

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

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 – Sistema de controle de malha fechada do conversor buck-boost com controlador PID discreto	13
Figura 4 – Classificação Conversores CC-CC	17
Figura 5 – Conversor Chopper de 1 Quadrante	18
Figura 6 – Conversor Chopper de 2 Quadrante	19
Figura 7 – Conversor Chopper de 4 Quadrante	19
Figura 8 – Estrutura básica de um conversor Buck (Step-down)	20
Figura 9 – Estrutura básica de um conversor Boost (Step-Up)	21
Figura 10 – Estrutura básica de um conversor Síncrono	22
Figura 11 – Estrutura básica de um conversor de Quatro Chaves	22
Figura 12 – Estrutura básica de um conversor SEPIC	23
Figura 13 – Estrutura básica de um conversor CUK	24
Figura 14 – Estrutura básica de um conversor ZETA	24
Figura 15 – Estrutura básica de um conversor Buck-Boost	25
Figura 16 – Comportamento para Modo de Condução Contínua	27
Figura 17 – Comportamento para Modo de Condução Descontínua	28
Figura 18 – Teste imagem02	41

LISTA DE ABREVIATURAS

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

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	19
3.1.2.1	Conversores de Segunda Ordem	19
3.1.2.1.1	Conversores Buck	20
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	Sistemas de Controle Clássico	29
3.3.1	Modelagem de Sistemas	29
3.3.1.1	Modelagem Matemática de Sistemas Físicos (Mecânicos, Elétricos, Térmicos, Hidráulicos).	29
3.3.1.2	Equações diferenciais.	30
3.3.1.3	Representação no domínio do tempo.	30
3.3.2	Transformada de Laplace	30
3.3.2.1	Definição e propriedades.	31

3.3.2.2	Resolução de equações diferenciais.	31
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
3.3.4.1	Resposta a entrada degrau, rampa e impulso	33
3.3.4.2	Crítérios de desempenho: tempo de subida, tempo de acomodação, sobre-sinal, erro em regime permanente.	34
3.3.5	Estabilidade de Sistemas no Domínio do Tempo	34
3.3.5.1	Crítério de Routh-Hurwitz.	35
3.3.5.2	Lugar das raízes	35
3.3.6	Análise no Domínio da Frequência	35
3.3.6.1	Diagramas de Bode: ganho e fase.	35
3.3.6.2	Diagrama de Nyquist: análise de estabilidade e margem de ganho/fase.	36
3.3.7	Realimentação	37
3.3.7.1	Controle proporcional (P), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD) e proporcional-integral-derivativo (PID)	37
3.3.8	Controle Contínuo (Analógico)	38
3.3.9	Controle Discreto (Digital)	39
3.3.10	Espaço de Estados	40
4	METODOLOGIA	41
5	RESULTADOS	42
6	CONCLUSÕES	43
	REFERÊNCIAS	44

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 \(2017\)](#).

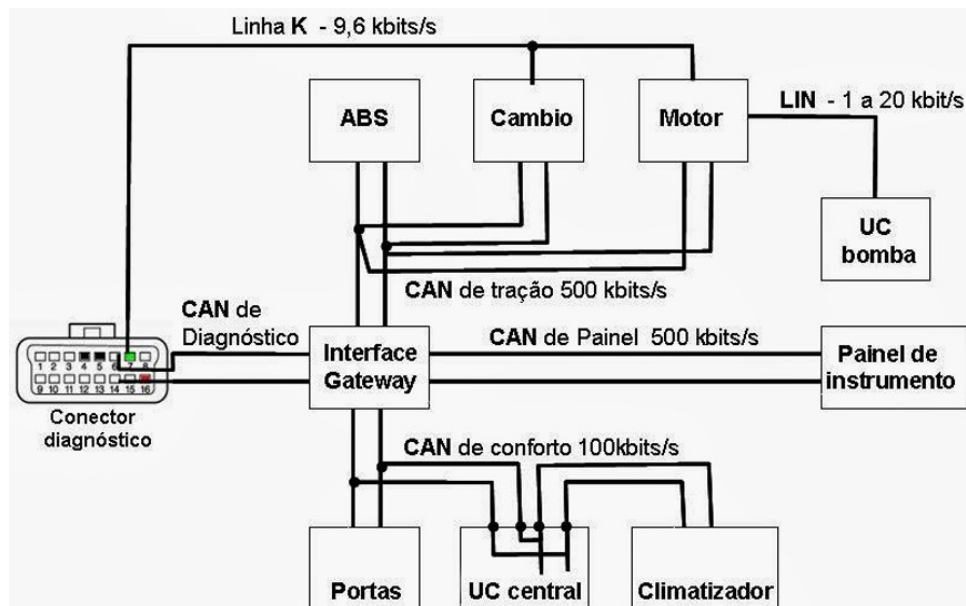
1.2 Unidades Eletrônicas Automotivas

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

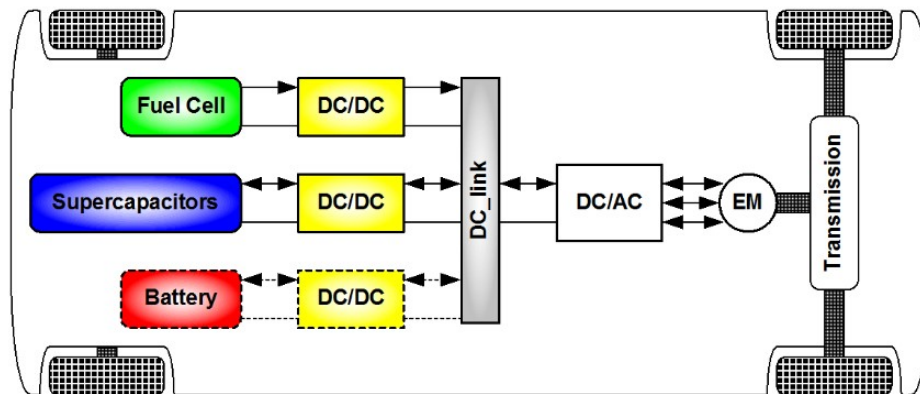


Fonte: Material de Aula, "Circuitos Eletrônicos Automotivos", Prof. Leopoldo Yoshioka, Escola Politécnica da USP (EPUSP).

