

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 .	11
Figura 2 – Disposição de um módulo CC/CC em veículos	12
Figura 3 – Sistema de controle de malha fechada do conversor buck-boost com controlador PID discreto	12
Figura 4 – Classificação Conversores CC-CC	16
Figura 5 – Teste imagem02	17

LISTA DE ABREVIATURAS

[TEXTO PROVISÓRIO]

TEXTO EM INGLÊS COM ALGUMAS PALAVRAS CHAVES (Keywords)

SUMÁRIO

Lista de ilustrações	6
1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Desenvolvimento da Eletrônica Automotiva	9
1.2 Unidades Eletrônicas Automotivas	10
1.3 Motivação	11
1.4 Objetivos	12
2 ESTUDO BIBLIOGRÁFICO	14
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 Topologias e Classificações de Conversores CC-CC	16
4 METODOLOGIA	17
5 RESULTADOS	18
6 CONCLUSÕES	19
REFERÊNCIAS	20

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 \(2017\)](#).

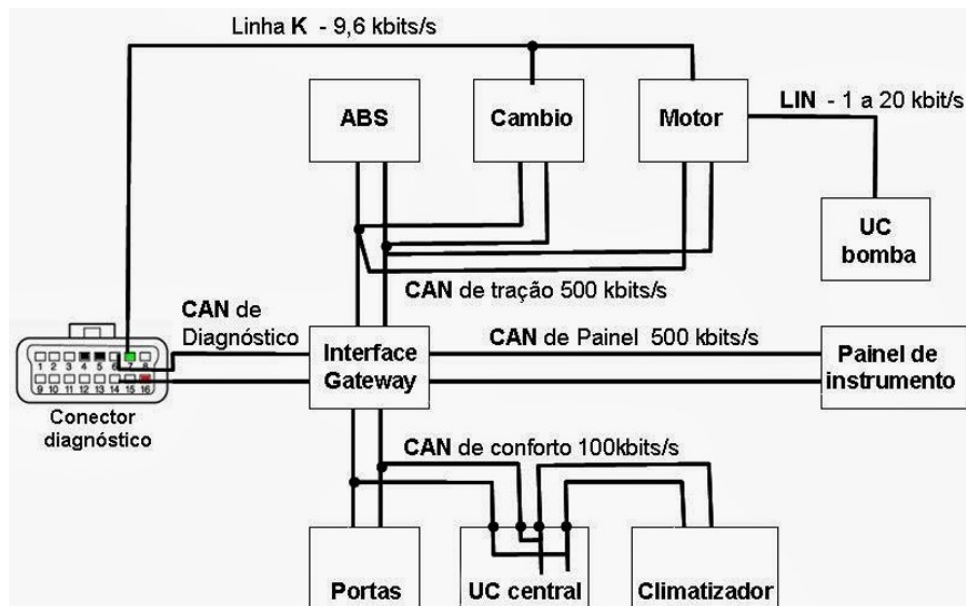
1.2 Unidades Eletrônicas Automotivas

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

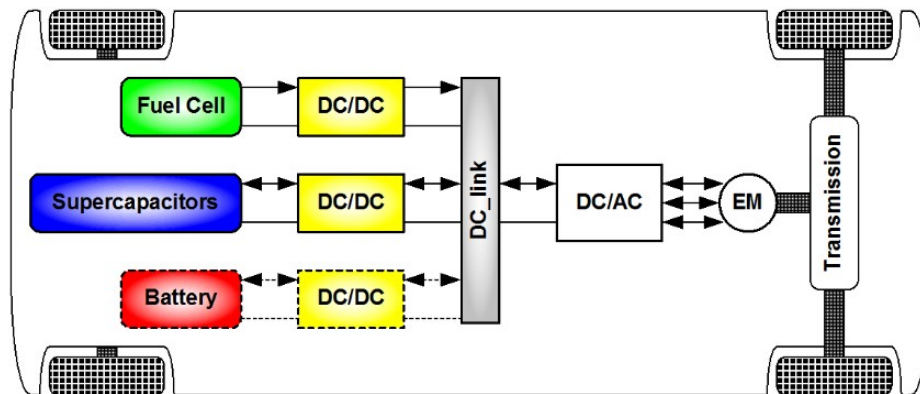


Fonte: Material de Aula, "Circuitos Eletrônicos Automotivos", Prof. Leopoldo Yoshioka, Escola Politécnica da USP (EPUSP).

