

Controle PID Digital Aplicado a Conversor CC CC Buck Boost Bidirecional

Marcelo Oliveira de Jesus Júnior

Victor Pereira dos Santos

William Souza Santos

São Paulo

2025

Controle PID Digital Aplicado a Conversor CC CC Buck Boost Bidirecional

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

[TEXTO PROVISÓRIO]

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.

"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

[TEXTO PROVISÓRIO]

TEXTO EM INGLÊS COM ALGUMAS PALAVRAS CHAVES (Keywords)

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 – Sistema de controle de malha fechada do conversor buck-boost com controlador PID discreto	13
Figura 4 – Classificação Conversores CC-CC	17
Figura 5 – Teste imagem02	26

LISTA DE ABREVIATURAS

[TEXTO PROVISÓRIO]

TEXTO EM INGLÊS COM ALGUMAS PALAVRAS CHAVES (Keywords)

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	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	Topologias e Classificações de Conversores CC-CC	17
3.1.1	Choppers	18
3.1.2	Fontes Chaveadas Não Isoladas	18
3.1.2.1	Conversores de Segunda Ordem	18
3.1.2.1.1	Conversores Buck	18
3.1.2.1.2	Conversores Boost	19
3.1.2.1.3	Conversores Buck-Boost	19
3.1.2.1.4	Conversores Síncronos (2Q)	19
3.1.2.1.5	Conversores de Quatro Chaves	19
3.1.2.2	Conversores de Quarta Ordem	20
3.1.2.2.1	Conversores SEPIC	20
3.1.2.2.2	Conversores CUK	21
3.1.2.2.3	Conversores ZETA	21
3.1.3	Fontes Chaveadas Isoladas	22
3.1.3.1	Conversores Flyback	22
3.1.3.2	Conversores Forward	22
3.1.3.3	Conversores Push-Pull	23
3.1.3.4	Conversores Half-Bridge	23
3.1.3.5	Conversores Dual Active Bridge	24
3.1.3.6	Conversores Ressonantes	24
3.2	Sistemas de Controle	25
4	METODOLOGIA	26
5	RESULTADOS	27

6	CONCLUSÕES	28
	REFERÊNCIAS	29

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 em nosso cotidiano. 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 PID, pelo qual o combustível passa até a câmara de combustão de um veículo, até sistemas complexos de direção autônoma, como o ADAS (Advanced Driver Assistance System).

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 sistemas de navegação 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 (Advanced Driver Assistance Systems) 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 \(2017\)](#).

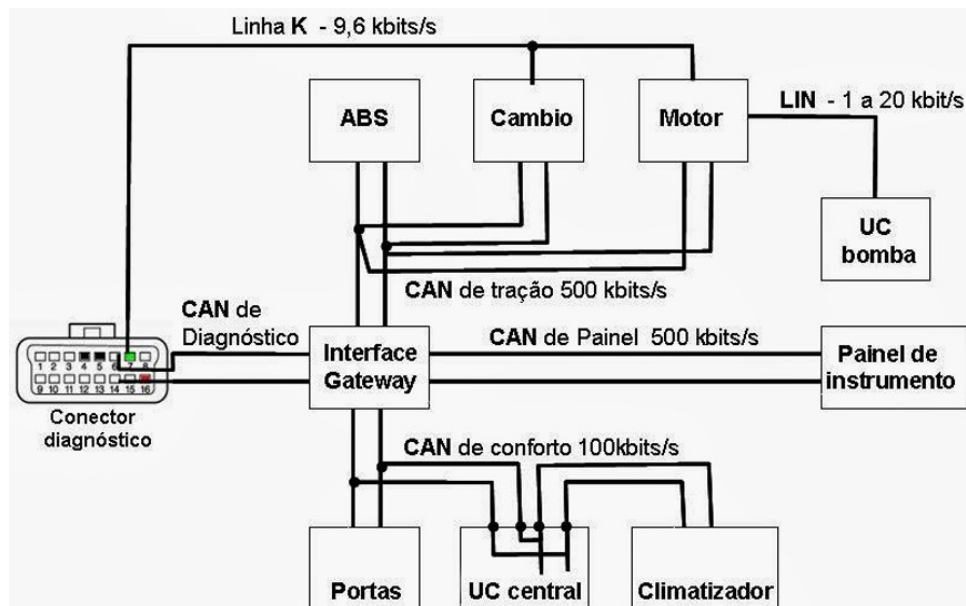
1.2 Unidades Eletrônicas Automotivas

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 1.

