

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JOYCE CARVALHO PEREIRA

MATHEUS DE ALMEIDA GIMENES

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONVERSOR CC/CC *BOOST* COMO
PLATAFORMA DIDÁTICA PARA ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**

CURITIBA

2024

**JOYCE CARVALHO PEREIRA
MATHEUS DE ALMEIDA GIMENES**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONVERSOR CC/CC *BOOST* COMO
PLATAFORMA DIDÁTICA PARA ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**

**DEVELOPMENT OF A DC/DC *BOOST* CONVERTER AS LEARNING
PLATFORM FOR POWER ELECTRONICS**

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

Orientador: Prof. Dr. Lucas Sangoi Mendonça

CURITIBA

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**JOYCE CARVALHO PEREIRA
MATHEUS DE ALMEIDA GIMENES**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONVERSOR CC/CC *BOOST* COMO
PLATAFORMA DIDÁTICA PARA ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**

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

Data de aprovação: 23/Fevereiro/2024

Lucas Sangoi Mendonça
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

José Jair Alves Mendes Junior
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Thiago Cattani Naidon
Doutorado
Universidade Federal de Santa Maria

**CURITIBA
2024**

Os alunos dedicam esse trabalho de conclusão
de curso aos seus pais.

AGRADECIMENTOS

Os alunos, Joyce e Matheus, primeiramente, gostariam de agradecer ao orientador Prof. Dr. Lucas Sangoi Mendonça, pela sabedoria e parceria com que nos guiou nesta trajetória.

A aluna Joyce gostaria de deixar registrado também, o agradecimento à seus pais, Fátima e Reginaldo, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer mais esse desafio.

O aluno Matheus gostariam de deixar registrado também, o reconhecimento à minha família e amigos, pois esta jornada sem o apoio e incentivos, em especial, Rubens e Carol Gimenes, seria muito mais desafiador de ser alcançada.

Os alunos gostariam de agradecer também aos professores, em especial encontrados durante o curso, como aos professores Rubens Alexandre De Faria e Joaquim Miguel Maia, e às professoras Carmen Caroline Rasesa e Fabiana Pottker.

A aluna Joyce gostaria de agradecer também, seu companheiro, Renan, por todo suporte, amor e convivência ao longos desses anos, e a seus amigos.

Bancada didática é mais do que construir circuitos; é construir pontes entre teoria e prática, capacitando o aluno para enfrentar os desafios tecnológicos do mundo moderno.

RESUMO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem como objetivo projetar, desenvolver e fornecer materiais de teste e uso para uma bancada didática de conversão CC/CC com topologia *Boost* para disciplina de Eletrônica de Potência. Os conversores CC/CC estão presentes em diversos equipamentos, produtos e circuitos embarcados do nosso cotidiano, abrangendo equipamentos de ponta em fábricas e grandes montadoras. O desenvolvimento de uma bancada didática se faz necessário, pois permite que o aluno consiga realizar os laboratórios de forma mais dinâmica e prática, sendo capaz de validar os resultados obtidos na teoria. A proposta é que esse projeto seja utilizado em disciplinas de graduação com ementas que estão relacionadas à Eletrônica de Potência. Para o desenvolvimento do presente conversor, foram realizados estudos e dimensionamentos teóricos, simulações, testes de *hardware* de circuitos intermediários, desenvolvimento de placa de circuito impresso, bancada finalizada e um conjunto de instruções o qual irá auxiliar e direcionar os discentes no momento do teste e validação prática. O conversor CC/CC *Boost* projetado foi validado por meio da comparação dos resultados de simulação e experimental para diferentes pontos de operação. Ademais, a plataforma didática desenvolvida foi comparada com soluções comerciais em termos de dimensões, tipo de conversão e custo.

Palavras-chave: bancada didática; conversores cc/cc; conversor *boost*.

ABSTRACT

This final undergraduate work aims to design, develop and provide bench materials for a learning workbench in DC/DC Boost conversion to be used in Power Electronics lectures. The DC/DC converters are used in several equipments, products and embedded circuits in our daily lives, covering cutting-edge equipments in factories and assembling plants. The development of a learning workbench is necessary because it allows the student to perform practical tests and to validate the theory. This work aims to be used in undergraduate courses related to Power Eletronics. In order to develop the proposed converter, theoretical analysis and design, simulation, hardware tests, printed circuit board development and a how-to-use guide were performed. The designed DC/DC Boost converter were validated by means of a comparison between simulation and experimental results. In addition, the developed learning workbench was compared to commercial solutions considering physical size, type of conversion and cost.

Keywords: learning workbench; dc/dc converters; boost converter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – <i>Kits</i> didáticos - <i>Texas Instruments</i> ®	23
Figura 2 – Bancada de ensino em Eletrônica de Potência - <i>Exsto Tecnologia</i> ®	24
Figura 3 – Conversor <i>Boost</i> do <i>kit</i>	24
Figura 4 – Módulo didático ZL-POT da Zilocchi®	25
Figura 5 – Conversor <i>Buck</i>	27
Figura 6 – Conversor <i>Buck</i> - Circuito para de etapa de operação 1.	27
Figura 7 – Conversor <i>Buck</i> - Circuito para de etapa de operação 2.	28
Figura 8 – Formas de onda do conversor <i>Buck</i>	29
Figura 9 – Ganho estático do conversor <i>Buck</i> em função da razão cíclica	31
Figura 10 – Conversor <i>Boost</i>	31
Figura 11 – Conversor <i>Boost</i> - Circuito para de etapa de operação 1	32
Figura 12 – Conversor <i>Boost</i> - Circuito para etapa de operação 2.	32
Figura 13 – Formas de onda do conversor <i>Boost</i>	33
Figura 14 – Ganho estático do conversor <i>Boost</i> em função da razão cíclica	34
Figura 15 – Conversor <i>Buck-Boost</i>	35
Figura 16 – Conversor <i>Buck-Boost</i> - Circuito para etapa de operação 1	35
Figura 17 – Conversor <i>Buck-Boost</i> - Circuito para etapa de operação 2	35
Figura 18 – Formas de onda do conversor <i>Buck-Boost</i>	36
Figura 19 – Ganho estático do conversor <i>Buck-Boost</i> em função da razão cíclica	37
Figura 20 – Outros conversores CC/CC. (a) <i>Flyback</i> . (b) <i>Foward</i> . (c) <i>Çuk</i> . (d) <i>Sepic</i> . (e) <i>Zeta</i>	38
Figura 21 – Modos de condução. (a) CCM. (b) CRM. (c) DCM	40
Figura 22 – Esquemático da Simulação do conversor <i>Boost</i>	47
Figura 23 – Resultado da simulação do conversor <i>Boost</i>	48
Figura 24 – Fluxograma da escolha dos componentes	49
Figura 25 – Esquemático da simulação do circuito <i>gate-driver</i>	52
Figura 26 – Simulação do <i>driver</i> . (a) 20%. (b) 35%. (c) 50%. (d) 60%.	54
Figura 27 – Esquemático de produção	55
Figura 28 – <i>Top layer</i>	56
Figura 29 – <i>Bottom layer</i>	57

Figura 30 – Top layer 3D	57
Figura 31 – Bottom layer 3D	58
Figura 32 – Placa soldada - top layer	59
Figura 33 – Placa soldada - bottom layer	60
Figura 34 – Caixa montada sem placa. (a) Visão lateral 1. (b) Visão de cima. (c) Visão frontal. (d) Visão lateral 2.	61
Figura 35 – Plataforma didática com conversor CC/CC Boost - Aberta	62
Figura 36 – Plataforma didática com conversor CC/CC Boost - Fechada	62
Figura 37 – Resultados para sinal de gatilho para razão cíclica de 20%. (a) Simulação. (b) Experimental.	63
Figura 38 – Resultados para tensão de saída para razão cíclica de 20%. (a) Simulação. (b) Experimental.	64
Figura 39 – Resultados para tensão na chave para razão cíclica de 20%. (a) Simulação. (b) Experimental.	64
Figura 40 – Resultados para tensão no diodo para razão cíclica de 20%. (a) Simulação. (b) Experimental.	65
Figura 41 – Resultados para corrente no indutor para razão cíclica de 20%. (a) Simulação. (b) Experimental.	65
Figura 42 – Resultados para sinal de gatilho para razão cíclica de 35%. (a) Simulação. (b) Experimental.	66
Figura 43 – Resultados para tensão de saída para razão cíclica de 35%. (a) Simulação. (b) Experimental.	66
Figura 44 – Resultados para tensão na chave v_S para razão cíclica de 35%. (a) Simulação. (b) Experimental.	67
Figura 45 – Resultados para tensão no diodo para razão cíclica de 35%. (a) Simulação. (b) Experimental.	67
Figura 46 – Resultados para corrente no indutor para razão cíclica de 35%. (a) Simulação. (b) Experimental.	68
Figura 47 – Resultados para sinal de gatilho para razão cíclica de 50%. (a) Simulação. (b) Experimental.	68
Figura 48 – Resultados para tensão de saída para razão cíclica de 50%. (a) Simulação. (b) Experimental.	69

Figura 49 – Resultados para tensão na chave para razão cíclica de 50%. (a) Simulação. (b) Experimental.	69
Figura 50 – Resultados para tensão no diodo para razão cíclica de 50%. (a) Simulação. (b) Experimental.	70
Figura 51 – Resultados para corrente no indutor para razão cíclica de 50%. (a) Simulação. (b) Experimental.	70
Figura 52 – Resultados para sinal de gatilho para razão cíclica de 60%. (a) Simulação. (b) Experimental.	71
Figura 53 – Resultados para tensão de saída para razão cíclica de 60%. (a) Simulação. (b) Experimental.	71
Figura 54 – Resultados para tensão na chave para razão cíclica de 60%. (a) Simulação. (b) Experimental.	72
Figura 55 – Resultados para tensão no diodo para razão cíclica de 60%. (a) Simulação. (b) Experimental.	72
Figura 56 – Resultados para corrente no indutor para razão cíclica 60%. (a) Simulação. (b) Experimental.	73
Figura 57 – Comparação do ganho teórico com experimental	75
Figura 58 – <i>Setup</i> de teste	76
Figura 59 – Ganho estático do conversor <i>Boost</i> em função da razão cíclica	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações da fonte CA/CC	43
Tabela 2 – Especificações do conversor CC/CC	44
Tabela 3 – Valores calculados	45
Tabela 4 – Saída do algoritmo de projeto	46
Tabela 5 – Parâmetros de simulação	47
Tabela 6 – Componentes Comerciais	49
Tabela 7 – Componentes para o chaveamento	50
Tabela 8 – Valores de resistência do potenciômetro	53
Tabela 9 – Razão cíclica da simulação com modelo SPICE	53
Tabela 10 – Indicação das conexões entre a placa e a caixa	60
Tabela 11 – Eficiência do conversor CC/CC	73
Tabela 12 – Resultado experimental para variação da razão cíclica	74
Tabela 13 – Comparação com outras soluções	75
Tabela 14 – Resultados para tensão de saída	82
Tabela 15 – Resultados para ondulação de corrente	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

BOM	Lista de Material
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCM	<i>Continuous Conduction Mode</i>
CRM	<i>Critical Conduction Mode</i>
DCM	<i>Discontinuous Conduction Mode</i>
LDO	<i>Low-dropout Regulator</i>
PBL	<i>Project-based Learning</i>
PCB	Placa de Circuito Impresso
PPC	Projeto Pedagógico de Curso
SCR	Retificador Controlado de Silício

