotovoltaica. Aerogeradores de pequeno porte geralmente utilizam máquinas elétricas de velocidade variável, como geradores síncronos de ímãs permanentes, cuja saída elétrica apresenta frequência e amplitude variáveis.

Dessa forma, a energia gerada requer estágios de retificação e conversão CC-CC para integração eficiente ao barramento CC da microrrede. Apesar dessas etapas adicionais, a energia eólica contribui para a diversificação das fontes e para a redução da dependência exclusiva da geração solar, aumentando a robustez do sistema (LASSETER, 2011).

2.3. Sistema de Armazenamento de Energia (BESS)

Um aspecto comum às fontes renováveis é a intermitência e a variabilidade da potência gerada. A produção fotovoltaica é diretamente afetada por variações rápidas de irradiância, como sombreamento parcial e passagem de nuvens, enquanto a geração eólica depende de regimes de vento naturalmente irregulares. Essas flutuações provocam variações instantâneas de potência que, se não forem adequadamente compensadas, podem resultar em instabilidades no barramento CC, degradação da qualidade da energia e até mesmo interrupções no fornecimento às cargas críticas da microrrede (GUERRERO et al., 2011).

Os Sistemas de Armazenamento de Energia com Baterias (Battery Energy Storage Systems – BESS) possuem papel fundamental na operação e no desempenho. Esses sistemas são responsáveis por desacoplar temporalmente a geração e o consumo de energia, permitindo maior flexibilidade operacional, aumento da confiabilidade e melhoria da qualidade da energia fornecida.

Em microrredes com elevada penetração de fontes renováveis, o BESS atua como elemento regulador do balanço de potência, compensando variações rápidas de geração e carga. Dessa forma, o armazenamento torna-se um componente essencial para mitigar os efeitos da intermitência e da variabilidade dessas fontes renováveis, contribuindo para a estabilidade do barramento CC e para a operação segura tanto em modo conectado à rede quanto em modo ilhado.

2.3.1. Tipos de Sistemas de Armazenamento

Diversas tecnologias de baterias, como mostrado na Tabela 1, podem ser empregadas para armazenamento de energia em microrredes. Entretanto, no contexto de microrredes CC e aplicações estacionárias de médio porte, as baterias de íons de lítio destacam-se como a solução mais amplamente adotada.

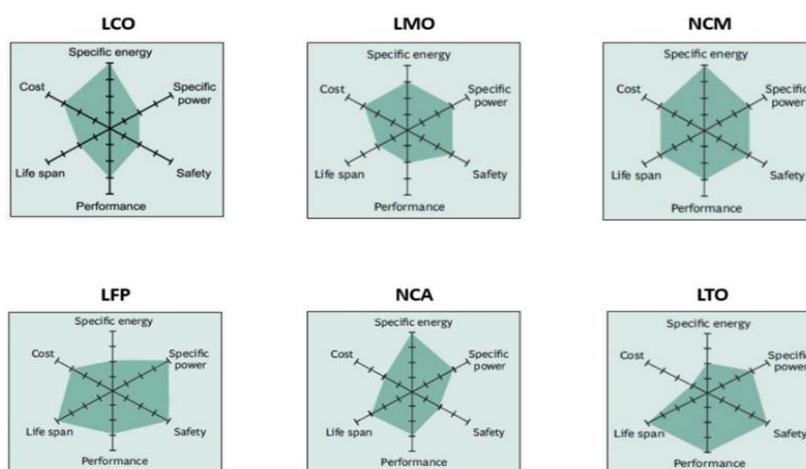
Tabela 1: Comparação entre diferentes tipos de baterias

Especificação	Pb-ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Li-íon
Ciclos de vida	200~300	1000	300~500	500~2000
Resistência interna	Muito Baixa	Muito Baixa	Baixa	Varia com a química
Tensão Nominal (V)	2	1,2	1,2	3,2~3,7
Faixa de temperatura (°C)	-20~50	-20~65	-20~65	-20~60
Toxicidade	Muito Alta	Muito Alta	Baixa	Baixa
Custo	Baixo	Moderado	Moderado	Alto

Fonte: Battery University (2021).

As baterias de íons de lítio apresentam elevada densidade de energia, alta eficiência de carga e descarga, ausência de efeito memória e maior vida útil quando comparadas a tecnologias tradicionais, como chumbo-ácido.

Além disso, sua elevada densidade de potência permite resposta dinâmica rápida, característica essencial para aplicações que exigem controle ativo de potência em microrredes. Na Figura 3, é apresentada a comparação entre diferentes químicas de baterias. Essas propriedades tornam as baterias de íons de lítio especialmente adequadas para integração com conversores CC-CC bidirecionais em barramentos CC de média tensão (LINDEN; REDDY, 2011; HANNAN et al., 2017).

Figura 3: Comparação entre diferentes químicas de baterias de íons de lítio.

Fonte: Adaptado de Battery University (2023).

2.3.2. Requisitos Elétricos para Integração com Conversores CC-CC

Um aspecto crítico na integração de baterias em microrredes CC refere-se à ondulação de corrente (*current ripple*) imposta pelo estágio de conversão eletrônica. Correntes pulsantes de alta amplitude e frequência podem acelerar mecanismos de degradação das baterias, como aquecimento excessivo e envelhecimento prematuro dos eletrodos (ZHANG et al., 2018).

Estudos indicam que a presença de *ripple* significativo na corrente de carga e descarga reduz a vida útil das baterias de íons de lítio, impactando diretamente o custo total de propriedade do sistema de armazenamento. Dessa forma, a redução da ondulação de corrente constitui um requisito essencial no projeto de conversores CC-CC associados a BESS, especialmente em aplicações de operação contínua e longo prazo.

Assim, observa-se que o desempenho global do BESS não depende apenas da tecnologia de armazenamento empregada, mas também, de forma decisiva, da topologia e da estratégia de controle do conversor CC-CC utilizado, reforçando a importância do estudo de conversores bidirecionais de alto desempenho para aplicações em microrredes.

2.4. Conversores CC-CC em Microrredes

Em microrredes CC, esses conversores atuam como elementos de interface elétrica, possibilitando a integração de dispositivos que operam em diferentes níveis de tensão e características dinâmicas, assegurando eficiência energética e confiabilidade do sistema.

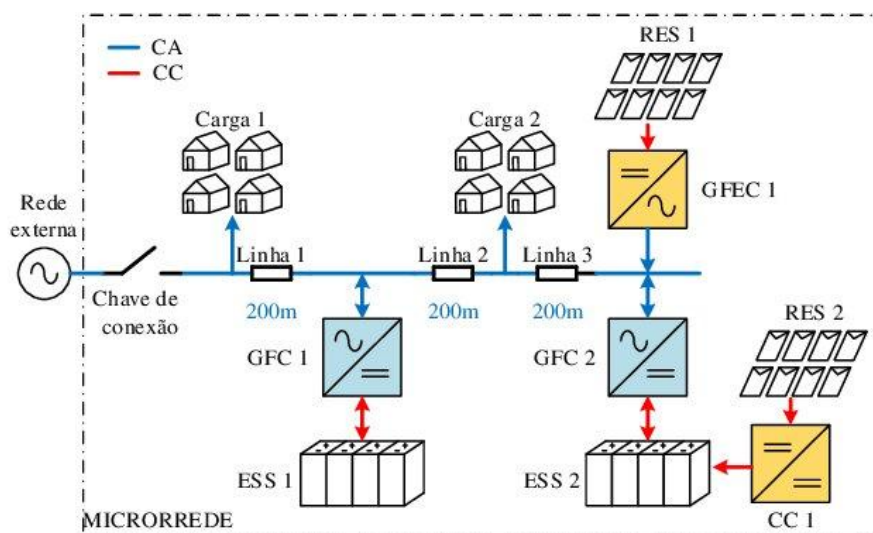
De forma geral, os conversores CC-CC têm como principal função elevar ou reduzir níveis de tensão contínua, além de regular corrente e potência conforme as exigências operacionais da microrrede. Em aplicações modernas, especialmente aquelas associadas a fontes renováveis e sistemas de armazenamento de energia, esses conversores também são responsáveis por implementar estratégias de controle avançadas, como rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), controle de carga e descarga de baterias e estabilização do barramento CC (MOHAN;

UNDELAND; ROBBINS, 2003). A Figura 4 apresenta um exemplo de configuração de microrrede com múltiplos sistemas de armazenamento e fontes renováveis.

Dessa maneira, tornam-se elementos indispensáveis para o gerenciamento energético e a coordenação entre os diferentes subsistemas da microrrede. Os conversores CC-CC podem ser classificados, de forma geral, em unidirecionais e bidirecionais. Conversores unidirecionais permitem o fluxo de potência em apenas um sentido, sendo adequados para aplicações nas quais não há necessidade de retorno de energia, como a interface entre painéis fotovoltaicos e o barramento CC.

Em contrapartida, conversores bidirecionais possibilitam o fluxo de potência em ambos os sentidos, característica essencial em sistemas de armazenamento de energia, nos quais é necessário tanto carregar quanto descarregar as baterias de acordo com as condições da microrrede. Assim, em microrredes CC modernas, os conversores bidirecionais assumem papel estratégico, especialmente na integração de BESS (ALMEIDA; FONT, 2018).

Figura 4: Configuração de uma microrrede híbrida CA/CC com múltiplos sistemas de armazenamento de energia e fontes renováveis.



Fonte: Caracas et al. (2018).

No contexto de microrredes CC com sistemas de armazenamento baseados em baterias, é comum a presença de bancos de baterias operando em níveis de tensão relativamente baixos, tipicamente entre 48 V e 120 V, enquanto o barramento CC da microrrede pode operar em níveis superiores, usualmente na faixa de 380 V a 800 V (DRAGIČEVIĆ et al., 2016; RODRÍGUEZ-DÍAZ et al., 2015).

Essa diferença significativa de tensão justifica o uso de conversores do tipo *Boost*, capazes de elevar a tensão do banco de baterias ao nível do barramento CC durante o modo de descarga, bem como operar de forma inversa no modo de carga quando implementados em topologias bidirecionais.

Os conversores *Boost* são amplamente empregados nessas aplicações devido à sua simplicidade estrutural, elevado ganho de tensão e facilidade de controle. Entretanto, quando utilizados em microrredes CC, especialmente em associação com BESS, esses conversores devem atender aos requisitos comentados acima.

Dessa forma, o projeto de conversores CC-CC para microrredes não se limita apenas à adequação do nível de tensão, mas envolve também a otimização de parâmetros elétricos e térmicos, visando maior eficiência, confiabilidade e integração harmoniosa com o sistema de armazenamento de energia.

