

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANDRÉ FABIANO ALVES ALFLEN

**DESENVOLVIMENTO DE FONTE CHAVEADA COM CONVERSOR
FULL-BRIDGE, BOOST PFC E CONTROLE FUZZY PARA INFRAESTRUTURA DE
REDES DE TELECOMUNICAÇÕES**

CAMPO MOURÃO

2025

ANDRÉ FABIANO ALVES ALFLEN

**DESENVOLVIMENTO DE FONTE CHAVEADA COM CONVERSOR
FULL-BRIDGE, BOOST PFC E CONTROLE FUZZY PARA INFRAESTRUTURA DE
REDES DE TELECOMUNICAÇÕES**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Eletrônica. da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador(a): Gilson Junior Schiavon

CAMPO MOURÃO

2025

ANDRÉ FABIANO ALVES ALFLEN

**DESENVOLVIMENTO DE FONTE CHAVEADA COM CONVERSOR
FULL-BRIDGE, BOOST PFC E CONTROLE FUZZY PARA INFRAESTRUTURA DE
REDES DE TELECOMUNICAÇÕES**

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

Data de aprovação: Dia/mês por extenso/ano

Nome completo e por extenso do Membro 1 (de acordo com o Currículo Lattes)
Titulação (Especialização, Mestrado, Doutorado)
Nome completo e por extenso da instituição a qual possui vínculo

Nome completo e por extenso do Membro 2 (de acordo com o Currículo Lattes)
Titulação (Especialização, Mestrado, Doutorado)
Nome completo e por extenso da instituição a qual possui vínculo

Nome completo e por extenso do Membro 3 (de acordo com o Currículo Lattes)

Titulação (Especialização, Mestrado, Doutorado)

Nome completo e por extenso da instituição a qual possui vínculo

CAMPO MOURÃO

2025

Dedico este trabalho à minha família, pelos
momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Gilson Junior Schiavon, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

A Eletrônica de Potência desponta no início
Século XXI como uma das mais importantes
áreas da engenharia elétrica em todos os países,
sendo considerada estratégica no
desenvolvimento industrial e social dos povos..
(Ivo Barbi, 2005).

RESUMO

A infraestrutura das redes de telecomunicações móveis cresce ano após ano, resultando em um aumento significativo no consumo de energia e, consequentemente, reforçando a importância da eficiência energética. Neste contexto, o presente projeto propõe desenvolver uma fonte chaveada para aplicação na infraestrutura de redes de telecomunicações. O trabalho visa criar uma fonte chaveada utilizando um retificador de onda completa, conectado a um conversor CC-CC Boost atuando como PFC (Power Factor Correction), que será integrado a um conversor CC-CC isolado Full-Bridge e empregará um microcontrolador para implementar o controle fuzzy em malha fechada, corrigindo a tensão de saída e o FP (Fator de Potência). O sistema terá uma tensão de saída de 48V e uma potência de 150W. A abordagem busca desenvolver um sistema estável e otimizar o desempenho por meio da lógica fuzzy e da integração entre o conversor Full-Bridge e o Boost PFC. O trabalho aborda o projeto e a integração de cada parte da fonte chaveada, assim como a construção do sistema completo. Desse modo, espera-se a obtenção de resultados consistentes com os objetivos propostos, tanto na simulação quanto nos testes práticos.

Palavras-chave: Full-Bridge; PFC; Fonte chaveada; Fuzzy.

ABSTRACT

The infrastructure of mobile telecommunications networks grows year by year, resulting in a significant increase in energy consumption and, consequently, reinforcing the importance of energy efficiency. In this context, the present project proposes the development of a switched-mode power supply for application in telecommunications network infrastructure. The project aims to create a switched-mode power supply utilizing a full-wave rectifier connected to a Boost DC-DC converter acting as a PFC (Power Factor Correction), which will be integrated with an isolated Full-Bridge DC-DC converter. A microcontroller will be used to implement closed-loop fuzzy control, correcting the output voltage and Power Factor (PF). The system will have an output voltage of 48V and a power capacity of 150W. This approach seeks to develop a stable system and optimize performance through fuzzy logic and the integration between the Full-Bridge converter and the Boost PFC. The project covers the design and integration of each part of the switched-mode power supply, as well as the construction of the complete system. Thus, consistent results with the proposed objectives are expected, both in simulation and practical tests.

Keywords: Full-Bridge; PFC; Switched-mode power supply; Fuzzy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Retificador monofásico de onda completa em ponte	17
Figura 2 - Forma de onda Retificador	18
Figura 3 - Ponte de Diodos com filtro capacitivo	18
Figura 4 - Forma de onda na saída	19
Figura 5 - Circuito típico de um boost	20
Figura 6 - Formas de Ondas Condução Continua	21
Figura 7 - Diagrama de blocos x	22
Figura 8 - Conversor Full-Bridge	23
Figura 9 - Formas de Onda Conversor Full-Bridge	24
Figura 10 - SNUBBER RCD	25
Figura 11 - Diagrama de blocos	27
Figura 12 - Diagrama de blocos controlador PID	28
Figura 13 - Função de Pertinência	29
Figura 14 - Nucleo EE	33
Figura 15 - gate driver	35
Figura 16 - Snubber	36
Figura 17 - Diagrama de Blocos Controle PI Fuzzy	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Desempenho dos alunos na prova de co

20

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PFC	Power Factor Correction
SCR	Retificadores Controlados de Silício
CI	Circuitos Integrados
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Continua
PWM	Pulse Width Modulation
RCD	Resistor, Capacitor e Diodo
PI	Proporcional e Integral
PID	Proporcional, integral e derivativo

LISTA DE SÍMBOLOS

E:	Tensão da fonte
V _{mf} :	Tensão nas chaves
V _p :	Tensão no primário do transformador
D:	Razão Cíclica
N _s :	Número de espiras no secundário do transformador
N _p :	Número de espiras no primário do transformador
V _d :	Tensão no diodo retificador
V _o :	Tensão de saída do conversor
T _{on} :	Tempo chave ligado
T _s :	Período de chaveamento
V _{in} :	Tensão de entrada
I _{in} :	Corrente de entrada
L _f :	Indutância do filtro
C _f :	Capacitância do filtro
ΔV:	Variação de tensão
ΔI:	Variação de corrente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivo Geral.....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
1.3 Justificativa.....	15
1.4 Cronograma.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 Retificador Monofásico de Onda Completa.....	17
2.2 Conversor Boost.....	20
2.3 Circuito Integrado ML4841.....	22
2.4 Conversor Full-Bridge.....	23
2.5 Snubber.....	25
2.6 Gate Drive.....	26
2.7 Elementos Magnéticos.....	27
2.8 Controle.....	27
2.8.1 Controle Clássico.....	27
2.8.2 Controle Fuzzy.....	29
3 METODOLOGIA.....	31
3.1 Projeto do Retificador.....	31
3.2 Projeto do Conversor Boost.....	31
3.3 Projeto do Conversor Full-Bridge.....	32
3.4 Projeto do Indutor e Transformador.....	33
3.5 Projeto do Gate Driver.....	35
3.6 Projeto do Snubber.....	36
3.7 Projeto do Controle PI Fuzzy.....	37
4 RESULTADOS ESPERADOS.....	38

Título 1

1 INTRODUÇÃO

Em 1883, já existiam retificadores não controlados que utilizavam diodos de selênio. Nessa época, ainda não havia diodos de tubo a vácuo, que só surgiriam em 1904. Em 1905, Charles Proteus Steinmetz publicou estudos sobre o uso de tubos de mercúrio em retificadores. Por volta de 1940, apareceram os primeiros diodos de silício e germânio (KREIN, 1997, p. 13).

