

Controle Fuzzy Aplicado a Conversor CC-CC Buck-Boost Bidirecional de Quatro Chaves

Marcelo Oliveira de Jesus Júnior

Victor Pereira dos Santos

William Souza Santos

São Paulo

2025

Controle Fuzzy Aplicado a Conversor CC-CC Buck-Boost Bidirecional de Quatro Chaves

Monografia apresentada
para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Eletrônica no
Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de São Paulo,
campus São Paulo.
Orientador: Prof.Dr Ricardo Pires.

São Paulo
2025

AGRADECIMENTOS

Dedicamos este trabalho, em primeiro lugar, a Deus, pela vida, por ter nos guiado por todo caminho, e a nossas famílias, por estarem sempre ao nosso lado, nos amparando em todos os momentos, concedendo amor, compreensão e todo incentivo possível contribuindo muito para esta trajetória acadêmica.

Ao nosso orientador, Professor Ricardo Pires pela confiança depositada em nós e por sua dedicação, orientação e tempo disponibilizado para concretizar este projeto, por sua experiência e disposição para compartilhar conhecimento, sendo essencial para o desenvolvimento de nosso trabalho e também para o nosso crescimento como estudantes e futuros profissionais.

A todos os professores e orientadores de projetos que nos acompanharam neste percurso ao longo dos últimos anos. A todos aqueles que torceram pelo nosso sucesso e contribuíram para nossa chegada até aqui.

Agradecemos também ao Instituto Federal de São Paulo, que nos proporcionou uma formação acadêmica de qualidade, e também um ambiente desafiador e enriquecedor para o nosso desenvolvimento pessoal e técnico.

Este trabalho é resultado de muito esforço e dedicação, e temos a sincera expectativa de que ele agregue valor ao avanço do conhecimento em nossa área.

"Somos o que fazemos repetidamente.
A excelência, então, não é um feito, mas um hábito."

Aristóteles

RESUMO

[TEXTO PROVISÓRIO (UMAS DAS ÚLTIMAS PARTES)]

Agradecemos, primeiramente, a Deus, que nos deu forças e perseverança para enfrentar cada etapa deste trabalho. Sem essa fé e confiança, muitos dos desafios superados ao longo dessa jornada não teriam sido possíveis.

Às nossas famílias, que sempre estiveram ao nosso lado, apoiando cada decisão e incentivando-nos a buscar nossos sonhos. A vocês, que enfrentaram conosco cada momento de dificuldade e celebraram cada conquista, nosso mais profundo reconhecimento e carinho. Vocês foram e sempre serão a base de todas as nossas realizações.

Manifestamos também nossa gratidão aos nossos orientadores, que nos guiaram ao longo deste caminho com paciência, profissionalismo e dedicação. Obrigado por compartilharem seu conhecimento e experiência e por acreditarem em nosso potencial, incentivando-nos a dar o melhor de nós a cada etapa do projeto. Sem o apoio e a orientação de vocês, este trabalho certamente não teria a mesma qualidade.

Aos nossos colegas de curso e amigos, que dividiram conosco tanto os momentos de aprendizado quanto as incertezas e pressões. Com vocês, esta jornada foi mais leve e cheia de memórias que levaremos para sempre. A amizade e a colaboração entre nós foram fundamentais para que pudéssemos superar os momentos mais desafiadores.

Também somos gratos a todos os professores que, ao longo da graduação, contribuíram para nossa formação e nos desafiaram a pensar criticamente. Cada aula, cada conselho e cada desafio acadêmico foram essenciais para que nos tornássemos profissionais melhores e mais preparados.

Por fim, agradecemos a todos aqueles que, direta ou indiretamente, nos apoiaram nesta etapa. Este trabalho é fruto do esforço e da dedicação de muitos que, de diferentes formas, contribuíram para nossa jornada. A todos vocês, nosso sincero agradecimento.

ABSTRACT

This work presents the development and implementation of a digital PID control system applied to a bidirectional DC-DC Buck-Boost converter. The main objective is to ensure stability, precision, and efficiency in controlling voltage and current flow in both directions, optimizing energy management in embedded electronic systems, particularly in automotive applications. The study covers theoretical foundations of DC-DC converters, their classifications, and control strategies, focusing on digital control implementation. Simulations were performed using MATLAB and LTSpice to design the controller and analyze circuit characteristics. Additionally, a firmware for a microcontroller-based digital controller was developed, along with a real-time supervisory system for monitoring and adjusting parameters. A prototype was built and tested, demonstrating improved dynamic response and system stability. The results confirm the feasibility of the proposed approach in practical applications.

Keywords: Digital PID Control, Bidirectional DC-DC Converter, Buck-Boost, Embedded Systems, Automotive Electronics

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Unidades Eletrônicas Automotivas Conectadas pelo Barramento CAN .	12
Figura 2 – Disposição de um módulo CC/CC em veículos	13
Figura 3 – Classificação Conversores CC-CC	16
Figura 4 – Conversor Chopper de 1 Quadrante	17
Figura 5 – Conversor Chopper de 2 Quadrante	18
Figura 6 – Conversor Chopper de 4 Quadrante	18
Figura 7 – Estrutura básica de um conversor Buck (Step-down)	19
Figura 8 – Estrutura básica de um conversor Boost (<i>Step-Up</i>)	20
Figura 9 – Estrutura básica de um conversor Síncrono	22
Figura 10 – Estrutura básica de um conversor de Quatro Chaves	22
Figura 11 – Estrutura básica de um conversor SEPIC	23
Figura 12 – Estrutura básica de um conversor CUK	24
Figura 13 – Estrutura básica de um conversor ZETA	24
Figura 14 – Estrutura básica de um conversor Buck-Boost	25
Figura 15 – Comportamento para Modo de Condução Contínua	27
Figura 16 – Comportamento para Modo de Condução Descontínua	28
Figura 17 – Circuito Conversor Bidirecional	30
Figura 18 – Teste imagem02	33

LISTA DE ABREVIATURAS

PID *Proporcional Integrativo Derivativo*

CC *Corrente Contínua*

CC *Corrente Contínua*

PID *Proporcional Integrativo Derivativo*

SUMÁRIO

Lista de ilustrações		6
1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Desenvolvimento da Eletrônica Automotiva	10
1.2	Unidades Eletrônicas Automotivas	11
1.3	Motivação	12
1.4	Objetivos	13
2	ESTUDO BIBLIOGRÁFICO	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1	Topologias e Classificações de Conversores CC-CC	16
3.1.1	Choppers	17
3.1.2	Fontes Chaveadas Não Isoladas	18
3.1.2.1	Conversores de Segunda Ordem	18
3.1.2.1.1	Conversores Buck	19
3.1.2.1.2	Conversores Boost	20
3.1.2.1.3	Conversores Síncronos (2Q)	21
3.1.2.1.4	Conversores de Quatro Chaves	22
3.1.2.2	Conversores de Quarta Ordem	22
3.1.2.2.1	Conversores SEPIC	23
3.1.2.2.2	Conversores CUK	23
3.1.2.2.3	Conversores ZETA	24
3.2	Conversor Buck-Boost Detalhado	25
3.2.1	Operação em modo Contínuo	26
3.2.2	Operação em modo Descontínuo	27
3.2.3	Cálculo de L e de C	29
3.2.4	Conversor Buck-Boost Bidirecional	29
3.3	Controle Fuzzy	30
3.3.1	Modelagem de Sistemas	32
3.3.1.1	Modelagem Matemática de Sistemas Físicos (Mecânicos, Elétricos, Térmicos, Hidráulicos).	32
3.3.1.2	Equações diferenciais.	32
3.3.1.3	Representação no domínio do tempo.	32
3.3.2	Transformada de Laplace	32
3.3.2.1	Definição e propriedades.	32

3.3.2.2	Resolução de equações diferenciais.	32
3.3.3	Função de Transferência	32
3.3.3.1	Definição e obtenção a partir de sistemas físicos.	32
3.3.3.2	Polos e zeros: significados e localização.	32
3.3.4	Análise no Domínio do Tempo	32
3.3.5	Estabilidade de Sistemas no Domínio do Tempo	32
3.3.5.1	CrITÉrio de Routh-Hurwitz.	32
3.3.5.2	Lugar das raÍzes	32
3.3.6	Análise no DomÍnio da Frequência	32
3.3.6.1	Diagramas de Bode: ganho e fase.	32
3.3.7	Realimentação	32
3.3.7.1	Controle proporcional (P), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD) e proporcional-integral-derivativo (PID)	32
3.3.8	Controle ContÍnuo (AnalÓgico)	32
3.3.9	Controle Discreto (Digital)	32
3.3.10	Espaço de Estados	32
4	METODOLOGIA	33
5	RESULTADOS	34
6	CONCLUSÕES	35
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

Devido às profundas e constantes inovações na engenharia nas últimas décadas, é possível notar uma presença cada vez mais sólida de dispositivos eletrônicos inteligentes. As interações com tais dispositivos vão desde o monitoramento de batimentos cardíacos até a consolidação dos meios de comunicação. No entanto, engana-se quem acredita que a eletrônica moderna se limita apenas às novas tendências de mercado. Atualmente, o nível de automação proporcionado por esses dispositivos se dissemina em áreas cada vez mais específicas e nichadas, que, em tempos anteriores, estavam restritas apenas pela robustez da área mecânica, como o setor automobilístico.