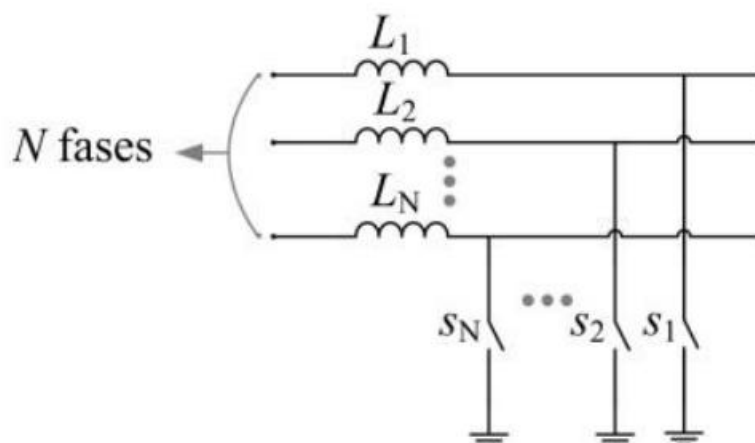
2.5. Técnica de *Interleaving* em Conversores CC-CC

A técnica de *interleaving* aplicada a conversores CC-CC consiste na associação intercalada de múltiplas fases de conversão, conectadas eletricamente em paralelo, conforme mostrado na Figura 5, operando com defasagem angular controlada entre seus sinais de comutação.

Essa abordagem tem como objetivo principal a melhoria do desempenho elétrico do conversor, especialmente no que se refere à redução da ondulação de corrente (*current ripple*), à distribuição de esforços elétricos e térmicos entre os semicondutores e à elevação da eficiência global do sistema (FUZATO, 2015; ZHANG et al., 2018).

Em aplicações envolvendo microrredes em corrente contínua e sistemas de armazenamento de energia baseados em baterias, tais características tornam-se particularmente relevantes.

Figura 5: Estrutura genérica de conversor *Boost* interleaved multifásico com N fases.



Fonte: Fuzato (2015).

Em um conversor *interleaved* com N fases idênticas, os sinais de comando dos interruptores são defasados tipicamente de $360^\circ/N$. Como consequência, no modo elevador analisado, as correntes individuais de cada fase se somam no ponto comum do lado de baixa tensão, resultando em uma corrente total com menor ondulação em comparação a um conversor monofásico equivalente.

Estudos clássicos demonstram que, para determinadas razões cíclicas, a ondulação de corrente pode ser reduzida aproximadamente por um fator proporcional ao número de fases, desde que haja simetria entre os componentes e sincronismo adequado entre os sinais de comutação.

No contexto de microrredes CC, a redução do *ripple* de corrente assume papel central, sobretudo quando o conversor está diretamente acoplado a um banco de baterias de íons de lítio. Assim, a técnica de *Interleaving* contribui diretamente para a confiabilidade e longevidade do sistema de armazenamento, ao promover um perfil de corrente mais suave e próximo do ideal contínuo.

Outro benefício relevante do *Interleaving* é a possibilidade de redução do valor dos indutores de cada fase. Como a ondulação de corrente por fase é menor do que a corrente total do conversor, os indutores podem ser projetados com menores valores de indutância e dimensões físicas reduzidas, resultando em maior densidade de potência.

Além disso, a divisão da corrente total entre múltiplos caminhos reduz o estresse elétrico e térmico sobre os dispositivos semicondutores, favorecendo a operação em níveis mais baixos de temperatura de junção e aumentando a confiabilidade do sistema (FUZATO, 2015).

Apesar de suas vantagens, a técnica de *Interleaving* impõe desafios adicionais ao projeto do conversor. A necessidade de sincronização precisa entre as fases exige estratégias de controle mais elaboradas e maior complexidade no sistema de acionamento. Desequilíbrios entre componentes, como variações nos valores de indutância ou resistência parasita, podem levar à má distribuição de corrente entre as fases, comprometendo parte dos benefícios esperados. Dessa forma, o projeto cuidadoso do controle de corrente e a seleção adequada dos componentes tornam-se essenciais.

Em síntese, a técnica de *Interleaving* destaca-se como um elemento central no desenvolvimento de conversores CC-CC bidirecionais para microrredes CC, especialmente quando integrados a sistemas de armazenamento de energia. Sua capacidade de reduzir o *ripple* de corrente, aumentar a eficiência, diminuir o volume dos componentes passivos e mitigar o estresse térmico justifica amplamente sua adoção em aplicações modernas de eletrônica de potência voltadas à transição energética.

2.6. Conversores com Capacitor Chaveado

O estudo de conversores a capacitor chaveado tem sido amplamente abordado na literatura, tanto em análises fundamentais e modelagem equivalente quanto em topologias híbridas de alto ganho aplicadas à eletrônica de potência (BARBI, 2019; DALLA VECCHIA, 2016; SEBAJE, 2023).

O princípio de funcionamento dos conversores com capacitor chaveado baseia-se na alternância periódica da conexão dos capacitores entre diferentes nós do circuito, permitindo que estes sejam carregados e descarregados em sequências específicas. Durante cada estado de comutação, os capacitores armazenam energia elétrica e, em seguida, a transferem para a carga ou para outros capacitores, resultando em uma tensão de saída que corresponde a uma fração ou múltiplo da

tensão de entrada, dependendo da topologia empregada (SEEMAN; SANDERS, 2008).

Uma das principais características desses conversores é a utilização de células de multiplicação de tensão, formadas por arranjos modulares de capacitores e chaves semicondutoras. Tais células podem ser conectadas em série ou em paralelo, possibilitando ganhos de tensão fixos ou reconfiguráveis. Essa modularidade permite alcançar elevados níveis de tensão a partir de fontes de baixa tensão, o que é particularmente relevante em microrredes CC com barramentos operando na faixa de níveis superiores de tensão, tipicamente entre 380 V e 800 V, alimentados por sistemas fotovoltaicos ou bancos de baterias (DONG et al., 2015).

Entre as principais vantagens dos conversores com capacitor chaveado destacam-se o elevado ganho de tensão, a ausência de componentes magnéticos volumosos e a possibilidade de integração em circuitos compactos. A eliminação de indutores contribui para a redução de peso, volume e interferência eletromagnética, além de facilitar a implementação em arquiteturas modulares e distribuídas, características desejáveis em microrredes CC modernas (FANG et al., 2012).

Por outro lado, esses conversores apresentam limitações importantes que devem ser consideradas em aplicações de maior potência. As perdas por condução e comutação tendem a ser mais elevadas devido ao grande número de chaves e capacitores envolvidos, bem como às correntes de carga e descarga pulsantes nos capacitores.

Além disso, o controle desses conversores pode se tornar complexo, especialmente em topologias com múltiplas células e operação bidirecional, exigindo estratégias avançadas de modulação e balanceamento de tensão entre os capacitores (SEEMAN; SANDERS, 2008).

No contexto de microrredes CC, os conversores com capacitor chaveado têm sido investigados como alternativas ou complementos aos conversores CC-CC indutivos tradicionais, sobretudo em aplicações que demandam alto ganho de tensão e elevada densidade de potência. Sua utilização pode ser observada em estágios de interface entre fontes renováveis de baixa tensão e barramentos CC de maior nível, bem como em arquiteturas híbridas que combinam técnicas de capacitor chaveado e indutivas, visando reduzir esforços nos componentes passivos e melhorar a eficiência global do sistema (DAS; MAKSIMOVIĆ, 2016; SEBAJE, 2023).

Assim, embora os conversores com capacitor chaveado apresentem desafios relacionados a perdas e complexidade de controle, seu potencial para aplicações em microrredes CC é significativo, especialmente quando integrados a sistemas de armazenamento de energia e associados a técnicas como *Interleaving* ou topologias híbridas, contribuindo para a evolução de conversores mais compactos, eficientes e adequados às exigências das microrredes modernas.

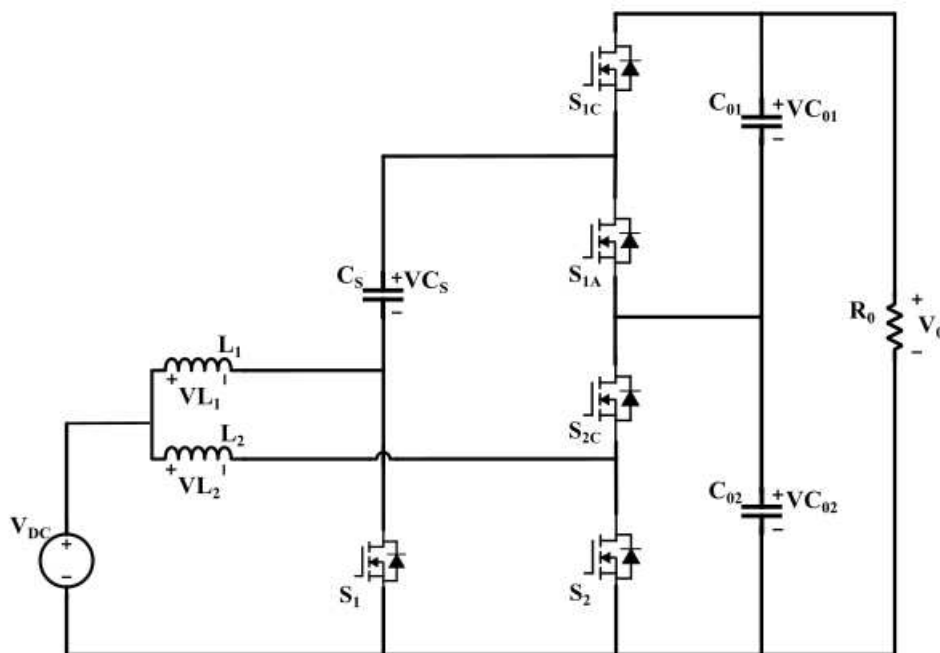
3. Desenvolvimento

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento teórico do conversor CC-CC bidirecional *Boost interleaved* a capacitor chaveado proposto neste trabalho. Inicialmente, descreve-se a topologia do conversor, destacando a função das duas fases *interleaved* na entrada e da célula a capacitor chaveado na etapa de saída. Em seguida, são analisadas as etapas de operação do circuito em modo de condução contínua, evidenciando os caminhos de corrente, os estados de condução dos interruptores e o processo de carga e descarga dos elementos armazenadores de energia.

Também são apresentadas as principais formas de onda de tensão e corrente, permitindo compreender o comportamento do conversor ao longo de um período de comutação. Por fim, desenvolve-se a análise matemática das etapas de operação, com o objetivo de obter as expressões fundamentais que descrevem o funcionamento da topologia e possibilitam a determinação do ganho estático do conversor.

3.1. Etapas de Operação

Figura 6: Topologia do conversor.