Figura 1 – Unidades Eletrônicas Automotivas Conectadas pelo Barramento CAN

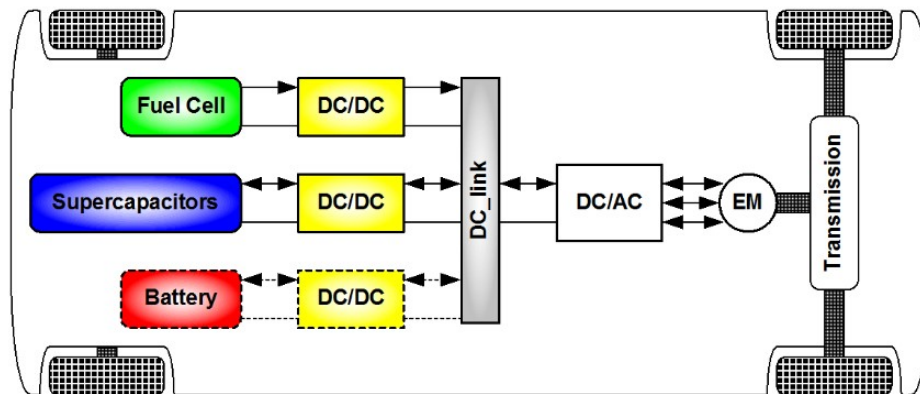


Fonte: Material de Aula, "Circuitos Eletrônicos Automotivos", Prof. Leopoldo Yoshioka, Escola Politécnica da USP (EPUSP).

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, quando analisamos essa questão do ponto de vista da tensão elétrica, percebemos que ainda há um desafio a ser enfrentado, 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 abaixo.

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

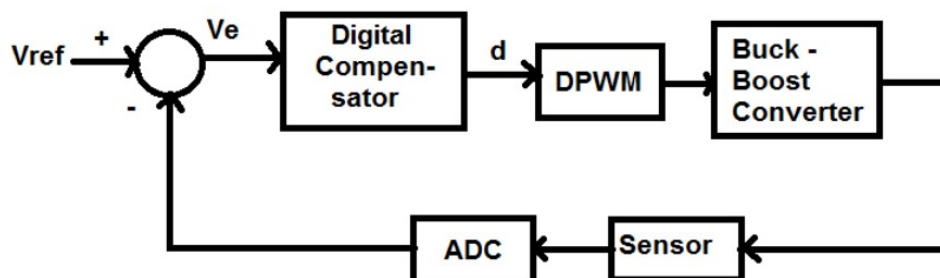


Fonte: Monzer Al Sakka, Joeri Van Mierlo e Hamid Gualousa, DC/DC Converters for Electric Vehicles, disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/19583>.

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. Esse sistema será aplicado a um conversor CC-CC Buck-Boost bidirecional, permitindo o controle eficiente e robusto de tensão e corrente em ambas as direções, com foco na integração de tecnologias modernas de controle digital. Além disso, o trabalho buscará otimizar o desempenho energético e avaliar a viabilidade prática da solução em aplicações reais, como em sistemas automotivos. A topologia de controle do conversor CC-CC buck boost mais comum é ilustrado na figura 3 abaixo.

Figura 3 – Sistema de controle de malha fechada do conversor buck-boost com controlador PID discreto



Fonte: THANGASWAMY, Sree Renga Raja; SUBRAMANIAN, Vijayalakshmi. Time Domain Based Digital Controller for Buck-Boost Converter. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/279874767>.