A eletrônica automotiva é uma área que ganha bastante destaque no cenário de automação, prevenção e confiabilidade de veículos modernos. A aplicabilidade desses dispositivos é bastante diversificada, podendo abranger desde o aquecimento inteligente do bico injetor, por meio de um controle Proporcional-Integral-Derivativo, pelo qual o combustível passa até a câmara de combustão de um veículo, até sistemas complexos de direção autônoma, como o *Advanced Driver Assistance System* (ADAS).

Outro aspecto que favorece a adoção de módulos eletrônicos no setor automobilístico é a crescente preocupação com as mudanças climáticas e ambientais, que se intensificam ao longo dos anos. Dessa forma, impulsiona-se a eletrificação e a busca pela viabilidade de veículos que utilizam energias renováveis e a redução dos níveis de poluição emitidos pela combustão (Carglass, 2023).

1.1 Desenvolvimento da Eletrônica Automotiva

Na década de 1950, a eletrônica começou a ser utilizada em automóveis para funções básicas, como a ignição eletrônica, que substituiu os sistemas mecânicos de ignição. Esses avanços buscavam melhorar o desempenho e a confiabilidade dos motores (Versis, 2017).

Nos anos 1960, surgiram os primeiros rádios automotivos transistorizados, que marcaram o início da eletrônica de entretenimento nos veículos. Esses avanços permitiram maior acessibilidade às comunicações e à informação durante viagens (Anjos, 2011).

Nos anos 1970, com a crescente preocupação ambiental e a regulamentação de emissões, sistemas eletrônicos como o controle de emissão (EGR - *Exhaust Gas Recirculation*) foram introduzidos. A década também viu o desenvolvimento dos primeiros sistemas de freio antibloqueio (ABS), inicialmente utilizados em aviões, mas adaptados para veículos comerciais (Tiandiano, 2024).

Os anos 1980 foram marcados pela introdução de microprocessadores nos veículos, possibilitando o desenvolvimento de sistemas como o gerenciamento eletrônico de motores (ECU - *Engine Control Unit*). A eletrônica passou a ser crucial para a eficiência de combustível e o controle de emissões, alavancando tecnologias que ainda hoje são fundamentais na indústria ([Reparação Automotiva, 2025](#)).

Nos anos 1990, módulos como o *airbag*, os Sistema de Posicionamento Global (GPS) e os painéis de instrumentos digitais (*instrument cluster*) se tornaram mais comuns, reforçando a segurança e a conveniência dos motoristas ([Anjos, 2011](#)).

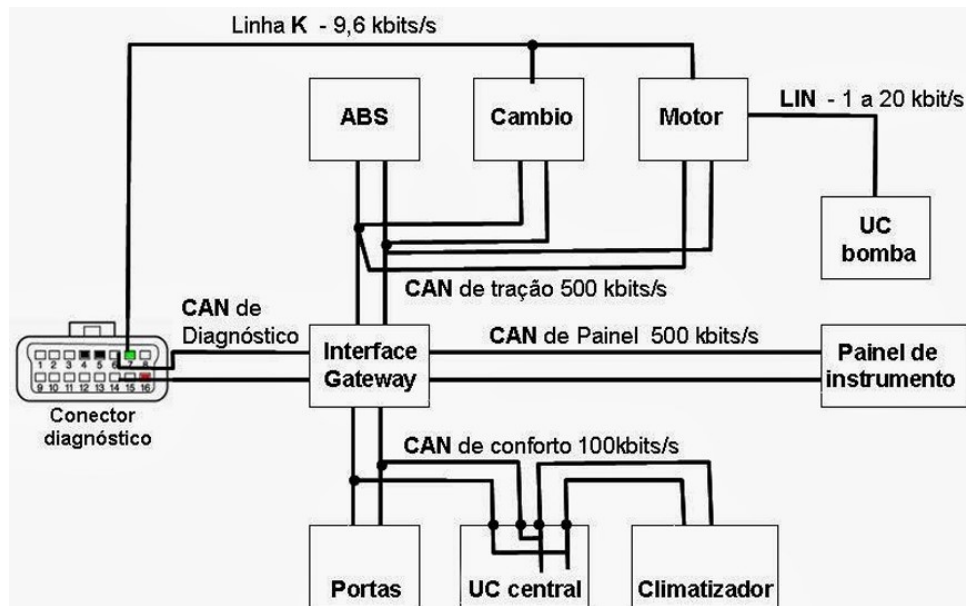
Com a chegada do século XXI, a eletrônica automotiva entrou na era da conectividade e da automação. Módulos avançados como os sistemas ADAS surgiram, incluindo controle de cruzeiro adaptativo, frenagem automática de emergência e assistência de permanência em faixa. Os painéis digitais evoluíram para displays multifuncionais totalmente configuráveis, permitindo que os motoristas personalizassem informações. Além disso, sistemas de entretenimento e conectividade, como integração com smartphones e redes 5G, passaram a ser padrão em veículos modernos ([Versis, 2017](#)).

1.2 Unidades Eletrônicas Automotivas

Atualmente, devido à complexidade das unidades eletrônicas no setor automotivo, foram desenvolvidos protocolos de comunicação para simplificar a distribuição das conexões. Entre esses protocolos destacam-se o CAN (Controller Area Network) e o LIN (Local Interconnect Network), responsáveis pela transferência de informações entre os diferentes módulos. O protocolo CAN, desenvolvido pela Bosch na década de 1980, é uma rede de comunicação que permite a interação em tempo real e de alta velocidade entre diversos módulos de controle, utilizando um sistema de barramento composto por dois fios elétricos (CAN high e CAN low) para transmitir informações. ([J2534, 2024](#))

Os principais módulos eletrônicos automotivos incluem o ABS, que impede o travamento das rodas durante a frenagem, melhorando a segurança em situações de emergência. O Instrument Cluster, que pode ser digital ou analógico, fornece informações essenciais ao motorista, como velocidade, nível de combustível e diagnósticos do veículo. A ECU (Engine Control Unit) gerencia o funcionamento do motor, otimizando seu desempenho e o consumo de combustível. O Airbag é um sistema de segurança que utiliza sensores eletrônicos para inflar bolsas de proteção em caso de colisão. Os ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) são sistemas avançados de assistência ao motorista, como frenagem automática e controle de cruzeiro adaptativo. Por fim, os Infotainment Systems são sistemas de entretenimento e conectividade que integram funções como navegação, multimídia e conectividade com dispositivos externos. A distribuição das unidades eletrônicas no barramento pode ser ilustrado na figura .

Figura 1 – Unidades Eletrônicas Automotivas Conectadas pelo Barramento CAN

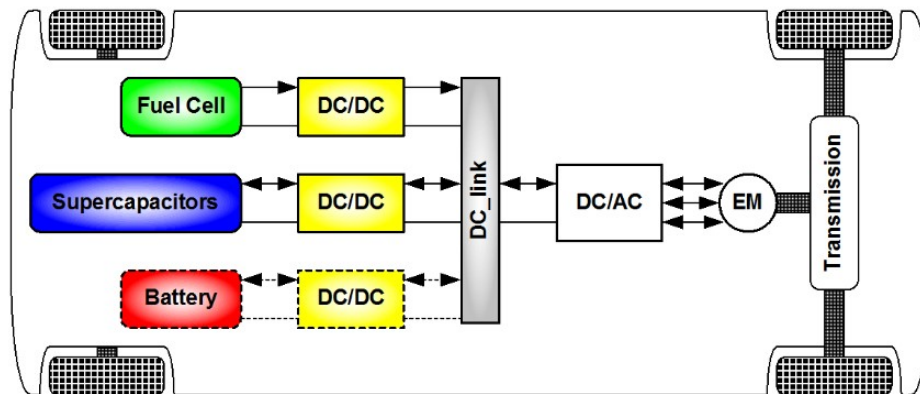


Fonte: Material de Aula, “Circuitos Eletrônicos Automotivos”, Prof. Leopoldo Yoshioka, Escola Politécnica da USP (EPUSP).