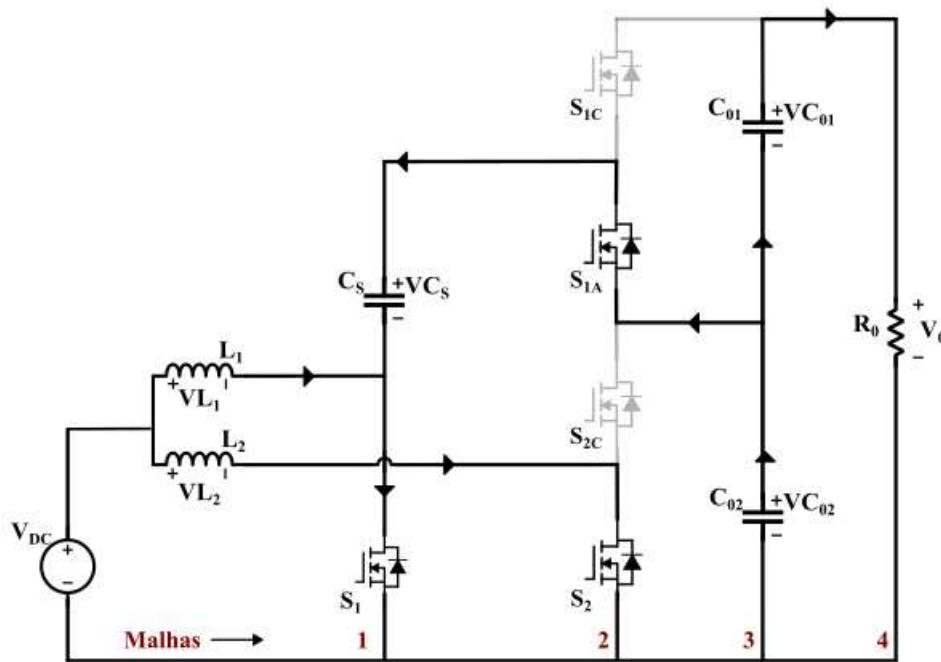
Fonte: Autoria própria (2026)

O conversor *Boost* CC-CC convencional, quando opera em CCM, possui duas etapas principais de operação. Entretanto, com a associação *interleaved*, responsável pela divisão dos esforços de corrente entre as fases, e com a célula a capacitor chaveado, utilizada para elevar o ganho estático, o conversor proposto passa a apresentar quatro etapas de operação ao longo de um período de comutação. Para iniciar a análise, como mostrado na Figura 7 foram indicadas as polaridades das tensões e os sentidos das correntes dos componentes do modelo.

Primeira e terceira etapas de operação

A Figura 7 apresenta a primeira e a terceira etapa de operação do conversor. Nessa condição, os interruptores S_1 , S_{1A} e S_2 encontram-se em condução, enquanto S_{1c} e S_{2c} permanecem bloqueados.

Figura 7: Topologia do conversor para a primeira e terceira etapa.



Fonte: Autoria própria (2026)

Nas malhas “1 e 2”, a fonte V_{in} transfere energia para os indutores L_1 e L_2 respectivamente. Nesse intervalo, ambos os indutores são magnetizados, apresentando derivadas de corrente positivas, caracterizando o armazenamento de energia.

A malha “3” é formada pelo capacitor chaveado C_s , o qual é carregado a partir do capacitor de saída C_{02} . Nessa configuração, C_s e C_{02} encontram-se em paralelo, resultando na equalização das tensões nos capacitores.

Na malha “4” a carga é mantida pelos dois capacitores C_{01} e C_{02} , resultando na duplicação da tensão na saída do conversor.

Agora partindo para uma análise matemática a primeira e a terceira etapa de operação são determinadas no intervalo Δt_1 na expressão 1. Definido pela razão cíclica D e período de comutação T_s .

$$\Delta t_1 = \Delta t_3 = \frac{T_s}{2}(2D - 1) \quad (1)$$

As relações que determinam as tensões começam com análise do circuito da Figura 7, verificando o barramento de saída.

$$-V_0 + V_{C01} + V_{C02} = 0 \quad (2)$$

$$V_{C01} + V_{C02} = V_0 \quad (3)$$

A fim de demonstrar a teoria do circuito dobrador de tensão no barramento de saída do conversor, se desconsidera as perdas e se obtém a equação 4.

$$V_{C01} = V_{C02} \quad (4)$$

Logo, a tensão de saída é igual a duas vezes a tensão em cada capacitor.

$$V_0 = 2 \cdot V_{C01,2} \quad (5)$$

Em ambos os indutores pode-se verificar que na primeira etapa a tensão sobre L_1 e L_2 é igual a tensão da fonte de entrada V_{in} e devido ao paralelismo do capacitor chaveado C_s com o capacitor no barramento de saída C_{02} as tensões se equalizam, conforme mostrado na Figura 7. E considerando as análises realizadas nas equações anteriores chega-se às equações 6 e 7.

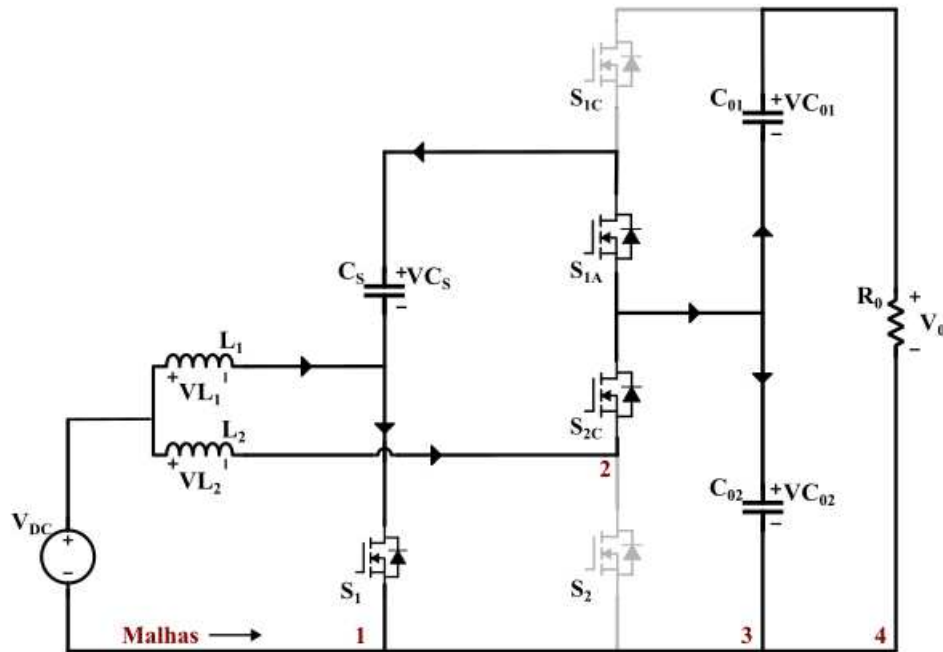
$$V_{L1} = V_{L2} = V_{in} \quad (6)$$

$$V_{Cs} = V_{C02} = \frac{V_0}{2} \quad (7)$$

Segunda etapa de operação

A segunda etapa de operação está representada na Figura 8. Os interruptores S_1 , S_{1A} e S_{2c} entram em condução enquanto S_{1c} e S_2 estão bloqueados. Na malha “1” a fonte V_{in} transfere energia para o indutor L_1 .

Figura 8: Topologia do conversor para a segunda etapa.



Fonte: Autoria própria (2026)

Nas malhas “2 e 3” a fonte V_{in} juntamente com a energia armazenada no indutor L_2 é transferida para o capacitor chaveado C_s e para o capacitor no barramento de saída C_{02} respectivamente possibilitando que os dois capacitores fiquem em paralelo, enquanto o indutor se desmagnetiza, apresentando derivada de corrente negativa.

Na malha “4” a carga é mantida pelos dois capacitores C_{01} e C_{02} , resultando na duplicação da tensão na saída do conversor.

A segunda etapa de operação é determinada no intervalo Δt_2 na expressão 8. Definido pela razão cíclica D e período de comutação T_s .

$$\Delta t_2 = T_s(1 - D) \quad (8)$$

Vale ressaltar que a equação 5 encontrada da análise da relação dos capacitores C_{01} e C_{02} do barramento de saída com a tensão nos terminais de saída realizados na primeira e terceira etapa é válida para todos os estados do conversor.

Verifica-se que na segunda etapa a tensão sobre L_1 é igual a tensão da fonte de entrada V_{in} , devido ao paralelismo do capacitor chaveado C_s com o capacitor no barramento de saída C_{02} . As tensões se equalizam conforme analisado na Figura 8 e observa-se que a tensão no indutor L_2 é uma relação entre a tensão de entrada V_{in} e a tensão no capacitor de saída C_{02} . E considerando as análises realizadas nas equações anteriores, chega-se às equações 10 e 11.

$$V_{L1} = V_{in} \quad (9)$$

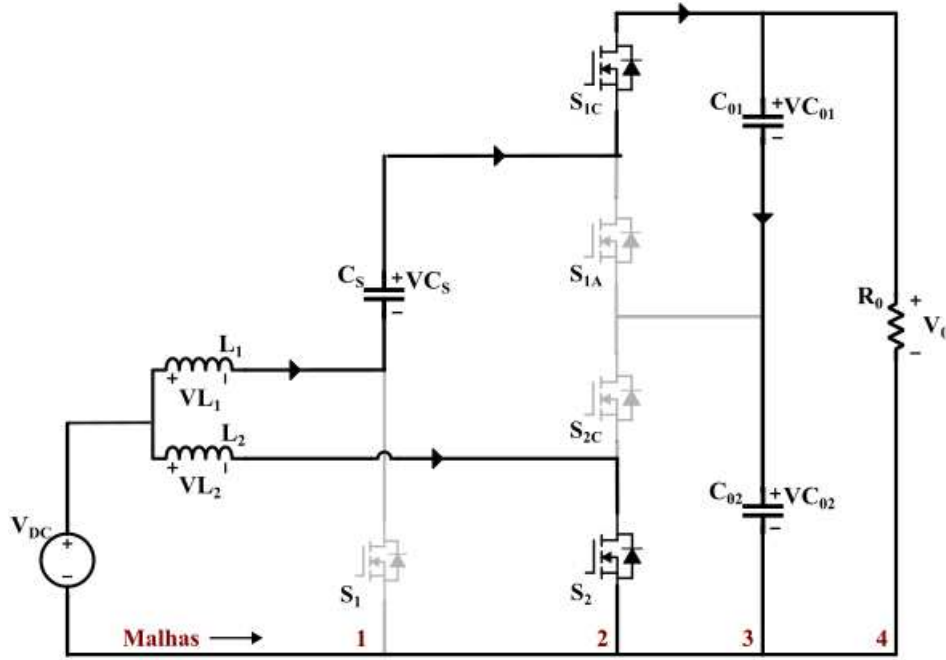
$$V_{Cs} = V_{C02} = \frac{V_0}{2} \quad (10)$$

$$V_{L2} = V_{in} - \frac{V_0}{2} \quad (11)$$

Quarta etapa de operação

A Figura 9 apresenta a quarta etapa de operação do conversor. Nessa condição, os interruptores S_{1c} e S_2 encontram-se em condução, enquanto S_1 , S_{1A} e S_{2c} permanecem bloqueados.

Figura 9: Topologia do conversor para a quarta etapa.



Fonte: Autoria própria (2026)

Na malha “3” a fonte V_{in} , juntamente com a energia armazenada no indutor L_1 e o capacitor chaveado C_s fornecem energia para os capacitores do barramento de saída C_{01} e C_{02} . Na malha “4” a carga é mantida pelos dois capacitores C_{01} e C_{02} , resultando na duplicação da tensão na saída do conversor.

A quarta etapa de operação possui duração equivalente à segunda etapa, sendo determinada pelo intervalo $\Delta t_4 = \Delta t_2$ na equação 12. Definido pela razão cíclica D e período de comutação T_s .

$$\Delta t_4 = \Delta t_2 = T_s(1 - D) \quad (12)$$

Verifica-se que na quarta etapa a tensão sobre L_2 é igual a tensão da fonte de entrada V_{in} conforme analisado na Figura 9 e observa-se que a tensão no indutor L_1 é uma relação entre a tensão de entrada V_{in} e a tensão no capacitor de saída C_{02} . E considerando as análises realizadas nas equações anteriores chega-se à equação 14.

$$V_{L2} = V_{in} \quad (13)$$

$$V_{L1} = V_{in} - \frac{V_0}{2} \quad (14)$$

Na Tabela 2 apresenta-se de forma completa as grandezas de tensão sobre todos os componentes do conversor em estudo.