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 no MATLAB.
- Desenvolvimento de uma simulação do circuito do conversor CC-CC Buck-Boost com o objetivo de dimensionar e testar características elétricas no LTSPICE, 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 na pesquisa, foram selecionados, com base em seus títulos, resumos e alinhamento com os objetivos do estudo, aqueles que se mostraram mais relevantes para a fundamentação teórica e prática deste trabalho. Os artigos escolhidos foram analisados em detalhes e são comentados a seguir, destacando suas contribuições para o entendimento e aplicação do controle PID digital em conversores CC-CC 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" dos pesquisadores [Viswanatha, Venkata e Rajeswari \(2019\)](#) explora o desempenho de laços de controle analógico e digital aplicados a conversores buck-boost bidirecionais em contextos de geração de energia renovável. O objetivo principal do estudo é analisar a estabilidade e a resposta dinâmica desses sistemas sob diferentes condições de operação. Em resumo, pode-se concluir que o controle digital oferece vantagens significativas sobre o analógico em termos de flexibilidade, estabilidade e resposta dinâmica. Isso torna os controladores digitais ideais para aplicações modernas em sistemas de energia renovável.

Um trabalho com ênfase em conversores CC-CC, realizado pelos pesquisadores [Liu et al. \(2016\)](#) desenvolveu um projeto de controle de um conversor bidirecional DC-DC não isolado, capaz de operar nos modos buck e boost em todas as direções de transferência de energia. O objetivo principal é melhorar a eficiência do conversor, especialmente em condições de baixa carga, utilizando uma estratégia de controle de deslocamento de fase adaptativo (Adaptive Phase-Shift - APS). O estudo propõe o controle APS como uma solução baseada em software, eliminando a necessidade de circuitos adicionais, o que reduz a instabilidade e problemas de suscetibilidade a ruídos. Um protótipo de 300 W foi implementado e testado, demonstrando uma melhoria na eficiência de 12,2% em cargas leves e 4,0% em cargas médias.

O artigo intitulado "Control of Bidirectional DC-DC Converter with Proportional Integral Derivative", dos pesquisadores [Septiawan, Tahtawi e Ilman \(2024\)](#), apresenta um estudo sobre o controle de conversores DC-DC bidirecionais utilizando controle PID. A pesquisa aborda o projeto e a implementação desse tipo de conversor em dois modos operacionais: descarga e carga. As simulações foram realizadas no MATLAB/Simulink,

e os experimentos utilizaram hardware baseado em um microcontrolador Arduino UNO. No modo de descarga, os resultados simulados indicam tempos de subida e acomodação inferiores a 1 segundo, com erro em regime permanente menor que 2%. Entretanto, nos experimentos com hardware, os tempos de resposta foram mais lentos e os erros ligeiramente maiores. No modo de carga, a implementação foi limitada e não utilizou o controle PID no hardware. O artigo sugere que melhorias podem ser realizadas, como a aplicação de controle PID no modo de carga e a introdução de controladores PID adaptativos ou baseados em lógica fuzzy para maior robustez.

Com base nesse estudo bibliográfico, o propósito é desenvolver um algoritmo que empregue técnicas de controle PID digital integradas ao conversor CC-CC. O objetivo é realizar o controle e a otimização de um conversor DC-DC bidirecional, garantindo o gerenciamento eficiente de energia em sistemas de armazenamento ou dispositivos elétricos.

O sistema proposto busca melhorar a estabilidade operacional do conversor, otimizando os tempos de resposta e minimizando os erros em regime permanente nos modos de carga e descarga.