Em 1957, foi desenvolvido o tiristor, e, por volta de 1960, iniciou a primeira onda de evolução da eletrônica de potência (MAJUMBA, 2004, p. 1). Os SCRs (Retificadores Controlados de Silício) possibilitaram avanços nas retificações controladas, tornando-as mais eficientes e adequadas para frequências maiores. Em 1967, retificadores com transformadores para redução de tensão e retificadores não controlados com tubos de vácuo foram empregados em eletrodomésticos. Nessa mesma época, os CIs (Circuitos Integrados) reguladores de tensão começaram a ser usados nos estágios finais desses retificadores, contribuindo para a maturação da tecnologia voltada aos eletrodomésticos (KREIN, 1997, p. 14).

Na década de 1970, a crise do petróleo impulsionou uma nova fase de evolução na área, pois a descoberta de que o petróleo não era um recurso renovável trouxe uma necessidade crescente por eficiência energética. Nesse contexto, os MOSFETs (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors) foram amplamente adotados em aplicações de baixa potência, possibilitando maior eficiência e desempenho energético (MAJUMBA, 2004, p. 1).

Por volta de 1990 os desenvolvimentos na área passaram a focar na melhor solução para cada problema, marcando início dos conversores focados em comutação suave (MAJUMBA, 2004, p. 3).

Os conversores eletrônicos, que podem operar tanto em malha aberta quanto em malha fechada, são fundamentais em diversos sistemas de controle. O primeiro registro de um sistema de controle remonta a 300 a.C., enquanto as técnicas clássicas de controle foram desenvolvidas em 1885. Em 1922, surgiram as técnicas de controle adaptativo (NISE, 2023, p. 3). Com o avanço dessas tecnologias, a lógica fuzzy foi introduzida por Zadeh em 1965, permitindo o uso no

controle ao possibilitar abordagens mais tolerantes com incertezas (SALMANI, 2008,p. 1).

A eletrônica de potência, ao incorporar essas técnicas de controle, desempenha um papel crucial em inúmeras aplicações, incluindo a infraestrutura de redes de telefonia. No Brasil, a história da telefonia começou em 1877, com a instalação da primeira linha telefônica na residência do imperador Dom Pedro II. Interessado pelo dispositivo criado por Alexander Graham Bell e apresentado na Exposição do Centenário da Independência dos Estados Unidos, em 1876, o imperador decidiu adotá-lo. Inicialmente, o telefone conectava apenas órgãos governamentais e estruturas de segurança pública. Dois anos depois, em 1878, foi realizada a primeira ligação interurbana no país (UEDA, 2000, p. 2).

Durante esse período, as concessões para instalação de redes de telefonia eram concedidas apenas ao Império. Contudo, após o início da República Velha em 1889, os estados e municípios receberam maior autonomia, permitindo que os municípios realizassem concessões. Isso marcou uma época em que não havia interoperabilidade entre os sistemas telefônicos, pois as regulamentações tinham caráter municipal, muitas vezes incompatíveis entre si (PEREIRA DA SILVA; MACCHIONE SAES, 2023, p. 9).

Na década de 1960, foi possível, por meio de circuitos eletromecânicos, criar centrais telefônicas que não necessitavam de um telefonista para conectar diferentes assinantes do serviço. Em 1965, foi criada a estatal Embratel, visando acelerar a disseminação da tecnologia da telefonia e unificar a rede de telecomunicações, sendo responsável por estabelecer uma rede nacional. No entanto, na década de 1970, ainda existiam mais de mil empresas privadas atuando no setor. Por isso, em 1972, foi criada a TELEBRAS, uma sociedade de economia mista que adquiriu toda a infraestrutura nacional e que, por volta da década de 1990, passaria por um processo de privatização (NEVES, 2002, p.301).

A telefonia móvel começou no Brasil em 1990, com cerca de 667 aparelhos conectados (XAVIER, 2006, p.1). Em 2023, 163,8 milhões de pessoas utilizavam um smartphone (IBGE, 2023). Esse aumento expressivo de usuários exigiu uma expansão contínua e da infraestrutura de telecomunicações.

O avanço das telecomunicações no Brasil não ocorreu apenas pelo aumento do número de usuários, mas também pelo desenvolvimento das tecnologias de rede. Os primeiros dispositivos móveis utilizavam redes 1G, com capacidade de

transmissão de até 28 Kb/s. Com o tempo, surgiu a rede 3G, que alcançava até 10 Mb/s (XAVIER, 2006, p. 4), e, mais recentemente, a infraestrutura para a tecnologia 5G, que pode atingir até 1,2 Gbps, vem sendo instalada.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho visa desenvolver uma fonte chaveada para aplicação na infraestrutura de redes de telefonia móvel, utilizando um retificador de onda completa, um conversor boost para correção do fator de potência e um conversor Full-Bridge para reduzir a tensão de saída para 48V.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Projetar e implementar um retificador de onda completa.
- Projetar e implementar um conversor Boost para correção do fator de potência.
- Projetar e implementar um conversor Full-Bridge para ajuste da tensão de saída.
- Integrar os conversores em um sistema funcional.
- Desenvolver a lógica fuzzy para controlar a saída do conversor e garantir um fator de potência elevado.
- Realizar testes para validação do protótipo
- Analisar resultados obtidos.

1.3 JUSTIFICATIVA

A infraestrutura de telecomunicações no Brasil precisou se adaptar continuamente para atender à crescente demanda por conectividade e velocidade de transmissão de dados. Estima-se que, até 2030, essa demanda aumente em 100 vezes (DE LUCCA, 2020, p.30).

Nesse cenário, a eletrônica de potência se apresenta como um elemento-chave, oferecendo recursos para o desenvolvimento de fontes de alimentação e conversores que atendam às exigências das modernas redes de

telecomunicações. Com a expansão do uso de dispositivos móveis e a necessidade de infraestruturas mais complexas, a eletrônica de potência proporciona soluções que permitem controle e eficiência no uso de energia nos sistemas de telecomunicações. As unidades retificadoras, por exemplo, devem atender a especificações rigorosas em relação ao consumo de corrente, conteúdo harmônico e emissão de radiofrequência (HELDWEIN, 1999, p.45).

1.4 CRONOGRAMA

Tabela 1 - Cronograma

FASE		MAR	ABR	MAI	JUN	JUL
1	Projetar e implementar um retificador de onda completa.					
2	Projetar e implementar um conversor Boost para correção do fator de potência.					
3	Projetar e implementar um conversor Full-Bridge para ajuste da tensão de saída.					
4	Integrar os conversores em um sistema funcional.					
5	Desenvolver a lógica fuzzy para controlar a saída do conversor e garantir um fator de potência elevado.					
6	Realizar testes para validação do protótipo					
7	Analisar resultados obtidos.					

Fonte: Autoria Própria

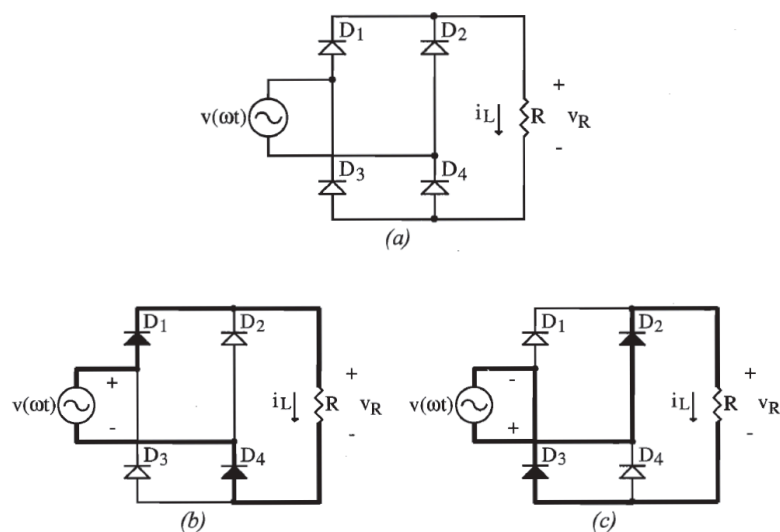
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo é apresentada explicações sobre o funcionamento de parte do projeto

2.1 Retificador monofásico de onda completa em ponte

O retificador monofásico de onda completa é uma topologia baseada em diodos, cujo objetivo é converter a corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC), utilizando ambos os semiciclos da senoide da rede elétrica. Essa configuração apresenta o maior fator de potência entre os retificadores baseados em diodos (Barbi, 1998, pág. 46). A Figura 1 ilustra o funcionamento da topologia.