1.3 Motivação

Devido ao crescente número de módulos eletrônicos embarcados em veículos modernos, é necessário garantir que toda essa eletrônica seja capaz de se comunicar sem erros. Esse problema foi resolvido pela Bosch ao desenvolver o protocolo CAN, que permite que todas as unidades eletrônicas se conectem utilizando apenas dois fios. No entanto, ao analisar essa questão do ponto de vista da tensão elétrica, constata-se a existência de um desafio que ainda necessita ser superado., já que cada módulo eletrônico possui características elétricas únicas. Diante desse cenário, amplamente presente em veículos modernos, os conversores CC-CC (que convertem um sinal contínuo em outro sinal contínuo com uma tensão diferente) surgem como uma solução. Eles atuam como interface de compatibilidade elétrica, permitindo que módulos eletrônicos se conectem a outros sem serem danificados por diferenças de tensão. Esse cenário pode ser ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Disposição de um módulo CC/CC em veículos



Fonte: Monzer Al Sakka, Joeri Van Mierlo e Hamid Gualousa, DC/DC Converters for Electric Vehicles, disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/19583>.

1.4 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver e implementar um sistema de controle digital PID em malha fechada, projetado para atender a requisitos de estabilidade, precisão e desempenho em sistemas eletrônicos embarcados. Utilizando um sistema aplicado a um conversor CC-CC Buck-Boost bidirecional, permitindo o controle eficiente e robusto de tensão e corrente em ambas as direções.

Os objetivos específicos são:

- Desenvolvimento de uma simulação com o objetivo de determinar a função de transferência, projetar o controlador e analisar as principais características de controle.
- Desenvolvimento de uma simulação do circuito do conversor CC-CC Buck-Boost com o objetivo de dimensionar e testar características elétricas, garantindo a viabilidade do projeto em termos de eficiência e estabilidade.
- Desenvolvimento e implementação de um firmware de controle a ser embarcado em um microcontrolador, com foco na otimização de recursos e tempo de resposta.
- Implementação de um sistema supervisor para o monitoramento em tempo real e manipulação de parâmetros de controle, visando facilitar a análise e ajuste do sistema.
- Desenvolvimento e implementação de um circuito protótipo para testes de desempenho, incluindo avaliação da precisão, robustez e eficiência do sistema sob condições reais de operação.

2 ESTUDO BIBLIOGRÁFICO

Para se conhecer o estado atual da tecnologia em controle digital para conversores CC CC, realizou-se pesquisa no Google Acadêmico, usando-se como termos de buscas:

PID Digital Control DC DC Converter Bidirecional Buck Boost

Dentre os artigos encontrados, foram selecionados aqueles que, com base em seus títulos, resumos e alinhamento com os objetivos deste estudo, se mostraram mais relevantes para a fundamentação teórica e prática. A seguir, destacam-se os principais trabalhos analisados e suas contribuições para o entendimento do controle PID digital em conversores buck-boost bidirecionais.

O artigo intitulado *Stability and Dynamic Response of Analog and Digital Control Loops of Bidirectional Buck-Boost Converter for Renewable Energy Applications* discute a comparação entre controle analógico e digital em conversores CC-CC para aplicações em energia renovável. Os autores concluem que o controle digital apresenta vantagens significativas, como maior flexibilidade, estabilidade e melhor resposta dinâmica frente a variações de operação ([Viswanatha; Venkata; Rajeswari, 2019](#)).

No trabalho de ([Liu et al., 2016](#)), é proposto um conversor bidirecional não isolado com controle adaptativo por deslocamento de fase (APS). A abordagem é totalmente baseada em software, eliminando a necessidade de circuitos adicionais e reduzindo a suscetibilidade a ruídos. Um protótipo de 300 W foi implementado e demonstrou melhorias significativas na eficiência, especialmente em condições de baixa carga.

Já o estudo de ([Septiawan; Tahtawi; Iman, 2024](#)) apresenta o projeto e a implementação de um controle PID para um conversor bidirecional DC-DC operando nos modos de carga e descarga. As simulações, realizadas no ambiente MATLAB/Simulink, indicaram tempos de subida inferiores a 1 segundo e erro em regime permanente menor que 2%. No entanto, os testes com hardware baseados em Arduino revelaram tempos de resposta mais lentos e erros ligeiramente maiores. O artigo também sugere que melhorias podem ser obtidas com a utilização de controladores PID adaptativos ou baseados em lógica fuzzy.

Apesar da ampla utilização do controle PID em sistemas lineares e de sua simplicidade de implementação, esse tipo de controle apresenta limitações significativas em sistemas não lineares e sujeitos a variações rápidas de regime. Como destacado por ([Åström; Hägglund, 2006](#)), os ganhos fixos do PID dificultam a adaptação a diferentes condições de operação, o que pode comprometer a estabilidade e a precisão do sistema.

Em contraste, a lógica fuzzy surge como uma alternativa promissora, especialmente em sistemas dinâmicos com comportamento não linear, como é o caso do conversor buck-boost bidirecional de quatro chaves. Essa técnica de controle, conforme proposto inicialmente por (Zadeh, 1965) e detalhado por (Passino; Yurkovich, 1998), permite lidar com incertezas e variações sem a necessidade de uma modelagem matemática precisa, utilizando regras heurísticas baseadas no conhecimento do comportamento do sistema.

Diante do cenário atual da eletrônica embarcada em veículos modernos, onde diferentes módulos eletrônicos precisam se comunicar de forma eficiente e segura, torna-se essencial garantir a compatibilidade elétrica entre esses sistemas. Cada módulo possui características elétricas próprias, o que pode resultar em diferenças significativas de tensão. Nesse contexto, o conversor CC-CC buck-boost bidirecional de quatro chaves atua como uma interface fundamental, promovendo a adequação dos níveis de tensão entre os dispositivos. A aplicação do controle fuzzy nesse tipo de conversor justifica-se pela necessidade de robustez e adaptabilidade frente às variações de carga, tensão de entrada e requisitos operacionais. Tais qualidades são essenciais para garantir a operação estável e eficiente em ambientes automotivos, onde a dinâmica dos sistemas e a variabilidade das condições de operação exigem soluções de controle mais flexíveis e tolerantes à incerteza.

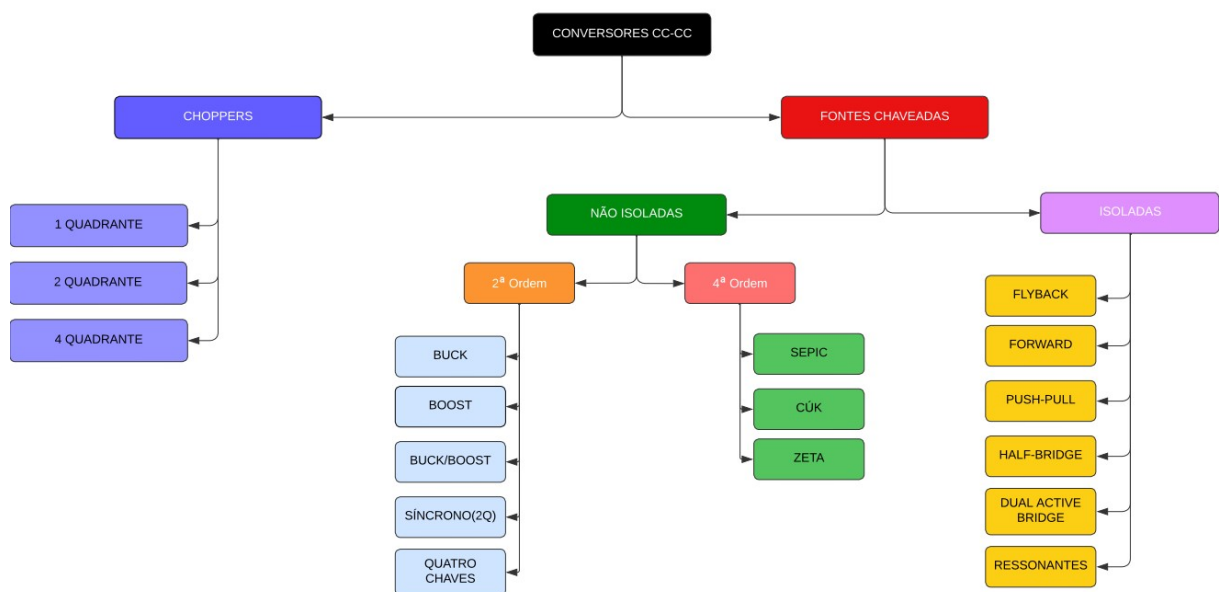
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão apresentadas as principais topologias de conversores CC-CC, acompanhadas de suas respectivas classificações e aplicações práticas. Além disso, será explorado um panorama detalhado sobre as técnicas de controle mais empregadas em conversores e em sistemas de eletrônica de potência. Serão discutidos aspectos teóricos e práticos que fundamentam o funcionamento dessas tecnologias, destacando suas vantagens, limitações e contextos de uso.