Tabela 2: Tensão sobre os componentes do conversor proposto.

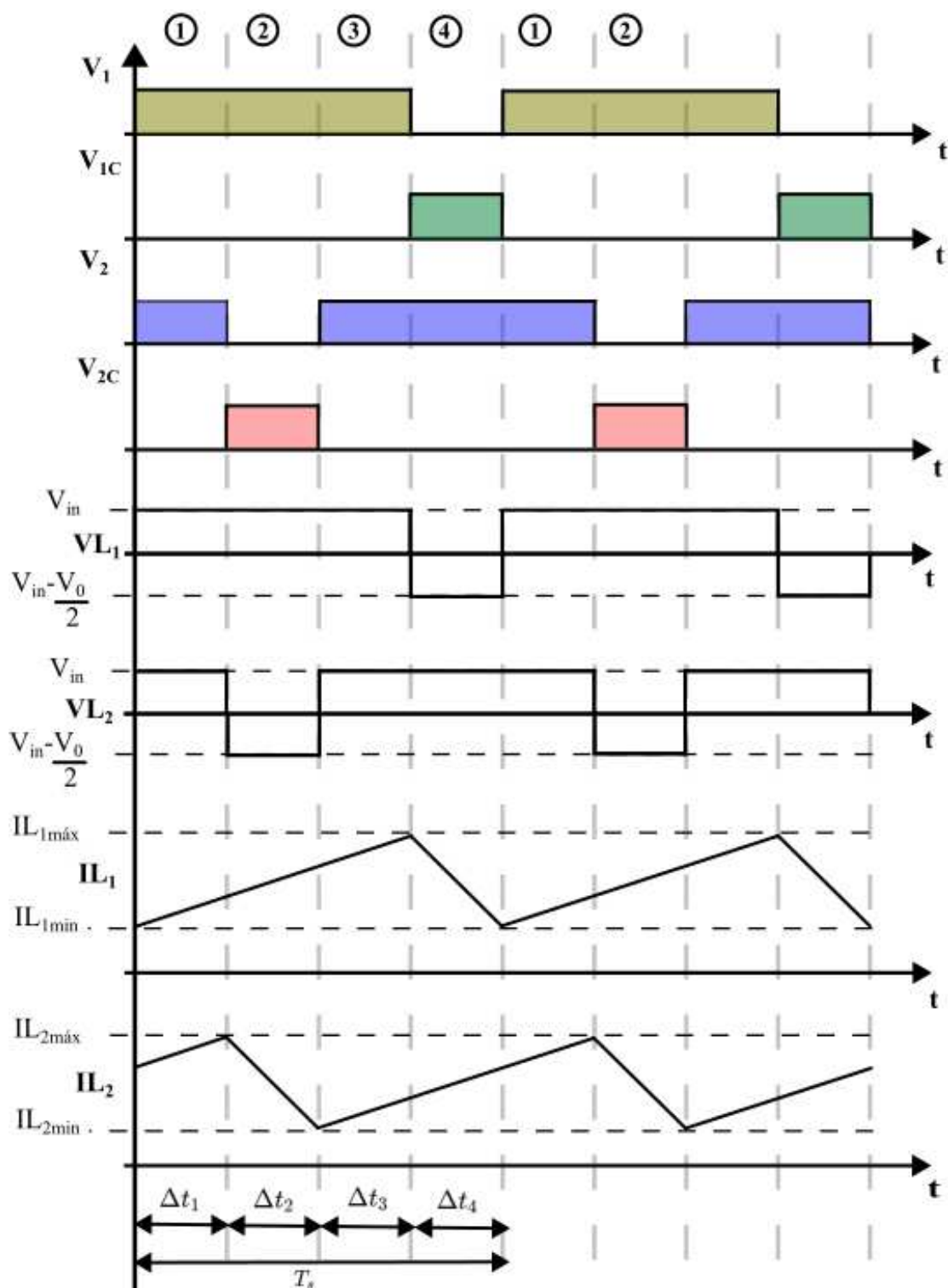
Grandezas (Volts)	1ª Etapa Δt_1	2ª Etapa Δt_2	3ª Etapa Δt_3	4ª Etapa Δt_4
V_{L1}	$V_{in} > 0$	$V_{in} > 0$	$V_{in} > 0$	$V_{in} - \frac{V_0}{2} < 0$
V_{L2}	$V_{in} > 0$	$V_{in} - \frac{V_0}{2} < 0$	$V_{in} > 0$	$V_{in} > 0$
V_{SC1A}	0	0	0	$\frac{V_0}{2} > 0$
V_{SC1}	0	0	0	$\frac{V_0}{2} > 0$
V_{SC1C}	$\frac{V_0}{2} > 0$	$\frac{V_0}{2} > 0$	$\frac{V_0}{2} > 0$	0
V_{SC2}	0	$\frac{V_0}{2} > 0$	0	0
V_{SC2C}	$\frac{V_0}{2} > 0$	0	$\frac{V_0}{2} > 0$	$\frac{V_0}{2} > 0$
V_{CS}	$\frac{V_0}{2} > 0$	$\frac{V_0}{2} > 0$	$\frac{V_0}{2} > 0$	$\frac{V_0}{2} > 0$
V_{C01}	$\frac{V_0}{2} > 0$	$\frac{V_0}{2} > 0$	$\frac{V_0}{2} > 0$	$\frac{V_0}{2} > 0$
V_{C02}	$\frac{V_0}{2} > 0$	$\frac{V_0}{2} > 0$	$\frac{V_0}{2} > 0$	$\frac{V_0}{2} > 0$

Fonte: Autoria própria (2026)

3.2. Formas de onda do conversor proposto

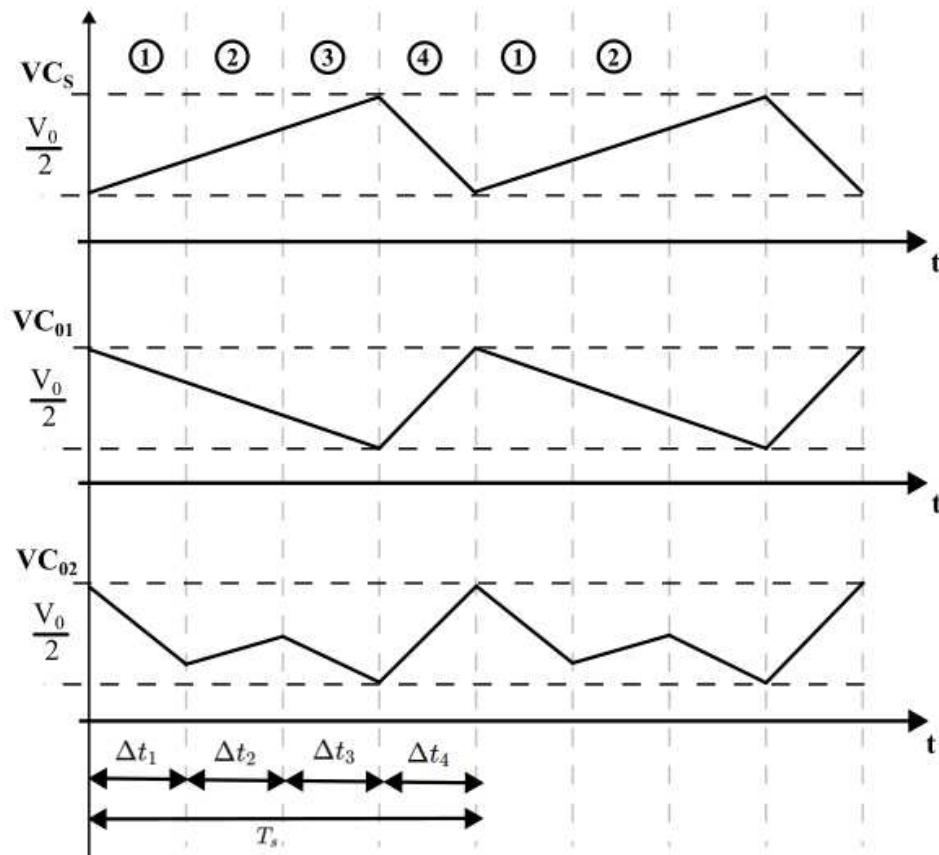
A seguir, nas Figuras 10 e 11, são apresentadas as formas de onda do conversor referentes aos sinais de comando, bem como às correntes e tensões nos indutores L_1 , L_2 e nos capacitores C_s , C_{01} e C_{02} .

Figura 10: Formas de onda do conversor proposto.



Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 11: Formas de onda do conversor proposto.



Fonte: Autoria própria (2026)

3.2.1. Ganho Estático

Aplicando-se o balanço volt-segundo no indutor $L1$ para as etapas de operação analisadas, desprezando-se as perdas e, observando-se que em regime permanente o valor médio da tensão sobre o indutor é zero, encontra-se a equação 15.

$$G = \frac{V_0}{V_{in}} = \frac{2}{(1 - D)} \quad (15)$$

Para expressão da razão cíclica isola-se D na equação 15 e obtém-se 16.

$$D = \frac{V_0 - 2 \cdot V_{in}}{V_0} \quad (16)$$

4. Projeto e dimensionamento

Neste capítulo são apresentados o projeto e o dimensionamento do conversor proposto, empregando a técnica de *interleaving* no lado de baixa tensão e a célula a capacitor chaveado no lado de alta tensão. O desenvolvimento contempla o equacionamento, os critérios de projeto e o dimensionamento elétrico dos principais componentes.

A utilização da técnica de *interleaving* no lado de baixa tensão tem como principal objetivo reduzir a ondulação de corrente (*current ripple*) vista pelo banco de baterias e distribuir o esforço elétrico entre as fases do conversor.

Além disso, essa configuração possibilita menor solicitação sobre os componentes magnéticos, contribuindo para redução de perdas e aumento da eficiência energética. No lado de alta tensão, a aplicação da estrutura de capacitor chaveado permite elevar o ganho estático do conversor sem a necessidade de razões cíclicas extremas ou transformadores de alta frequência. Neste trabalho, a relação de conversão adotada é igual a 6, considerando a elevação de 60 V para 360 V. Em um conversor *Boost* convencional, essa condição exigiria uma razão cíclica elevada; por isso, a associação com a célula a capacitor chaveado torna-se interessante para reduzir a dependência exclusiva da razão cíclica e manter níveis reduzidos de esforço de tensão nos dispositivos semicondutores.

A Tabela 3 mostra as especificações do projeto utilizadas para o dimensionamento do conversor.

Tabela 3: Especificações de projeto.