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Considerações iniciais	15
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo geral	17
1.2.2	Objetivos específicos	17
1.3	Justificativa	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Revisão da literatura	20
2.2	Soluções comerciais para plataformas didáticas de Eletrônica de Potência	22
3	REFERENCIAL TEÓRICO	26
3.1	Conversores CC/CC	26
3.1.1	Conversor <i>Buck</i>	27
3.1.2	Conversor <i>Boost</i>	30
3.1.3	Conversor <i>Buck-Boost</i>	34
3.1.4	Outros conversores CC/CC	37
3.2	Modo de condução	39
3.3	Projeto de conversores CC/CC	40
4	METODOLOGIA	43
4.1	Especificações de projeto	43
4.2	Cálculo dos componentes	44
4.3	Simulação inicial	45
4.4	Escolha dos componentes do estágio de potência	48
4.4.1	Diodo e chave	50
4.4.2	Capacitor, resistor e indutor	50
4.5	Circuito de <i>gate-driver</i>	51
4.6	Simulação com modelos SPICE	53
4.7	Projeto do <i>hardware</i>	54
4.8	Placa de circuito impresso	55
4.9	Estrutura mecânica	58

4.10	Material didático	58
5	RESULTADOS	59
5.1	Montagem da plataforma	59
5.2	Comparação entre resultados de simulação e experimental	63
5.2.1	Razão cíclica 20%	63
5.2.2	Razão cíclica 35%	65
5.2.3	Razão cíclica 50%	68
5.2.4	Razão cíclica 60%	71
5.3	Potência e eficiência	73
5.4	Comparação com outras soluções	74
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICE A ROTEIRO DE AULA PARA USO DA PLATAFORMA DIDÁTICA	81

1 INTRODUÇÃO

A Eletrônica de Potência pode ser encontrada em diversas tecnologias e é responsável pelo estudo da conversão de energia elétrica e controle de sistemas eletrônicos. Algumas aplicações dessa área de estudo estão no setor automotivo, de distribuição e transmissão de energia elétrica, tratamento de fontes renováveis, dentre outros (BARBI, 2006).

Uma das formas de conversão de energia, alvo do estudo da Eletrônica de Potência, é a conversão de Corrente Contínua (CC) para corrente contínua, visando adequar diferentes níveis de tensão. Os conversores CC/CC são empregados como uma interface entre fontes de alimentação em corrente contínua e cargas que demandam tensão com um nível diferente mas também em corrente contínua.

Esse trabalho de conclusão de curso apresenta o desenvolvimento de um conversor CC/CC como plataforma didática para o estudo da Eletrônica de Potência. No presente capítulo, considerações iniciais sobre a conversão CC/CC, motivação para o ensino com plataformas didáticas na Eletrônica de Potência e aplicações são descritas. Ademais, esse capítulo também mostra o objetivo geral, objetivos específicos e justificativa para o desenvolvimento do trabalho.

1.1 Considerações iniciais

Na conversão CC/CC, destacam-se como topologias bases o conversor rebaixador de tensão, onde a tensão de saída é inferior a de entrada, denominado *Buck*, o conversor elevador de tensão, onde a tensão de saída é maior que a tensão da entrada, denominado *Boost* e o conversor que possibilita rebaixar ou elevar a tensão dependendo do ponto de operação, chamado de *Buck-Boost*. Com a recente investigação espacial marcada pelo telescópio James Webb, diversos sistemas eletrônicos são necessários para o funcionamento desse equipamento óptico. Um exemplo é a utilização de um conversor *Buck* responsável por converter a tensão de 22 - 43 V para tensões reguladas de 5 e 12 V, usadas na alimentação de amplificadores de potência e módulos de aquecimento do telescópio espacial (HARVEY *et al.*, 2016).

Os conversores CC/CC também são amplamente utilizados para acionamento de motores de corrente contínua. Nesse sentido, em aplicações como sistemas de tração, robótica, e laminadores industriais, motores CC devem ser acionados e controlados de forma adequada, e esse processamento de energia é realizado por topologias CC/CC (ISMAIL; ELNADY, 2019).

Notoriamente, faz-se importante o estudo da Eletrônica de Potência na formação de estudantes de Engenharia Eletrônica, Elétrica, Controle e Automação e Mecatrônica. Uma das abordagens mais eficazes para aprimorar a aprendizagem dos estudantes, em particular na área de Eletrônica de Potência, é por meio das aulas práticas de laboratório.

Nessas aulas, os alunos têm a oportunidade de colocar em prática os conceitos teóricos previamente aprendidos em sala de aula, assim como a matéria é ministrada no curso de eletrônica da UTFPR de Curitiba, onde na matriz atual, a carga horária semanal da disciplina de

Eletrônica de Potência é composta por três aulas teóricas e duas aulas práticas, ressaltando a necessidade da utilização dos laboratórios como modelo comprovatório dos resultados obtidos nas aulas teóricas.

Durante as atividades laboratoriais são realizadas simulações de circuitos, projetos e dimensionamento de componentes, montagem de circuitos e uma variedade de outras práticas que proporcionam aos alunos uma compreensão mais profunda do sistema em estudo. Isso permite a análise do funcionamento do circuito, o uso de equipamentos de medição, a compreensão do comportamento não ideal dos componentes e as normas de segurança necessárias para utilização dos dispositivos, para preservação dos mesmos e dos próprios discentes que estão manuseando o experimento.

Apesar da utilização de ferramentas e aulas de laboratórios serem essenciais para que o aluno tenha a experiência prática do conteúdo teórico, há diversos empecilhos que dificultam essa prática. A grande dificuldade em realizar isso, é que muitos alunos não possuem a prática diária de montagem de circuitos elétricos, e isso demanda muito tempo do professor, pois o mesmo precisa auxiliar uma turma de aproximadamente 24 alunos. Com isso, bancadas pré-montadas, são de grande auxílio para o melhor aproveitamento do tempo da aula, aumento de segurança e foco mais destinado na aplicação e não nas situações oriundas à montagem, como segurança e integridade do sistema dividindo o foco do aluno que, neste momento, deve avaliar os resultados do projeto proposto.

Laboratórios de Eletrônica de Potência necessitam de amplo espaço físico, possuem custo elevado, o que dificulta sua construção e são de alta periculosidade, pois trata-se da chamada *rede-viva*, que é a tensão direta da tomada nas bancadas e nas placas que serão avaliadas. Visando minimizar esses problemas, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma plataforma didática para estudo do tópico de conversores CC/CC para ensino prático para a disciplina de Eletrônica de Potência. Busca-se desenvolver uma plataforma de tamanho reduzido e baixo valor de fabricação e aquisição dos componentes. Ademais, o trabalho visa fornecer os cálculos, simulações, roteiro para aula e validação dos resultados onde os alunos podem ter acesso a todas etapas de construção de um projeto real, possuindo as características de um produto final encontrado no mercado de trabalho.

1.2 Objetivos

O objetivo deste TCC é expor a ideia técnica do desenvolvimento de uma bancada didática, o que se faz importante para a formação de futuros engenheiros na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, podendo ser utilizado por outras instituições que compartilhem da mesma posição com relação à busca de oferecer aos seus discentes uma metodologia onde a teoria seja validada na prática.

1.2.1 Objetivo geral

Esse trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma plataforma didática com dimensões e custo reduzidos para Eletrônica de Potência no estudo de conversores CC/CC usando a topologia *Boost*, a qual os discentes possam realizar medições e alterações de funcionamento de forma simples e segura.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um circuito de *gate-driver* com possibilidade de ajuste analógico da razão cíclica;
- Simular os estágios de potência e acionamento;
- Projetar e desenvolver uma placa de circuito impresso para o conversor *Boost* com alimentação única para o estágio de potência e acionamento;
- Realizar testes experimentais para validar os resultados obtidos na simulação;
- Instalar o conversor em uma plataforma didática para fácil manuseio;
- Elaborar um roteiro de aula, o qual será utilizado como base para a realização das atividades laboratoriais, pelos alunos;
- Instalar pontos de testes (*test points*), para possibilitar o acoplamento de fonte de alimentação desenvolvida previamente, na disciplina de Eletrônica de Potência, e com os instrumentos de medição (como osciloscópio e/ou multímetro), expostos nos pontos importantes de medições, os quais serão definidos ao longo dos capítulos seguintes;
- Identificar as soluções comerciais para ensino em Eletrônica de Potência existentes atualmente no mercado para efeito de comparação com a plataforma desenvolvida.

1.3 Justificativa

O presente trabalho foi desenvolvido considerando a necessidade de aulas práticas de Eletrônica de Potência na formação do Engenheiro, o alto custo de bancadas didáticas comerciais e da demanda particular nos cursos de Engenharia Eletrônica e Mecatrônica da UTFPR-Curitiba por uma plataforma para estudo prático de conversores CC/CC.

Esse trabalho é justificado pela importância da realização de atividades práticas na formação do Engenheiro Eletrônico, uma vez que, as habilidades de *hardware* são fundamentais no mercado de trabalho. Além disso, no contexto de Eletrônica de Potência, a experiência do

estudo de como as topologias de conversores operam na prática, permite a compreensão e validação dos conteúdos teóricos, possibilitando variação do modelo do conversor, por exemplo, topologias *Buck* e *Boost*, de acordo com os componentes selecionados pelos estudantes, no momento da realização do laboratório. Ademais, o novo projeto pedagógico de curso Projeto Pedagógico de Curso (PPC) de Engenharia Eletrônica da UTFPR - Curitiba, tem como principal objetivo possibilitar que o aluno, em um determinado momento do curso, possa enfatizar e focar nas áreas que mais são atrativas para si (NORONHA, 2019), dessa forma, o discente pode escolher disciplinas onde os tópicos necessitam de maior aprofundamento teórico, como no caso, da proposta para a disciplina de Eletrônica de Potência no novo PPC.

Segundo Noronha (2019), preferencialmente associada a pelo menos um Projeto, Atividade ou Programa de Extensão, uma Trilha de Aprofundamento é formada por um grupo de disciplinas, que juntas, formam uma base técnica e científica, ou um contexto de atuação profissional, permitindo assim que o aluno vivencie como ser Engenheiro. Portanto, o escopo deste TCC está inserido diretamente nos objetivos desse novo PPC, onde o projeto desenvolvido será utilizado na nova trilha da área de Eletrônica de Potência que está sendo desenvolvida e especificada, para que os futuros alunos possam aproveitar de todo esse conhecimento. Ademais, o trabalho é justificado pelo próprio interesse das instituições de ensino em fomentar o desenvolvimento de trabalhos de conclusão de curso na Engenharia Eletrônica, Mecatrônica e Elétrica voltados à criação de bancadas didáticas.

Existem, na literatura, alguns exemplos de bancadas também desenvolvidas por estudantes, como o trabalho de Prange (2019), que apresenta um equipamento didático para as aulas de Eletrônica de Potência com topologias de retificadores a diodo e tiristor. No trabalho citado, os circuitos com tiristor são comandados por um microcontrolador, o que possibilita aliar o estudo do *hardware* com habilidades de *software*. Já em Pitol (2019), um retificador controlado a tiristor foi projetado em placa de circuito impresso para uma bancada didática de Eletrônica de Potência. O projeto eletrônico citado contém um potenciômetro para ajuste do ângulo de disparo dos semicondutores.