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

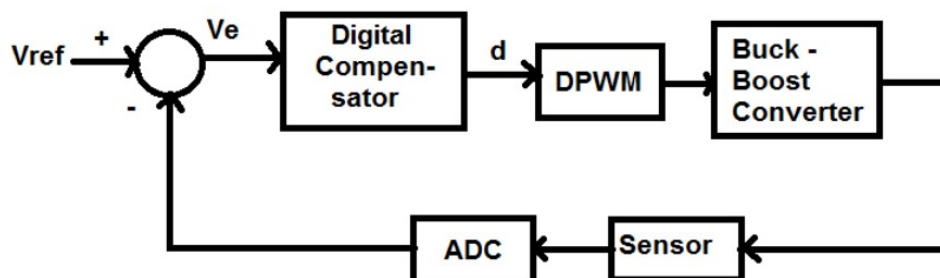


Fonte: Monzer Al Sakka, Joeri Van Mierlo e Hamid Gualousa, DC/DC Converters for Electric Vehicles, disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/19583>.

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.

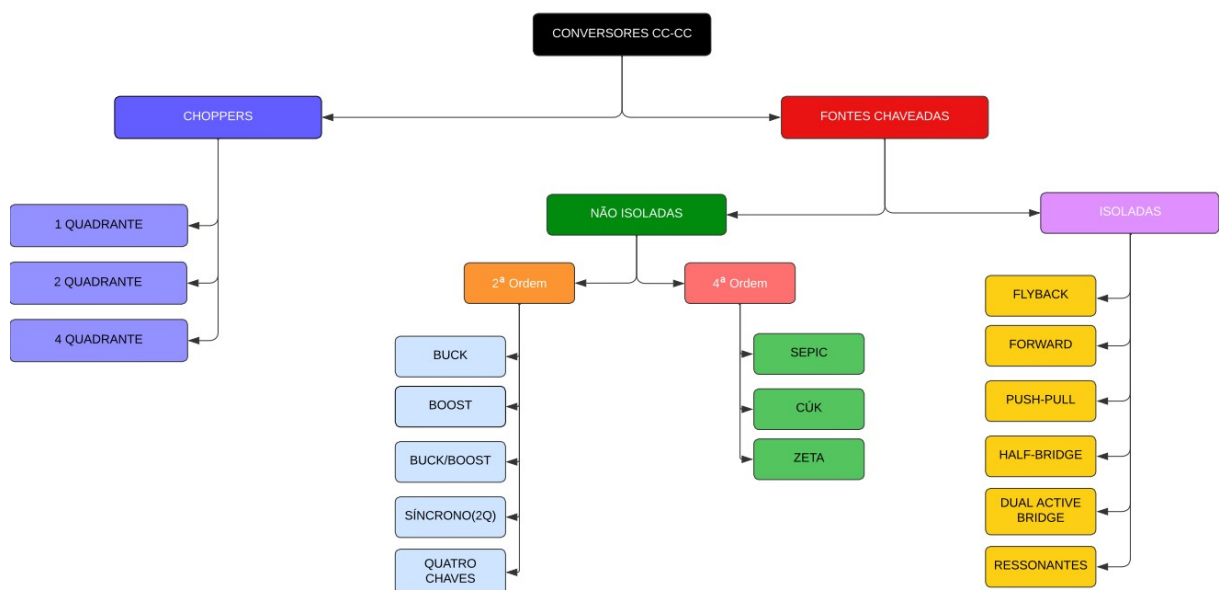
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

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 4 abaixo.

Figura 4 – Classificação Conversores CC-CC



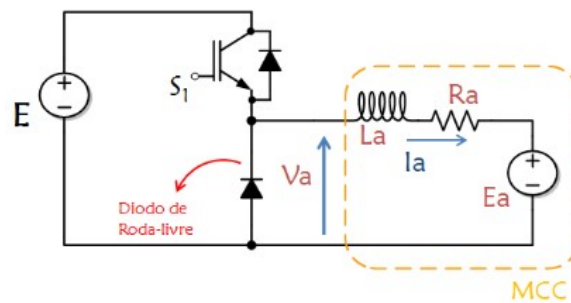
Fonte: OLIVEIRA, Thiago de (2024).

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 [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 direção única. 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 duty cycle (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 5 abaixo.

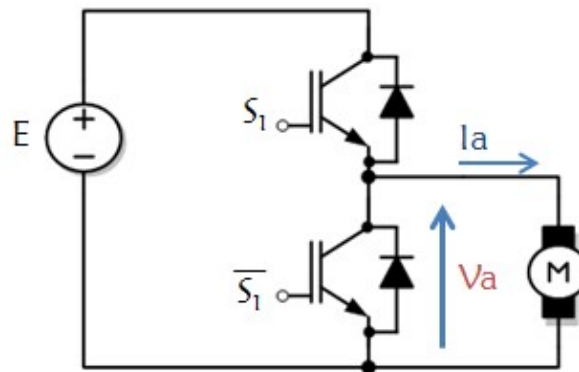
Figura 5 – Conversor Chopper de 1 Quadrante



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 6 abaixo.

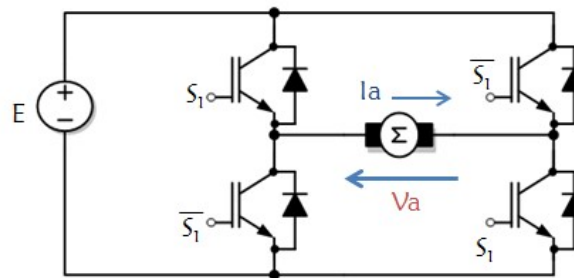
Figura 6 – Conversor Chopper de 2 Quadrante



Fonte: OLIVEIRA, Thiago de (2024).

Os **choppers de 4 quadrantes**, também conhecidos como ponte H, são os mais versáteis e permitem controle completo de direção 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 7 abaixo.