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

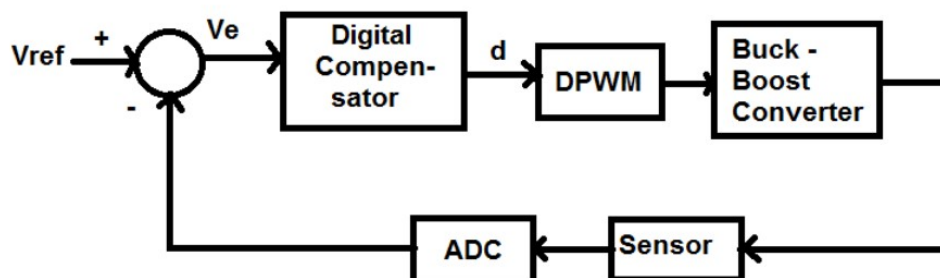


Fonte: Monzer Al Sakka, Joeri Van Mierlo e Hamid Gualousa, DC/DC Converters for Electric Vehicles, disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/19583>.

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 supervisorio 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.

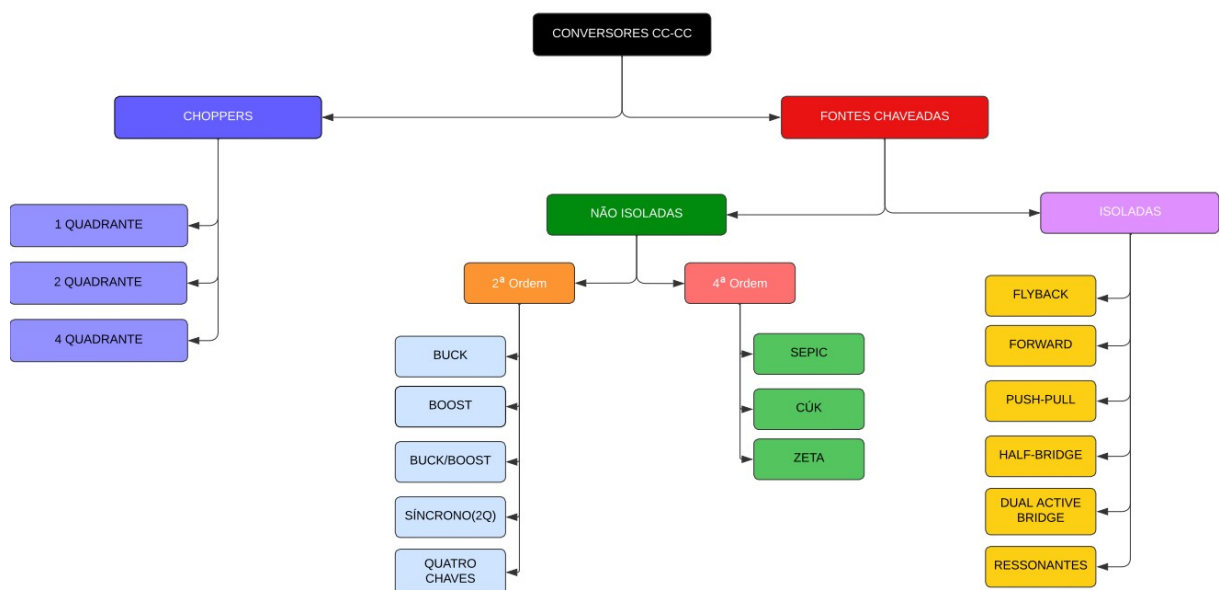
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

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 (2025).

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 9 e 10.

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 9.

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 10.

LIU, K.-B. et al. Analysis and controller design of a universal bidirectional dc-dc converter. *Energies*, 2016. Citado na página 14.

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 10.

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 14.

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 9.

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 9 e 10.

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 14.