Cavilha (2020) também mostrou a importância do desenvolvimento de uma bancada didática para o acionamento de motores de indução trifásicos, voltado para alunos de Pós-graduação. Pois, com o desenvolvimento da bancada, seria possível que os alunos colocassem em prática o conhecimento adquirido em sala de aula, e também observassem os detalhes técnicos necessários para o funcionamento das máquinas em corrente alternada.

Soluções comerciais são encontradas no mercado, tais como *kits* didáticos modulares para ensino em Eletrônica de Potência. Empresas como *Texas Instruments*, a *Exston Tecnologia*, a *PowerSIM*, e o Grupo *Zilocchi* comercializam esses *kits* (TEXAS-INSTRUMENTS, 2017; EXSTO, 2017; ZILOCCHI., 2017). Dessa forma, o próprio interesse do mercado em desenvolver plataformas didáticas para Eletrônica de Potência apresenta uma justificativa para a criação destas também dentro da Universidade, o que facilita o acesso dos equipamentos por parte dos alunos, devido, principalmente, ao alto custo que os *kits* possuem.

O projeto dos conversores CC/CC em uma plataforma didática fornece uma ferramenta prática para que os alunos possam testar, analisar e compreender o funcionamento do modelo de conversão, de forma interativa, segura e direta, onde alterando apenas alguns componentes poderão analisar os impactos previstos na teoria por meio da prática. Além disso, busca-se produzir a bancada na própria Universidade, tornando-a acessível para os alunos. Ademais, o conversor poderá ser integrado a uma fonte previamente desenvolvida na disciplina de Eletrônica de Potência, a qual será pré-requisito para a nova trilha, consolidando ainda mais os conceitos vistos anteriormente em sala e em laboratório. Em síntese, o desenvolvimento de uma bancada didática para estudo dos conversores CC/CC é justificado pela variedade de aplicações, incluindo máquinas elétricas, iluminação e fontes chaveadas, incentivo das Universidades no desenvolvimento de plataformas para práticas de Eletrônica de Potência e interesse do mercado na comercialização de *kits* para estudo das topologias mais utilizadas nesta forma de conversão. Portanto, a proposta aqui justificada, mostra-se alinhada com as diretrizes de desenvolvimento tecnológico utilizadas no ensino e aprendizagem, pesquisa e indústria na área de Eletrônica de Potência.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo apresenta os principais trabalhos, pesquisas e produtos relacionados aos objetivos desse TCC. Os principais tópicos de revisão incluem: conversão CC/CC, aplicações de conversores CC/CC, plataformas didáticas para ensino na Engenharia e produtos comerciais voltadas à área de Eletrônica de Potência. Portanto, o presente capítulo está separado em dois itens: revisão da literatura e soluções comerciais para plataformas didáticas em Eletrônica de Potência.

2.1 Revisão da literatura

Visando desenvolver um *hardware* configurável para diferentes tipos de conversão de energia, Anand, Farswan e Fernandes (2012) desenvolveram um equipamento genérico PED (*power electronics and drives*) que permite a configuração de 14 topologias, destacando-se os retificadores monofásicos meia onda e onda completa, retificadores trifásicos, conversor CC/CC rebaixador entre outros. O equipamento também inclui um microcontrolador que pode ser usado para implementação de técnicas de controle. A plataforma foi implementada em cursos de pós-graduação e é capaz de processar até 2 kW. Apesar do trabalho mencionar que o equipamento possui baixo custo, o valor total de sua construção não foi indicado.

Com a necessidade de aulas remotas, muitos esforços foram concentrados para suprir a falta de aulas práticas presenciais. Nesse contexto, Przybyła *et al.* (2022) propuseram um conversor CC/CC conectado no osciloscópio USB *Analog Discovery 2* da Digilent (DIGILENT, 2023) que mede duas formas de onda do conversor e está comunicado com um *Raspberry PI*. Os resultados medidos são mostrados em um computador local por meio de uma aplicação da Digilent. Por meio de uma aula remota, os estudantes podem ter acesso aos resultados medidos e apresentados no computador local. O *hardware* do conversor permite operação como *Buck* ou *Boost* e está construído em uma Placa de Circuito Impresso (PCB) com dimensões 75 x 164 mm.

Josemar (2018) desenvolveu um conversor *Buck* com intuito de uso didático. O conversor projetado opera em 25 kHz e processa até 10 W de potência. Ademais, é possível realizar variação da razão cíclica por meio de um circuito com oscilador e potenciômetro. Os circuitos de potência e sinal foram montados em placa de circuito impresso. Uma limitação em termos de uso didático, é que o conversor possui apenas ponto de medição para a tensão e corrente na carga.

Martínez (2005) propôs uma abordagem que consiste em uma plataforma configurável que integra *hardware* e *software*. Essa plataforma permite aos estudantes escolher entre diversos tipos de conversores disponíveis, ajustar seus parâmetros por meio de uma interface intuitiva, analisar o circuito e observar gráficos de sinais, como os sinais de disparo e as formas de onda de corrente e tensão.

Seguindo a filosofia de laboratórios modulares, Machado, Costa e Carmo (2012) e Susin *et al.* (2000) também apresentam propostas que envolvem a aplicação, identificação e controle de circuitos eletrônicos usando diversas topologias e tipos de cargas. Paralelamente, Perez, Balcells e Lamich (2008) sugerem a criação de *kits* didáticos com baixa tensão de saída, mas com alta corrente. Isso permite que os alunos utilizem os *kits* para acionar e controlar dispositivos como motores de indução trifásicos. O controle pode ser realizado em malha aberta ou, em alguns casos, em malha fechada.

É importante destacar que, ao desenvolver esses experimentos e *kits*, a segurança é primordial. A implementação de circuitos de proteção, incluindo fusíveis, transformadores, isoladores, e rebaixadores, desempenha um papel fundamental na eliminação ou redução dos riscos de choques elétricos, garantindo um ambiente de aprendizado seguro para os alunos.

No contexto da elaboração de projetos de engenharia, Machado, Costa e Carmo (2011) ressaltam diversos pontos cruciais. Isso inclui a necessidade de incentivar os alunos a desenvolver habilidades de comunicação eficaz com seus colegas, considerar aspectos de custo e lucro nos projetos, promover a compreensão multidisciplinar, enfatizar a ética profissional, cultivar uma paixão pela engenharia, e reconhecer a importância dos mentores e professores no processo de aprendizado.

Alinhado com essa abordagem, enfatiza-se o valor fundamental das aulas práticas de laboratório. Essas aulas desempenham um papel central na validação dos conhecimentos adquiridos, no desenvolvimento de habilidades de trabalho em equipe e na aplicação prática de soluções de engenharia a partir de situações-problema e requisitos específicos. Elas também incentivam a criatividade dos alunos, permitindo-lhes explorar novas ideias e conceitos (MACHADO; COSTA; CARMO, 2011).

Bastami, Avestruz e Leeb (2014) propõem uma estratégia de projetos mais robusta, que abrange a modelagem, o controle e a simulação, a fim de aprimorar a compreensão de fatores como *layout*, aterramento, não-linearidades, e outros elementos-chave de projetos de engenharia. Os *softwares* de simulação desempenham um papel crucial no processo de aprendizado, pois permitem que os alunos cometam erros que, na realidade, poderiam causar danos aos circuitos. No entanto, é fundamental ressaltar que, embora essas ferramentas sejam valiosas, elas possuem limitações, uma vez que são baseadas em modelos matemáticos. Portanto, a combinação de aulas práticas, simulações e abordagens multidisciplinares é essencial para uma formação completa e eficaz em engenharia.

A utilização de plataformas didáticas no ensino da Engenharia converge com a metodologia de ensino-aprendizagem conhecida como *Project-based Learning* (PBL), ou seja, a aprendizagem baseada em projetos, na qual, um projeto é definido como objetivo final de uma avaliação, e durante o semestre, os discentes devem desenvolver o projeto e ir assimilando os conteúdos e conceitos, muitas vezes, por experiência prática. No trabalho descrito por Lamar *et al.* (2012), a metodologia PBL foi aplicada no curso de Eletrônica de Potência da Universidade de Oviedo, Espanha, com o intuito do desenvolvimento de um conversor CC/CC com tensão de

entrada nominal de 12 V, tensão de saída de 19 V, potência de saída de 20 W e operação com frequência de chaveamento 100 kHz. No final do semestre, uma pesquisa foi conduzida com os estudantes visando avaliar a abordagem PBL aplicada. Por meio dessa pesquisa, foi quantificado que os alunos melhoraram suas habilidades de resolução de problemas, aplicação de conteúdos teóricos e tomada de decisão. Contudo, vale ressaltar que o trabalho também avaliou o desempenho dos estudantes em uma prova teórica convencional tendo como base o aprendizado via PBL. Na prova teórica, para o trabalho referenciado, os estudantes tiveram erros em conceitos bases da disciplina. O trabalho de Lamar *et al.* (2012) faz uma discussão sobre os benefícios da aplicação da PBL e os motivos dos erros na prova teórica e um dos pontos citados é que, devido à natureza prática do PBL, os estudantes acabam desenvolvendo métodos de tentativa e erro que, algumas vezes funcionam para a parte prática do projeto, porém, não são adequadas para os conteúdos teóricos. Em última instância, ainda sim, o contato com um projeto de Eletrônica de Potência com características comerciais, melhora a percepção dos alunos de como o conteúdo teórico é desdobrado na indústria.

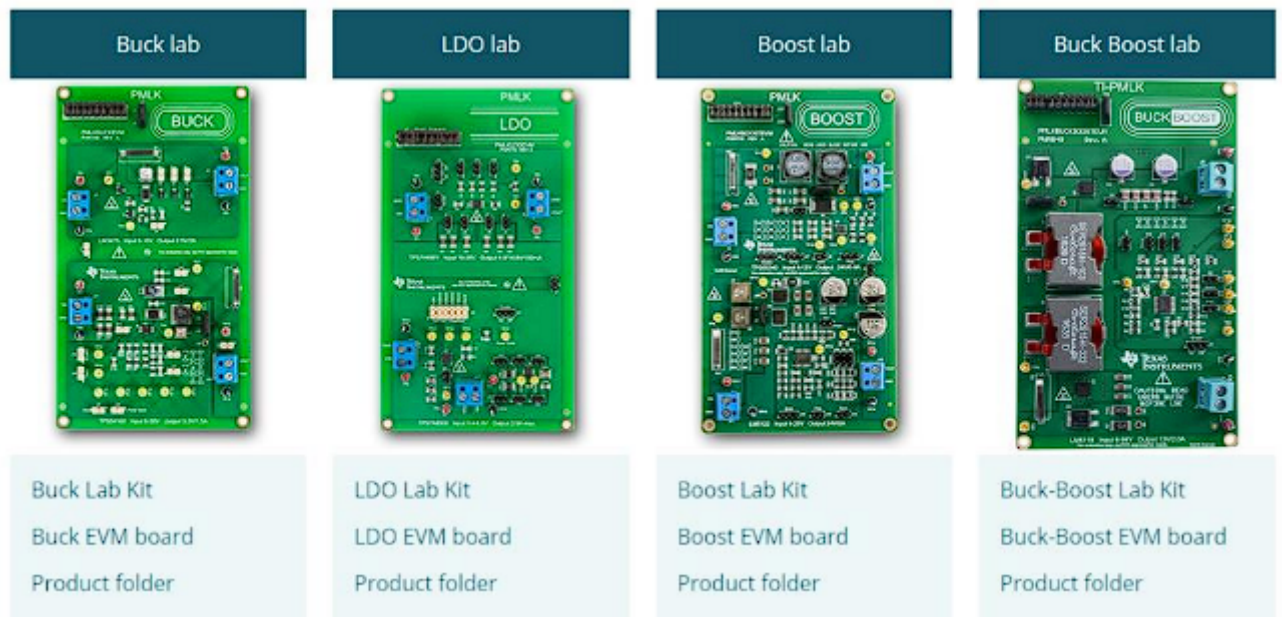
2.2 Soluções comerciais para plataformas didáticas de Eletrônica de Potência

O desenvolvimento de *kits* e bancadas permite a substituição dos componentes de maneira prática e eficiente. Diversas ponteiras para teste, com uso de osciloscópios e multímetro, foram acoplados aos *kits* e bancadas didáticas, permitindo aos discentes a medição de variáveis em diferentes pontos do circuito. Isso diminui o tempo de montagem, auxiliando na melhora da compreensão dos componentes eletrônicos, na disciplina de Eletrônica de Potência.