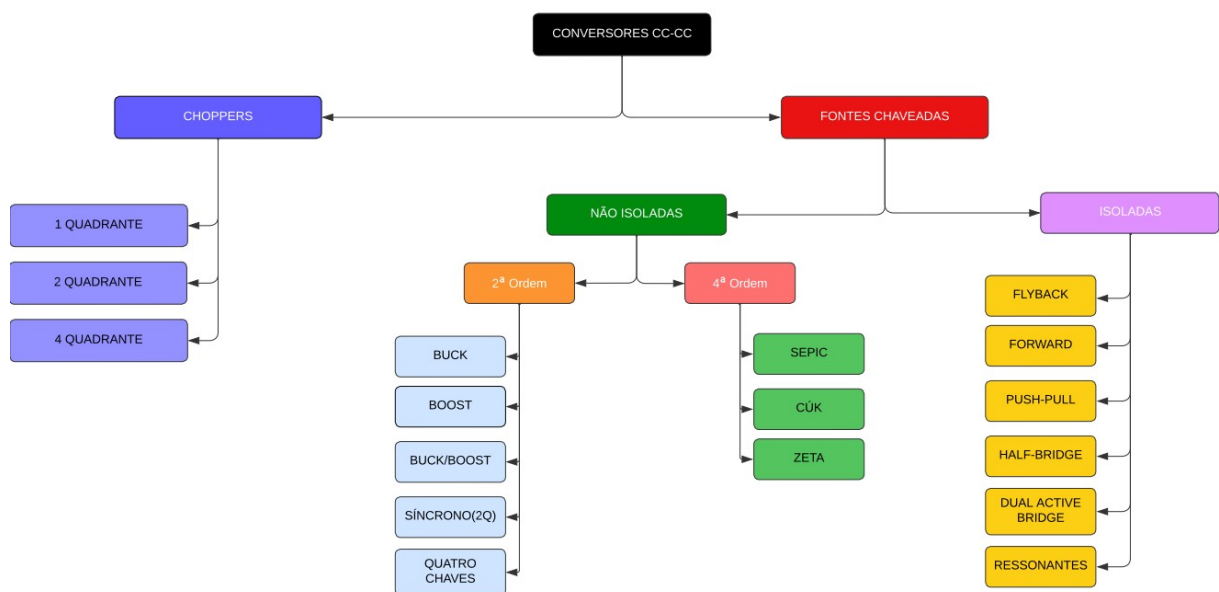
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

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. Abaixo, 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 X abaixo.

Figura 4 – 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. Eles são classificados com base nos quadrantes do plano tensão-corrente em que operam:

Chopper de 1 Quadrante que opera apenas no primeiro quadrante (tensão e corrente positivas), usado em aplicações como controle de motores de corrente contínua em direção única.

Chopper de 2 Quadrantes que opera no primeiro e segundo quadrantes. Permite fluxo bidirecional de corrente, adequado para aplicações como frenagem regenerativa em motores.

Chopper de 4 Quadrantes que opera em todos os quadrantes, permitindo controle completo de direção e reversão de fluxo de energia. Amplamente utilizado em sistemas de tracionamento elétrico e aplicações que exigem controle bidirecional completo.

3.1.2 Fontes Chaveadas Não Isoladas

As fontes chaveadas não isoladas transferem energia diretamente entre entrada e saída, sem utilização de transformadores. 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.

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.

3.1.2.1.2 Conversores Boost

O conversor Boost é um circuito projetado para aumentar a tensão de entrada para um nível mais alto na saída, utilizando um indutor, um interruptor controlado, e um diodo. Ele é amplamente usado em sistemas onde a tensão de alimentação é insuficiente para atender à carga, como em fontes de energia para LEDs de alta potência, sistemas fotovoltaicos e veículos elétricos. O conversor opera acumulando energia no indutor durante o estado de condução do interruptor e transferindo essa energia para a saída quando o interruptor é desligado. Sua eficiência elevada e capacidade de fornecer uma tensão de saída maior que a entrada fazem dele uma solução essencial em aplicações de energia portátil e embarcada.

3.1.2.1.3 Conversores Buck-Boost

O conversor Buck-Boost é um circuito capaz de aumentar ou reduzir a tensão de entrada, dependendo do ciclo de trabalho aplicado ao interruptor. 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. Sua versatilidade o torna amplamente utilizado em aplicações como fontes de alimentação portáteis, iluminação LED e sistemas de energia renovável, onde a tensão precisa ser adaptada dinamicamente para diferentes demandas de carga.

3.1.2.1.4 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. 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.

3.1.2.1.5 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 flexibi-

lidade no controle da conversão de energia. Essa configuração permite operar de forma bidirecional, possibilitando o fluxo de energia em ambas as direções, 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.

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.