3.1 Topologias e Classificações de Conversores CC-CC

Os conversores CC-CC são dispositivos eletrônicos amplamente utilizados para modificar os níveis de tensão de corrente contínua (CC) em sistemas de energia. Eles são cruciais em aplicações como fontes de alimentação, sistemas embarcados e gerenciamento de energia em dispositivos eletrônicos. A seguir, apresenta-se uma análise abrangente dos principais tipos de conversores CC-CC e suas categorias, incluindo *choppers*, fontes chaveadas não isoladas e isoladas. É possível visualizar uma classificação abrangente dos principais conversores CC-CC, na Figura.

Figura 3 – Classificação Conversores CC-CC



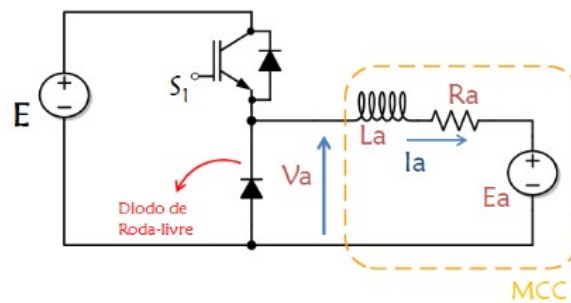
Fonte: OLIVEIRA, Thiago de (2024).

3.1.1 Choppers

Os choppers são uma categoria de conversores CC-CC que operam como interruptores eletrônicos, controlando a tensão de saída por meio da modulação do ciclo de trabalho (Thiago Oliveira, 2024a). Eles são classificados com base nos quadrantes do plano tensão-corrente em que operam:

O chopper de 1 quadrante opera apenas no primeiro quadrante (tensão e corrente positivas) e é usado no controle de motores de corrente contínua em sentido único. Ele é o mais simples, composto por uma chave eletrônica (transistor) e um diodo de roda-livre. A chave comuta entre E e 0 (zero) (desconsiderando a queda de tensão do diodo), sendo controlada por PWM, que ajusta a tensão média aplicada ao motor via ciclo de trabalho (D). Como a comutação ocorre mais rápido que a constante de tempo do motor, este responde apenas ao valor médio da tensão (Thiago Oliveira, 2024a), conforme ilustrado na Figura.

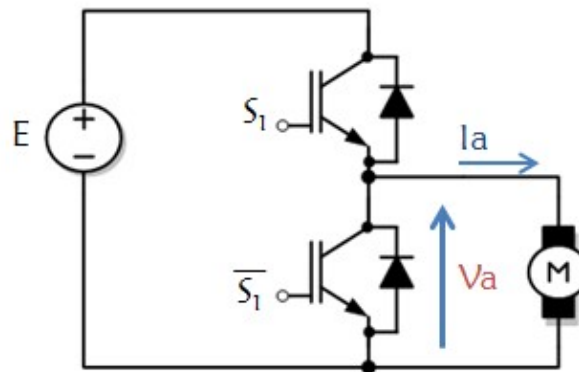
Figura 4 – Conversor Chopper de 1 Quadrante



Fonte: OLIVEIRA, Thiago de (2024).

O chopper de 2 quadrantes opera no primeiro e segundo quadrantes, permitindo fluxo bidirecional de corrente, mas sem reversão de sentido. Ele substitui o diodo de roda-livre por uma segunda chave, comandada de forma complementar à primeira. A tensão na armadura é igual à do chopper de 1 quadrante, mas quando os pulsos de comando são cortados, a chave inferior mantém um caminho para a corrente circular, tornando-a negativa e extraíndo energia do motor. Isso possibilita frenagem regenerativa, útil em aplicações como elevadores e trens (Thiago Oliveira, 2024a), conforme ilustrado na Figura.

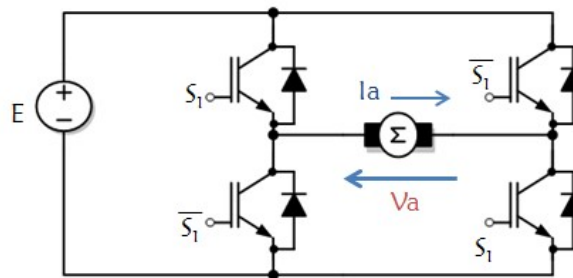
Figura 5 – Conversor Chopper de 2 Quadrante



Fonte: OLIVEIRA, Thiago de (2024).

Os choppers de 4 quadrantes, também conhecidos como ponte H, são os mais versáteis e permitem controle completo de sentido e reversão de fluxo de energia. Eles consistem em dois braços de transistores com a carga em ponte, permitindo a aplicação de tensões positivas e negativas, e, conseqüentemente, a inversão da corrente e a frenagem regenerativa. São amplamente utilizados em sistemas de tracionamento elétrico, aplicações que exigem controle bidirecional completo e em pequenos robôs e motores de passo (Thiago Oliveira, 2024a), conforme ilustrado na Figura.

Figura 6 – Conversor Chopper de 4 Quadrante



Fonte: OLIVEIRA, Thiago de (2024).

3.1.2 Fontes Chaveadas Não Isoladas

As fontes chaveadas não isoladas transferem energia diretamente entre entrada e saída, sem utilização de transformadores (Carlos Delfino, 2024). São classificadas em função de sua ordem: Segunda ou Quarta Ordem.

3.1.2.1 Conversores de Segunda Ordem

Conversores de segunda ordem são topologias de conversores eletrônicos que utilizam dois elementos de armazenamento de energia, geralmente uma combinação de indutores e

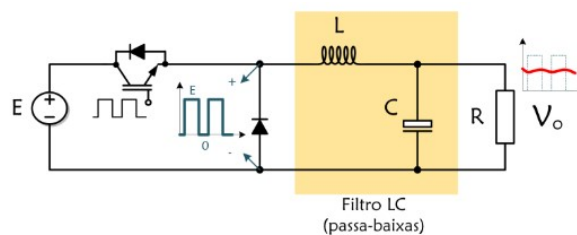
capacitores, para realizar a conversão de energia. Esses circuitos possuem uma resposta dinâmica mais complexa devido à interação dos dois elementos, resultando em uma segunda ordem na equação diferencial que descreve seu comportamento (Camila Schuina Neves, Ana Pavani, 2022).

3.1.2.1.1 Conversores Buck

Um conversor Buck é um circuito eletrônico utilizado para reduzir a tensão de entrada para um nível mais baixo na saída, sendo amplamente aplicado em fontes reguladas de baixa tensão, como carregadores de bateria, sistemas de alimentação para microcontroladores e dispositivos embarcados. Ele opera de forma eficiente ao utilizar a comutação de semicondutores e componentes passivos como indutores e capacitores para armazenar e transferir energia. Sua eficiência elevada o torna ideal para aplicações em que o consumo de energia deve ser minimizado. Além disso, o conversor Buck pode ser projetado para fornecer uma tensão de saída estável mesmo diante de variações na carga ou na tensão de entrada, o que é essencial em sistemas sensíveis (Thiago Oliveira, 2024b).

A Figura 8 ilustra a estrutura fundamental de um Conversor Buck, que pode ser visto como um Chopper equipado com um filtro passa-baixas LC na saída. O transistor opera através de um sinal PWM, alternando entre os estados ligado e desligado. Isso faz com que a tensão na entrada do filtro oscile entre o valor da fonte (E) e zero. No entanto, o filtro atenua essas variações, suavizando a tensão de saída e reduzindo os ruídos de alta frequência.

Figura 7 – Estrutura básica de um conversor Buck (Step-down)



Fonte: OLIVEIRA, Thiago de (2024).