Figura 1 - Retificador monofásico de onda completa em ponte



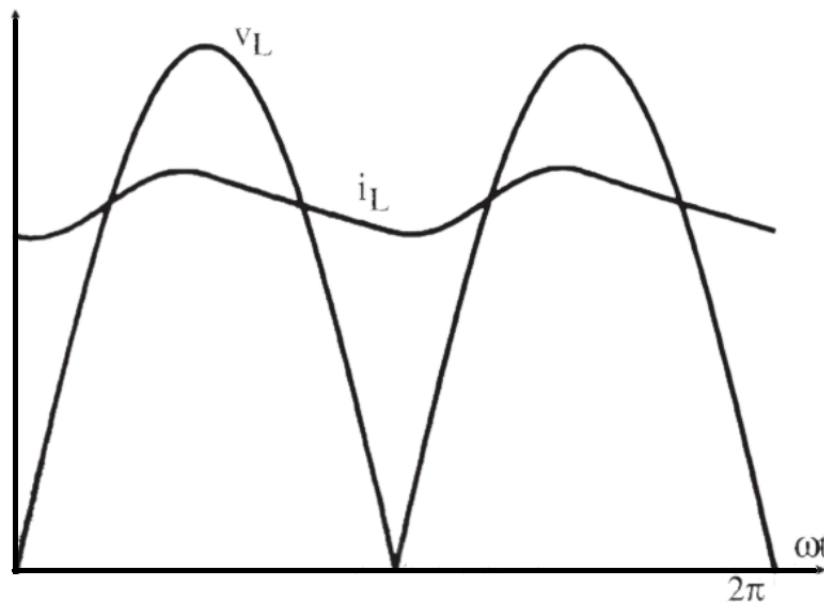
Fonte: Ivo Barbi (1998)

O funcionamento do retificador pode ser descrito em duas etapas principais (Barbi, 1998, pág. 46). :

1. Durante o semiciclo positivo da senoide, o diodo D_1 conduz a corrente positiva, enquanto o diodo D_4 conduz a corrente negativa.

2. No semiciclo negativo da senoide, o diodo D2 passa a conduzir a corrente positiva, enquanto o diodo D3 conduz a corrente negativa.

Figura 2 - Forma de onda Retificador



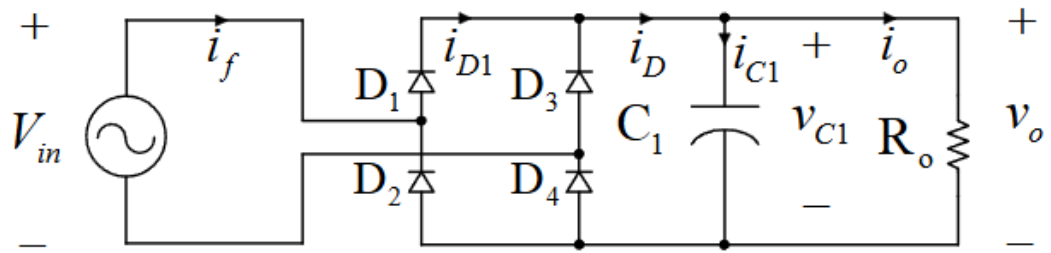
Fonte: adaptado de Ivo Barbi (2006)

Dessa forma obtemos o gráfico da tensão de saída conforme a Figura 2, onde se pode observar que a tensão de saída não é constante, ela tem dois pulsos e podemos obter a tensão média através da Equação (1) (Barbi, 2006, pág. 46).

$$V_{med} = 0,9V_p \quad \text{Eq.(1)}$$

Para tornar a tensão aproximadamente constante se utiliza um capacitor em paralelo com a carga, assim como demonstrado na Figura 3 (Petry, 2012, pág. 81).

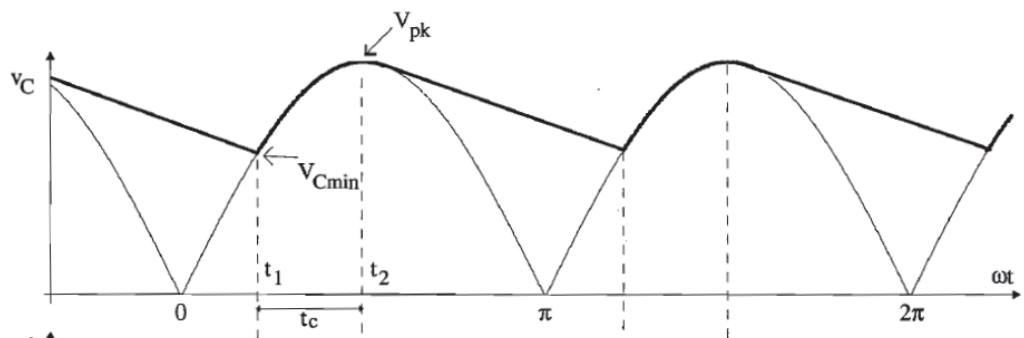
Figura 3 - Ponte de Diodos com filtro capacitivo



Fonte: Clóvis Antônio Petry (2012)

Nessa topologia o capacitor tem a função de fornecer energia no momento em que a tensão da rede está diminuindo, podemos observar o comportamento desse retificador na Figura 4.

Figura 4 - Forma de onda na saída



Fonte: Adaptado Ivo Barbi (1998)

A variação de tensão nesse circuito pode ser calculada pela Equação (2), onde f é a frequência da rede e I_L a corrente na carga.

$$\Delta V = \frac{I_L}{2fC} \quad \text{Eq.(2)}$$

O capacitor pode ser dimensionado usando (3).

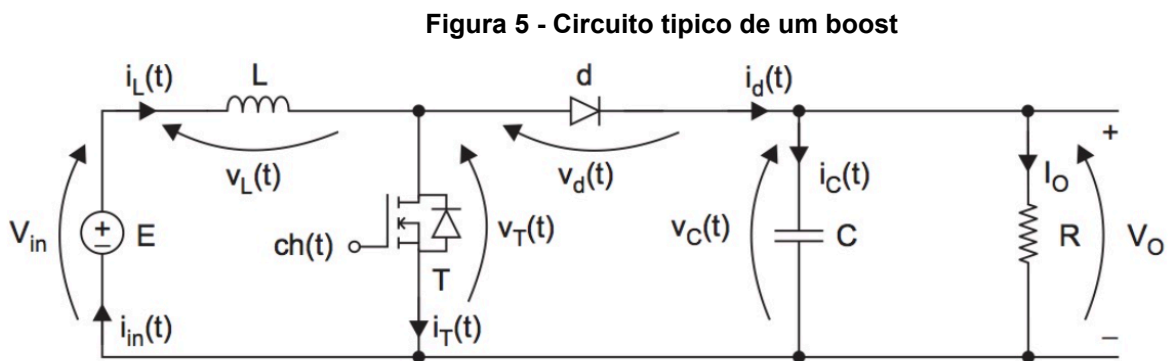
$$C1 > \frac{Pin}{f(V_{pk}^2 - V_{Cmin}^2)} \quad \text{Eq.(3)}$$

Dessa forma a equação aproximada utilizando capacitor com capacitância superior à C_1 , na Equação (3), a tensão média é dada pela Equação (4).

$$V_{Lmed} = \sqrt{2}V_{rms} \quad \text{Eq.(4)}$$

2.2 Conversor Boost

O conversor *boost*, também conhecido como conversor elevador, é um conversor estático não isolado com a capacidade de aumentar a tensão em um circuito. Ele pode operar em três modos principais: condução contínua, condução descontínua e condução no limite (Arrabaça, 2013, p. 88). Neste tópico, será abordado exclusivamente o modo de condução contínua, nesse modo de condução a corrente elétrica passando sobre o indutor nunca chega a zero. A figura 5 apresenta o circuito típico do conversor.