Atualmente, no mercado, é possível encontrar soluções comerciais de *kits* didáticos modulares destinados ao ensino de Eletrônica de Potência. Diversas empresas disponibilizam esses produtos, proporcionando uma ampla variedade de opções para instituições de ensino. A seguir são apresentados exemplos e soluções comerciais para plataformas didáticas de Eletrônica de Potência.

A *Texas Instruments*® é uma empresa norte americana e comercializa o kit chamado *Power Management kit Lab* (PMLK), o qual possui quatro placas de uso didático, sendo composto de um conversor *Buck*, um *Boost*, um *Buck-Boost*, e um regulador linear, *Low-dropout Regulator* (LDO). Todos os conversores são CC/CC, de baixa potência, não isolados, para facilitar a interação do aluno com os circuitos eletrônicos, sendo de fácil visualização dos componentes. O custo apenas das placas varia de \$ 59 a \$ 99. Os *kits* são vendidos com manuais e diversos exemplos de uso (TEXAS-INSTRUMENTS, 2017). A Figura 1 apresenta os conversores utilizados nos *kits* didáticos da empresa.

Figura 1 – Kits didáticos - Texas Instruments®



Fonte: Texas-Instruments (2017).

A empresa de tecnologia, *Exsto Tecnologia*®, que possui sede em Minas Gerais, fornece soluções educacionais em Eletrônica de Potência por meio de *kits* didáticos modulares para uso na área de tecnologia. Uma bancada didática que permite a montagem de retificadores bifásicos ou trifásicos, controlados ou não, inversores trifásicos, circuito de controle de ângulo de disparo de Retificador Controlado de Silício (SCR), controles de motores e conversão para Corrente Alternada (CA) são apresentados no modelo XP302. Esse *kit* possui um transformador abaixador de tensão, com carga composta, fixa ou variável, por um conjunto de elementos indutivos, capacitivos e resistivos. Essa bancada possui dimensões de 426 x 575 x 400 mm de Largura x Altura x Profundidade (L x A x P), o que dificulta sua movimentação. E também possui seus módulos fechados, o que impede a visualização do circuito pelo aluno, permitindo apenas a conexão de cabos nos bornes, e realização de ajuste de parâmetros. Essa bancada é vendida por R\$ 13.040,00. Os *kits* são vendidos com manuais e diversos exemplos de uso (EXSTO, 2017). A Figura 2 mostra o banco de ensaio da *Exsto Tecnologia*®.

A *PowerSIM*®, representada no Brasil pela Ohmini®, oferece uma gama de *kits* didáticos que abordam tópicos relevantes em Eletrônica de Potência. O *kit* possui conversores CC/CC, incluindo: *Buck*, *Boost*, *Buck-Boost*, *Flyback* e *Forward*. Esse *kit* possibilita uma análise detalhada de cada topologia, e do funcionamento correspondente pelo aluno, no entanto, limita consideravelmente as modificações que o aluno pode efetuar. O *kit* é fechado, porém, permite inserção de carga externa para alteração de valores de indutância e resistência. Ademais, possui *duty cycle* variável e frequência de chaveamento ajustável. O *kit* inclui pontos destinados à realização de medições de tensão e corrente, utilizando um multímetro ou osciloscópio. As dimensões do *kit* são 270 mm de largura x 190 mm de altura x 100 mm de profundidade (L x A x P), com um preço unitário de aproximadamente \$ 1.990,00 USD, ou então, \$ 9.950,00 ao adquirir os

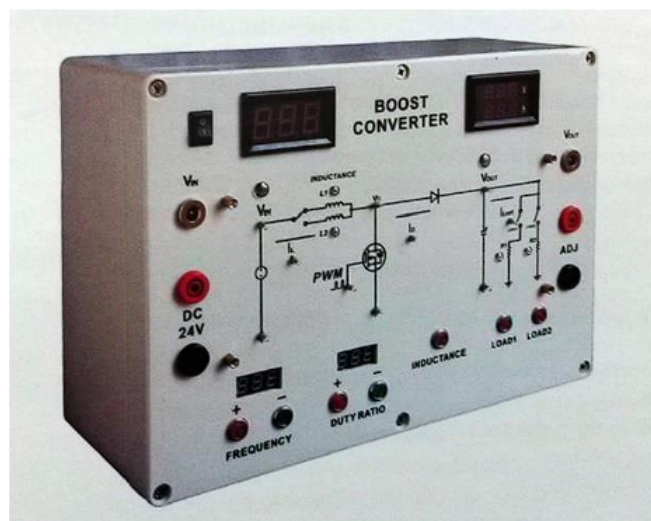
Figura 2 – Bancada de ensino em Eletrônica de Potência -Exsto Tecnologia®



Fonte: Exsto (2017).

cinco conversores (OHMINI, 2013). A empresa também fornece suporte técnico por um período de um ano, manual de instruções e material didático. A Figura 3 apresenta o conversor *Boost* contido no *kit* da *PowerSIM*®.

Figura 3 – Conversor *Boost* do *kit*



Fonte: Ohmini (2013).

O Grupo nacional Zilocchi®, também sediada em Minas Gerais, é reconhecido por seus *kits* didáticos abrangentes para o ensino de Eletrônica de Potência, Eletrônica Analógica, Digital, Telecomunicações, dentre outros. É possível solicitar um produto personalizado. O Módulo Educacional ZL-POT, de Eletrônica de Potência, é constituído por placas intercambiáveis alojadas em um suporte metálico, conectadas por meio de cabos banana-banana através de terminais de fácil acesso. O suporte tem capacidade para até seis placas para a realização de experimentos, mas a empresa disponibiliza mais de dez opções, proporcionando uma extensa variedade de conexões e análises de circuitos. O conjunto inclui retificadores (ponte de diodos), filtros, cargas

diversas, controle de *duty cycle* e de frequência, inversores e circuitos de disparo (ZILOCCHI., 2017). O suporte conta com alças para facilitar o transporte, revestimento eletrostático e pés de borracha antiderrapante, tendo dimensões de 180 x 485 x 400 mm (A x L x P). O *kit* também inclui material para experimentos teóricos e práticos, além dos cabos necessários para as conexões entre as placas. Devido à possibilidade de aquisição separada das placas, os preços apresentam uma ampla variação. Contudo, conforme informações da empresa, um conjunto com seis placas tem um custo aproximado de R\$ 15.000,00. Na Figura 4 é possível observar o ZL-POT.

Figura 4 – Módulo didático ZL-POT da Zilocchi®



Fonte: Zilocchi. (2017).

Cada empresa pode oferecer uma variedade de *kits* que abrangem diferentes tópicos e níveis de complexidade, atendendo às necessidades específicas de cursos e programas de ensino, porém, todas as empresas apresentam altos preços o que dificulta a capacidade de compra de mais de um *kit*, para que todos os alunos possam usar nas aulas laboratoriais, e para os *kits* importados, os valores apresentados não contemplam as taxas de importação, transporte e o tempo de entrega que pode chegar a meses.

Fica evidente que o custo das plataformas comerciais também está associado com a quantidade de funcionalidades. Porém, em muitos casos, não é possível utilizar todos os recursos de um *kit* didático em uma disciplina. Dessa forma, pode se dizer que, o investimento em uma bancada de alto custo, em algumas situações, entra no cenário de subutilização do equipamento. Portanto, o presente trabalho visa o desenvolvimento de uma plataforma didática que possibilite a demonstração do funcionamento da conversão CC/CC, mas que seja desenvolvida com custo inferior ao das bancadas comerciais supracitadas. Como nota auxiliar, destaca-se que os valores apresentados para custo das bancadas foram extraídos em consulta em dezembro de 2023.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Esse Capítulo apresenta os conceitos teóricos necessários para o desenvolvimento da plataforma didática de conversão CC/CC para Eletrônica de Potência. Portanto, em um primeiro momento, os conversores CC/CC básicos são apresentados e analisados visando mostrar as equações diferenciais que regem os seus comportamentos assim como as principais formas de onda. Exemplos de conversores de quarta ordem e conversores isolados são descritos em nível de informação. Ademais, os modos de condução são descritos e também as equações de projeto do estágio de potência para o conversor *Boost* são apresentadas uma vez que, esse é o conversor foco de desenvolvimento desse trabalho.

3.1 Conversores CC/CC

Os sistemas eletrônicos modernos demandam padrões elevados de produção industrial, além de exigirem dimensões e peso reduzidos, juntamente com fontes de alimentação eficientes. As fontes lineares, que baseiam seu funcionamento na divisão de tensão ou corrente, demonstram ineficiência devido aos valores limitados de tensão de saída (inferiores aos de entrada) e à baixa densidade de potência resultante do uso de transformadores e filtros de baixas frequências (50 ou 60 Hz). Apesar disso, a regulação linear pode proporcionar uma tensão de saída de alta qualidade. Seu principal campo de aplicação está em potências baixas (inferiores a 1 W), como os reguladores lineares que operam com correntes da ordem de miliampères (RASHID, 2011).

Em situações de potências elevadas, superiores a 100 W, opta-se pelo uso de reguladores chaveados, os quais operam por meio de interruptores semicondutores que alternam entre os estados ligado e desligado (*On-Off*). Nestes estados, a dissipação de potência é significativamente menor em comparação com as fontes lineares. Dessa forma, as fontes chaveadas conseguem atingir níveis de eficiência que variam de 70 à 98% na conversão de energia. Os semicondutores modernos têm a capacidade de operar em frequências elevadas, na ordem de dezenas de quilohertz (kHz), possibilitando o uso de transformadores, filtros capacitivos e indutivos mais compactos e leves. Isso resulta em um aumento na densidade de potência do circuito. Outra vantagem é que a operação em altas frequências permite uma resposta dinâmica rápida às alterações súbitas na carga ou na tensão de entrada. Conforme destacado por Luo, Ye e Rashid (2005), uma compilação incompleta identificou mais de 500 topologias de conversores CC/CC em seis gerações teóricas e evolutivas desde 2001.