O conversor CC-CC ilustrado na Figura 7 corresponde a um conversor *buck*, o qual rebaixa a tensão de entrada E para uma tensão de saída V_o , em função do ciclo de trabalho D do sinal PWM aplicado ao interruptor. Assumindo operação em modo de condução contínua, a relação estática entre as tensões é dada por:

$$V_o = D \cdot E$$

Para representar a dinâmica do sistema, considerando o filtro LC na saída, obtêm-se as seguintes equações diferenciais:

$$\begin{aligned} L \frac{di_L(t)}{dt} &= D(t) \cdot E - v_C(t) \\ C \frac{dv_C(t)}{dt} &= i_L(t) - \frac{v_C(t)}{R} \end{aligned}$$

Ao transformar essas equações para o domínio de Laplace e assumir pequenas variações em torno do ponto de operação, obtêm-se a função de transferência linearizada entre a razão cíclica $D(s)$ e a tensão de saída $V_o(s)$:

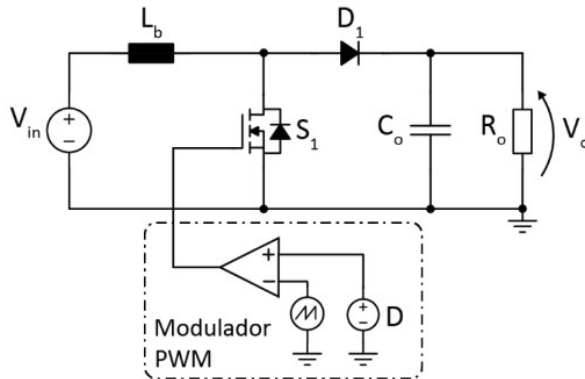
$$\frac{V_o(s)}{D(s)} = \frac{E}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1}$$

3.1.2.1.2 Conversores Boost

O conversor Boost é um circuito utilizado para elevar a tensão de entrada para um nível superior na saída, empregando um indutor, um interruptor controlado e um diodo. Seu funcionamento baseia-se na comutação controlada por PWM, que determina os períodos de carga e descarga do indutor. Durante o acionamento do interruptor, a corrente flui pelo indutor, armazenando energia no campo magnético. Quando o interruptor é desligado, a energia acumulada é transferida para a carga por meio do diodo, resultando em uma tensão de saída superior à de entrada. Devido à sua alta eficiência e controle preciso da tensão de saída, o conversor Boost é amplamente utilizado em sistemas que exigem conversão CC-CC com elevada confiabilidade (Caio Moraes, 2023).

A estrutura básica de um conversor boost está representada na figura 9, onde S1 é o interruptor de potência, D_1 é o diodo de potência, L_b é o indutor e C_o é o capacitor.

Figura 8 – Estrutura básica de um conversor Boost (*Step-Up*)



Fonte: MORAIS, Caio de (2023).

O conversor Buck ilustrado na Figura 8 é utilizado para rebaixar a tensão de entrada V_{in} para uma tensão de saída V_o , por meio da modulação por largura de pulso (PWM). A relação fundamental em regime permanente, assumindo operação em modo contínuo e componentes ideais, é expressa por:

$$V_o = D \cdot V_{in}$$

Para uma análise dinâmica, levando em conta os elementos indutivo (L_b) e capacitivo (C_o), o sistema pode ser descrito pelas seguintes equações diferenciais:

$$\begin{aligned} L_b \frac{di(t)}{dt} &= D(t) \cdot V_{in} - v_o(t) \\ C_o \frac{dv_o(t)}{dt} &= i(t) - \frac{v_o(t)}{R_o} \end{aligned}$$

No domínio de Laplace, o modelo linearizado resulta na seguinte função de transferência entre a razão cíclica $D(s)$ e a saída $V_o(s)$:

$$\frac{V_o(s)}{D(s)} = \frac{V_{in}}{L_b C_o s^2 + \frac{L_b}{R_o} s + 1}$$

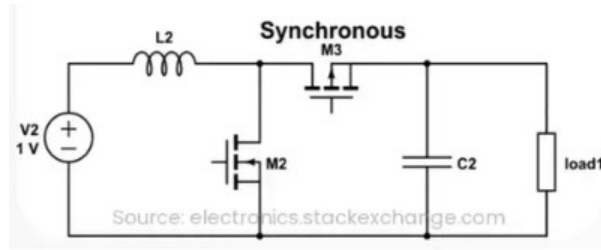
Este modelo é essencial para o projeto de controladores e análise da resposta dinâmica do conversor.

3.1.2.1.3 Conversores Síncronos (2Q)

Os conversores síncronos (2Q) são uma evolução das topologias tradicionais de conversores, substituindo os diodos por transistores controlados, como MOSFETs, para aumentar a eficiência do circuito. Essa configuração reduz as perdas por condução, especialmente em aplicações de baixa tensão, onde a queda de tensão nos diodos pode ser significativa (electricity-magnetism-org, 2025). São amplamente utilizados em fontes de alimentação modernas, dispositivos portáteis e sistemas embarcados, onde a eficiência energética é crítica. Os conversores síncronos podem ser aplicados em diversas topologias, como Buck, Boost e Buck-Boost, garantindo maior controle sobre a operação e menor geração de calor. Essa tecnologia é ideal para atender às demandas de alta eficiência e densidade de potência em projetos eletrônicos avançados.

Esta topologia pode ser ilustrada na Figura, onde existe a substituição do diodo pelo segundo transistor do tipo MOSFET.

Figura 9 – Estrutura básica de um conversor Síncrono



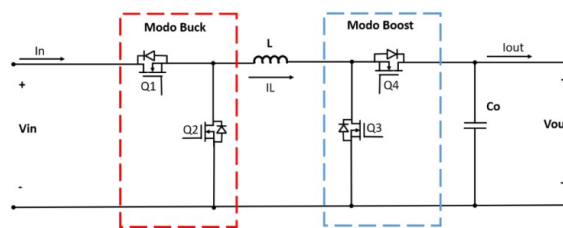
Fonte: <https://www.electricity-magnetism.org> (2025).

3.1.2.1.4 Conversores de Quatro Chaves

O conversor de quatro chaves é uma topologia avançada de conversor que utiliza quatro interruptores controlados, como MOSFETs ou IGBTs, para oferecer maior flexibilidade no controle da conversão de energia. Essa configuração permite operar de forma bidirecional, possibilitando o fluxo de energia em ambos sentidos, além de suportar modos de operação como Buck, Boost ou Buck-Boost. É amplamente utilizado em sistemas de armazenamento de energia, veículos elétricos e redes inteligentes, onde a necessidade de gerenciamento dinâmico de energia é fundamental. Sua versatilidade e capacidade de resposta rápida o tornam ideal para aplicações que demandam alta eficiência, controle preciso e compatibilidade com diferentes condições de entrada e saída (Côrtes, 2021).

A topologia de conversores de quatros chaves pode ser ilustrado na Figura com 4 MOSFETS.

Figura 10 – Estrutura básica de um conversor de Quatro Chaves



Fonte: Côrtes de (2021)

3.1.2.2 Conversores de Quarta Ordem

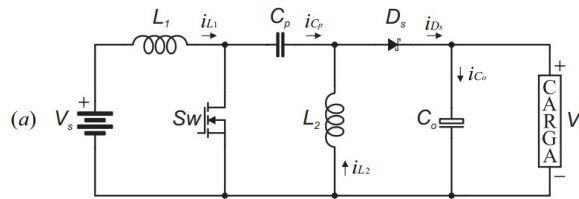
Conversores de quarta ordem são topologias de conversores eletrônicos que utilizam quatro elementos de armazenamento de energia, como indutores e capacitores, em sua configuração. Esses circuitos possuem uma resposta dinâmica descrita por uma equação diferencial de quarta ordem, resultando em um comportamento mais complexo e avançado em termos de controle e operação (Tofoli, 2018). As topologias de conversores de quarta ordem mais conhecidas são: SEPIC, CUK e ZETA que serão abordados na sequência.

3.1.2.2.1 Conversores SEPIC

Os conversores SEPIC (*Single-Ended Primary Inductor Converter*) são topologias de conversores DC-DC derivadas do conversor Boost. A principal característica do SEPIC é a capacidade de fornecer uma tensão de saída que pode ser maior ou menor que a tensão de entrada, dependendo do ciclo de trabalho do sinal de controle da chave. Isso torna essa topologia ideal para aplicações em que a tensão de entrada não é regulada e pode sofrer variações (Araújo, 2017). A figura 12 exemplifica um circuito básico de um conversor SEPIC.

A estrutura do conversor SEPIC inclui um filtro passa-baixa LC entre os estágios de entrada e saída, garantindo um melhor controle sobre o *ripple* da tensão de saída. Entretanto, um possível ponto negativo dessa topologia é o uso de dois indutores, tornando o circuito relativamente maior que um conversor Boost convencional. No entanto, esses indutores podem ser acoplados, reduzindo o tamanho e permitindo que a indutância necessária seja reduzida em 50% para uma mesma variação de corrente (Falin, 2008).

Figura 11 – Estrutura básica de um conversor SEPIC



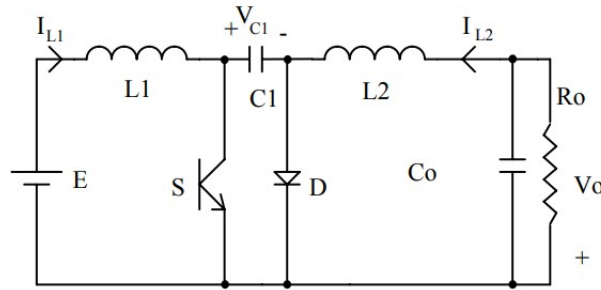
Fonte: ARAÚJO, Gabriela de (2017)

3.1.2.2.2 Conversores CUK

Os conversores CUK são topologias de conversores DC-DC que oferecem uma conversão de tensão tanto para maior quanto para menor que a tensão de entrada, assim como os conversores SEPIC. A principal característica dos conversores CUK é que eles utilizam um capacitor de acoplamento para transferir a energia entre o indutor e o circuito de saída, o que permite que a tensão de saída seja invertida em relação à tensão de entrada, ou seja, a tensão de saída pode ser positiva ou negativa (Pomilio, 2010a). Na figura 13 um exemplo básico do circuito de um conversor CUK.