Figura 7 – 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

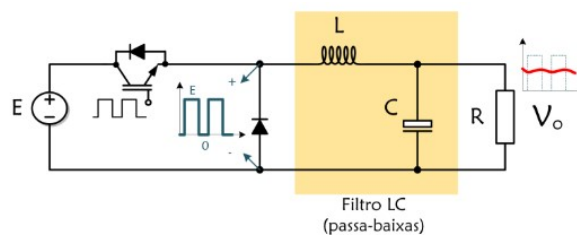
capacitores, para realizar a conversão de energia. Esses circuitos possuem uma resposta dinâmica mais complexa devido à interação dos dois elementos, resultando em uma segunda ordem na equação diferencial que descreve seu comportamento [Camila Schuina Neves, Ana Pavani \(2022\)](#).

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



Fonte: OLIVEIRA, Thiago de (2024).

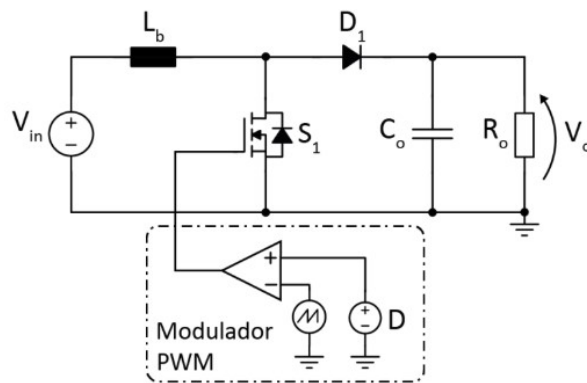
3.1.2.1.2 Conversores Boost

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 Morais \(2023\)](#).

A estrutura básica de um conversor boost está representada na figura 9, onde S1 é o interruptor de potência, D1 é o diodo de potência, LB é o indutor e C0 é o capacitor.

Figura 9 – Estrutura básica de um conversor Boost (Step-Up)



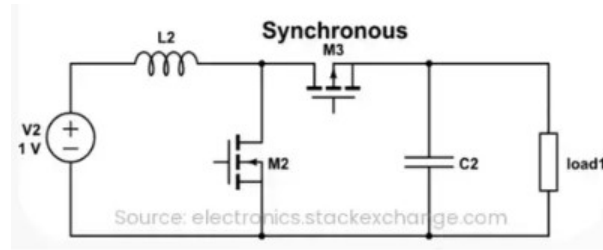
Fonte: MORAIS, Caio de (2023).

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 10 abaxio, onde existe a substituição do diodo pelo segundo transistor do tipo MOSFET.

Figura 10 – Estrutura básica de um conversor Síncrono



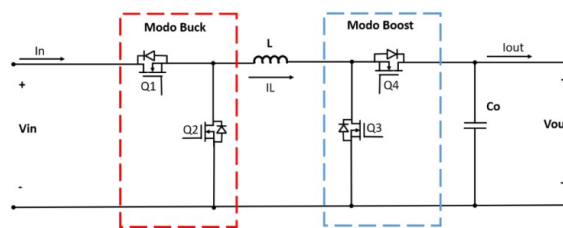
Fonte: <https://www.electricity-magnetism.org> (2025).

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 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 Côrtes (2021).

A topologia de conversores de quatros chaves pode ser ilustrado na figura 11 abaixo com 4 MOSFETS.

Figura 11 – Estrutura básica de um conversor de Quatro Chaves



Fonte: Côrtes de (2021)

3.1.2.2 Conversores de Quarta Ordem

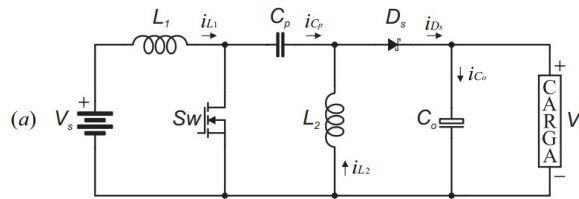
Conversores de quarta ordem são topologias de conversores eletrônicos que utilizam quatro elementos de armazenamento de energia, como indutores e capacitores, em sua configuração. Esses circuitos possuem uma resposta dinâmica descrita por uma equação diferencial de quarta ordem, resultando em um comportamento 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 12 – Estrutura básica de um conversor SEPIC



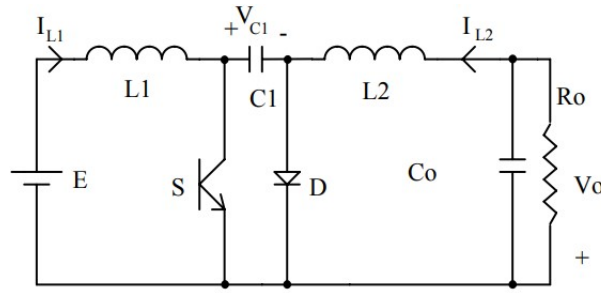
Fonte: ARAÚJO, Gabriela de (2017)

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 13 – Estrutura básica de um conversor CUK



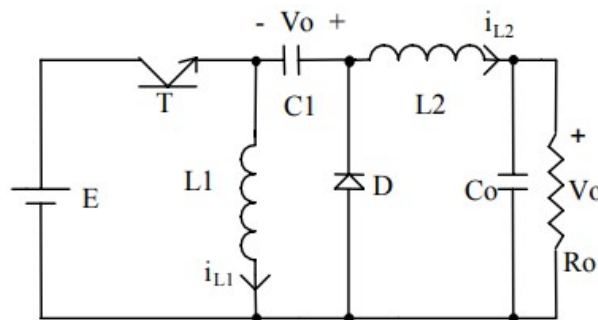
Fonte: POMILIO, José de (2010)

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 14 – Estrutura básica de um conversor ZETA



Fonte: POMILIO, José de (2010)