Os conversores CC/CC têm a capacidade de operar em dois modos distintos: modo contínuo e modo descontínuo. O modo contínuo é amplamente adotado como base para o projeto desses conversores. Neste caso, o parâmetro controlado para garantir a condução contínua é a corrente de saída (I_o). Há um limite para o valor de I_o , acima do qual a condução é sempre contínua, e a tensão de saída permanece inalterada pela corrente. Em outras palavras, é mantida

uma boa regulação mesmo em condições de malha aberta, conforme explicado por (POMILIO, 2014).

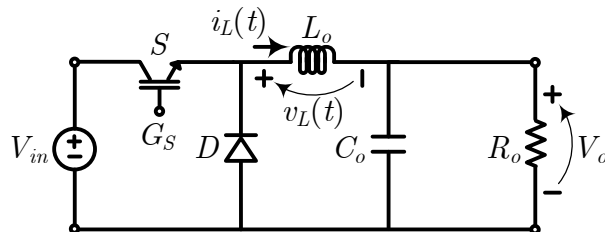
A seguir, serão apresentadas as análises dos conversores CC/CC base. As seguintes premissas são consideradas:

1. Componentes ideais;
2. Frequência de chaveamento constante;
3. Operação complementar da chave ativa e diodo;
4. Modo de condução contínuo;
5. Tensão de saída com pequena ondulação.

3.1.1 Conversor *Buck*

O conversor *Buck*, com topologia mostrada na Figura 5 realiza a conversão CC/CC visando reduzir a tensão de saída em comparação com a entrada. Esse conversor possui uma chave S , diodo D , indutor L_o , capacitor C_o e carga R_o . As variáveis elétricas são: corrente e tensão no indutor, $i_L(t)$ e $v_L(t)$, respectivamente, tensão de entrada V_{in} e tensão de saída V_o . O sinal lógico de comando na porta da chave é representado por G_S .

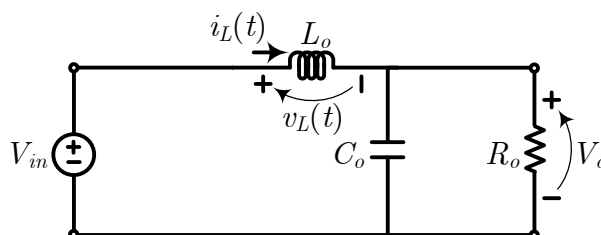
Figura 5 – Conversor *Buck*.



Fonte: Autoria própria (2024).

A operação complementar de S e D geram duas etapas de operação. Cada etapa possui um circuito elétrico equivalente resultante. Na etapa 1, a chave S está conduzindo e o diodo D bloqueado. Logo, o circuito resultante é mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Conversor *Buck* - Circuito para de etapa de operação 1.



Fonte: Autoria própria (2024).

O circuito resultante é analisado por meio da Lei das Tensões de Kirchoff:

$$-V_{in} + v_L(t) + V_o = 0. \quad (1)$$

Isolando a tensão no indutor:

$$v_L(t) = V_{in} - V_o, \quad (2)$$

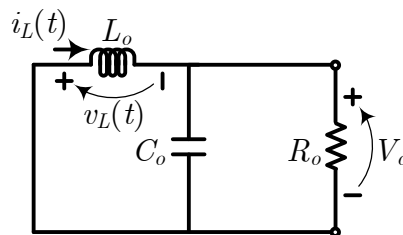
logo:

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_{in} - V_o}{L_o}. \quad (3)$$

Como V_{in} é maior que V_o , possui o conversor opera de forma a reduzir a tensão de saída, a tensão no indutor tem valor positivo. Além disso, a corrente $i_L(t)$ cresce linearmente pois $(V_{in} - V_o)/L_o > 0$. A etapa 1 ocorre de 0 até um instante T_{on} .

Já na etapa 2, a chave S é bloqueada e o diodo D conduz. Logo, o circuito resultante é mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Conversor Buck - Circuito para de etapa de operação 2.



Fonte: Autoria própria (2024).

Analisando o circuito, obtém-se:

$$v_L(t) + V_o = 0, \quad (4)$$

logo:

$$v_L(t) = -V_o. \quad (5)$$

Portanto, a derivada da corrente do indutor é:

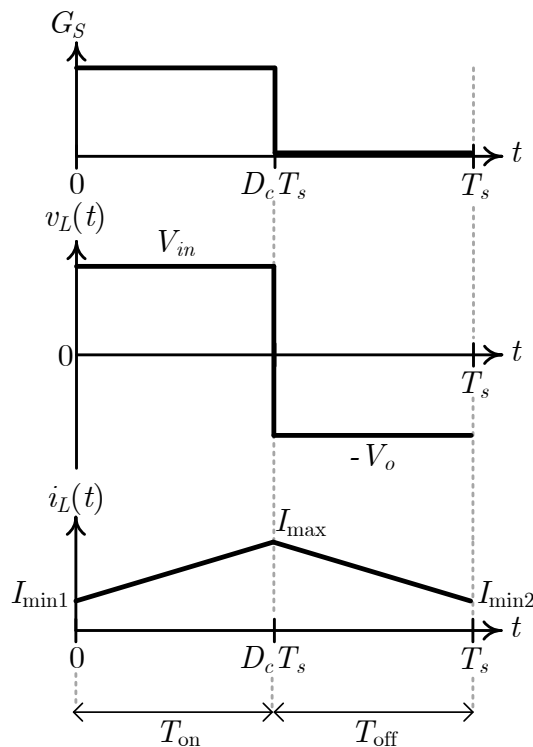
$$\frac{di_L(t)}{dt} = -\frac{V_o}{L_o}, \quad (6)$$

indicando que a tensão no indutor é negativa. Ademais, a derivada da corrente no indutor é negativa, logo, $i_L(t)$ decresce linearmente. A etapa 2 ocorre de T_{on} até T_s . Dessa forma, T_{on} indica o tempo no qual a chave está conduzindo e T_s o período.

As formas de onda do conversor *Buck* são mostradas na Figura 8. Nota-se que de 0 até $D_c T_s$, o sinal lógico é alto, indicando que a chave está conduzindo. D_c é a razão cíclica. T_{off} é o tempo no qual a chave está bloqueada, logo, $T_s = T_{\text{on}} + T_{\text{off}}$.

A corrente $i_L(t)$ cresce de um valor mínimo I_{min1} até um máximo I_{max} de 0 até $D_c T_s$. Já de $D_c T_s$ até T_s , a corrente no indutor decresce linearmente do valor máximo até I_{min2} . Deve-se notar que, em regime permanente, $I_{\text{min1}} = I_{\text{min2}}$. Ademais, Δi_L representa a ondulação (*ripple*) de corrente no indutor.

Figura 8 – Formas de onda do conversor *Buck*



Fonte: Autoria própria (2024).

Com a análise estática, também busca-se encontrar o ganho estático do conversor, ou seja, a relação V_o/V_{in} . Para isso, utiliza-se o balanço dos Volts-segundos:

$$\int_0^{T_s} v_L(t) dt = 0, \quad (7)$$

que indica que a tensão média no indutor é igual a zero. Essa equação pode ser interpretada utilizando os valores de tensão no indutor para cada etapa indicados pelas Equações (2) e (4):

$$v_L(t)T_{\text{on}} + v_L(t)T_{\text{off}} = 0, \quad (8)$$

logo,

$$(V_{in} - V_o)T_{\text{on}} - V_o T_{\text{off}} = 0. \quad (9)$$

Considerando que, $T_{\text{off}} = T_s - T_{\text{on}}$:

$$(V_{in} - V_o)T_{\text{on}} - V_o(T_s - T_{\text{on}}) = 0, \quad (10)$$

logo,

$$V_{in}T_{\text{on}} - V_oT_{\text{on}} - V_oT_s + V_oT_{\text{on}} = 0, \quad (11)$$

simplificada como:

$$V_{in}T_{\text{on}} - V_oT_s = 0. \quad (12)$$

Isolando V_o/V_{in} :

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{T_{\text{on}}}{T_s}, \quad (13)$$

considerando que a razão cíclica pode ser escrita em termos da razão entre o tempo de condução da chave e o período de um ciclo de chaveamento:

$$D_c = \frac{T_{\text{on}}}{T_s}, \quad (14)$$

finalmente, obtém-se a relação do ganho estático do conversor Buck:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D_c. \quad (15)$$

A Figura 9 mostra o ganho estático em função da razão cíclica para o conversor *Buck*. Observa-se que o ganho estático é limitado em 1. Ou seja, mesmo considerando razão cíclica com valor unitário, o conversor não realiza elevação da tensão de entrada.

3.1.2 Conversor *Boost*

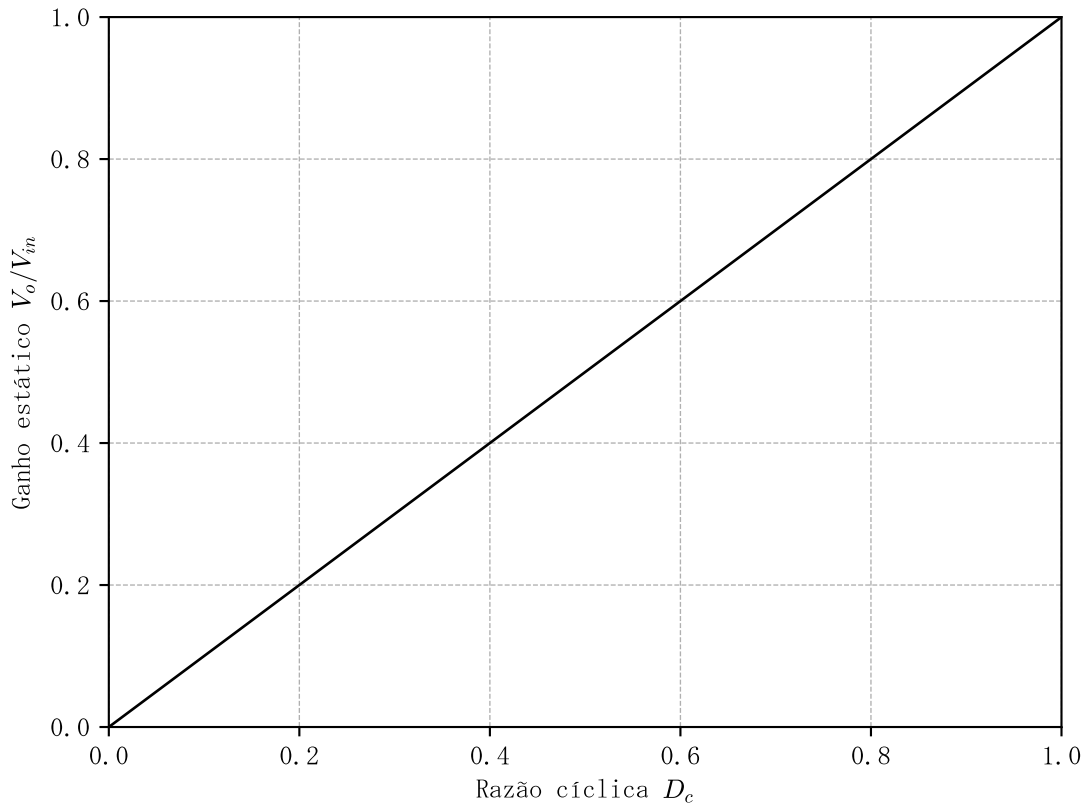
A topologia padrão do conversor elevador *Boost* é mostrada na Figura 10. O conversor é alimentado por uma fonte de tensão V_{in} , possui uma chave S , diodo D , indutor L , capacitor de saída C_o e carga R_o . As variáveis elétricas são: corrente no indutor $i_L(t)$, tensão no indutor $v_L(t)$ e tensão de saída V_o . Ademais, G_S indica o sinal de comando da chave S .