Fonte: Conversores de Energia Elétrica CC/CC para Aplicações em Eletrônica de Potência - Conceitos, Metodologia de Análise e Simulação (2013)

O funcionamento do circuito pode ser descrito em duas etapas (Arrabaça, 2013, p. 89):

1. Primeira etapa: O MOSFET opera como um curto-circuito. Nesse momento, o indutor é carregado, e a corrente circula apenas entre o indutor e a fonte. A

tensão sobre o indutor é igual à da fonte, mas com polaridade oposta. Durante essa etapa, o capacitor fornece energia para a carga.

2. Segunda etapa: O MOSFET funciona como uma chave aberta, e a polaridade do indutor se inverte. Nesse caso, a tensão do indutor soma-se à tensão da fonte, permitindo que a corrente flua pelo diodo. Essa corrente alimenta a carga e recarrega o capacitor.

A tensão de saída do conversor boost pode ser obtida através da Equação (5), onde D é o Duty-Cicly do PWM (Pulse Width Modulation).

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad \text{Eq.(5)}$$

A indutância do indutor pode ser obtida através da Equação (6), no qual f_s é a frequência de chaveamento e ΔI_L é a variação de corrente no indutor.

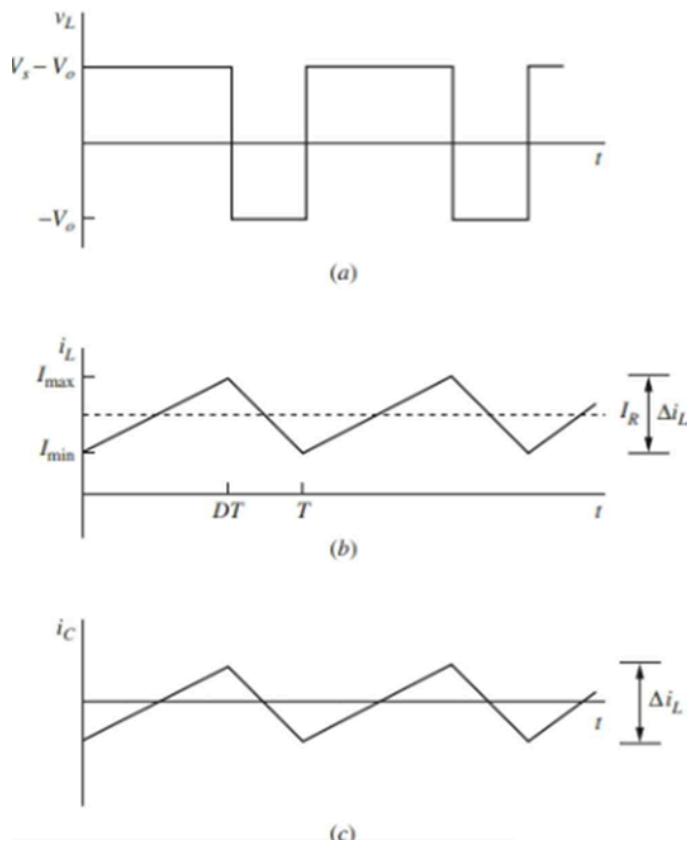
$$L = \frac{DV_{in}}{\Delta I_L f_s} \quad \text{Eq.(6)}$$

A Capacitância do capacitor pode ser obtida através da Equação (7), no qual f_s é a frequência de chaveamento e ΔV_c é a variação de tensão no capacitor.

$$C = \frac{DV_{in}}{\Delta V_c R f_s} \quad \text{Eq.(7)}$$

A Figura (6) apresenta as principais formas de onda de um conversor buck, sendo: (a) a tensão no indutor; (b) a corrente no indutor; e (c) a tensão no capacitor (FARIA, 2012, pág. 3).

Figura 6 - Formas de Ondas Condução Continua

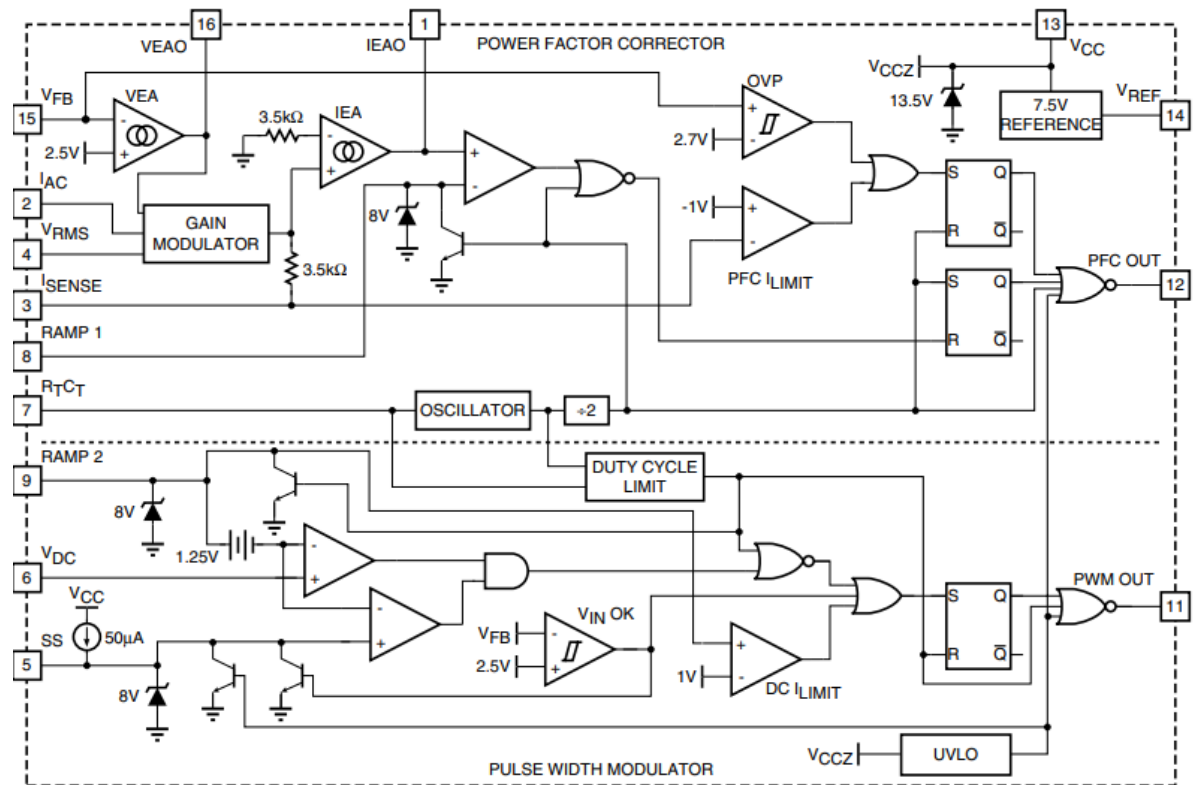


Fonte: Estudo, controle e simulação de um conversor buck para veículos aéreos não tripulados (VANT's). 2022.

2.3 CI (Circuito Integrado) ML4841

O CI ML4841 é um controlador de PFC, o objetivo de todo bom projeto de fonte de alimentação é obter um fator de potência próximo de 1, o fator de potência é obtido pela diferença entre a fase da forma de onda da corrente da tensão, (CRANDALL, 1998, p. 88). A Figura (7) apresenta o circuito interno deste CI.