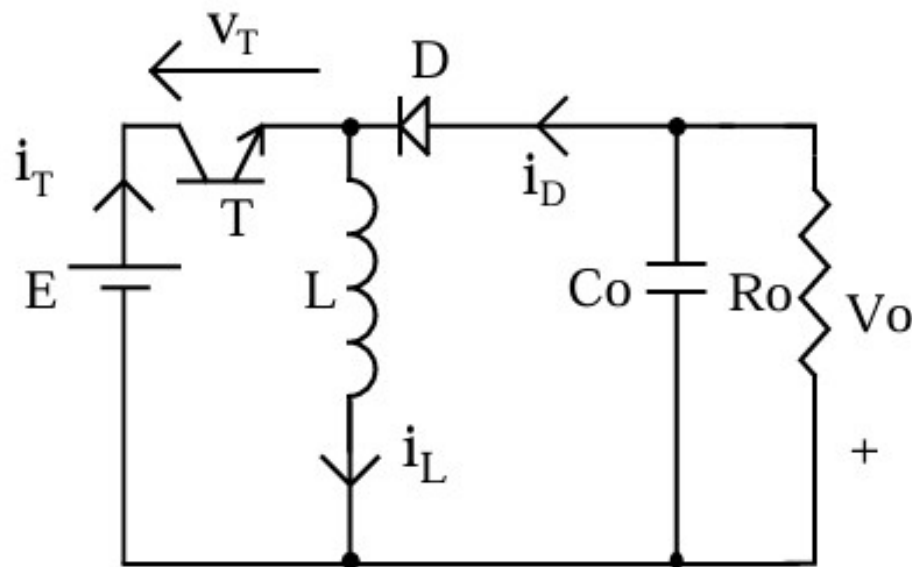
3.2 Conversor Buck-Boost Detalhado

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 15 abaixo. Neste figura, observamos 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 apresenta 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 15 – 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 temos as seguintes situações:

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

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

No modo contínuo podemos observar as seguinte 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 duty cycle) 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):

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

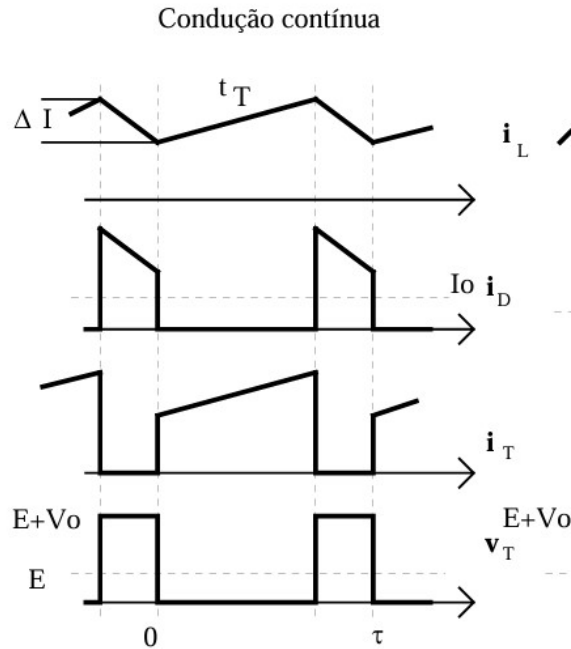
Agora focaremos na equação da corrente do indutor:

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

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.

Na sequência, na figura 16 ilustraremos o ciclo de trabalho do conversor no modo de condução contínua.

Figura 16 – 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 temos 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 podemos observar as seguintes 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):

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

Seu valor médio é:

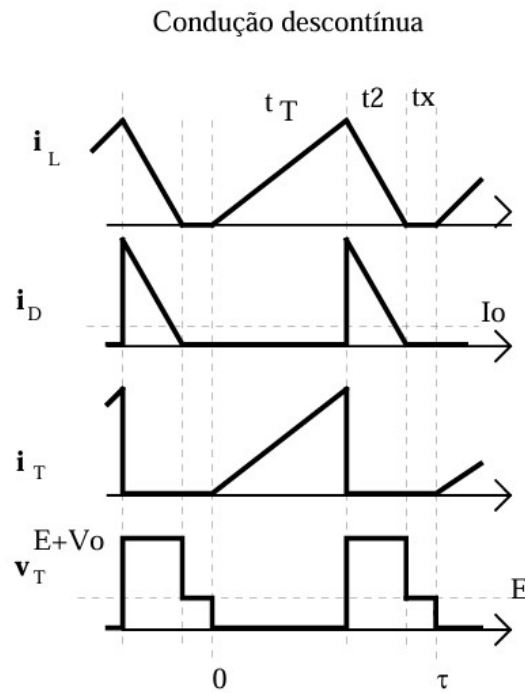
$$iL_{Med} = \frac{Il_{max} * tT}{2 * \tau} \quad (\text{Corrente Média do Indutor})$$

Do balanço de potência tem-se:

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

Na sequência, na figura 17 ilustraremos o ciclo de trabalho do conversor no modo de condução Descontínua.

Figura 17 – 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) :

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

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

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

3.2.4 Conversor Buck-Boost Bidirecional

3.3 Sistemas de Controle Clássico

Sistemas de controle são dispositivos ou conjuntos de dispositivos que gerenciam, comandam, ou regulam o comportamento de outros sistemas para alcançar um objetivo desejado. Dividem-se em sistemas de malha aberta (sem realimentação) e sistemas de malha fechada (com realimentação).

Esses sistemas são amplamente aplicados na automação industrial, engenharia elétrica, mecânica e outras áreas. A análise pode ser feita no domínio do tempo ou da frequência, utilizando ferramentas como a Transformada de Laplace, diagramas de Bode, Nyquist, e Lugar das Raízes. Projetos de controle incluem métodos analógicos e digitais, abrangendo controladores como PID e técnicas avançadas como controle ótimo e preditivo. O objetivo principal é garantir estabilidade, desempenho e precisão.

3.3.1 Modelagem de Sistemas

A modelagem de sistemas é o processo de representar matematicamente o comportamento de sistemas físicos, como mecânicos, elétricos, térmicos ou hidráulicos. Essa representação é feita por meio de equações diferenciais baseadas nas leis fundamentais, como as de Newton e Kirchhoff.

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

A modelagem matemática de sistemas físicos traduz o comportamento de sistemas mecânicos, elétricos, térmicos e hidráulicos em equações matemáticas, utilizando as leis fundamentais de cada domínio.

Os sistemas mecânicos utilizam as leis de Newton para descrever forças, massas e movimentos.

Os sistemas Elétricos Baseiam-se nas leis de Kirchhoff para correntes e tensões em circuitos.

Os sistemas térmicos Modelam a transferência de calor considerando condução, convecção e radiação.