Devido à sua complexidade, conversores de quarta ordem oferecem maior capacidade de controle, sendo empregados em aplicações que exigem alta precisão e estabilidade. A interação entre múltiplos elementos de armazenamento permite uma melhor filtragem do ripple na saída, resultando em uma redução significativa desse efeito indesejado. Além disso, são adequados para sistemas que exigem eficiência elevada e rápida resposta dinâmica, proporcionando um desempenho aprimorado.

Esses conversores são comuns em sistemas avançados, como energia renovável, incluindo painéis solares com MPPT (Maximum Power Point Tracking), equipamentos de comunicação e dispositivos eletrônicos de alta performance. Nessas aplicações, o controle preciso de tensão e corrente é essencial para garantir a operação otimizada e confiável dos sistemas.

3.1.2.2.1 Conversores SEPIC

Os conversores SEPIC (Single-Ended Primary Inductor Converter) são topologias de conversores DC-DC que permitem converter uma tensão de entrada para uma tensão de saída que pode ser maior ou menor do que a tensão de entrada. Eles são caracterizados pela capacidade de operar com uma tensão de entrada que varia acima ou abaixo do nível da tensão de saída, o que os torna flexíveis em diversas aplicações.

A principal vantagem do conversor SEPIC é sua capacidade de fornecer uma saída estável, independentemente das variações da tensão de entrada, o que é ideal para fontes de alimentação que possuem flutuações na tensão de entrada. Além disso, ele apresenta uma boa eficiência, especialmente em sistemas com requisitos de baixo ripple na saída.

Os conversores SEPIC são amplamente utilizados em sistemas de alimentação para dispositivos portáteis, baterias recarregáveis, sistemas fotovoltaicos e outras aplicações onde a conversão de tensão precisa ser flexível e eficiente. Eles são uma boa opção quando a tensão de entrada pode ser tanto maior quanto menor do que a tensão desejada na saída.

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.

Uma das vantagens dos conversores CUK é que eles apresentam uma excelente filtragem de ripple, proporcionando uma saída com baixa ondulação de tensão. Além disso, devido à sua estrutura, esses conversores podem ser mais eficientes em algumas aplicações em comparação com outras topologias de conversores.

Os conversores CUK são aplicados em sistemas de alimentação de dispositivos eletrônicos, circuitos de controle de potência e fontes de alimentação que exigem alta eficiência, bom controle de ripple e a capacidade de fornecer uma tensão de saída que seja tanto maior quanto menor do que a tensão de entrada. Eles são úteis, por exemplo, em sistemas fotovoltaicos, baterias recarregáveis e outras aplicações que demandam flexibilidade na conversão de tensão.

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.

Os conversores ZETA oferecem uma boa eficiência, uma vez que não há inversão de polaridade na conversão de energia, e são conhecidos pela baixa ondulação (ripple) na saída. Eles também apresentam uma resposta dinâmica estável e controlável, sendo apropriados para aplicações onde a tensão de saída precisa ser regulada de forma precisa, mesmo com variações na tensão de entrada.

São utilizados em diversas aplicações, como fontes de alimentação para sistemas eletrônicos, dispositivos de controle de potência, sistemas de baterias e dispositivos portáteis,

onde a conversão de tensão precisa ser flexível e eficiente, garantindo uma tensão de saída estável e confiável.

3.1.3 Fontes Chaveadas Isoladas

As fontes chaveadas isoladas utilizam transformadores para desacoplar os circuitos de entrada e saída, garantindo maior segurança elétrica e flexibilidade de projeto. Os principais tipos incluem:

3.1.3.1 Conversores Flyback

Os conversores Flyback são uma das topologias de conversores DC-DC mais utilizadas, especialmente em fontes de alimentação isoladas. Eles funcionam com um transformador que não só realiza a conversão de tensão, mas também proporciona isolamento galvânico entre a entrada e a saída. A principal característica do conversor Flyback é a sua capacidade de fornecer uma ampla gama de tensões de saída, tanto menores quanto maiores que a tensão de entrada.