Figura 7 - Diagrama de blocos ML4841

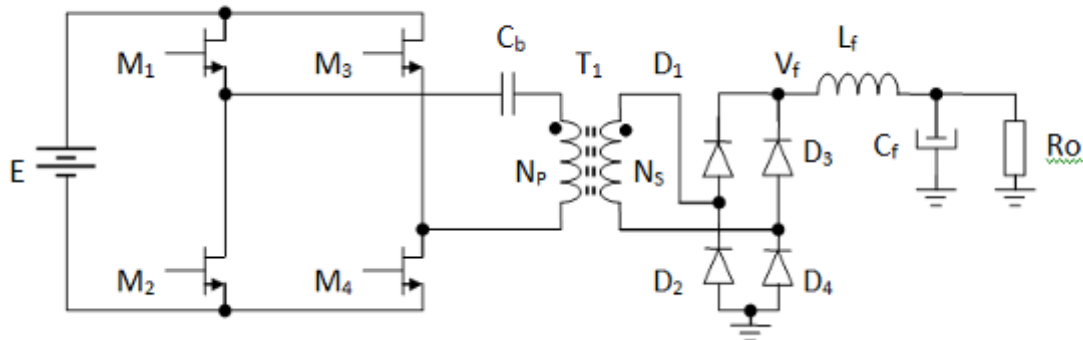


Fonte: ML4841 datasheet

2.4 Conversor Full-Bridge

O conversor Full-Bridge deriva de um conversor buck isolado, mas aproveita toda a excursão da histerese do campo magnético do transformador. Dessa forma, fornece corrente contínua de maneira simétrica em cada um de seus ciclos de operação. A Figura (8) apresenta o circuito típico de um conversor CC-CC Full-Bridge (HENRIQUE; FARIA, 2012, pág. 7)

Figura 8 - Conversor Full-Bridge



Fonte: Conversor CC-CC elevador de tensão Full-Bridge para aplicações em célula a combustível (2012)

O conversor opera em duas etapas. Na primeira, as chaves M1 e M4 são acionadas simultaneamente, conduzindo corrente pelo primário do transformador, induzindo corrente no secundário, conduzida pelos diodos D1 e D4. Na segunda etapa, as chaves M1 e M4 entram em corte, enquanto M2 e M3 saturam, invertendo o sentido da corrente no transformador. Essa inversão também ocorre no secundário, onde a corrente é conduzida pelos diodos D2 e D3 (HENRIQUE; FARIA, 2012, pág. 7).

Em ambas as etapas, o capacitor C_b é responsável por bloquear a corrente contínua, impedindo-a de fluir pelo transformador. Já L_f e C_f têm a função de filtrar as oscilações de corrente e tensão na saída, respectivamente. A tensão de saída do conversor pode ser obtida através da Equação (8) (HENRIQUE; FARIA, 2012, pág. 7).

$$V_o = 2D(E - V_{MF}) \frac{N_s}{N_p} - V_D \quad \text{Eq. (8).}$$

E: Tensão da fonte;

V_{mf} : Tensão nas chaves;

V_p :: Tensão no primário do transformador;

D: Razão Cíclica;

N_s : Número de espiras no secundário do transformador;

N_p : Número de espiras no primário do transformador;

V_d : Tensão no diodo retificador;

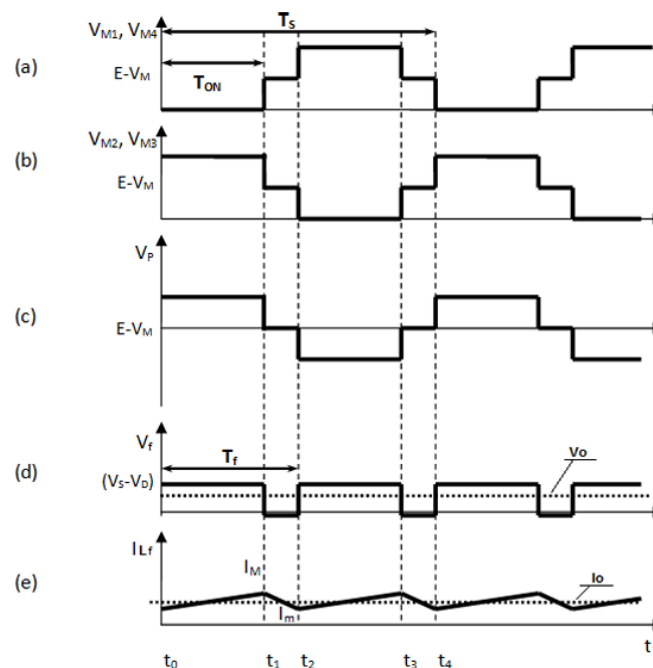
V_o : Tensão de saída do conversor;

T_{on} : Tempo chave ligada

T_s : período de chaveamento

A Figura (9) apresenta as principais formas de onda do conversor, onde: (a) representa a tensão nas chaves M1 e M4; (b) a tensão nas chaves M2 e M3; (c) a tensão no primário do transformador; (d) a tensão no filtro de saída e na saída do conversor; e (e) a corrente no indutor do filtro de saída (I_{Lf}) e a corrente na saída (I_o) (HENRIQUE; FARIA, 2012, pág. 8)

Figura 9 -Formas de Onda Conversor Full-Bridge



Fonte: Conversor CC-CC elevador de tensão Full-Bridge para aplicações em célula a combustível (2012)

2.5 Snubber

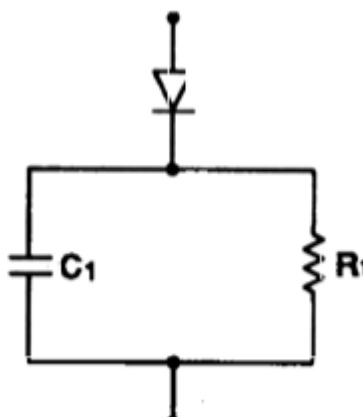
O Snubber é um circuito responsável por absorver a energia dos componentes reativos de um sistema, garantindo que o elemento de comutação

trabalhe dissipando uma quantidade menor de energia média. Ele protege a chave contra overshoots de tensão e reduz a EMI (interferência eletromagnética) emitida pelo circuito (Todd, 1996, pág. 1).

Os snubbers podem ser classificados como dissipativos ou não dissipativos. Os dissipativos dissipam a energia absorvida por meio de um resistor, enquanto os não dissipativos devolvem a energia absorvida para a entrada ou para a saída do circuito (Todd, 1996, pág. 1).

O snubber RCD (Resistor, Capacitor e Diodo) é considerado um snubber dissipativo. Ele pode ser utilizado tanto para limitar a taxa de variação de tensão quanto para *clamping* (grampeamento). A limitação da taxa de variação de tensão protege contra componentes parasitas em alta frequência, enquanto o grampeamento limita os picos de tensão. A Figura 10 apresenta um snubber RCD visando grampeamento (Todd, 1996, pág. 6).

Figura 10 - SNUBBER RCD



Fonte: Snubber Circuits: Theory , Design and Application

2.6 Gate Drive

O driver do gate dos MOSFETs é um circuito essencial para fornecer a tensão e a corrente necessárias para saturar e cortar a condução, garantindo que os transistores operem eficientemente em alta frequência. Ele desempenha um papel crítico na proteção e desempenho do sistema, evitando atraso de comutação que poderiam levar a perdas de potência ou danos às chaves (Schiavon, 2007, p. 71).

2.7 ELEMENTO MAGNÉTICOS

O projeto dos elementos magnéticos é extremamente importante para o desenvolvimento de qualquer projeto de conversor, pois falhas no resultam em problemas indesejáveis no conversor, o indutor precisa conseguir armazenar a energia necessária na operação do conversor (Barbi, 2002, pág. 1).

Um dos elementos magnéticos mais utilizados são os transformadores, com a função de elevar ou reduzir tensões. Eles tipicamente possuem enrolamentos primário e secundário. Quando ocorre uma variação de tensão no enrolamento primário, uma tensão é induzida no secundário. Isso acontece porque, ao passar uma corrente por uma espira, é gerado um fluxo magnético que, por sua vez, induz uma corrente em outra espira (JR, 2020, pág. 12).