Os sistemas Hidráulicos utilizam princípios de conservação de massa e energia para modelar fluxos de fluidos.

3.3.1.2 Equações diferenciais.

Na teoria de controle, as equações diferenciais são usadas para modelar o comportamento dinâmico de sistemas físicos. Elas descrevem como variáveis como posição, velocidade, corrente ou temperatura mudam ao longo do tempo em resposta a entradas e condições iniciais.

Essas equações são essenciais para representar sistemas contínuos, como motores elétricos, sistemas térmicos ou hidráulicos. A solução das equações diferenciais fornece a resposta do sistema a estímulos, como degraus ou impulsos.

3.3.1.3 Representação no domínio do tempo.

A representação no domínio do tempo descreve o comportamento dinâmico de sistemas físicos analisando como suas variáveis (como posição, velocidade, corrente ou temperatura) evoluem ao longo do tempo.

Ela é baseada em equações diferenciais que relacionam as entradas, estados e saídas do sistema, permitindo estudar respostas transitórias e em regime permanente. Essa abordagem é fundamental para avaliar características como estabilidade, tempo de subida, tempo de acomodação e sobre-sinal, sendo amplamente utilizada no projeto e análise de sistemas de controle.

3.3.2 Transformada de Laplace

A Transformada de Laplace é uma ferramenta matemática amplamente utilizada na teoria de controle para analisar e projetar sistemas dinâmicos, especialmente sistemas lineares. Ela converte equações diferenciais, que descrevem o comportamento temporal de um sistema, em equações algébricas no domínio da frequência complexa (s), o que facilita a análise.

No contexto de controle, a Transformada de Laplace é usada para modelar e estudar a resposta de sistemas a entradas e perturbações. Ela permite obter a função

de transferência, que relaciona a saída do sistema com a entrada, e facilita o estudo de estabilidade, resposta transitória e comportamento em regime permanente.

Além disso, a Transformada de Laplace é essencial para projetar controladores, como os baseados no método de alças de malha fechada, e para aplicar técnicas de análise como a Regra de Routh-Hurwitz e o critério de Nyquist. Ao converter a análise temporal em uma análise no domínio da frequência, ela simplifica a solução de problemas complexos e o entendimento do desempenho de sistemas de controle.

3.3.2.1 Definição e propriedades.

A Transformada de Laplace é uma ferramenta matemática usada para transformar funções de tempo (normalmente soluções de equações diferenciais) em funções no domínio da frequência complexa. Sua definição básica é dada por:

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad (3.1)$$

Propriedades importantes da Transformada de Laplace na teoria de controle: **Linearidade, Transformada da Derivada, Transformada da integral, Deslocamento no tempo e Teorema da Convolução**. Essas propriedades tornam a Transformada de Laplace uma ferramenta poderosa na teoria de controle, permitindo a análise de sistemas lineares, a construção de funções de transferência e a análise de estabilidade e resposta a distúrbios de forma mais acessível e eficiente.

3.3.2.2 Resolução de equações diferenciais.

A resolução de equações diferenciais utilizando a Transformada de Laplace é uma técnica fundamental na teoria de controle, pois muitos sistemas dinâmicos podem ser modelados por equações diferenciais. A Transformada de Laplace permite transformar essas equações do domínio do tempo para o domínio da frequência complexa, facilitando a análise e a solução.

Transformação da equação diferencial: Ao aplicar a Transformada de Laplace a uma equação diferencial, as derivadas são convertidas em expressões algébricas no domínio de s (frequência).

Solução algébrica: Com a equação transformada, as soluções podem ser obtidas resolvendo as equações algébricas no domínio de Laplace. Isso pode envolver manipulações algébricas, como multiplicação ou divisão por polinômios.

Retorno ao domínio do tempo: Após resolver a equação no domínio de s , a solução é transformada de volta para o domínio do tempo utilizando a Transformada Inversa

de Laplace. Esse passo pode ser feito através de tabelas de transformadas ou, quando necessário, utilizando a decomposição em frações parciais e o uso de resíduos.

3.3.3 Função de Transferência

A função de transferência é uma representação matemática fundamental na teoria de controle, que descreve a relação entre a entrada e a saída de um sistema linear e invariável no tempo (LTI) no domínio da frequência complexa (ou domínio de Laplace). Ela é expressa como uma razão entre as transformadas de Laplace da saída e da entrada do sistema.

3.3.3.1 Definição e obtenção a partir de sistemas físicos.

A função de transferência $H(s)$ de um sistema é dada por:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (3.2)$$

Onde: $Y(s)$ é a transformada de Laplace da saída $y(t)$, $U(s)$ é a transformada de Laplace da entrada $u(t)$, e s é a variável complexa de Laplace, $s = \sigma + j\omega$, onde σ é a parte real e $j\omega$ é a parte imaginária.

3.3.3.2 Polos e zeros: significados e localização.

Polos são os valores de s que tornam o denominador de $H(s)$, ou seja $U(s)$, igual a zero, ou seja, os valores de s que tornam o sistema instável ou causam respostas com crescimento exponencial.

Zeros são os valores de s que tornam o numerador de $H(s)$, ou seja $Y(s)$, igual a zero, ou seja, as frequências nas quais a resposta do sistema se anula.

3.3.4 Análise no Domínio do Tempo

A Análise no Domínio do Tempo em sistemas de controle é uma abordagem que visa estudar a resposta de um sistema a diferentes entradas, como degraus, impulsos ou sinais senoidais, no decorrer do tempo. Esse tipo de análise foca em observar como o sistema evolui e se estabiliza a partir do instante em que ocorre uma mudança na entrada. Entre os principais aspectos analisados estão:

A **resposta transitória** é a parte da resposta do sistema que ocorre logo após uma alteração na entrada, como um degrau, impulso ou qualquer outra mudança repentina. Essa resposta descreve como o sistema se ajusta para atingir o seu estado final, e pode envolver oscilações, sobressaltos ou atrasos, dependendo da natureza do sistema e dos parâmetros como os polos e zeros. Em sistemas estáveis, a resposta transitória eventualmente decai

para zero ou para um valor constante, à medida que o sistema "se adapta" à nova entrada. O **tempo de atraso**, o **tempo de subida**, o **tempo de acomodação** e o **overshoot** são alguns dos parâmetros que caracterizam a resposta transitória.