Esses conversores operam de forma pulsada, com um transistor que se liga e desliga, armazenando energia no transformador durante o ciclo de condução e transferindo essa energia para a carga na fase de desarme. O conversor Flyback é eficaz na conversão de potência em níveis baixos, sendo comum em fontes de alimentação para dispositivos de baixa potência, como carregadores de baterias, TVs, sistemas de telecomunicações e equipamentos de controle de potência.

Uma das principais vantagens do conversor Flyback é seu design simples e custo relativamente baixo, além de ser ideal para aplicações que exigem isolamento entre a entrada e a saída. Ele também oferece boa eficiência e pode ser projetado para operar em modo contínuo ou discreto, dependendo dos requisitos da aplicação.

3.1.3.2 Conversores Forward

Os conversores Forward são uma topologia de conversores DC-DC isolados que utilizam um transformador para fornecer isolamento entre a entrada e a saída. Ao contrário do conversor Flyback, o conversor Forward opera com um indutor de saída que ajuda a transferir a energia de maneira mais eficiente. Durante a operação, a energia é armazenada no transformador e transferida diretamente para a carga, com um controle preciso do fluxo de energia.

Uma das principais características dos conversores Forward é que eles operam com a chave de comutação ligada por um período de tempo específico, resultando em uma operação mais eficiente, especialmente em aplicações de maior potência. O conversor Forward é capaz de fornecer tensões de saída que podem ser ajustadas para serem maiores

ou menores que a tensão de entrada, e é muito eficiente em sistemas de alimentação que exigem alta potência e controle rigoroso da tensão de saída.

Os conversores Forward são usados principalmente em fontes de alimentação de alta potência, como em sistemas de telecomunicações, servidores, equipamentos industriais e fontes de alimentação de computadores. Sua principal vantagem é a alta eficiência, robustez e o desempenho em aplicações de maior potência, ao mesmo tempo em que fornecem isolamento galvânico, o que aumenta a segurança do sistema.

3.1.3.3 Conversores Push-Pull

Os conversores Push-Pull são uma topologia de conversores DC-DC que utilizam dois transistores para fornecer uma conversão eficiente de energia. Eles operam com um transformador, o que oferece isolamento galvânico entre a entrada e a saída, e empregam um método de chaveamento alternado: quando um transistor está ligado, o outro está desligado, e vice-versa, "empurrando" e "puxando" a energia através do transformador.

Essa topologia é frequentemente utilizada em aplicações de média a alta potência devido à sua capacidade de fornecer uma conversão de energia eficiente com baixa distorção. O transformador utilizado nos conversores Push-Pull ajuda a balancear a carga e distribuir a energia de forma eficaz, minimizando perdas e melhorando a eficiência global do sistema.

Os conversores Push-Pull são usados em fontes de alimentação para equipamentos industriais, fontes de alimentação de alta potência, sistemas de telecomunicações, e em outras aplicações onde a eficiência e o controle preciso da tensão são cruciais. Uma das vantagens dessa topologia é a sua simplicidade e robustez, o que a torna uma opção atraente para sistemas que exigem alta eficiência e isolamento.

3.1.3.4 Conversores Half-Bridge

Os conversores Half-Bridge são uma topologia de conversores DC-DC que utilizam dois interruptores (tipicamente transistores) para converter a energia de forma eficiente. Como o nome sugere, essa configuração utiliza dois transistores conectados em série entre a entrada e o meio do transformador, com a carga conectada ao ponto de meio. Essa disposição permite a criação de um ciclo de comutação eficiente, onde a energia é alternadamente transferida através do transformador, proporcionando um bom controle de tensão de saída.

Uma das principais vantagens do conversor Half-Bridge é sua capacidade de operar com alta eficiência e menor perda de comutação, tornando-o ideal para aplicações de média e alta potência. Além disso, o conversor Half-Bridge pode ser projetado para operar em modo contínuo ou discreto, oferecendo flexibilidade dependendo da necessidade de controle da tensão e corrente.

Essa topologia é comumente usada em fontes de alimentação industriais, sistemas de controle de potência e em aplicações de inversores, como sistemas de energia renovável e motor de controle. Sua principal vantagem é a simplicidade, eficiência e capacidade de fornecer uma conversão de energia estável e confiável em sistemas de maior potência.