2.8 CONTROLE

Nesse tópico será abordado técnicas de controle

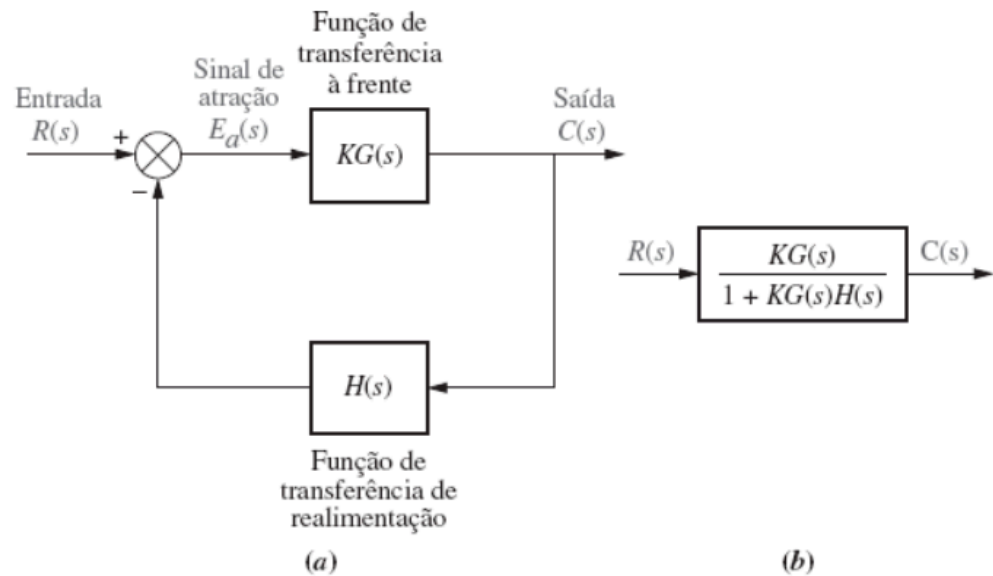
2.8.1 CONTROLE CLÁSSICO

A abordagem clássica do controle consiste em modelagem dos sistemas no domínio frequência, relacionando a entrada de um sistema como a saída, usando equações diferenciais, denominando isso de função de transferência.

Essa abordagem simplifica os sistemas, mas também apresenta uma desvantagem, não pode ser utilizada em sistemas que não sejam possíveis de aproximar como lineares e invariantes no tempo (Nise, 2023, pág. 79).

Para aplicar o controle, é necessário que o sistema seja realimentado. A Figura 11 apresenta a configuração típica de um diagrama de blocos com realimentação: (a) mostra o diagrama de blocos de forma generalizada e (b) apresenta uma versão generalizada e simplificada do diagrama de blocos (NISE, 2023, pág. 79).

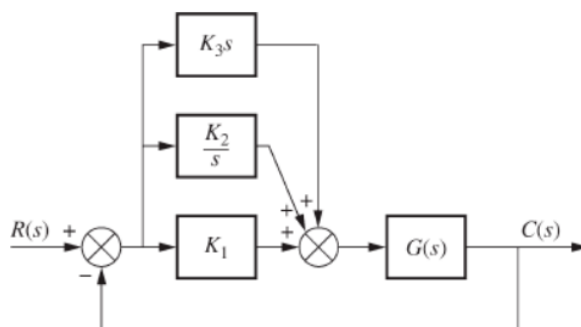
Figura 11 - Diagrama de blocos



Fonte: Engenharia de Sistemas de Controle

Para adicionar a ação de controle PID (Proporcional, Integrativo e Derivativo), é necessário inserir o controlador, alimentado pelo erro e tem como saída a lei de controle que atua na planta. A ação proporcional é responsável por reduzir o erro da planta e melhorar o desempenho do regime transitório. A ação integral tende a eliminar o erro de estado estacionário, mas pode tornar o sistema mais oscilatório. Já a ação derivativa afeta o regime transitório da planta, ajudando a reduzir oscilações e melhorando a estabilidade do sistema (NISE, 2023, pág. 316). A Figura (12) apresenta o diagrama de blocos do controlador PID

Figura 12 - Diagrama de blocos controlador PID



Fonte: Engenharia de Sistemas de Controle

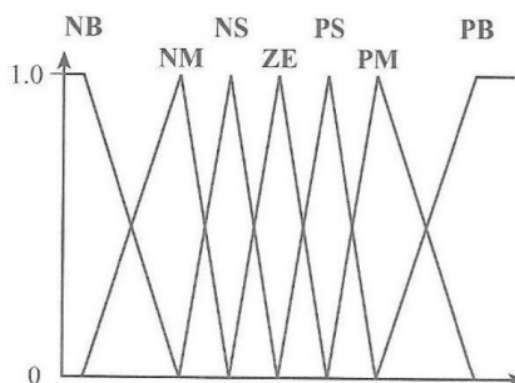
2.8.2 Controle Fuzzy

A lógica fuzzy tem a característica de transformar números incertos e probabilísticos em variáveis linguísticas, permitindo traduzir as percepções vagas de um ser humano em valores numéricos que um computador pode interpretar (Simões; Shaw, 2007, pág. 1).

Os sinais recebidos de sensores precisam ser convertidos em variáveis linguísticas, o nome desse processo é fuzzificação. Nesse processo, o valor medido pelos sensores é transformado em graus de pertinência associados a diferentes variáveis linguísticas (Simões; Shaw, 2007, pág. 14)

A Figura 13 apresenta um exemplo de gráfico associando diferentes graus de pertencas a diferentes varáveis linguísticas.

Figura 13 - Função de Pertinência



Fonte: Modelagem e controle Fuzzy 2º ed. (2007)

Após o processo de fuzzificação, os valores precisam ser processados pelo controlador fuzzy. Existem diferentes abordagens para projetar um controlador fuzzy, sendo uma das mais comuns o controlador baseado em regras.

Controladores baseados em regras utilizam uma base de conhecimento estruturada em declarações do tipo (se-então), que determinam a relação entre as entradas fuzzificadas e as saídas esperadas. Essa abordagem mais conhecida são o método de Mamdani e o método de Sugeno (Simões; Shaw, 2007, pág. 60).

O método Mandani relaciona conjuntos fuzzy da entrada com conjuntos fuzzy da saída sendo necessária uma defuzzyficação, já o método mandami, relaciona uma entrada com uma equação na saída (Simões; Shaw, 2007, pág. 73).

Um dos métodos defuzzificação existem é o Centro da Área, ou também conhecido como centro gravitacional, que consiste em encontrar o centro da área da figura formada com a união das áreas das pertinências dos conjuntos fuzzy, esse valor pode ser encontrado usando a Equação (9), u_i é a posição do centroide individual de uma função $u_{OUT}(u_i)$ é a área da união das áreas das funções de pertinência modificada pela sua pertinência

$$u = \frac{\sum_{j=1}^N u_i u_{OUT}(u_i)}{\sum_{j=1}^N u_{OUT}(u_i)} \quad \text{Eq.(9)}$$

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo é apresentado o passo a passo para desenvolvimento do projeto.