A **resposta em regime permanente ou resposta em estado estacionário** é o comportamento do sistema depois que a resposta transitória se estabiliza, ou seja, após a fase inicial de ajuste. Quando o sistema alcança o regime permanente, ele responde de maneira constante à entrada, sem mais oscilações ou variações. Para entradas de tipo constante, como um degrau, a resposta em regime permanente pode ser simplesmente um valor constante. Para entradas variáveis, como senóides, a resposta será uma função periódica estável. Em sistemas ideais e bem ajustados, a resposta em regime permanente é frequentemente usada para avaliar a precisão e a estabilidade do sistema, como no caso de erro de seguimento para entradas como degrau, rampa ou parábola.

Parâmetros Característicos: São usados para avaliar o desempenho do sistema, como o tempo de subida (tempo necessário para a saída alcançar uma certa porcentagem de seu valor final), tempo de acomodação (tempo necessário para que a saída fique dentro de uma faixa de erro aceitável), e o overshoot (excesso temporário da resposta sobre o valor final).

3.3.4.1 Resposta a entrada degrau, rampa e impulso

A resposta a entrada degrau, rampa e impulso é essencial para entender como um sistema de controle reage a diferentes tipos de sinais de entrada. Cada um desses sinais tem características únicas que ajudam a analisar o desempenho e a dinâmica do sistema.

A **entrada degrau** representa uma mudança abrupta na entrada do sistema, geralmente de um valor inicial para um valor constante, como quando um interruptor é acionado. A resposta do sistema a esse tipo de entrada permite estudar como o sistema se adapta rapidamente a uma alteração súbita, observando o comportamento transitório e o valor final que a saída atinge. Durante essa resposta, é possível identificar parâmetros importantes como o overshoot (pico de sobrecarga), o tempo de subida e o tempo de acomodação, que ajudam a avaliar a estabilidade e a rapidez com que o sistema responde à alteração.

A **entrada rampa** é uma variação linear da entrada, onde o valor aumenta de maneira contínua e proporcional ao tempo, semelhante ao ato de acelerar um carro. A resposta a uma entrada rampa permite verificar como o sistema reage a mudanças graduais, revelando a capacidade do sistema de acompanhar essa alteração de forma gradual. Em sistemas bem projetados, a saída deve seguir a rampa de entrada com um certo atraso, mas sempre dentro de uma faixa aceitável de erro. Esse tipo de análise ajuda a entender a resposta do sistema quando a entrada varia de maneira constante e não abrupta.

Já a entrada impulso representa uma mudança extremamente rápida e breve na entrada, quase instantânea. Esse tipo de entrada idealiza uma "força" concentrada no tempo, e a resposta do sistema a um impulso é crucial para estudar as características dinâmicas do sistema, como a frequência e o amortecimento. A resposta a um impulso também é usada para identificar a função de transferência do sistema e avaliar seus polos e zeros, fornecendo insights importantes sobre a estabilidade e a resposta do sistema a mudanças abruptas

3.3.4.2 Critérios de desempenho: tempo de subida, tempo de acomodação, sobre-sinal, erro em regime permanente.

Os critérios de desempenho são parâmetros usados para avaliar a qualidade da resposta de um sistema de controle. Entre os mais comuns estão o **tempo de subida**, o **tempo de acomodação**, o **sobre-sinal** e o **erro em regime permanente**.

O **tempo de subida** é o intervalo necessário para a saída do sistema passar de uma certa porcentagem do valor final (geralmente de 10% a 90%) até outro valor proporcionalmente próximo, indicando a rapidez com que o sistema alcança a maior parte de sua resposta. Esse parâmetro é importante para avaliar a velocidade de resposta do sistema a uma mudança na entrada.

O **tempo de acomodação** é o tempo necessário para que a saída do sistema se estabilize dentro de uma faixa de erro especificada em relação ao valor final, geralmente após ter passado pelas oscilações iniciais. Esse critério indica o tempo que o sistema leva para "parar de oscilar" e se aproximar de um valor constante.

O **sobre-sinal (overshoot)** representa o pico da resposta antes de a saída se estabilizar no valor final. Ele é um indicador importante da estabilidade transitória do sistema: quanto maior o sobre-sinal, mais instável o sistema pode ser. Idealmente, o sobre-sinal deve ser pequeno em sistemas que exigem precisão.

O **erro em regime permanente** refere-se à diferença entre a saída do sistema e o valor desejado após o sistema ter atingido seu estado estacionário, em resposta a uma entrada constante, como um degrau. Esse erro pode ser causado por limitações do controlador e é um critério essencial para avaliar a precisão do sistema em seguir a entrada.

3.3.5 Estabilidade de Sistemas no Domínio do Tempo

A estabilidade de sistemas no domínio do tempo refere-se ao comportamento de um sistema dinâmico quando ele é perturbado por uma entrada ou distúrbio. Um sistema é considerado estável se suas variáveis de estado (como a saída ou a posição) não crescem indefinidamente ao longo do tempo após uma perturbação. Em vez disso, elas devem se estabilizar em um valor finito ou retornar ao valor de equilíbrio.

3.3.5.1 Critério de Routh-Hurwitz.

O Critério de Routh-Hurwitz é uma técnica matemática utilizada para determinar a estabilidade de sistemas dinâmicos no domínio do tempo. Ele é usado para analisar a posição dos polos de um sistema, ou seja, as raízes do polinômio característico da função de transferência de um sistema linear.

Esse critério é muito útil porque permite verificar a estabilidade de um sistema sem a necessidade de calcular explicitamente as raízes do polinômio característico, o que pode ser complicado, especialmente quando o sistema tem muitos polos.

O critério de Routh-Hurwitz baseia-se na construção de uma tabela de Routh, que contém os coeficientes do polinômio característico. A partir dessa tabela, é possível verificar o número de raízes com parte real positiva (indicando instabilidade) e determinar a estabilidade do sistema.