3.1.3.5 Conversores Dual Active Bridge

Os conversores Dual Active Bridge (DAB) são uma topologia de conversores DC-DC isolados que utilizam dois ponte H (uma em cada lado do circuito) para transferir energia de forma bidirecional entre dois barramentos DC. Essa topologia é particularmente eficiente em sistemas de alta potência, onde é necessário o controle preciso da tensão e da direção da energia, como em sistemas de armazenamento de energia, como baterias, ou em conversores para sistemas de transmissão de energia elétrica.

Os conversores DAB são caracterizados por seu alto desempenho em termos de eficiência, pois a energia é transferida por meio de um transformador de alta frequência, o que permite o uso de componentes menores e redução de perdas. Além disso, sua operação bidirecional permite tanto a conversão de energia de uma fonte para uma carga quanto a reversão do fluxo de energia, o que os torna ideais para aplicações como sistemas de armazenamento de energia e conversores de energia renovável.

Eles são amplamente utilizados em sistemas de transmissão de energia de longa distância, como em sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS), redes elétricas e veículos elétricos, onde a eficiência e o controle preciso da transferência de energia são essenciais. A principal vantagem do conversor DAB é sua flexibilidade, alta eficiência e a capacidade de operar de forma bidirecional, o que proporciona uma ampla gama de aplicações em ambientes de alta potência e de controle dinâmico de energia.

3.1.3.6 Conversores Ressonantes

Os conversores ressonantes são topologias de conversores DC-DC que operam com circuitos ressonantes, ou seja, utilizam indutores e capacitores para criar uma frequência de ressonância específica que permite a troca de energia entre os componentes de maneira eficiente. A principal característica desses conversores é que eles operam em regimes de ressonância, onde a energia é transferida com mínima perda, aproveitando as características naturais dos circuitos ressonantes para otimizar a eficiência da conversão.

Existem diferentes tipos de conversores ressonantes, como o conversor Ressonante Série, o Ressonante Paralelo e o Ressonante com ZVS (Zero Voltage Switching) e ZCS (Zero Current Switching), que são projetados para reduzir as perdas de comutação, proporcionando uma operação mais eficiente, especialmente em aplicações de alta potência.

A principal vantagem dos conversores ressonantes é sua alta eficiência, especial-

mente em condições de alta frequência de operação, o que reduz as perdas associadas à comutação dos dispositivos semicondutores. Além disso, esses conversores têm uma excelente capacidade de minimizar o ripple de tensão e corrente, o que é essencial em aplicações que exigem alta precisão e qualidade na conversão de energia.

Os conversores ressonantes são frequentemente usados em fontes de alimentação de alta eficiência, sistemas de alimentação para dispositivos de telecomunicações, sistemas de energia renovável, e aplicações industriais de alta potência, onde a eficiência e a minimização das perdas são cruciais para o desempenho do sistema.

3.2 Sistemas de Controle

4 METODOLOGIA

De acordo com a imagem abaixo.



Figura 5 – 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

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.

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.

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.

LIU, K.-B. et al. Analysis and controller design of a universal bidirectional dc-dc converter. *Energies*, 2016. Citado na página 15.

Reparação 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, F. R.; TAHTAWI, A. R. A.; ILMAN, S. M. Control of bidirectional dc-dc converter with proportional integral derivative. *Journal of Fuzzy Systems and Contro*, v. 02, 2024. Citado na página 15.

Tiandiano. *A Evolução Dos sistemas Elétricos Automotivos: Uma Jorjada da Década de 1950 Á 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.

Versis. *A Eletrônica na Evolução do Automóvel*. 2017. Disponível em: <<https://versis.com.br/electronica-na-evolucao-do-automovel/>>. Acesso em: 17/01/2025. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.

VISWANATHA; VENKATA; RAJESWARI. Stability and dynamic response of analog and digital control loops of bidirectional buck-boost converter for renewable energy applications. *International Journal of Recent Technology and Enginerring*, 2019. Citado na página 15.