Uma das vantagens é que tanto a corrente de entrada quanto a de saída podem ser contínuas, graças à presença dos indutores. Além disso, ambos os indutores estão submetidos à mesma tensão instantânea, o que possibilita sua construção em um único núcleo. Esse acoplamento magnético, se bem projetado, pode reduzir a ondulação de corrente em um dos enrolamentos. Por fim, os interruptores devem ser capazes de suportar a soma das tensões de entrada e saída (Pomilio, 2010a).

Figura 12 – Estrutura básica de um conversor CUK



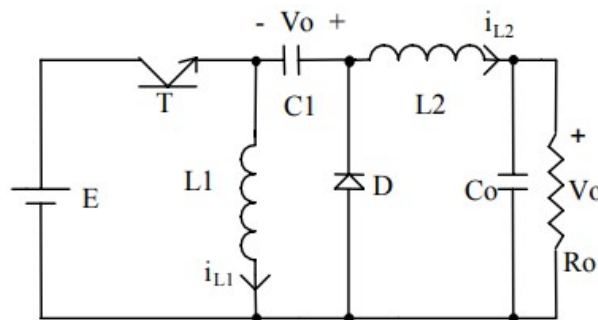
Fonte: POMILIO, José de (2010)

3.1.2.2.3 Conversores ZETA

Os conversores ZETA são topologias de conversores DC-DC que, assim como os conversores SEPIC e CUK, são capazes de fornecer uma tensão de saída tanto maior quanto menor do que a tensão de entrada. A principal característica do conversor ZETA é a sua capacidade de fornecer uma saída com uma tensão de polaridade positiva, independentemente da polaridade da tensão de entrada, o que os torna especialmente úteis em sistemas onde é necessário fornecer uma tensão de saída constante e positiva (Pomilio, 2010b). Na figura 14 um exemplo básico do circuito de um conversor ZETA.

Nesse conversor, a corrente de entrada é descontínua, enquanto a de saída é contínua. A transferência de energia ocorre por meio do capacitor. No modo descontínuo, também há a inversão do sentido da corrente em uma das indutâncias. Além disso, a posição do interruptor proporciona uma proteção natural contra sobrecorrentes (Pomilio, 2010b).

Figura 13 – Estrutura básica de um conversor ZETA



Fonte: POMILIO, José de (2010)

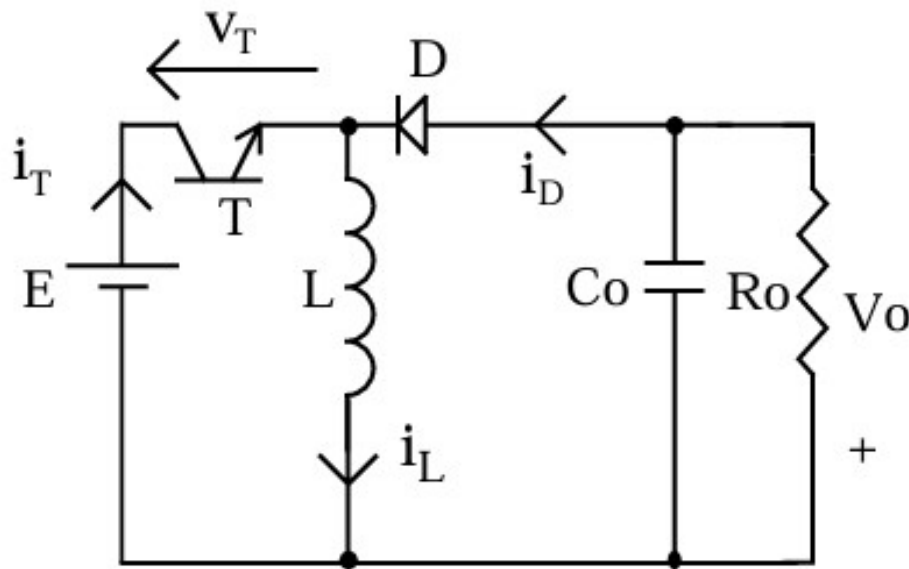
3.2 Conversor Buck-Boost Detalhado

O conversor Buck-Boost é um circuito capaz de aumentar ou reduzir a tensão de entrada, dependendo do ciclo de trabalho aplicado ao interruptor (Transistor) (Pomilio, 2010c). Ele é ideal para sistemas que exigem flexibilidade no nível de tensão, como dispositivos alimentados por baterias, onde a tensão pode variar significativamente durante o uso. Essa topologia combina características dos conversores Buck e Boost, permitindo que a saída seja maior, menor ou igual à tensão de entrada, dependendo das condições de operação (Pomilio, 2010c).

O funcionamento básico do conversor Buck-Boost baseia-se na ilustração da Figura. Neste figura, é observado que quando T está ligado, a fonte transfere energia para o indutor. Nesse momento, o diodo permanece bloqueado, e a carga é alimentada pelo capacitor. Ao desligar T, a corrente do indutor continua fluindo através do diodo, que entra em condução. A energia armazenada em L é então fornecida ao capacitor e à carga (Pomilio, 2010c).

Tanto a corrente na entrada quanto na saída apresentam caráter descontínuo. A tensão que o diodo e o transistor devem suportar corresponde à soma das tensões de entrada e saída, $V_o + E$ (Pomilio, 2010c).

Figura 14 – Estrutura básica de um conversor Buck-Boost



Fonte: POMILIO, José de (2010)

3.2.1 Operação em modo Contínuo

No conversor Buck-Boost, os modos **contínuo** e **descontínuo** referem-se ao **comportamento da corrente no indutor durante o ciclo de comutação** (Pomilio, 2010c).

No modo de condução contínuo a **corrente no indutor nunca zera durante o ciclo de operação**. Isso ocorre quando a carga é suficientemente alta para manter um fluxo constante de energia (Pomilio, 2010c). Neste modo, as seguintes situações são:

Quando T conduz: $v_L = E$ (durante tT)

Quando D conduz: $v_L = -V_o$ (durante $\tau - tT$)

No modo contínuo podem-se observar as seguintes equações que descrevem o comportamento do conversor buck boost:

$$V_o = \frac{E \cdot \delta}{1 - \delta} \quad (\text{Tensão da saída do conversor})$$

Onde: δ é a razão cíclica (A razão cíclica (ou ciclo de trabalho) de um conversor buck-boost é a fração do período de chaveamento em que o interruptor permanece ligado. Percebe-se também o comportamento de δ abaixo:

Se $0 < \delta < 0.5$, o conversor se comporta como Buck.

Se $0.5 < \delta < 1$, o conversor se comporta como Boost.

O ganho estático é essencial para o projeto de conversores, pois determina a eficiência e a viabilidade da conversão de tensão (Pomilio, 2010c). O ganho estático nesse modo de operação pode ser obtido manipulando a equação da tensão da saída do conversor (Pomilio, 2010c):

$$\frac{V_o}{E} = \frac{\delta}{1 - \delta} = G \quad (\text{Ganho Estático do Conversor})$$

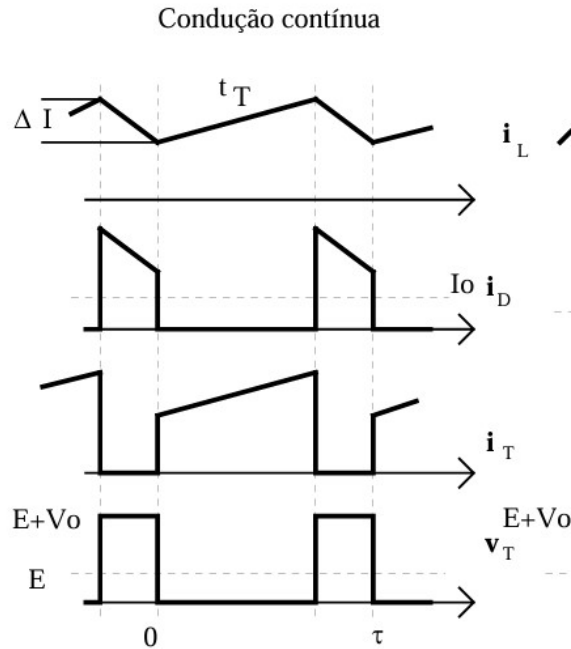
Agora, ressaltando a equação da corrente do indutor:

$$\Delta I_i = \frac{E \cdot tT}{L} = \frac{V_o \cdot (\tau - tT)}{L} \quad (\text{Variação de corrente no indutor})$$

Onde: (E) Tensão de entrada, (Vo) Tensão de saída, (L) Indutância do indutor, (τ) Tempo de condução do interruptor (relacionado ao ciclo de trabalho $\delta = \tau/T$) e (tT) tempo total de um ciclo.