ESPECIFICAÇÕES	VALOR
Tensão de Entrada V_{in}	60 V
Tensão de Saída V_0	360 V
Potência de Saída P_0	2,4 kW
Frequência de Comutação	40 kHz
Ondulação de Corrente nos indutores L_1 e L_2	10%
Ondulação de Tensão nos Capacitores C_{01} e C_{02}	1%
Número de fases interleaved N	2

Fonte: Autoria própria (2026)

4.1. Cálculos preliminares

Para iniciar os cálculos preliminares, encontra-se a corrente de entrada e a de saída.

$$I_{in} = \frac{P_{in}}{V_{in}} = \frac{2400}{60} = 40A \quad (17)$$

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = \frac{2400}{360} = 6,67A \quad (18)$$

Na questão da carga, adota-se uma resistência equivalente de carga, a partir dos valores de tensão e potência. O cálculo da resistência equivalente de carga se observa na equação 19:

$$R_o = \frac{V_o^2}{P_o} = \frac{360^2}{2400} = 54\Omega \quad (19)$$

Ao utilizar os valores da tensão de entrada e saída considerados nas especificações da Tabela 3 e fazendo uso da equação 16, é possível determinar a razão cíclica nominal do conversor.

$$D = \frac{V_o - 2 \cdot V_{in}}{V_o} = 0,67 \quad (20)$$

A ondulação nominal da corrente nos indutores é determinada a partir da ondulação percentual definida em projeto, sendo calculada em função da corrente do lado de baixa tensão dividida pela quantidade de fases empregadas na configuração *interleaved*.

$$\Delta I_L = \Delta I_{L\%} \frac{I_{in}}{N} = 0,1 \frac{40}{2} = 2A \quad (21)$$

Para ondulação nominal de tensão no capacitor de saída segue a mesma lógica.

$$\Delta V_0 = \Delta V_{0\%} \frac{V_0}{N} = 0,01 \frac{360}{2} = 1,8V \quad (22)$$

4.2. Dimensionamento dos elementos armazenadores de energia

Nesta seção são apresentados os procedimentos de dimensionamento dos principais elementos armazenadores de energia do conversor proposto. Inicialmente, são calculados os indutores das fases *interleaved*, considerando a ondulação admissível de corrente definida nas especificações de projeto. Em seguida, são dimensionados os capacitores de saída a partir da ondulação máxima de tensão permitida. Por fim, é realizado o dimensionamento do capacitor chaveado com base na metodologia da resistência equivalente da célula a capacitor chaveado.

4.2.1. Cálculo dos indutores

A partir da ondulação de corrente nos indutores L_1 e L_2 será possível determinar a equação das indutâncias.

$$V_{in} = L_{1,2} \frac{\Delta I_{L1,2}}{\Delta t} \quad (23)$$

Ao considerar o período de comutação completo para os respectivos intervalos de interesse, após as devidas manipulações chega-se à expressão 24 que determinam a ondulação de corrente nos indutores L_1 e L_2 .

$$L_{1,2} = \frac{V_{in} \cdot D \cdot T_s}{\Delta I_{L1,2}} = 502,5\mu H \quad (24)$$

4.2.2. Cálculo do capacitor

O dimensionamento dos capacitores de saída é realizado a partir da ondulação de tensão máxima admissível, definida como critério de projeto. Essa abordagem considera que, durante determinados intervalos de comutação, os capacitores fornecem ou absorvem parte da corrente necessária à carga, ocasionando uma variação de carga elétrica em seus terminais.

A relação entre essa variação de carga e a ondulação de tensão permite determinar a capacitância mínima necessária para manter a tensão de saída dentro dos limites especificados.

$$I_0 = C_{01,2} \frac{\Delta V_{C1,2}}{\Delta_t} \quad (25)$$

Após as devidas manipulações chega-se à expressão 26.

$$C_{01,2} = \frac{I_0 \cdot D \cdot T_s}{\Delta V_{C1,2}} = 62,25 \mu F \quad (26)$$

No conversor CC-CC bidirecional *Boost Interleaved* a Capacitor Chaveado, o capacitor chaveado contribui diretamente para a elevação da tensão de saída, aumentando o ganho estático do conversor sem a necessidade de razões cíclicas extremas. Como consequência, obtém-se aumento do ganho estático e melhor distribuição dos esforços de tensão nos semicondutores, uma vez que parte da tensão de saída é sustentada pelos capacitores da célula chaveada.

Entretanto, o comportamento do capacitor chaveado não depende exclusivamente de sua capacitância. A forma como ocorre a transferência de carga é fortemente influenciada pela frequência de comutação, pela resistência série equivalente dos capacitores e pela resistência de condução dos semicondutores.

Por esse motivo, o projeto do capacitor chaveado é normalmente realizado através da análise da resistência equivalente da célula.

Segundo a teoria dos conversores a capacitor chaveado, a célula pode ser representada por uma resistência equivalente R_{eq} , essa resistência não corresponde a um componente físico do circuito, mas sim a um modelo matemático que representa as perdas associadas ao carregamento e descarregamento do capacitor chaveado.

A resistência equivalente é determinada por:

$$R_{eq} = \frac{1}{f_s C} \frac{1 - e^{\frac{-1}{f_s \tau}}}{\left(e^{\frac{-D}{f_s \tau}} - 1 \right) \left(e^{\frac{-1-D}{f_s \tau}} - 1 \right)} \quad (27)$$

O principal parâmetro utilizado para caracterizar a operação da célula é o produto $f_s \tau$.

O produto representa a relação entre a constante de tempo do circuito de carga e descarga e o período de comutação da célula. Esse parâmetro determina o regime de transferência de carga do capacitor chaveado, podendo operar nas regiões de carga completa, parcial ou quase instantânea. O valor obtido influencia diretamente a resistência equivalente da célula e, conseqüentemente, as perdas associadas ao processo de transferência de energia.

A constante de tempo τ representa a dinâmica de carga e descarga do capacitor chaveado e é determinada pela capacitância do capacitor e pela resistência equivalente presente no caminho de transferência de carga. Fisicamente, τ indica a rapidez com que a tensão no capacitor varia durante cada processo de comutação.

Descarga Completa (CC): Neste modo, o capacitor completa praticamente todo o processo de carga e descarga durante cada período de comutação representado na Figura 12(a). Essa condição produz elevados picos de corrente, aumentando as perdas por condução e reduzindo o rendimento do conversor.

$$f_s \tau < 0,1 \quad (28)$$

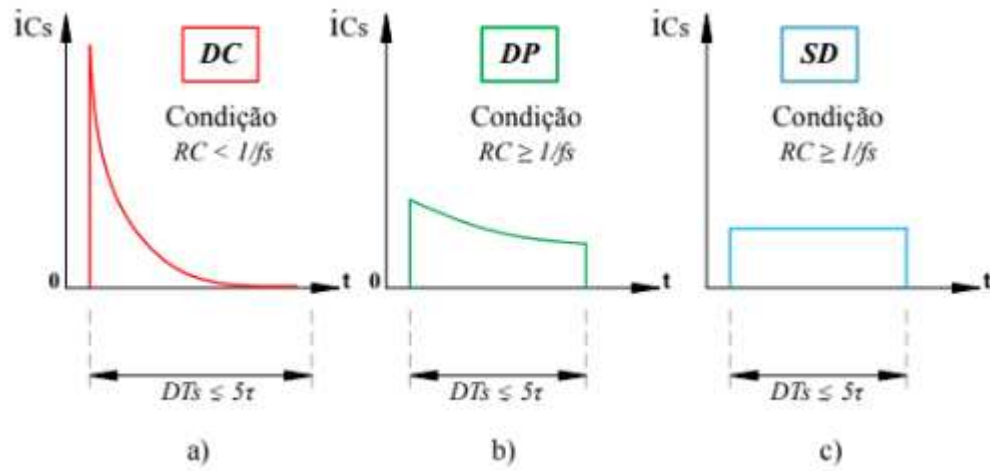
Descarga Parcial (DP): Neste modo, o capacitor não conclui totalmente o processo de carga ou descarga antes da próxima comutação representado na Figura 12(b). Essa região apresenta o melhor compromisso entre volume do capacitor, perdas e eficiência, sendo normalmente adotada em projetos de conversores a capacitor chaveado.

$$0,1 < f_s \tau < 1,44 \quad (29)$$

Sem Descarga (SD): Nesta condição a corrente apresenta pequenas variações ao longo do período de comutação representado na Figura 12(c). Embora apresente resistência equivalente próxima ao valor mínimo, essa região exige valores elevados de capacitância, aumentando o volume e o custo do projeto.

$$f_s \tau > 1,44 \quad (30)$$

Figura 12: Corrente no capacitor chaveado para diferentes modos de operação.



Fonte: Sebaje (2023)

Conforme discutido por Dalla Vecchia (2016), a região de carga parcial apresenta o melhor compromisso entre resistência equivalente, volume dos componentes e frequência de comutação. O autor demonstra que valores de $f_s\tau$ próximos de 0,5 resultam em uma resistência equivalente de aproximadamente 1,08 pu em relação ao valor mínimo teórico na Tabela 4, enquanto aumentos adicionais desse parâmetro proporcionam ganhos marginais de desempenho ao custo de maiores valores de capacitância ou maiores frequências de comutação.

Tabela 4: Intervalos para os modos de operação do capacitor chaveado.

Modo de Operação	Intervalo de Operação	R_{eq} em Relação a Resistência mínima	
DC	$0 < f_s\tau \leq 0,1$	$10,14 < R_{eq} \leq \infty$	$f_s\tau = 0,1 \rightarrow (2,53pu)$
DP	$0,1 < f_s\tau \leq 1,44$	$4,33 < R_{eq} \leq 10,14$	$f_s\tau = 0,5 \rightarrow (1,08pu)$
SD	$1,44 < f_s\tau \leq \infty$	$1 < R_{eq} \leq 4,33$	$f_s\tau = 1,44 \rightarrow (1,01pu)$

Fonte: Sebaje (2023).

Dessa forma, adotou-se para o projeto da célula o valor de $f_s\tau = 0,52$, garantindo operação na região de descarga parcial e próxima da condição considerada ótima, o que proporciona baixa resistência equivalente sem exigir capacitâncias excessivamente elevadas.

Conforme a metodologia empregada por Sebaje (2023), adotou-se o valor de $R = 0,1037\Omega$, permitindo representar o comportamento não ideal da célula durante os processos de carga e descarga do capacitor chaveado. A utilização dessa resistência concentrada possibilita uma estimativa mais realista das perdas de potência e da dinâmica de transferência de carga, contribuindo para a validação do modelo teórico por meio das simulações.

Com os parâmetros de projeto definidos, calcula-se inicialmente a resistência equivalente da célula. Essa resistência representa, de forma concentrada, o efeito das perdas associadas ao processo de carga e descarga do capacitor chaveado.

$$R_{eq} = \frac{R}{f_s \tau} \frac{1 - e^{\frac{-1}{f_s \tau}}}{\left(e^{\frac{-D}{f_s \tau}} - 1\right) \left(e^{\frac{-1-D}{f_s \tau}} - 1\right)} = 0,5003\Omega \quad (31)$$

O valor obtido indica a resistência equivalente efetiva da célula para o ponto de operação escolhido. Como essa resistência está relacionada às perdas dissipativas durante a transferência de carga, busca-se que seu valor seja o mais próximo possível do valor mínimo teórico, sem que isso implique em uma capacitância muito elevada.