3.1 PROJETO DO RETIFICADOR

Primeiro é necessário dimensionar o capacitor do retificador, para isso é necessário saber a capacitância e a tensão de operação, podemos dimensionar a tensão de saída do retificador usando a Equação (4), a tensão máxima do capacitor precisa ser superior à tensão na saída.

$$VLmed = \sqrt{2}Vrms \quad \text{Eq.(4)}$$

Para dimensionar a capacitância se rescreve a Equação (3)

$$C1 = \frac{Pin}{f(V_{pk}^2 - V_{Cmin}^2)} \quad \text{Eq.(3)}$$

3.2 PROJETO CONVERSOR BOOST

Para o projeto do Conversor Boost, é necessário determinar os valores de capacitância e indutância. A capacitância do capacitor pode ser calculada utilizando a Equação (6), onde f_s representa a frequência de chaveamento e ΔV_C é a variação de tensão no capacitor (Arrabaça, 2013, p. 88). Neste projeto, com o uso do CI ML4841, tipicamente considera-se um D_{max} de 95% e a frequência de operação pode ser definida pelas Equação 10, e pelo resisto R_T e capacitor C_T , conectados ao pino sete do CI (Citar datasheet).

$$f_s = \frac{1}{0,51R_TC_T} \quad \text{Eq.(10)}$$

Para dimensionar a capacitância a Equação (7) é utilizada.

$$C = \frac{DVin}{\Delta V_C R f_s} \quad \text{Eq.(7)}$$

Para dimensionar a indutância a Equação (6) é utilizada.

$$L = \frac{DV_{in}}{\Delta I_L f_s} \quad \text{Eq.(6)}$$

3.3 PROJETO CONVERSOR FULL-BRIDGE

Para o projeto do conversor é necessário calcular as correntes envolvidas no transformador, utilizando as seguintes equações (HENRIQUE; FARIA, 2012, pág. 21).

$$I_{ipft\ vin\ min} = \frac{P_s}{\eta D_{max} V_{in\ Min}} \quad \text{Eq.(11)}$$

$$I_{ipft\ vin\ max} = \frac{P_s}{\eta D_{max} V_{in\ Max}} \quad \text{Eq.(12)}$$

$$I_{e\ max} = I_{ipft\ vin\ min} \sqrt{D_{max}} \quad \text{Eq.(13)}$$

$$I_{e\ min} = I_{ipft\ vin\ min} \sqrt{D_{max}} \quad \text{Eq.(14)}$$

onde:

- P_s = potência de saída do conversor;
- η = eficiência do conversor;
- D_{max} = razão cíclica máxima;
- $V_{in\ Max}$ = tensão de entrada máxima
- $V_{in\ Min}$ = tensão de entrada mínima
- $I_{ipft\ vin\ min}$ = corrente de pico na entrada do transformador em condição de tensão de entrada mínima;
- $I_{ipft\ vin\ max}$ = corrente de pico na entrada do transformador em condição de tensão de entrada máxima;
- $I_{e\ max}$ = corrente eficaz máxima no conversor com carga;
- $I_{e\ min}$ = corrente eficaz mínima no conversor com carga;

Com o valor $I_{ipft\ vin\ min}$ é possível calcular o capacitor de desacoplamento utilizando a Equação (15).

$$C_b = \frac{I_{ipft\ vin\ min} T_{on}}{0,1V_{in\ Min}} \quad \text{Eq.(15)}$$

Em seguida é necessário dimensionar a relação de espiras do transformador, utilizando a Equação (16), para o conversor fornecer a tensão de saída mesmo no pior cenário, ou seja, tensão de entrada mínima (HENRIQUE; FARIA, 2012, pág. 22).

$$\frac{N_p}{N_s} = 2D_{max} \frac{V_{in\ Min} - V_{Mosfet}}{V_o + V_D} \quad \text{Eq.(16)}$$

As demais equações necessárias para o projeto do transformador serão apresentadas no tópico focado em projeto de indutores e transformadores.

Para que o filtro de saída mantenha o conversor operando nas condições de projeto, utilizamos a Equação 17 para determinar a capacitância e a Equação 18 para determinar a indutância necessária, considerando ΔI_o como variação máxima de corrente na saída e ΔV_o como variação máxima de tensão na saída (HENRIQUE; FARIA, 2012, pág. 21).

$$C_o = \frac{80 \times 10^{-6} \Delta I_o}{\Delta V_o} \quad \text{Eq.(17)}$$

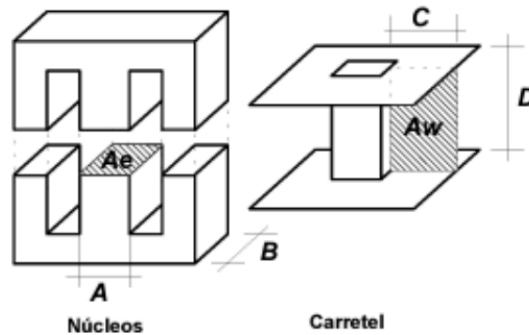
$$L_o = \frac{D_{max} V_o T}{\Delta I_o} \quad \text{Eq.(18)}$$

3.4 PROJETO INDUTOR E TRANSFORMADOR NUCLEO EE

As mesmas equações podem ser utilizadas para construção do indutor e do transformador, o transformador apenas não precisa possuir entreferro, diferentemente do indutor (Barbi, 2002, p.5).

A Figura 14 apresenta o núcleo e as Areas importantes para serem tradas em projeto de um ou transformador utilizando núcleo E núcleo EE (Barbi, 2002, p. 1).

Figura 14 - Nucleo EE



Fonte: PROJETO FÍSICO DE INDUTORES E TRANSFORMADORES (2002)

Para a escolha do modelo de núcleo, é necessário considerar a constante do produto da área K_w , que tipicamente apresenta o valor de 0,7. A Equação (19) descreve como calcular o valor que essa constante precisa atingir. Nessa equação, B_{max} representa o campo magnético que satura o núcleo do indutor, com um valor típico de 0,3 T para núcleos de ferrite, enquanto J_{max} é a densidade de corrente máxima do condutor, geralmente assumida como 450 A/cm² (Barbi, 2002, p.2).

$$A_e A_w = \frac{LI_{pico} I_{eficaz} 10^4}{B_{max} J_{max} K_w} \quad \text{Eq.(19)}$$

Para determinar o número de espiras necessárias para o projeto é necessário utilizar a Equação (20)

$$N = \frac{LI_{pico}}{B_{max} A_e} \quad \text{Eq.(20)}$$

Para determinar a distância do entreferro necessária para garantir a indutância de projeto é necessário utilizar a Equação (20)

$$l_{entreferro} = \frac{N^2 \mu_0 A_e 10^{-2}}{L} \quad \text{Eq.(21)}$$

Para determinar a profundidade de penetração da corrente no condutor se utiliza a Equação (22)

$$\Delta = \frac{7.5}{\sqrt{f}} \quad \text{Eq.(22)}$$

Para determinar a área da sessão transversão para conduzir a corrente é utilizado a Equação (23)

$$S_{fio} = \frac{I_{eficaz}}{J_{max}} \quad \text{Eq.(23)}$$

Para determinar o número de condutores necessário é utilizado a equação (24), utilizando a maior área possível para condutores considerando o devido ao efeito Skin e a área necessária para conduzir a corrente de projeto (Barbi, 2002, pág. 9).

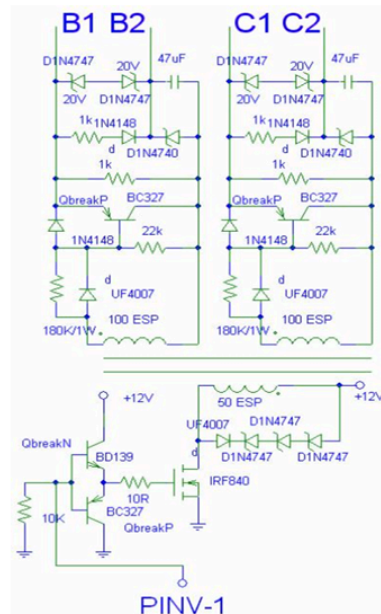
$$n_{condutor} = \frac{S_{condutor}}{S_{skin}} \quad \text{Eq.(24)}$$

3.5 GATE DRIVER

O circuito de driver inclui um transformador de pulso que eleva a tensão de controle, capacitores para desacoplamento e diodos para desmagnetização. A operação começa com um sinal de controle que energiza a bobina primária do transformador, gerando um pulso de alta tensão no lado secundário. Esse pulso carrega rapidamente o gate do MOSFET, ativando-o. Durante o desligamento, um circuito regenerativo garante que o gate seja drenado eficientemente, utilizando diodos e capacitores para criar uma tensão negativa. Essa técnica assegura que o transistor esteja completamente cortado, minimizando perdas residuais (Schiavon, 2007, p. 71).

A Figura 15 apresenta o circuito de gate driver, onde PINV - 1 controla B1 e B2, dos quais tem comportamento igual, e PINV-2 é omitido, mas controla C1 e C2.