Na etapa 1, a chave S está conduzindo e o diodo D bloqueado. Portanto, o circuito resultante é mostrado na Figura 11.

Utilizando a Lei das Tensões de Kircchoff, obtém-se:

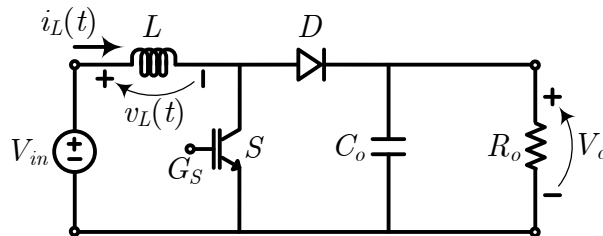
$$-V_{in} + v_L(t) = 0, \quad (16)$$

Figura 9 – Ganho estático do conversor *Buck* em função da razão cíclica



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 10 – Conversor *Boost*



Fonte: Autoria própria (2024).

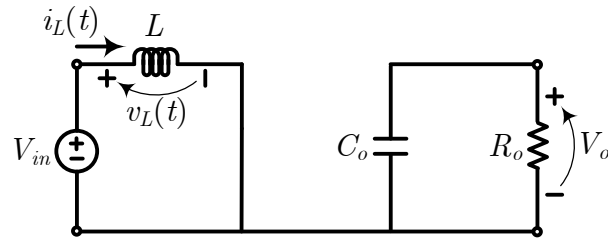
logo:

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_{in}}{L}, \quad (17)$$

indicando que a corrente $i_L(t)$ cresce linearmente pois $V_{in}/L > 0$. Essa etapa possui duração de 0 até T_{on} .

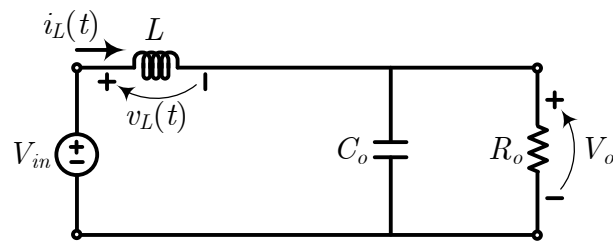
Na etapa 2, a chave S está bloqueada e o diodo D conduzindo. Logo, o circuito resultante é mostrado na Figura 12.

Figura 11 – Conversor *Boost* - Circuito para de etapa de operação 1



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 12 – Conversor *Boost* - Circuito para etapa de operação 2.



Fonte: Autoria própria (2024).

A equação da malha fornece:

$$-V_{in} + v_L(t) + V_o = 0, \quad (18)$$

logo:

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_{in} - V_o}{L}, \quad (19)$$

como $V_o > V_{in}$, a derivada da corrente no indutor é negativa, indicando que $i_L(t)$ decresce linearmente. A etapa ocorre de T_{on} até T_s .

As formas de onda do conversor *Boost* são mostradas na Figura 13. A corrente $i_L(t)$ cresce linearmente de um valor mínimo I_{min1} até um máximo I_{max} com derivada V_{in}/L e decresce do valor máximo até I_{min2} com derivada $(V_{in} - V_o)/L$. Em regime permanente, $I_{min1} = I_{min2}$. T_{off} indica o período no qual a chave está bloqueada.

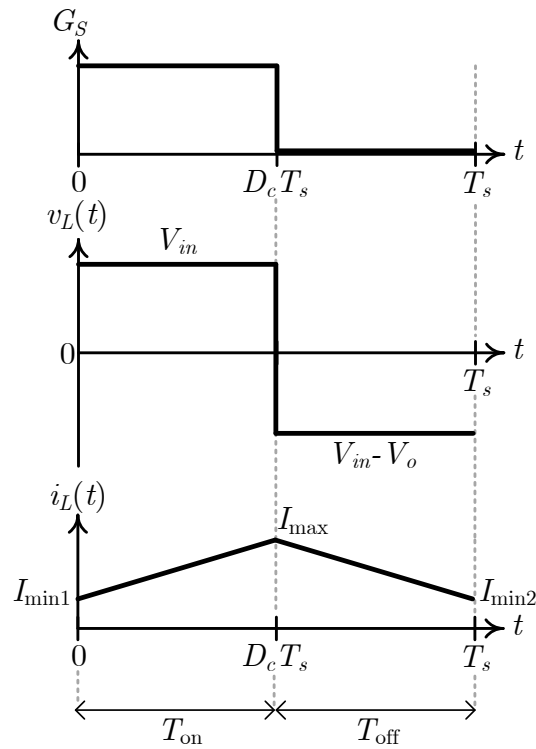
Utilizando o balanço dos Volts-segundos,

$$\int_0^{T_s} v_L(t) dt = 0, \quad (20)$$

é possível encontrar o ganho estático. A Equação 20 é interpretada considerando os valores de tensão em cada etapa:

$$v_L(t)T_{on} + v_L(t)T_{off} = 0, \quad (21)$$

Figura 13 – Formas de onda do conversor *Boost*



Fonte: Autoria própria (2024).

re-escrita por:

$$V_{in}T_{on} + (V_{in} - V_o)T_{off} = 0. \quad (22)$$

Sabe-se que $T_s = T_{on} + T_{off}$, logo:

$$V_{in}T_{on} + (V_{in} - V_o)(T_s - T_{on}) = 0, \quad (23)$$

ou seja:

$$V_{in}T_{on} + V_{in}T_s - V_{in}T_{on} - V_oT_s + V_oT_{on} = 0, \quad (24)$$

$$V_{in}T_s - V_o(T_s - T_{on}) = 0, \quad (25)$$

isola-se V_o/V_{in} :

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{T_s}{T_s - T_{on}}. \quad (26)$$

Para escrever o ganho estático em função da razão cíclica D_c , a Equação (26) tem seu numerador e denominador multiplicado por $1/T_s$,

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - \frac{T_{on}}{T_s}}, \quad (27)$$

e sabendo que:

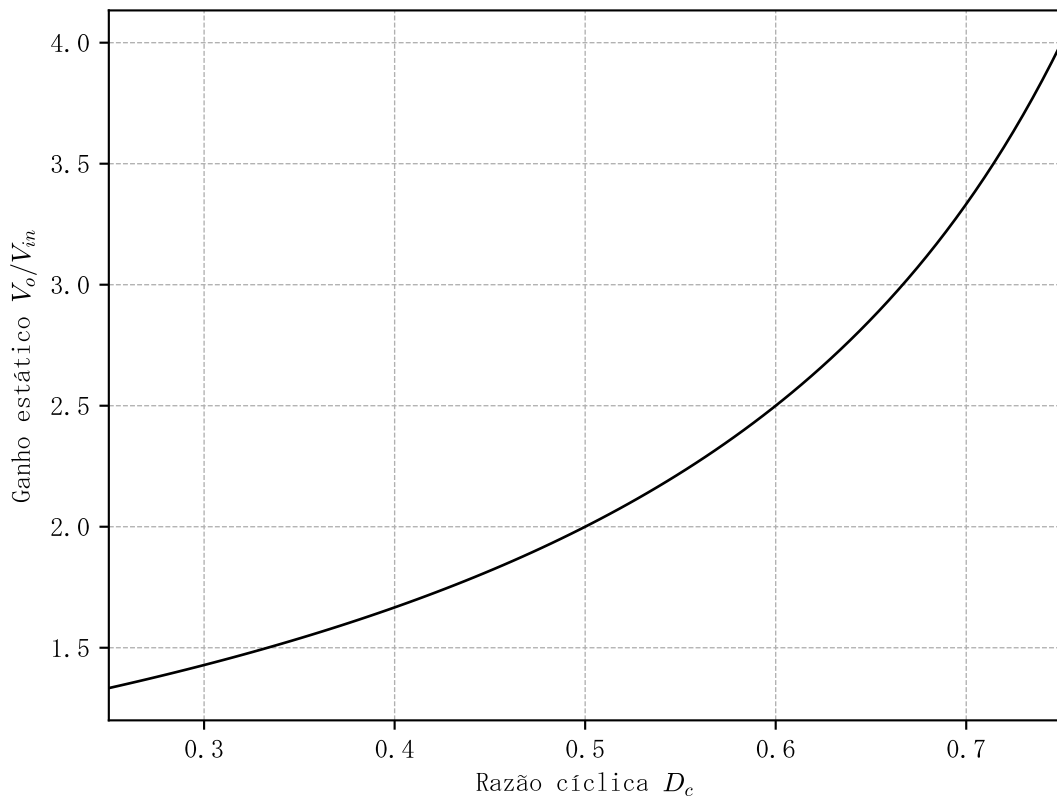
$$D_c = \frac{T_{\text{on}}}{T_s}, \quad (28)$$

obtém-se a relação do ganho estático do conversor *Boost*:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D_c}. \quad (29)$$

A Figura 14 mostra o ganho estático do conversor *Boost* em função da razão cíclica.

Figura 14 – Ganho estático do conversor *Boost* em função da razão cíclica

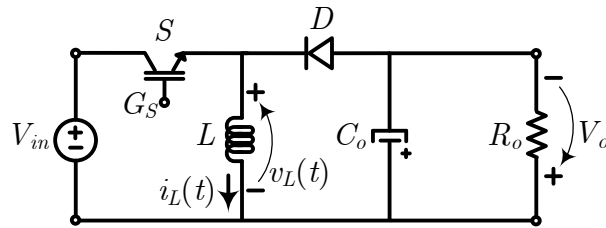


Fonte: Autoria própria (2024).

3.1.3 Conversor *Buck-Boost*

O conversor *Buck-Boost* mostrado na Figura 15 é capaz de elevar ou diminuir o nível da tensão de entrada V_{in} . O conversor é composto de uma chave ativa S , diodo D , indutor L , capacitor de saída C_o e carga R_o . As variáveis elétricas são: corrente no indutor $i_L(t)$, tensão no indutor $v_L(t)$, tensão de saída V_o . G_S indica o sinal de comando da chave S .

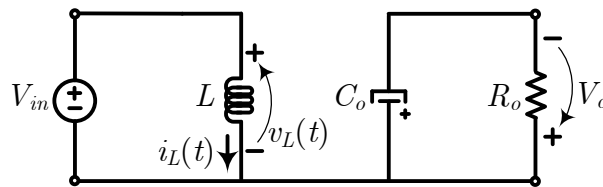
Figura 15 – Conversor *Buck-Boost*



Fonte: Autoria própria (2024).

Com a chave S conduzindo e o diodo D bloqueado, o circuito equivalente para a etapa 1 é mostrado na Figura 16. A etapa dura de 0 até T_{on} .

Figura 16 – Conversor *Buck-Boost* - Circuito para etapa de operação 1



Fonte: Autoria própria (2024).