Para avaliar essa condição, calcula-se a resistência equivalente normalizada, dada pela razão entre a resistência equivalente calculada e a resistência concentrada adotada no modelo.

$$r_{eq} = \frac{R_{eq}}{R} = 4,8249 \quad (32)$$

Essa normalização permite comparar o comportamento da célula independentemente do valor absoluto da resistência adotada, facilitando a análise do ponto de operação em relação ao limite teórico.

Em seguida, determina-se a resistência equivalente mínima normalizada, que depende apenas da razão cíclica do conversor.

$$r_{eq,min} = \frac{1}{D(1-D)} = 4,5228 \quad (33)$$

Esse valor representa a menor resistência equivalente normalizada que a célula pode atingir para a razão cíclica adotada. Assim, quanto mais próximo r_{eq} estiver de $r_{eq,min}$, mais eficiente é o ponto de operação escolhido em termos de transferência de carga. A proximidade entre esses valores é verificada pela relação:

$$\frac{r_{eq}}{r_{eq,min}} = 1,0668 \quad (34)$$

O resultado mostra que a resistência equivalente da célula é aproximadamente $1,07pu$ da resistência mínima teórica. Isso significa que, para o valor adotado de $f_s\tau = 0,52$, a célula opera apenas cerca de 6,7% acima da condição mínima possível de resistência equivalente. Portanto, o ponto de operação escolhido apresenta bom compromisso entre eficiência e viabilidade física do capacitor, uma vez que valores maiores de $f_s\tau$ reduziram pouco a resistência equivalente, mas exigiram maior capacitância.

Para complementar a análise, calcula-se a resistência equivalente mínima em valor absoluto, considerando a resistência concentrada R .

$$R_{eq,min} = \frac{R}{D(1-D)} = 0,4690\Omega \quad (35)$$

Comparando-se R_{eq} com $R_{eq,min}$, observa-se que a diferença entre os valores é pequena. Esse resultado confirma que a célula foi dimensionada em uma região próxima da resistência mínima, sem deslocar sua operação para a região de sem descarga, que exigiria capacitores de maior valor e maior volume.

Após a verificação do ponto de operação, determina-se a capacitância necessária para o capacitor chaveado. Rearranjando a equação da resistência equivalente, obtém-se:

$$C_s = \frac{1}{f_s R_{eq,min}} \frac{1 - e^{\frac{-1}{f_s\tau}}}{\left(e^{\frac{-D}{f_s\tau}} - 1\right) \left(e^{\frac{-1-D}{f_s\tau}} - 1\right)} = 133,7\mu F \quad (36)$$

Dessa forma, o valor calculado para capacitância atende ao critério de operação na região de descarga parcial, mantendo a resistência equivalente da célula próxima ao valor mínimo teórico.

A Tabela 5 apresenta os valores encontrados dos componentes armazenadores de energia.

Tabela 5: Valores dos componentes armazenadores de energia.

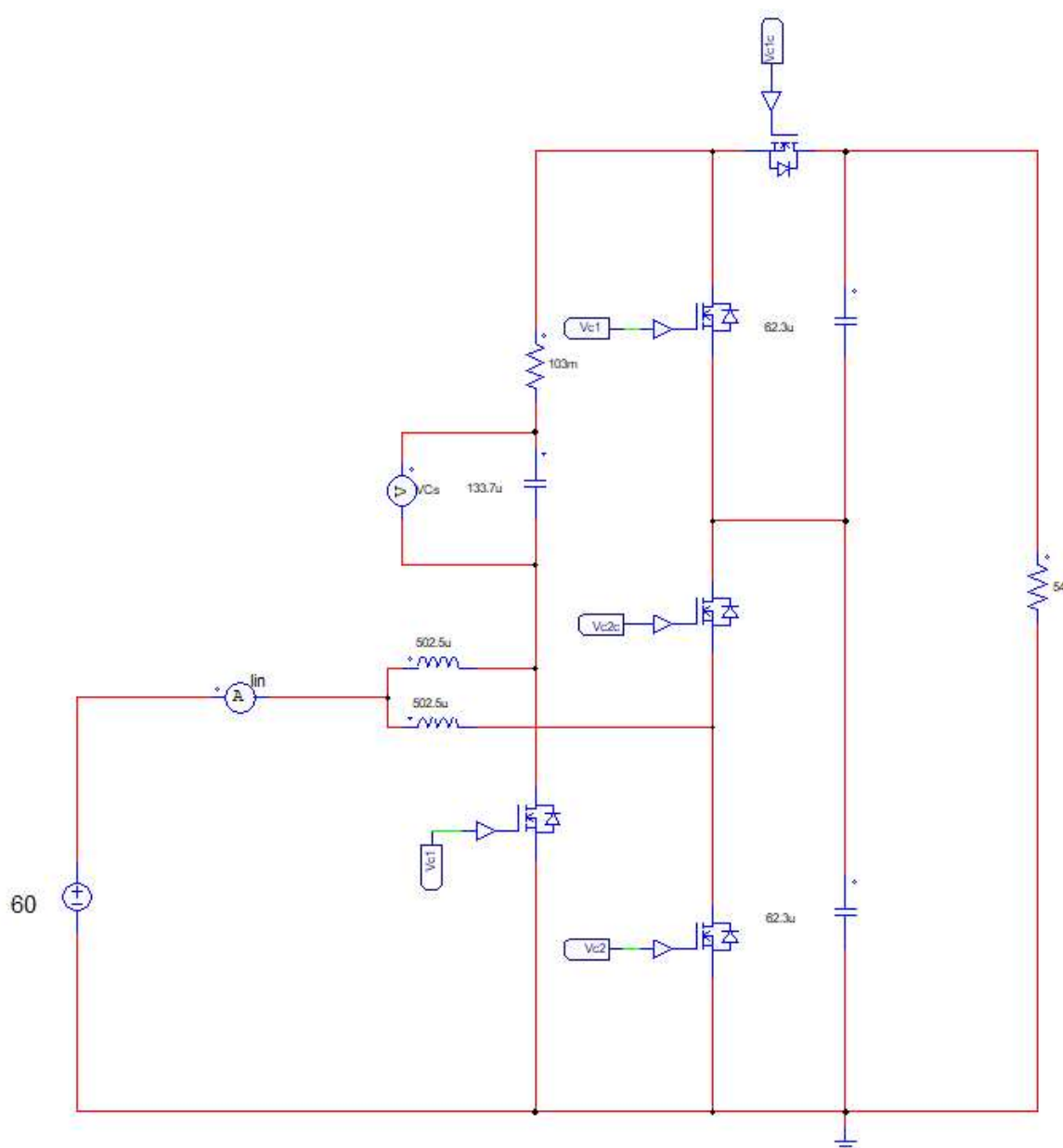
Componentes	Valor
Indutor L_1 e L_2	$502,5\mu H$
Capacitores C_{01} e C_{02}	$62,25\mu F$
Capacitores C_s	$133,7\mu F$

Fonte: Autoria própria (2026)

5. Resultados da simulação

Nesta etapa do trabalho são apresentados os resultados obtidos para o conversor CC-CC bidirecional *Boost interleaved* a capacitor chaveado. O diagrama esquemático do circuito utilizado para realizar a simulação é mostrado na Figura 13. As simulações foram realizadas no software PSIM.

Figura 13: Esquemático do conversor proposto.



Fonte: Autoria própria (2026)

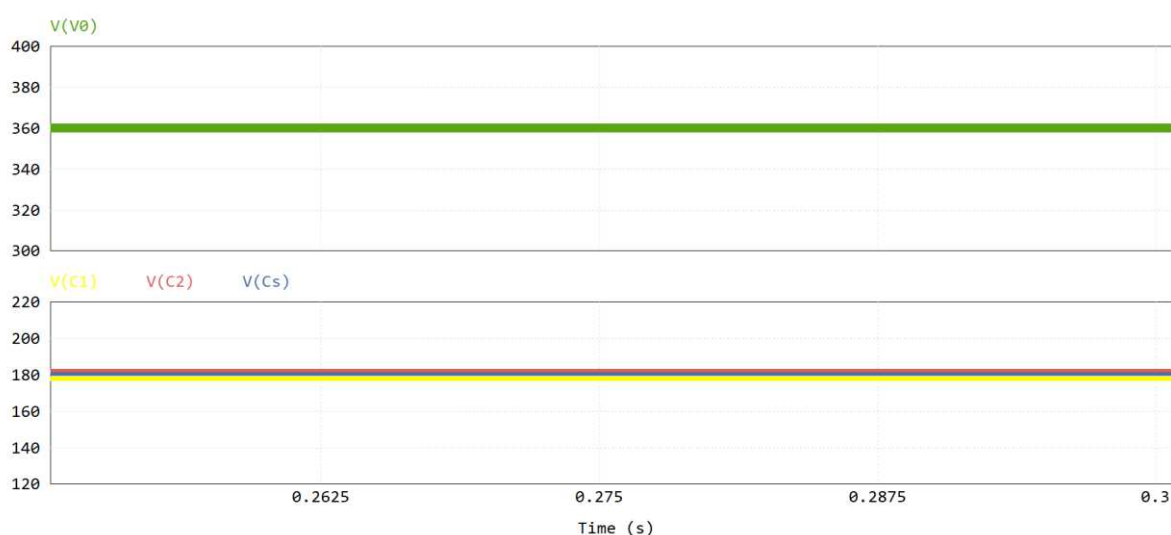
A seguir serão apresentadas as formas de onda dos resultados obtidos na simulação para a operação em malha aberta.

A Figuras 14 e 15 apresentam as formas de onda da tensão de saída do conversor, bem como das tensões nos capacitores de saída e no capacitor chaveado, sob condições nominais de operação.

Na janela de simulação apresentada, a tensão de saída permanece próxima ao valor definido em projeto, validando o elevado ganho estático de tensão proporcionado pela topologia proposta. A forma de onda foi apresentada com ênfase no regime permanente de operação. Além disso, as tensões nos capacitores de saída e no capacitor chaveado apresentam valores médios próximos entre si, evidenciando a capacidade da técnica de capacitor chaveado em reproduzir e sustentar os níveis de tensão requeridos pelo estágio de saída.

Nota-se uma pequena diferença entre os valores médios das tensões nos capacitores de saída, fenômeno associado às diferenças existentes entre as resistências equivalentes parasitas de cada etapa do circuito. Ainda assim, tal variação não compromete o desempenho global do conversor, mantendo a operação dentro das especificações de projeto.