Em sequência, na Figura, estão as formas das correntes e tensões ao longo do tempo.

Figura 15 – Comportamento para Modo de Condução Contínua



Fonte: POMILIO, José de (2010)

3.2.2 Operação em modo Descontínuo

O modo de condução descontínua em um conversor Buck-Boost ocorre quando a **corrente no indutor cai a zero durante parte do período de chaveamento** (Pomilio, 2010c). Neste modo, observam-se as seguintes situações:

Quando T conduz: $v_L = E$ (durante tT)

Quando D conduz: $v_L = -V_o$ (durante $\tau - tT - tx$)

No modo descontínuo pode-se observar as seguinte equações que descrevem o comportamento do conversor buck boost:

$$V_0 = \frac{E^2 \cdot \tau \cdot \delta^2}{2 \cdot L \cdot I_0} \quad (\text{Tensão de Saída do Conversor})$$

Onde: I_0 é corrente na carga e os demais membros da equação já foram descrito em equações acima.

Escrevendo em termos de variáveis conhecidas, e sabendo que a corrente máxima de entrada ocorre ao final do intervalo de condução do transistor (Pomilio, 2010c):

$$iL_{max} = \frac{E \cdot tT}{L} \quad (\text{Corrente Máxima do Indutor})$$

Seu valor médio é:

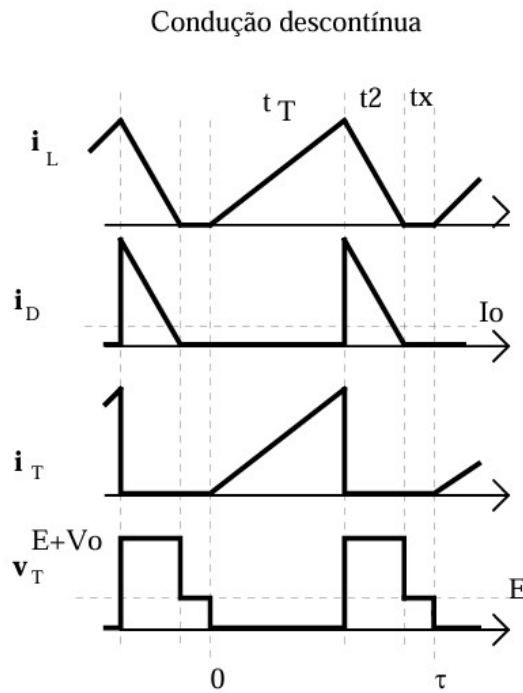
$$iL_{Med} = \frac{Il_{max} \cdot tT}{2 \cdot \tau} \quad (\text{Corrente Média do Indutor})$$

Do balanço de potência tem-se:

$$iL = \frac{Io \cdot Vo}{E} \quad (\text{Corrente do Balanço de Potências})$$

Em sequência, na Figura será ilustrado o ciclo de trabalho do conversor no modo de condução Descontínua.

Figura 16 – Comportamento para Modo de Condução Descontínua



Fonte: POMILIO, José de (2010)

Observa-se, que para baixos valores de I_o , o conversor tende a operar no modo descontínuo, logo, para que isso não ocorra, deve-se garantir um consumo mínimo de corrente (Pomilio, 2010c).

3.2.3 Cálculo de L e de C

O limiar entre as situações de condução contínua e descontínua é dado por (Pomilio, 2010c) :

$$I_o = \frac{V_o \cdot \tau \cdot (1 - \delta)^2}{2 \cdot L} \quad (\text{Corrente da carga})$$

$$L_{min} = \frac{E \cdot \tau \cdot \delta \cdot (1 - \delta)}{2 \cdot I_{omin}} \quad (\text{Indutância Mínima})$$

$$C_o = \frac{I_{omax} \cdot \tau \cdot \delta}{\Delta_{Vo}} \quad (\text{Cálculo da Capacitância})$$

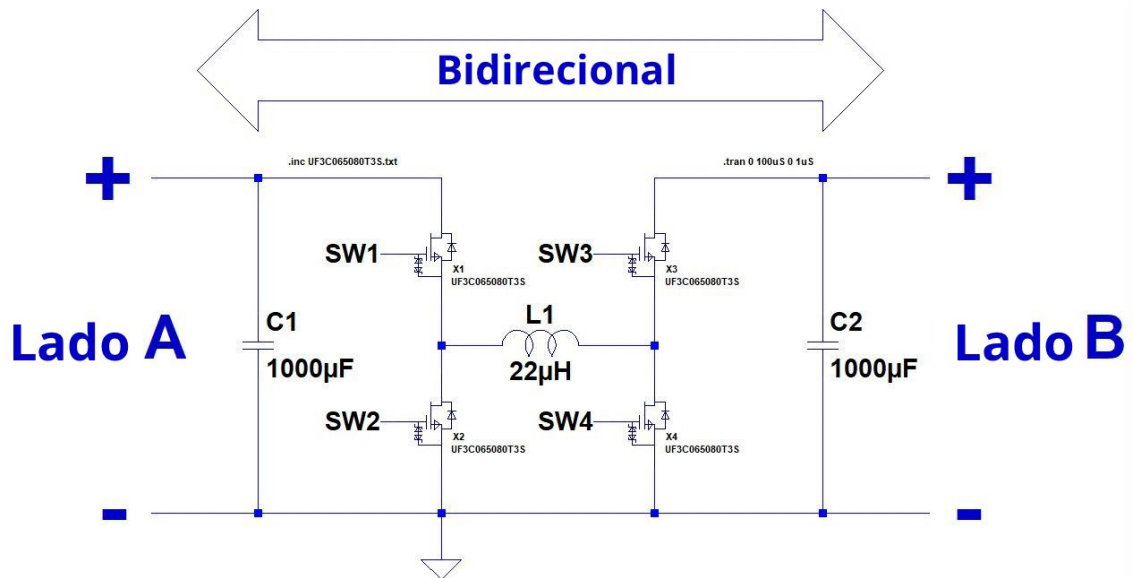
3.2.4 Conversor Buck-Boost Bidirecional

Os conversores CC-CC bidirecionais são dispositivos essenciais em sistemas de energia moderna, permitindo o fluxo de potência em dois sentidos entre duas fontes ou cargas de tensão contínua (CC). Eles são amplamente utilizados em aplicações que exigem recarga e descarga de energia, como em veículos elétricos, sistemas de armazenamento com baterias.

Esses conversores operam alternando entre modos *boost* (elevação de tensão) e *buck* (redução de tensão), dependendo do sentido do fluxo de energia. Por exemplo, em um veículo elétrico, durante a frenagem regenerativa, o conversor atua no modo *boost* para elevar a tensão da bateria e armazenar energia. No sentido oposto, no modo *buck*, ele fornece energia do banco de baterias para os motores. O controle é realizado por técnicas de modulação por largura de pulso (PWM) e chaveamento de semicondutores (como MOSFETs ou IGBTs).

Algumas aplicações práticas: Em veículos elétricos, os conversores bidirecionais integram baterias e sistemas de recuperação de energia, alternando entre modos *boost* (armazenamento na frenagem regenerativa) e *buck* (alimentação dos motores). Em sistemas com células fotovoltaicas, regulam o fluxo entre painéis solares e baterias, armazenando excedentes diurnos e liberando energia à noite. Já em sistemas aeroespaciais, gerenciam a transferência entre células a combustível (energia contínua) e supercapacitores (picos de demanda), garantindo eficiência em missões críticas. Na figura 18, pode-se observar um exemplo de circuito de um conversor bidirecional.

Figura 17 – Circuito Conversor Bidirecional



Fonte: Power Electronics News (2020)

3.3 Controle Fuzzy

O controle fuzzy é uma técnica de controle baseada na lógica difusa, que se destaca por sua capacidade de lidar com sistemas não lineares, incertos e com difícil modelagem matemática. Diferentemente de controladores convencionais, como o PID, que exigem um modelo preciso do sistema, o controlador fuzzy baseia-se em regras heurísticas formuladas a partir do conhecimento empírico do comportamento do sistema. Isso proporciona maior flexibilidade e robustez em aplicações práticas.