Por meio da análise malhas obtém-se:

$$-V_{in} + v_L(t) = 0, \quad (30)$$

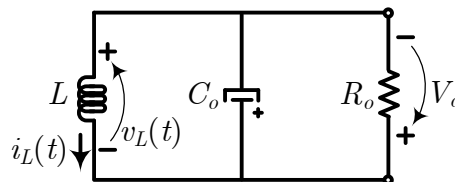
logo:

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_{in}}{L}, \quad (31)$$

indicando que a corrente $i_L(t)$ cresce linearmente pois $V_{in}/L > 0$.

Já na etapa 2, com duração de T_{on} até T_s , a chave está bloqueada e o diodo conduzindo. O circuito resultante é mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Conversor *Buck-Boost* - Circuito para etapa de operação 2



Fonte: Autoria própria (2024).

A equação que rege a corrente no indutor é obtida como segue:

$$-v_L(t) - V_o = 0 \quad (32)$$

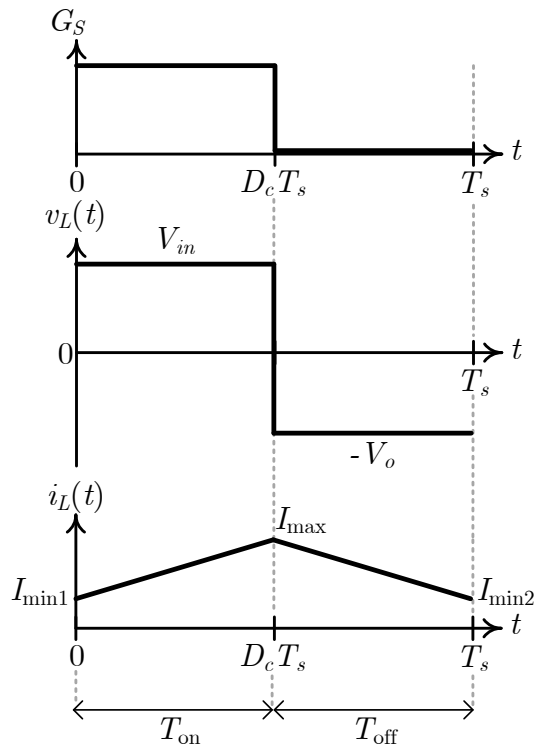
logo:

$$\frac{di_L(t)}{dt} = -\frac{V_o}{L}, \quad (33)$$

como $\frac{di_L(t)}{dt} < 0$, a corrente $i_L(t)$ decresce linearmente.

As formas de onda do conversor são apresentadas na Figura 18. Mostra-se o sinal de acionamento da chave, tensão no indutor e corrente no indutor.

Figura 18 – Formas de onda do conversor *Buck-Boost*



Fonte: Autoria própria (2024).

Como mostrado para os conversores *Buck* e *Boost*, o ganho estático pode ser obtida utilizando o balanço dos Volts-segundos. Portanto:

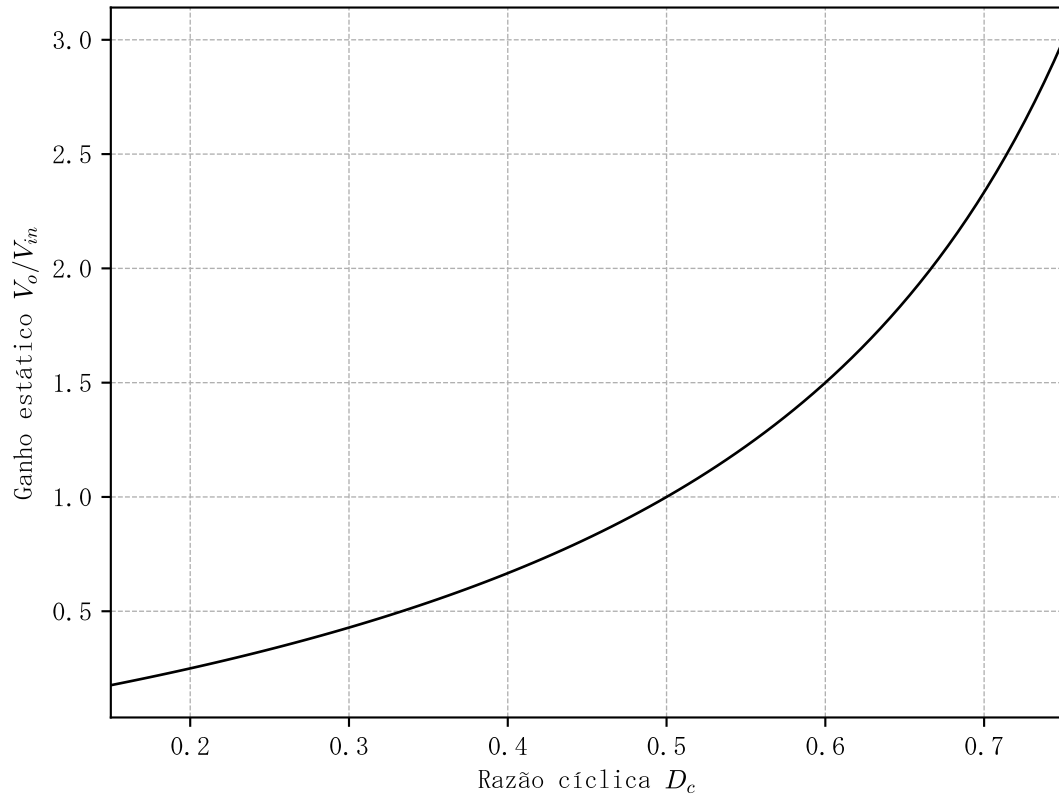
$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D_c}{1 - D_c}. \quad (34)$$

Isso significa que o ganho do *Buck-Boost* pode ser entendido como a combinação dos ganhos dos conversores *Buck* e *Boost*:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D_c \times \frac{1}{1 - D_c}. \quad (35)$$

O ganho estático em função da razão cíclica é apresentado na Figura 19. Para razão cíclica até 0,5, o conversor opera como rebaixador de tensão. Para valores maiores que 0,5, o conversor eleva a tensão.

Figura 19 – Ganho estático do conversor *Buck-Boost* em função da razão cíclica



Fonte: Autoria própria (2024).

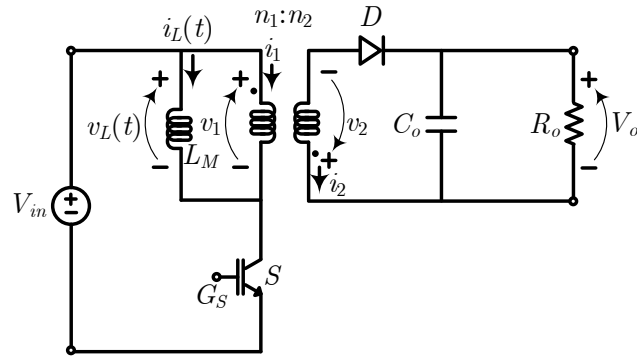
3.1.4 Outros conversores CC/CC

Além dos conversores básicos, *Buck*, *Boost* e *Buck-Boost*, existem diversas topologias para realização da conversão CC/CC. Utilizando elementos magnéticos, tais como transformadores e indutores acoplados, é possível obter topologias de conversores isolados. Ademais, com a inserção de outros elementos reativos, também é possível obter os conversores de quarta ordem.

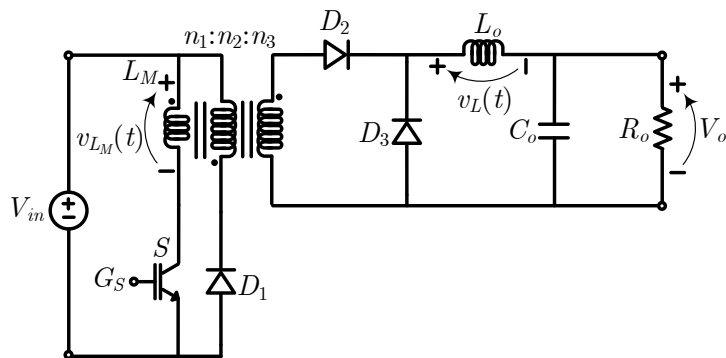
A Figura 20 apresenta outros exemplos de conversores CC/CC. As Figuras 20(a) e 20(b) mostram dois tipos de conversores isolados, os conversores *Flyback* e *Forward*, respectivamente. Conversores de quarta ordem são mostrados nas Figuras 20(c), 20(d) e 20(e), nomeados de *Çuk*, *Sepic* e *Zeta*.

O mesmo procedimento de análise apresentado para os conversores não-isolados de segunda ordem pode ser usado nos conversores apresentados nessa seção. A escolha da topologia depende da aplicação. Observa-se que algumas topologias apresentam maior número de componentes, o que é uma desvantagem. Em contraste, essas topologias apresentam vantagens em outros termos, por exemplo, isolamento, como no caso dos conversores *Flyback* e *Forward*, e melhor estabilidade em malha fechada, como no caso do conversor *Zeta*.

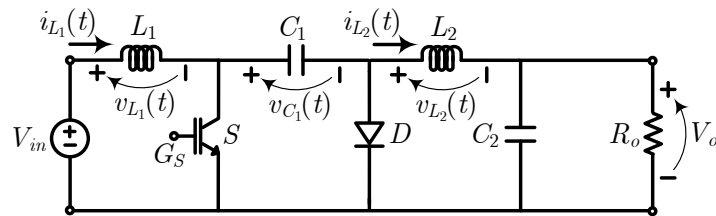
Figura 20 – Outros conversores CC/CC. (a) *Flyback*. (b) *Foward*. (c) *Çuk*. (d) *Sepic*. (e) *Zeta*.



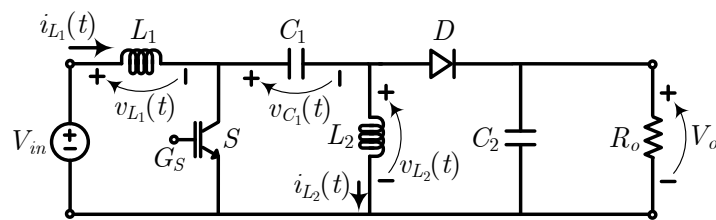
(a)



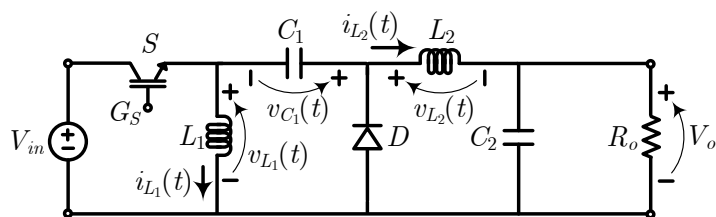
(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: Autoria própria (2024).

3.2 Modo de condução

É importante observar que as análises apresentadas são para o modo de condução contínuo. Contudo, dependendo da forma da corrente no indutor, os conversores CC/CC podem ser classificados pelo modo de condução por:

- Modo de condução contínuo, *Continuous Conduction Mode* (CCM);
- Modo de condução crítico, *Critical Conduction Mode* (CRM);
- Modo de condução descontínuo, *Discontinuous Conduction Mode* (DCM).

No modo CCM, a corrente no indutor é sempre maior que 0, matematicamente essa condição é dada por:

$$i_L(0) = i_L(T_s) > 0, \quad (36)$$

ou seja, a corrente no indutor $i_L(t)$ no instante 0 é igual à corrente no instante final de um período de chaveamento (operação em regime permanente) e sempre maior que zero.