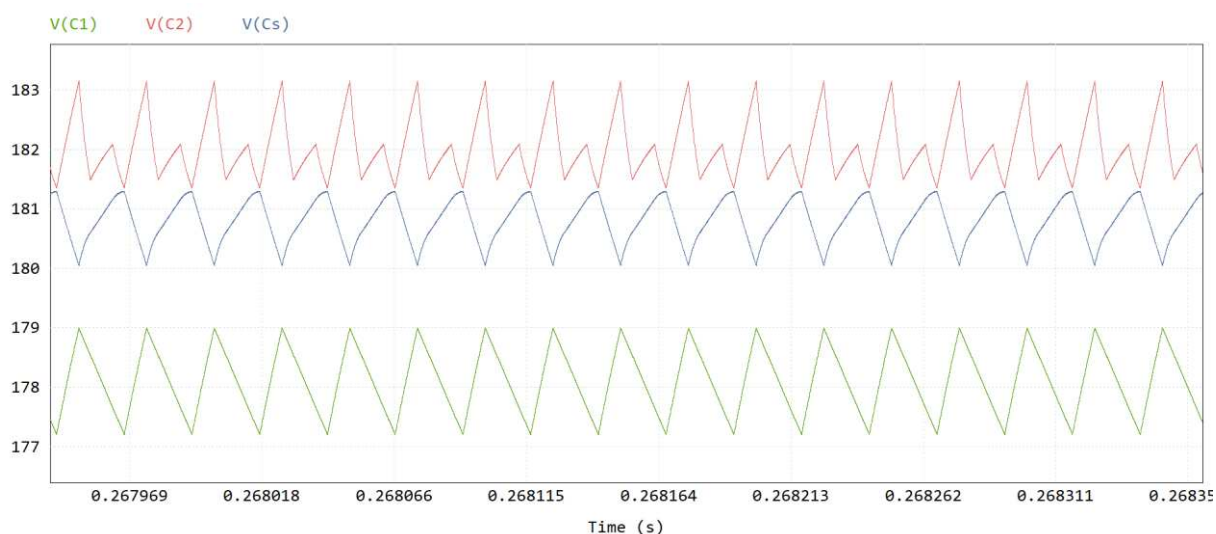
Figura 14: Tensão de saída e nos capacitores.



Fonte: Autoria própria (2026)

A Figura 15 permite verificar individualmente as tensões em C01, C02 e Cs. As ondulações observadas permanecem reduzidas em relação aos valores médios, coerentes com o critério de projeto adotado para os capacitores de saída. No caso do capacitor chaveado, o comportamento periódico confirma sua participação na transferência de carga entre os estágios do conversor.

Figura 15: Ondulação nos capacitores.



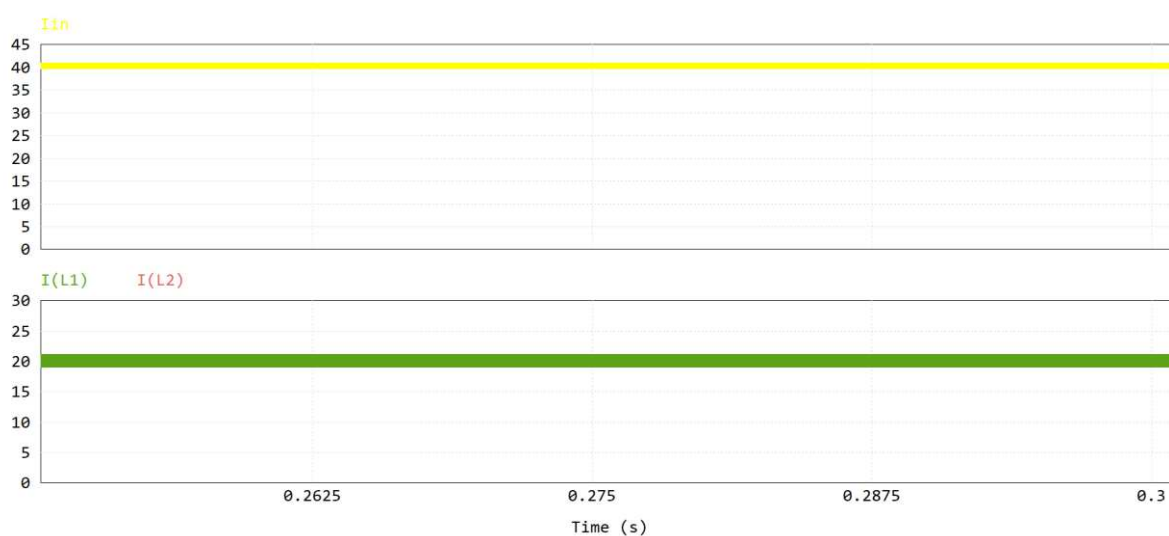
Fonte: Autoria própria (2026)

As Figuras 16 e 17 apresentam as formas de onda da corrente total de entrada e das correntes nos indutores das duas fases do conversor, evidenciando a operação *interleaved* do sistema. Na Figura 17, observam-se em detalhe as correntes de entrada e dos indutores. As correntes nos indutores exibem comportamento triangular típico de conversores *Boost* operando em modo de condução contínua (CCM), sendo possível verificar a defasagem angular entre as fases, característica essencial da técnica de *interleaving*.

Verifica-se que a corrente de entrada resulta da soma das correntes individuais dos indutores, comprovando a divisão equilibrada da corrente entre os estágios do conversor. Em decorrência da defasagem entre as fases, ocorre uma compensação parcial das ondulações individuais, resultando em uma redução significativa da ondulação da corrente total de entrada.

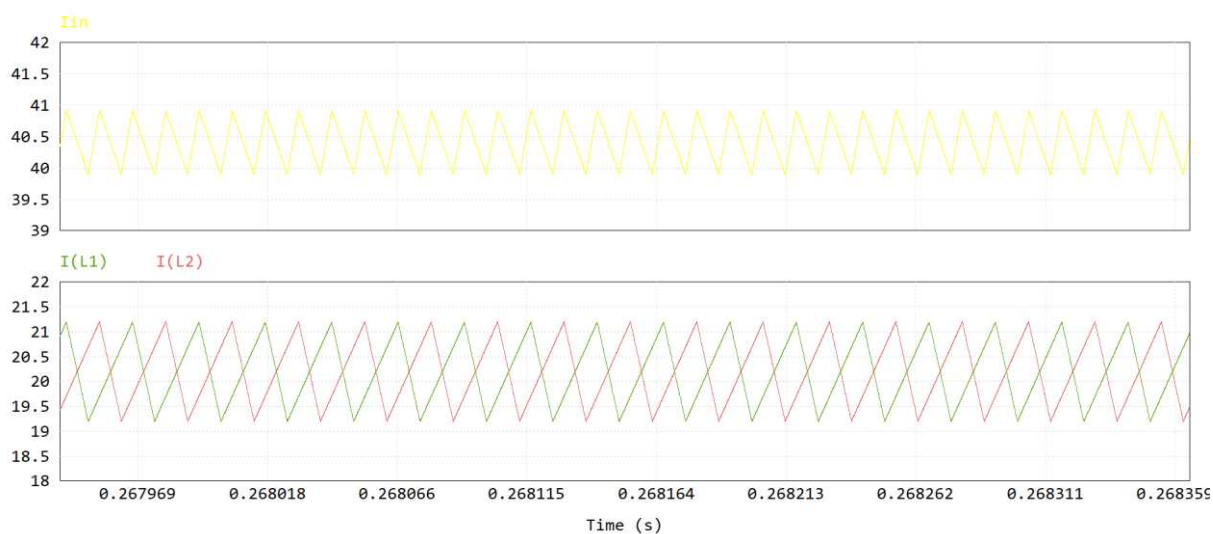
Essa característica proporciona melhor distribuição de potência entre os estágios, menor solicitação elétrica e térmica dos componentes magnéticos e semicondutores. A diminuição da ondulação da corrente de entrada torna-se particularmente vantajosa em aplicações envolvendo sistemas de armazenamento de energia por baterias, uma vez que correntes com menor *ripple* favorecem a vida útil, o desempenho e a estabilidade operacional do sistema de armazenamento, reduzindo perdas e impactos associados às variações de corrente.

Figura 16: Corrente de entrada e nos indutores.



Fonte: Autoria própria (2026)

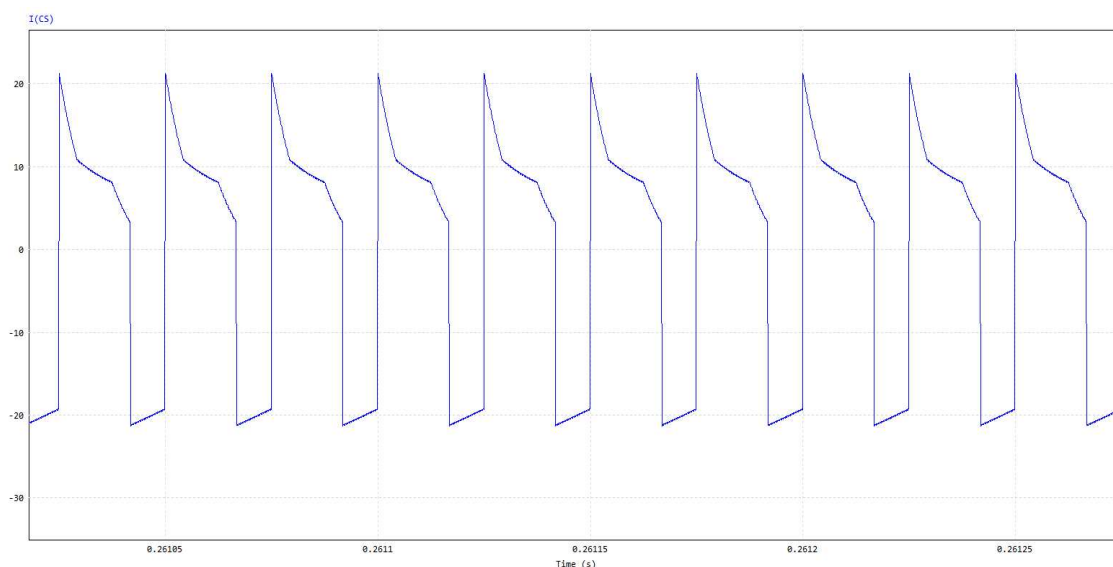
Figura 17: Detalhe da corrente de entrada e nos indutores.



Fonte: Autoria própria (2026)

Observa-se, na Figura 18, que o perfil da corrente no capacitor chaveado caracteriza a operação em modo de descarga parcial (DP), conforme definido nas especificações de projeto. Esse comportamento indica que o capacitor não completa totalmente seu processo de carga e descarga a cada período de comutação, reduzindo picos de corrente e mantendo a operação em uma região adequada de transferência de energia.