3.3.5.2 Lugar das raízes

O Lugar das Raízes (ou Root Locus) é uma técnica gráfica usada para analisar o comportamento de sistemas dinâmicos no domínio do tempo, especificamente a estabilidade de um sistema de controle linear em função das variações do ganho do sistema. Essa técnica mostra como os polos do sistema se movem no plano complexo à medida que o ganho do controlador é alterado. O Lugar das Raízes é uma ferramenta poderosa para o projeto de controladores, pois permite visualizar como as mudanças no ganho afetam a estabilidade do sistema.

3.3.6 Análise no Domínio da Frequência

A análise no domínio da frequência é uma abordagem utilizada em sistemas de controle para estudar como um sistema responde a diferentes frequências de entrada, em vez de observar a evolução temporal da saída. Nesse tipo de análise, a entrada do sistema é considerada como um sinal senoidal, com uma frequência variável, e o objetivo é avaliar como o sistema amplifica ou atenua essas frequências.

3.3.6.1 Diagramas de Bode: ganho e fase.

Os diagramas de Bode são ferramentas amplamente usadas na análise da resposta em frequência de sistemas dinâmicos. Eles consistem em duas curvas que mostram como o sistema responde a entradas sinusoidais de diferentes frequências, uma para o ganho (magnitude) e outra para a fase. Cada uma dessas curvas fornece informações essenciais sobre o comportamento do sistema em diferentes faixas de frequência.

No diagrama de magnitude (Ganho) mostra a amplificação ou atenuação do sistema em relação à frequência da entrada. Ele é expresso em decibéis (dB) e fornece

uma visão de como a amplitude da saída varia conforme a frequência da entrada muda. O diagrama mostra como o ganho do sistema muda conforme a frequência aumenta ou diminui. Ele é útil para identificar faixas de frequências onde o sistema amplifica ou atenua significativamente os sinais de entrada.

O ganho $G(j\omega)$ é dado por:

$$|G(j\omega)| = 20 \cdot \log_{10} |H(j\omega)| \quad (3.3)$$

Onde $H(j\omega)$ é a função de transferência do sistema e ω é a frequência.

No **diagrama de fase** mostra a mudança de fase da saída em relação à entrada para diferentes frequências. Em outras palavras, ele indica quanto a fase da saída é deslocada em relação à fase da entrada para cada frequência específica. A fase é medida em graus e pode variar de -180° a $+180^\circ$. O diagrama de fase revela a dinâmica temporal do sistema, ou seja, quanto a resposta da saída "atrasará" ou "adiantará" em relação à entrada.

3.3.6.2 Diagrama de Nyquist: análise de estabilidade e margem de ganho/fase.

O diagrama de Nyquist é uma ferramenta utilizada para analisar a estabilidade de sistemas dinâmicos no domínio da frequência. Ele é especialmente útil para sistemas em malha fechada e permite avaliar como a função de transferência de um sistema responde a variações nas frequências. A análise de estabilidade e as margens de ganho e fase podem ser determinadas diretamente a partir deste diagrama, fornecendo insights cruciais para o projeto de sistemas de controle.

A **análise de estabilidade** é feita com base no critério de estabilidade de Nyquist, que estabelece que um sistema é estável se a trajetória da função de transferência não envolver o ponto crítico $-1 + j0$ (o ponto de instabilidade no plano complexo) de maneira indesejada. O número de voltas que a curva faz em torno desse ponto determina a estabilidade do sistema, com base na relação entre o número de polos à direita e à esquerda do eixo imaginário.

A **margem de ganho** é a quantidade de ganho adicional que pode ser aplicado ao sistema sem que ele se torne instável. No diagrama de Nyquist, a margem de ganho é a distância entre o ponto -1 e o ponto mais próximo da trajetória do diagrama. Essa distância é medida no plano complexo e pode ser usada para avaliar o quão robusto o sistema é em relação a variações de ganho.

A **margem de fase** refere-se à quantidade de deslocamento de fase adicional que pode ser introduzido ao sistema antes que ele se torne instável. No diagrama de Nyquist, a margem de fase é medida no ponto de cruzamento da curva com o eixo real negativo (ponto -1).

3.3.7 Realimentação

A realimentação é uma ferramenta crucial na teoria de controle, permitindo a melhoria do desempenho, a estabilidade e a precisão dos sistemas. A realimentação negativa, em particular, é amplamente usada para reduzir erros, controlar a resposta do sistema e aumentar sua robustez a distúrbios e incertezas. O uso adequado da realimentação é essencial para o design de controladores eficientes em sistemas de controle automático.

Controle em Malha Aberta vs. Malha Fechada: Em um sistema de controle em malha aberta, não há realimentação, e o controlador age com base apenas nas condições iniciais ou no modelo do sistema. Já em malha fechada, a realimentação é usada para ajustar o comportamento do sistema continuamente.

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

Os controladores proporcionais (P), proporcionais-integral (PI), proporcionais-derivativo (PD) e proporcionais-integral-derivativo (PID) são técnicas amplamente utilizadas na teoria de controle para regular o comportamento de sistemas dinâmicos. Cada um desses controladores combina diferentes ações de controle para melhorar o desempenho do sistema e atender a requisitos específicos, como precisão, estabilidade e rapidez de resposta.

O controle proporcional (P) é o tipo mais simples de controlador, onde a ação de controle é diretamente proporcional ao erro entre a referência (valor desejado) e a saída do sistema. A equação do controlador proporcional é dada por:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (3.4)$$

Onde:

$u(t)$ é o sinal de controle aplicado ao sistema, $e(t) = r(t) - y(t)$ é o erro entre a referência $r(t)$ e a saída $y(t)$ e K_p é o ganho proporcional.

Vantagens: Simplicidade e facilidade de implementação. Desvantagens: Pode deixar um erro residual (erro em regime permanente) quando o sistema atinge o ponto de equilíbrio.

O controle proporcional-integral (PI) combina a ação proporcional com uma ação integral, que é responsável por eliminar o erro em regime permanente. O controlador PI adiciona uma integral do erro ao sinal de controle. Sua equação é:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt \quad (3.5)$$

Onde: $u(t)$ é o sinal de controle, $e(t)$ é o erro entre a referência $r(t)$ e a saída $y(t)$, K_p é o ganho proporcional, K_i é o ganho integral, e $\int e(t) dt$ é a integral do erro.