Figura 15 - gate driver

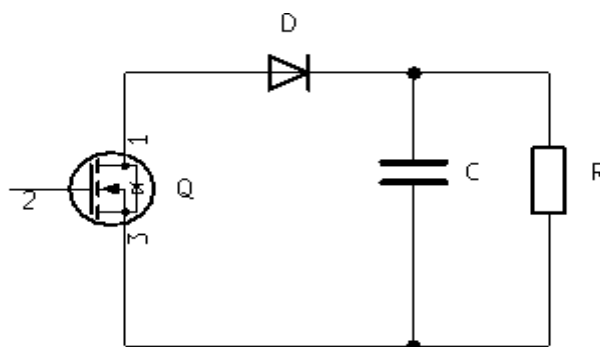


Fonte: Schiavon (2007)

3.6 PROJETO SNUBBER

Snubbers são circuitos utilizados para proteger semicondutores contra picos de tensão causados por indutâncias e capacitâncias parasitas presentes no circuito. A Figura 16 demonstra o circuito de um snubber (Schiavon, 2007, p. 56).

Figura 16 - Snubber



Fonte: Schiavon (2007)

Para calcular o valor do resistor utilizamos a Equação (25).

$$R = \frac{(2V_{rms})^2}{P} \quad \text{Eq.(25)}$$

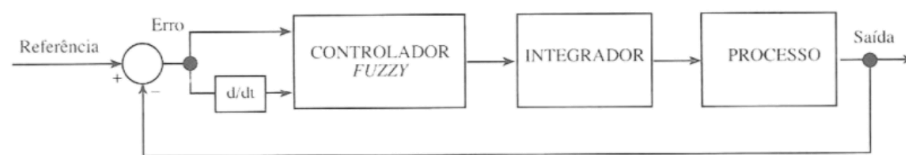
Para calcular o valor do capacitor utilizamos a Equação (26), sendo o valor de t o período para queda de 90% da tensão do capacitor.

$$C = \frac{-t}{R \ln\left(\frac{V_{c1}}{V_{c0}}\right)} \quad \text{Eq.(26)}$$

3.7 PROJETO CONTROLE PI FUZZY

O controlador PI fuzzy utilizada como entrada o erro e a variação do erro para alimentar o controlador fuzzy que tem como saída a variação da lei de controle, que precisa ser integrada para obter a lei de controle, Figura (17) apresenta o diagrama de blocos do controlador PI fuzzy (MARCELO GODOY SIMÕES; SHAW, 2007, pág. 70).

Figura 17 - Diagrama de Blocos Controle PI Fuzzy



Fonte: Modelagem e controle Fuzzy 2º ed. (2007)

A composição de regras será utilizada para será a Equação (27), demonstrando a entradas e saídas do sistema.

$$\text{SE erro} = E_i, \text{ E variação do erro} = dE_i, \text{ E variação da variação do erro} = d^2E_i, \text{ ENTÃO variação do erro} = dU_i \quad \text{Eq.(27)}$$

As funções de pertinências serão trapezoidais nas extremidades e triangulares próximas aos extremos do universo do discurso.

O método de inferência utilizado será Mandani e o método de defuzzyficação o centro de gravidade.

4 RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se projetar uma fonte chaveada capaz de estabilizar a tensão de saída em 48V, garantindo uma ondulação máxima de 1% e uma potência de 150W. O projeto deverá demonstrar desempenho satisfatório tanto nas simulações de circuito quanto na implementação prática, mantendo o fator de potência elevado durante a operação.

5

6 CONCLUSÃO (OU CONSIDERAÇÕES FINAIS)

Parte final do texto, na qual se apresentam as conclusões do trabalho acadêmico, usualmente denominada Considerações Finais. Pode ser usada outra denominação similar que indique a conclusão do trabalho.

REFERÊNCIAS

- ARRABAÇA, Devair A.; GIMENEZ, Salvador P. Conversores de Energia Elétrica CC/CC para Aplicações em Eletrônica de Potência - Conceitos, Metodologia de Análise e Simulação. Rio de Janeiro: Érica, 2013. *E-book*. p.89. ISBN 9788536518305. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536518305/>. Acesso em: 09 jan. 2025.
- BARBI, Ivo; FONT, CH Illa; ALVES, Ricardo Luis. Projeto físico de indutores e transformadores. Documento Interno (INEP–2002), 2002.
- DA SILVA, Marcel Pereira; SAES, Alexandre Macchione. A voz do desenvolvimento: Os primeiros anos da telefonia no Brasil e o começo da atuação do Grupo Light no serviço telefônico (1877-1916). *América Latina en la Historia Económica*, v. 31, n. 1, 2024.
- DE LUCCA, Jefferson; MAURO, Paulo Sérgio Gaudêncio. Desafios da tecnologia 5G. *Revista Interface Tecnológica*, v. 17, n. 1, p. 29-39, 2020.
- FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. ML4841 Product Specification. REV. 1.0.3. [S.l.]: Fairchild Semiconductor Corporation, 2001. Disponível em: <http://www.fairchildsemi.com>. Acesso em: 12 nov. 2024.
- FARIA, Julliano Henrique Santos de et al. Conversor CC-CC elevador de tensão Full-Bridge para aplicações em célula a combustível. 2012.
- FERREIRA, Matheus Erick Silva. Estudo, controle e simulação de um conversor buck para veículos aéreos não tripulados (VANT's). 2022.
- HELDWEIN, MARCELO LOBO. EM CENTRAIS DE TELECOMUNICAÇÕES. 1999. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
- HENRIQUE, J.; FARIA, S. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA NUPEP -NÚCLEO DE PESQUISAS EM ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA CONVERSOR CC-CC ELEVADOR DE TENSÃO FULL-BRIDGE**

PARA APLICAÇÕES EM CÉLULA A COMBUSTÍVEL. [s.l: s.n.]. Acesso em: 8 jan. 2025.

JR., Geraldo Carvalho do N. Máquinas Elétricas. Rio de Janeiro: Érica, 2020.

E-book. p.12. ISBN 9788536519821. Disponível em:

<https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536519821/>. Acesso em: 12 jan. 2025.

KREIN, Philip T. Elements of Power Electronics. New York, EUA – Oxford University Press, 1997.

MAJUMBAR, G. Future of power semiconductors. Power Electronics Specialists Conference – PESC'04, p. 10-15, June, 2004.

MARCELO GODOY SIMÕES; SHAW, I. S. **Controle e modelagem fuzzy**. [s.l.] Editora Blucher, 2007.

NEVES, Mauricio dos Santos. O setor de telecomunicações. 2002.

NISE, Norman S. Engenharia de Sistemas de Controle. 8th ed. Rio de Janeiro: LTC, 2023.

PETRY, Clóvis Antônio. Metodologia de projeto de retificadores com filtro capacitivo. Revista Ilha Digital, v. 3, p. 77-85, 2012.

SALMANI, Devood; AKBARI, Mohsen. Fuzzy and research paradigms relationship: a mutual contribution. Academic Leadership: The Online Journal, v. 6, n. 2, p. 7, 2008.

SCHIAVON, Gilson J. No-Break 1, 2KVA, senoidal, operando em malha fechada: circuito de potência, circuito de controle analógico e circuito de controle digital com DSC. 2007. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado Engenharia Elétrica)-Universidade Estadual de Londrina, Londrina

TODD, Philip C. Snubber circuits: Theory, design and application. In: Unitrode-Power Supply Design Seminar. 1993. p. 1993.

UEDA, Vanda. Inovação tecnológica e estratégias de implantação do telefone no Rio Grande do Sul e Argentina: um estudo comparado [em linha]. 200

XAVIER, Jonas et al. Estudo da evolução da telefonia móvel no Brasil. X Encontro de Iniciação Científica e VI Encontro de Pós-Graduação—Universidade do Vale do Paraíba. São José dos Campos-SP, 2006.