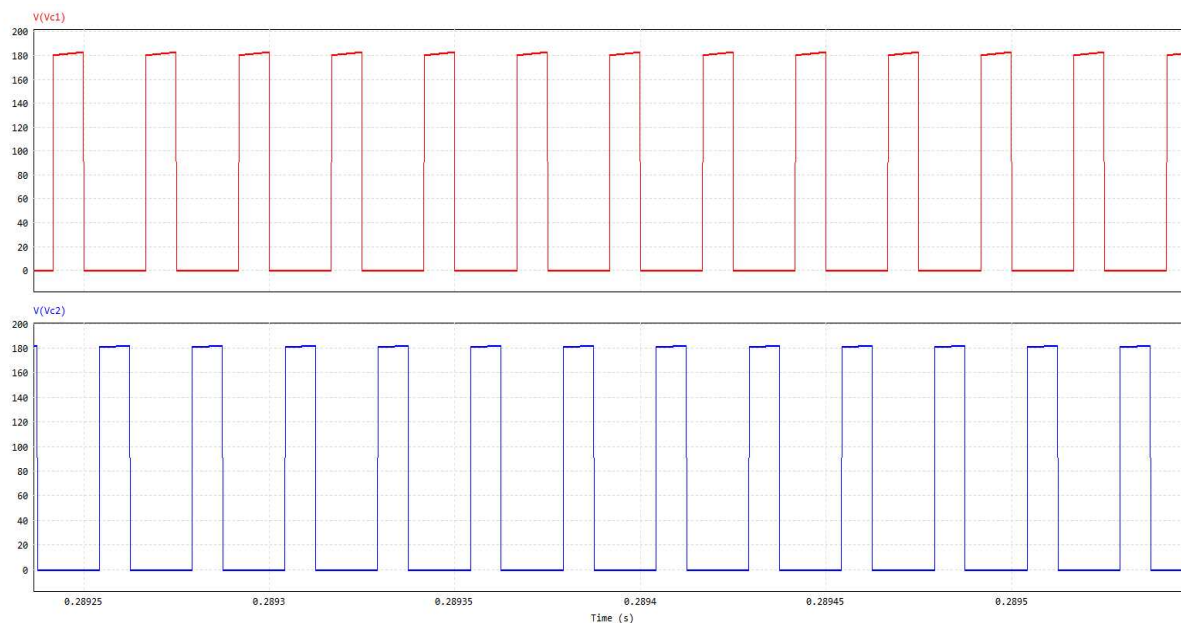
Figura 18: Corrente no capacitor chaveado.



Fonte: Autoria própria (2026)

A Figura 19 apresenta as formas de onda das tensões nos transistores durante a operação em regime permanente do conversor. Observa-se que os dispositivos são submetidos a tensões de bloqueio significativamente inferiores à tensão total de saída, permanecendo limitadas a aproximadamente metade do valor do barramento CC. Esse resultado está de acordo com a análise teórica apresentada no Capítulo 4, na qual foi demonstrado que a tensão de saída é distribuída entre os capacitores da célula chaveada, reduzindo o esforço de tensão aplicado aos semicondutores.

Figura 19: Tensão nos transistores S1 e S2.



Fonte: Autoria própria (2026)

Além disso, verifica-se que as formas de onda apresentam comportamento compatível com os estados de comutação do conversor, sem a ocorrência de sobretensões significativas durante as transições entre os modos de operação. Esse comportamento evidencia o correto funcionamento da célula a capacitor chaveado e confirma as condições assumidas durante o dimensionamento dos dispositivos semicondutores. Os resultados obtidos validam a análise desenvolvida para a topologia proposta, demonstrando que os transistores operam dentro dos limites de tensão previstos em projeto, contribuindo para a confiabilidade e viabilidade da estrutura para aplicações em sistemas de armazenamento de energia e microrredes em corrente contínua.

6. Conclusão

Este trabalho apresentou o estudo e o dimensionamento de um conversor CC-CC bidirecional *Boost interleaved* a capacitor chaveado aplicado a sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS) destinados à integração em microrredes de corrente contínua. A validação realizada concentrou-se no modo elevador de tensão, correspondente ao fluxo de energia do lado de baixa tensão para o barramento CC.

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre microrredes, sistemas de armazenamento de energia, baterias de íons de lítio, conversores CC-CC bidirecionais, técnica de *interleaving* e células a capacitor chaveado. A partir dessa fundamentação teórica, foi possível compreender os desafios associados à integração de sistemas de armazenamento em barramentos CC e identificar as vantagens oferecidas pela topologia proposta.

Em seguida, foi realizada a análise do princípio de funcionamento do conversor, descrevendo suas etapas de operação e obtendo as principais equações que regem seu comportamento. A associação da técnica *interleaved* com a célula a capacitor chaveado mostrou-se uma alternativa interessante para aplicações que exigem elevadas razões de conversão de tensão, permitindo aumentar o ganho estático do conversor sem a necessidade de razões cíclicas extremas.

Com base nas especificações de projeto estabelecidas, foram realizados os cálculos preliminares e o dimensionamento dos componentes armazenadores de energia. Os indutores de entrada e os capacitores foram projetados considerando critérios de ondulação de corrente e tensão, enquanto o capacitor chaveado foi dimensionado utilizando a metodologia da resistência equivalente da célula, possibilitando a avaliação do processo de transferência de carga e das perdas associadas ao circuito.

Posteriormente, a topologia projetada foi validada por meio de simulações computacionais, permitindo analisar as principais formas de onda de tensão e corrente. Os resultados obtidos demonstraram a coerência entre o modelo teórico desenvolvido e o comportamento observado em simulação, evidenciando a capacidade do conversor em realizar a elevação de tensão proposta e confirmando o correto funcionamento da estrutura *interleaved* associada à célula a capacitor chaveado.

Dessa forma, os objetivos estabelecidos para este trabalho foram alcançados, uma vez que foi possível realizar o estudo, a análise e o dimensionamento completo da topologia proposta, bem como validar seu funcionamento por meio de simulação. Os resultados obtidos indicam que o conversor apresenta potencial para aplicação em sistemas de armazenamento de energia conectados a microrredes CC, constituindo uma alternativa promissora para aplicações que demandam elevado ganho de tensão, redução da ondulação de corrente e melhor aproveitamento dos dispositivos de potência.

Embora a topologia estudada apresente característica bidirecional, o escopo deste Trabalho de Conclusão de Curso concentrou-se na análise inicial da estrutura, com ênfase na operação em modo *Boost*, no dimensionamento dos principais componentes e na validação do comportamento por simulação. Dessa forma, a investigação completa da operação reversa, associada ao processo de carga das baterias e ao funcionamento como abaixador de tensão, é proposta como etapa futura de aprofundamento da pesquisa.

Como continuidade deste trabalho, sugere-se:

- A construção de um protótipo experimental do conversor para validação prática dos resultados obtidos por simulação;
- A implementação de estratégias de controle em malha fechada para regulação da tensão do barramento CC;
- A avaliação experimental do rendimento e das perdas da topologia em diferentes condições de operação;
- A integração do conversor com um sistema BESS baseado em baterias de segunda vida provenientes de veículos elétricos;
- A análise da operação bidirecional completa em processos de carga e descarga das baterias;
- O estudo da aplicação da topologia em microrredes CC com fontes renováveis e múltiplos sistemas de armazenamento.

7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Augusto Braga de; FONT, Carlos Henrique Illa. DC-DC bidirectional 4-switch Cúk converter with voltage-doubler concept for interfacing batteries in microgrids. In: IEEE 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS, 2018, São Paulo. Proceedings [...]. São Paulo: IEEE, 2018.

BARBI, Ivo. Conversores de energia a capacitor chaveado. Florianópolis: Edição do Autor, 2019.

BATTERY UNIVERSITY. BU-107: comparison table of secondary batteries. Battery University, 2021. Disponível em: <https://batteryuniversity.com/article/bu-107-comparison-table-of-secondary-batteries>. Acesso em: 1 jun. 2026.

BATTERY UNIVERSITY. BU-205: types of lithium-ion. Battery University, 2023. Disponível em: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>. Acesso em: 1 jun. 2026.

CARACAS, João Victor Mapurunga; FARIAS, Guilherme de Carvalho; MATOS, José Gomes de; SILVA, Felipe Simões F.; RIBEIRO, Luiz Antonio de S. Controle droop adaptativo para balanceamento do estado de carga de múltiplos sistemas de armazenamento de energia em microrredes descentralizadas com barramento CA. 2018.

DALLA VECCHIA, Maurício. Conversores CC-CC não isolados gerados pela integração entre células de capacitores chaveados e células convencionais de comutação. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

DAS, P.; MAKSIMOVIĆ, D. Hybrid switched-capacitor converters: a new paradigm in power conversion. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 31, n. 3, p. 1923-1937, 2016.

DEYE. Battery energy storage system (BESS) for sustainable power solutions. Deye, 2023. Disponível em: <https://deye.com/battery-energy-storage-system-bess/>. Acesso em: 1 jun. 2026.

DONG, H. et al. A high step-up switched-capacitor DC-DC converter for renewable energy systems. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 30, n. 8, p. 4149-4161, 2015.

DRAGIČEVIĆ, Tomislav; LU, Xiaonan; VASQUEZ, Juan C.; GUERRERO, Josep M. DC microgrids - Part I: a review of control strategies and stabilization techniques. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 31, n. 7, p. 4876-4891, 2016. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2478859.

ELSAYED, Ahmed T.; MOHAMED, Ahmed A.; MOHAMMED, Osama A. DC microgrids and distribution systems: an overview. Electric Power Systems Research, v. 119, p. 407-417, 2015. DOI: 10.1016/j.epsr.2014.10.017.

ERICKSON, Robert W.; MAKSIMOVIĆ, Dragan. Fundamentals of power electronics. 2. ed. New York: Springer, 2001.

FANG, X. et al. High-efficiency switched-capacitor DC-DC converters. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 27, n. 6, p. 2743-2752, 2012.

FUZATO, Guilherme Henrique Favaro. Análise de um conversor Boost interleaved com multiplicador de tensão para sistemas de geração distribuída que utilizam células a combustível como fonte primária. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015.

GUERRERO, Josep M.; VASQUEZ, Juan C.; MATAS, José; VICUÑA, Luis García de; CASTILLA, Miguel. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids: a general approach toward standardization. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 58, n. 1, p. 158-172, 2011. DOI: 10.1109/TIE.2010.2066534.

HANNAN, M. A.; LIPU, M. S. H.; HUSSAIN, A.; MOHAMED, A. A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: challenges and recommendations. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 78, p. 834-854, 2017.

LASSETER, Robert H. Smart distribution: coupled microgrids. Proceedings of the IEEE, v. 99, n. 6, p. 1074-1082, 2011. DOI: 10.1109/JPROC.2011.2114630.

LINDEN, David; REDDY, Thomas B. Handbook of batteries. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2011.

MOHAN, Ned; UNDELAND, Tore M.; ROBBINS, William P. Power electronics: converters, applications, and design. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.

O SETOR ELÉTRICO. Tudo sobre microrredes no Brasil. O Setor Elétrico, São Paulo, 2022. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2022/01/Edicao-181_OSE.pdf. Acesso em: 1 jun. 2026.

RODRÍGUEZ-DÍAZ, Enrique; SAVAGHEBI, Mehdi; VASQUEZ, Juan C.; GUERRERO, Josep M. An overview of low voltage DC distribution systems for residential applications. In: IEEE 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSUMER ELECTRONICS – BERLIN, 2015, Berlin. Proceedings [...]. Berlin: IEEE, 2015.

SEBAJE, Alex Sander. Conversor CC-CC híbrido SEPIC com saídas simétricas integrado a célula a capacitor chaveado modificada. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2023.

SEEMAN, Michael D.; SANDERS, Seth R. Analysis and optimization of switched-capacitor DC-DC converters. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 23, n. 2, p. 841-851, 2008. DOI: 10.1109/TPEL.2007.915182.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael; RUPPERT FILHO, Ernesto. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 24, n. 5, p. 1198-1208, 2009. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2013862.

ZHANG, Yun; GAO, Yongping; LI, Jing; SUMNER, Mark. Interleaved switched-capacitor bidirectional DC-DC converter with wide voltage-gain range for energy storage systems. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 33, n. 5, p. 3852-3869, 2018. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2719402.