O controle fuzzy é estruturado em quatro etapas fundamentais: fuzzificação, base de regras, mecanismo de inferência e desfuzzificação. Na etapa de fuzzificação, os valores numéricos de entrada, como o erro e a variação do erro, são transformados em valores pertencentes a conjuntos com diferentes graus de pertinência. Em seguida, esses valores são avaliados por um conjunto de regras que descrevem o comportamento do sistema com base em combinações de entrada. O mecanismo de inferência processa os resultados dessas regras e gera uma saída representada em forma difusa. Por fim, a etapa de desfuzzificação converte essa saída em um valor numérico, adequado para o controle do sistema (Lee, 1990; Orive et al., 2016).

Essa abordagem é especialmente útil em sistemas de conversão de energia, como os conversores CC-CC, nos quais as características de operação variam significativamente com o tempo. Em particular, o conversor buck-boost bidirecional de quatro chaves opera

em uma ampla faixa de tensões e correntes, tanto no modo buck quanto no boost, e pode sofrer variações bruscas na tensão de entrada e na carga conectada. Nesses casos, um controlador tradicional como o PID teria dificuldades para manter o desempenho ideal sem reconfiguração frequente ou adaptação de ganhos.

A lógica fuzzy, por outro lado, apresenta desempenho consistente mesmo diante dessas incertezas e variações, uma vez que as decisões de controle são tomadas com base em regras que refletem diretamente o conhecimento prático sobre o sistema, dispensando a linearização em torno de pontos específicos de operação ([Al-shamasin; Khazaleh, 2012](#)). Isso torna o controle fuzzy particularmente vantajoso para aplicações em ambientes dinâmicos e exigentes, como sistemas automotivos, fontes renováveis e unidades de armazenamento de energia.

3.3.1 Modelagem de Sistemas

3.3.1.1 Modelagem Matemática de Sistemas Físicos (Mecânicos, Elétricos, Térmicos, Hidráulicos).

3.3.1.2 Equações diferenciais.

3.3.1.3 Representação no domínio do tempo.

3.3.2 Transformada de Laplace

3.3.2.1 Definição e propriedades.

3.3.2.2 Resolução de equações diferenciais.

3.3.3 Função de Transferência

3.3.3.1 Definição e obtenção a partir de sistemas físicos.

3.3.3.2 Polos e zeros: significados e localização.

3.3.4 Análise no Domínio do Tempo

3.3.5 Estabilidade de Sistemas no Domínio do Tempo

3.3.5.1 Critério de Routh-Hurwitz.

3.3.5.2 Lugar das raízes

3.3.6 Análise no Domínio da Frequência

3.3.6.1 Diagramas de Bode: ganho e fase.

3.3.7 Realimentação

3.3.7.1 Controle proporcional (P), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD) e proporcional-integral-derivativo (PID)

3.3.8 Controle Contínuo (Analógico)

3.3.9 Controle Discreto (Digital)

3.3.10 Espaço de Estados

4 METODOLOGIA

De acordo com a imagem abaixo.



Figura 18 – Teste imagem02

5 RESULTADOS

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

6 CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS

AL-SHAMASIN, M.; KHAZALEH, A. Design and simulation of a fuzzy logic controller for buck and boost converters. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, v. 6, n. 10, p. 813–818, 2012. Citado na página 31.

ANJOS, E. *A Evolução da Eletrônica Embarcada na Indústria Automobilística Brasileira*. TCC — Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano, SP, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.

ARAÚJO, G. M. D. S. Projeto de conversor cc-cc sepic para controle de módulos peltier aplicados a um refrigerador portátil automotivo. *Universidade Federal de Campina Grande - Repositório*, p. 24, 2017. Citado na página 23.

Caio Moraes. *Conversor Boost Passo a Passo*. 2023. Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/conversor-boost-mcc/>>. Acesso em 01/02/2025. Citado na página 20.

Camila Schuina Neves, Ana Pavani. *CIRCUITOS RLC DE SEGUNDA ORDEM EM DIFERENTES TOPOLOGIAS*. 2022. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/27280/index.html>>. Acesso em 01/02/2025. Citado na página 19.

Carglass. *Transição energética no setor auto*. 2023. Disponível em: <<https://www.carglass.pt/pt/blog/informacoes-auto/transicao-energetica/>>. Acesso em: 13/01/2025. Citado na página 10.

Carlos Delfino. *Fontes Chaveadas: Topologias e Aplicações*. 2024. Disponível em: <<https://basicaodaeletronica.com.br/eletronica-intermediaria/fontes-chaveadas-topologias-e-aplicacoes/>>. Acesso em 31/01/2025. Citado na página 18.

CÔRTEZ, L. R. C. Aplicação distribuída dos conversores buck-boost com quatro interruptores para minimizar efeitos de sobremento e maximizar a extração de potência em módulos fotovoltaicos. *Repositório UFU - PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA*, p. 50, 2021. Citado na página 22.

electricity-magnetism-org. *Conversor DC-DC síncrono*. 2025. Disponível em: <<https://www.electricity-magnetism.org/pt-br/conversor-dc-dc-sincrono/>>. Acesso em 01/01/2025. Citado na página 21.

FALIN, J. Designing dc/dc converters based on sepic topology. *Analog Applications Journal*, p. 18 – 23, 2008. Citado na página 23.

J2534. *Explicação Básica sobre Rede CAN em Veículos Automotivos: Entendendo o Sistema de Comunicação*. 2024. Disponível em: <<https://j2534.com.br/2024/01/22/explicacao-basica-sobre-rede-can-em-veiculos-automotivos-entendendo-o-sistema-de-comunicacao/>>. Acesso em: 17/01/2025. Citado na página 11.

LEE, C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. part i. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, IEEE, v. 20, n. 2, p. 404–418, 1990. Citado na página 30.

- LIU, X. et al. A non-isolated bidirectional dc–dc converter with adaptive phase shift control for dc distribution systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 63, n. 8, p. 4857–4868, 2016. Citado na página 14.
- ORIVE, D. et al. Fuzzy control for dc-dc buck converters: a comparative study. In: *Ieee. 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. [S.l.], 2016. p. 1928–1933. Citado na página 30.
- PASSINO, K. M.; YURKOVICH, S. *Fuzzy Control*. [S.l.]: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1998. Citado na página 15.
- POMILIO, J. A. Topologias básicas de conversores cc-cc não-isolados. *Fontes Chaveadas - Capítulo 1*, p. 12 – 16, 2010. Citado na página 23.
- POMILIO, J. A. Topologias básicas de conversores cc-cc não-isolados. *Fontes Chaveadas - Capítulo 1*, p. 20, 2010. Citado na página 24.
- POMILIO, J. A. Topologias básicas de conversores cc-cc não-isolados. *Fontes Chaveadas - Capítulo 1*, p. 13, 2010. Citado 5 vezes nas páginas 25, 26, 27, 28 e 29.
- Repação Automotiva. *A História da Injeção Eletrônica: Do Passado ao Presente*. 2025. Disponível em: <<https://reparacaoautomotiva.com.br/2023/07/05/a-historia-da-injecao-eletronica-do-passado-ao-presente/>>. Acesso em: 17/01/2025. Citado na página 11.
- SEPTIAWAN, R.; TAHTAWI, A.; ILMAN, M. Control of bidirectional dc-dc converter with proportional integral derivative. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, v. 15, n. 1, p. 101–109, 2024. Citado na página 14.
- Thiago Oliveira. *Choppers: Conversores CC/CC*. 2024. Disponível em: <<https://eltgeral.com.br/choppers-eltpot/>>. Acesso em 30/01/2025. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- Thiago Oliveira. *Conversor Buck: Da Teoria ao Projeto*. 2024. Disponível em: <<https://eltgeral.com.br/conversor-buck-da-teoria-ao-projeto/>>. Acesso em 01/02/2025. Citado na página 19.
- Tiandiano. *A Evolução Dos sistemas Elétricos Automotivos: Uma Jorandada da Década de 1950 À Década de 1970*. 2024. Disponível em: <<https://tiandianconnector.com/pt/the-evolution-of-automotive-electrical-systems-a-journey-from-the-1950s-to-the-1970s/>>. Acesso em: 17/01/2025. Citado na página 10.
- TOFOLI, F. L. Conversores cc-cc não isolados análise, modelagem e controle. *Artliber Editora*, p. 7 e 37, 2018. Citado na página 22.
- Versis. *A Eletrônica na Evolução do Automóvel*. 2017. Disponível em: <<https://versis.com.br/eletronica-na-evolucao-do-automovel/>>. Acesso em: 17/01/2025. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- VISWANATHA, B.; VENKATA, Y.; RAJESWARI, R. Stability and dynamic response of analog and digital control loops of bidirectional buck-boost converter for renewable energy applications. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, v. 8, n. 6, p. 2091–2096, 2019. Citado na página 14.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, Elsevier, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965. Citado na página 15.

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. [S.l.]: ISA—The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. Citado na página 14.