Vantagens: Elimina o erro em regime permanente e melhora a precisão do sistema. Desvantagens: Pode introduzir oscilações ou sobrepasso se não for bem ajustado.

O controle proporcional-derivativo (PD) combina a ação proporcional com uma ação derivativa do erro, o que ajuda a melhorar a resposta dinâmica do sistema, antecipando as mudanças no erro e aplicando um ajuste mais rápido. A equação do controlador PD é:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_d \cdot \frac{d}{dt}e(t) \quad (3.6)$$

Onde: $u(t)$ é o sinal de controle, $e(t)$ é o erro entre a referência $r(t)$ e a saída $y(t)$, K_p é o ganho proporcional, K_d é o ganho derivativo, e $\frac{d}{dt}e(t)$ é a derivada do erro.

Vantagens: Melhora a resposta dinâmica, reduzindo o tempo de subida e sobressaltos. Desvantagens: Não elimina o erro em regime permanente e pode ser sensível a ruídos na medição do erro.

O controle proporcional-integral-derivativo (PID) é a combinação das três ações: proporcional, integral e derivativa. É o controlador mais utilizado em sistemas de controle, pois oferece um equilíbrio entre precisão, estabilidade e velocidade de resposta. Sua equação é:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt + K_d \cdot \frac{d}{dt}e(t) \quad (3.7)$$

Onde $u(t)$ é o sinal de controle, $e(t)$ é o erro entre a referência $r(t)$ e a saída $y(t)$, K_p é o ganho proporcional, K_i é o ganho integral, K_d é o ganho derivativo, $\int e(t) dt$ é a integral do erro, e $\frac{d}{dt}e(t)$ é a derivada do erro.

Vantagens: Elimina o erro em regime permanente, melhora a dinâmica do sistema e é bastante versátil para uma grande variedade de aplicações. Desvantagens: Mais complexo de ajustar, pois os três parâmetros (proporcional, integral e derivativo) precisam ser sintonizados adequadamente.

3.3.8 Controle Contínuo (Analogico)

O controle contínuo (analogico) é um tipo de controle no qual o sinal de controle é contínuo no tempo, ou seja, a ação de controle é aplicada de forma constante e em tempo real para ajustar o comportamento do sistema. Ao contrário dos sistemas de controle digital, que operam com sinais discretos, o controle contínuo lida com variáveis contínuas e

é frequentemente implementado utilizando componentes eletrônicos, como amplificadores operacionais, resistores e capacitores.

Sistemas Analógicos: O controle contínuo é frequentemente realizado em sistemas analógicos, que não dependem de processamento digital. Em vez disso, ele utiliza circuitos eletrônicos analógicos para gerar sinais de controle. Por exemplo, em sistemas de controle de temperatura, um termostato pode ajustar a temperatura continuamente com base nas leituras de um sensor de temperatura.

Vantagens do controle contínuo são: **respostas rápidas e suaves**. A natureza contínua do sinal de controle permite ajustes suaves e imediatos ao comportamento do sistema além da **simplicidade**, o controle contínuo pode ser mais direto e fácil de implementar, sem a necessidade de processamento digital.

Desvantagens do controle contínuo são: **sensibilidade a ruídos**: sistemas analógicos podem ser mais suscetíveis a interferências e ruídos elétricos, o que pode afetar a precisão do controle, além de **falta de flexibilidade** comparado aos sistemas digitais, os sistemas analógicos são menos flexíveis, especialmente quando se trata de ajustes e modificações do controlador.

3.3.9 Controle Discreto (Digital)

O Controle Discreto (ou Digital) aplica técnicas de controle a sistemas cujas variáveis são processadas digitalmente. Ele começa com a **amostragem**, onde sinais contínuos são convertidos para discretos via **conversores A/D**.

A análise e o projeto desses sistemas são frequentemente feitos no **domínio Z**, utilizando a **Transformada Z** para modelagem e estudo da resposta do sistema.

O projeto de controladores discretos inclui abordagens como PID digital, controle por realimentação de estados e observadores de estados, garantindo estabilidade e desempenho desejados.

A estabilidade do sistema pode ser avaliada por métodos como Critério de Jury, Lugar das Raízes e Análise de Polos e Zeros no Plano Z. Além disso, a resposta no tempo e no domínio da frequência pode ser ajustada para atender requisitos específicos.

A implementação prática é feita em microcontroladores, DSPs e FPGAs, permitindo controle em tempo real em aplicações como automação industrial, sistemas embarcados e telecomunicações. Como vantagens, o controle digital oferece maior flexibilidade, robustez a ruídos e facilidade de ajuste via software. No entanto, requer um projeto adequado para lidar com atrasos de processamento e efeitos da discretização, garantindo que o desempenho do sistema seja satisfatório.

3.3.10 Espaço de Estados

O Espaço de Estados é uma abordagem para modelar e analisar sistemas dinâmicos no domínio do tempo, representando-os por um conjunto de equações diferenciais de primeira ordem. A modelagem utiliza vetores de estado, que descrevem completamente o comportamento do sistema, e matrizes que relacionam entradas, estados e saídas. A formulação geral é dada por:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.8)$$

$$y = Cx + Du \quad (3.9)$$

onde A, B, C e D são matrizes que definem a dinâmica do sistema. Essa abordagem permite análise tanto para sistemas contínuos quanto discretos. O controle pode ser feito por realimentação de estados, incluindo técnicas como controle ótimo (LQR) e observadores de estado (como o de Luenberger). A estabilidade é avaliada pelo espectro da matriz A e critérios como o de Lyapunov. A principal vantagem desse método é sua aplicabilidade a sistemas multivariáveis e não lineares, sendo amplamente utilizado em controle avançado, automação e robótica.

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

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 21.

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 20.

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 19.

CÔRTEZ, L. R. C. Aplicação distribuída dos conversores buck-boost com quatro interruptores para minimizar efeitos de sombreamento 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.

LIU, K.-B. et al. Analysis and controller design of a universal bidirectional dc-dc converter. *Energies*, 2016. 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.
- 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.
- 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 18 e 19.
- 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 20.
- Tiandiano. *A Evolução Dos sistemas Elétricos Automotivos: Uma Jorandade 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; 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.