O modo CRM é caracterizado por uma corrente no indutor que atinge o valor zero em um instante específico. Ou seja, a corrente assume valor zero mas não é mantida com valor nulo. Logo, o modo CRM é dado pela seguinte relação:

$$i_L(0) = i_L(T_s) = 0. \quad (37)$$

Uma outra possibilidade é o modo DCM, nesse modo, a corrente no indutor atinge zero e se mantém por um tempo neste valor, caracterizando assim, uma nova etapa de operação. No modo DCM, a característica do conversor é alterada, uma vez que, a tensão de saída torna-se dependente da carga, aumentando a impedância de saída do conversor. O modo DCM é descrito matematicamente por:

$$i_L((D_{c1} + D_{c2})T_s < t < T_s) = 0, \quad (38)$$

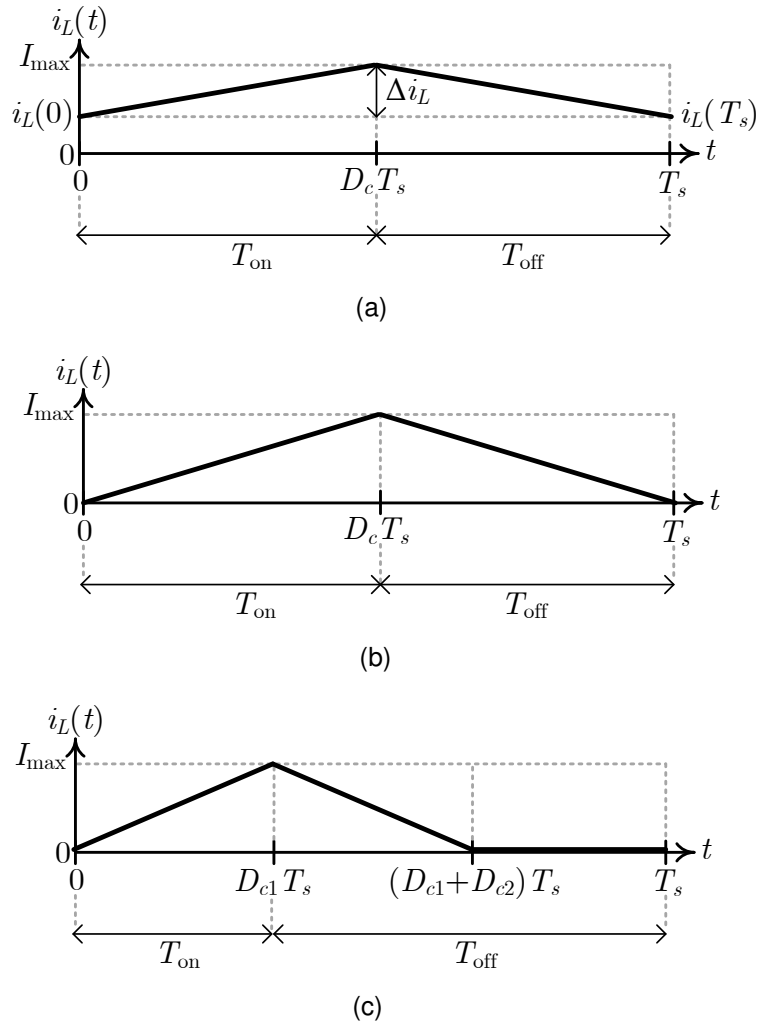
onde $(D_{c1} + D_{c2})T_s$ é o instante de tempo no qual a corrente do indutor assume valor zero, regido por duas razões cíclicas: D_{c1} e D_{c2} .

Para análise dos conversores, as seguintes relações podem ser usadas visando caracterizar cada tipo de modo de operação:

- CCM: $I_L > \frac{\Delta i_L}{2}$;
- CRM: $I_L = \frac{\Delta i_L}{2}$;
- DCM: $I_L < \frac{\Delta i_L}{2}$,

onde I_L é a corrente média no indutor e Δi_L a ondulação de corrente no indutor. As formas de onda da corrente do indutor para os três modos de operação são mostradas na Figura 21.

Figura 21 – Modos de condução. (a) CCM. (b) CRM. (c) DCM



Fonte: Autoria própria (2024).

3.3 Projeto de conversores CC/CC

Após a análise estática, é possível sintetizar as informações em uma sequência de projeto. Com o intuito de utilizar as relações aqui apresentadas no decorrer do trabalho para projeto de um conversor CC/CC *Boost*, essa seção apresenta as equações de projeto para essa topologia. Não obstante, a forma de obtenção dessas equações pode ser utilizada para outros conversores.

O indutor L do conversor *Boost* pode ser projetado por meio de uma equação obtida da relação de tensão no indutor:

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}, \quad (39)$$

que pode ser escrita considerando a ondulação de corrente Δi_L e a variação de tempo Δt :

$$V_L = L \frac{\Delta i_L}{\Delta t}. \quad (40)$$

Essa variação de tempo Δt é escrita em termos da razão cíclica D_c e do período T_s : $\Delta t = D_c T_s$.

A tensão v_L no indutor é descrita com seu valor referente a etapa 1, portanto a Equação (40) é reescrita por:

$$L = \frac{V_{in} D_c T_s}{\Delta i_L}. \quad (41)$$

A equação de projeto do indutor pode ser reescrita em termos da frequência de chaveamento f_s , logo, a equação de projeto é dada por:

$$L = \frac{V_{in} D_c}{\Delta i_L f_s}. \quad (42)$$

A ondulação de corrente é escrita em termos da corrente média no indutor I_L e de uma especificação de projeto para ondulação de corrente em porcentagem $\Delta i_L \%$:

$$\Delta i_L = \Delta i_L \% \cdot I_L, \quad (43)$$

em que $\Delta i_L \%$ assume um valor entre 5% e 20%.

Já a corrente média de entrada pode ser escrita como $I_L = I_{in}$ sendo I_{in} a corrente de entrada. Considerando 100% de eficiência, a corrente de entrada pode ser equacionada por:

$$I_{in} = \frac{P_o}{V_{in}}. \quad (44)$$

O capacitor é projetado baseado na equação diferencial que rege seu comportamento:

$$i_{C_o}(t) = C_o \frac{dv_o(t)}{dt}, \quad (45)$$

onde $i_{C_o}(t)$ é a corrente no capacitor. A equação pode ser reescrita considerando a ondulação da tensão de saída Δv_o e a variação de tempo Δt :

$$i_{C_o}(t) = C_o \frac{\Delta v_o}{\Delta t}. \quad (46)$$

Δt pode ser considerada como o tempo da etapa 1, ou seja, $\Delta t = D_c T_s$. Na etapa 1, a corrente no capacitor é igual à corrente de saída I_o . Isolando C_o na Equação (46), tem-se:

$$C_o = \frac{I_o D_c T_s}{\Delta v_o}, \quad (47)$$

que pode ser reescrita considerando a frequência de chaveamento:

$$C_o = \frac{I_o D_c}{\Delta v_o f_s}. \quad (48)$$

A corrente de saída I_o é dada pela Lei de Ohm por:

$$I_o = \frac{V_o}{R_o}. \quad (49)$$

A ondulação de tensão é dada em termos de um valor percentual por:

$$\Delta v_o = \Delta v_o \% \cdot V_o, \quad (50)$$

onde $\Delta v_o \%$ é um valor entre 1% e 5%.

4 METODOLOGIA

Esse Capítulo apresenta a metodologia empregada para o desenvolvimento do projeto de Eletrônica de Potência, que visa apresentar as principais etapas do desenvolvimento de um conversor estático CC/CC, descrevendo sua implementação como bancada didática, mencionada no referencial teórico, tais como a descrição dos materiais utilizados para a realização. A implementação de um conversor, na prática, necessita de etapas de definições de projeto, análise teórica para o cálculo dos componentes, simulações, busca e disponibilidade de componentes, *layout* da placa de circuito impresso do conversor, fabricação e testes experimentais. Tendo em vista isto, esse trabalho visa apresentar um projeto aplicado de análise e desenvolvimento de *hardware* do conversor *Boost*, e para isso, serão apresentadas em detalhe as etapas de desenvolvimento do projeto de Eletrônica de Potência orientado à concepção física do conversor.

4.1 Especificações de projeto

Os requisitos do projeto foram definidos baseados na aplicação do conversor. Com isso, dado a finalidade didática do projeto, os parâmetros como, níveis de tensões, frequência de operação, potência e ondulações de corrente e tensão foram definidos, considerando a utilização segura do conversor mas que também permita representar uma conversão de energia aplicável. Os valores foram selecionados afim de garantir uma região segura para o funcionamento do sistema e do usuário e que sejam compatíveis com a conexão na fonte desenvolvida na disciplina de Eletrônica de Potência previamente à utilização deste *kit*. Ou seja, busca-se que o conversor CC/CC seja compatível com fonte CA/CC que é desenvolvida na disciplina. Dessa forma as especificações da fonte CA/CC são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações da fonte CA/CC

Especificação	Valor
Tensão de saída, V_o	12 V (CC)
Tensão de entrada, V_{in}	127 V (CA, rms)
Potência de saída, P_o	10 W a 15 W
Ondulação de tensão	10 %

Fonte: Autoria própria (2024).

Já as especificações da plataforma didática, ou seja, do estágio CC/CC são apresentadas na Tabela 2. Observa-se que, a tensão de saída da fonte CA/CC é usada como entrada para o conversor CC/CC.

Tabela 2 – Especificações do conversor CC/CC

Especificações	Valores
Tensão de saída nominal, V_o	24 V
Tensão de entrada nominal, V_{in}	12 V
Potência de saída, P_o	10 W
Frequência de chaveamento	20 kHz
Ondulação de corrente	0,5 A
Ondulação de tensão	0,5 V

Fonte: Autoria própria (2024).

4.2 Cálculo dos componentes

Utilizando a especificações apresentadas anteriormente, foi calculado os valores dos componentes do conversor. Primeiramente, foram realizados os cálculos de maneira manual, e posteriormente, foi implementado um código em *Python*, mostrado como recurso computacional para realização da parte matemática, e caso necessário alteração de algum dado inicialmente definido.

A corrente de saída I_o é calculada por:

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = \frac{10}{24} = 417, mA. \quad (51)$$

O período de chaveamento T_s é obtido em função da frequência de chaveamento,

$$T_s = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{20000} = 50 \mu s. \quad (52)$$

O ganho estático M do conversor pode ser calculado pela relação da tensão de saída pela entrada por:

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{24}{12} = 2. \quad (53)$$

A partir do ganho, encontra-se a razão cíclica D_c necessária para a conversão:

$$D_c = \frac{M - 1}{M} = \frac{2 - 1}{2} = 0,5. \quad (54)$$

Os elementos reativos são obtidos por:

$$C_o = \frac{I_o D_c}{\Delta V_o f_s} = \frac{0,417 \cdot 0,5}{0,5 \cdot 20^3} = 20,85 \mu F \quad (55)$$

e

$$L = \frac{V_{in} \cdot D_c}{\Delta i_L f_s} = \frac{12 \cdot 0,5}{0,5 \cdot 20^3} = 600 \mu H. \quad (56)$$

Utilizando a Lei de Ohm, calcula-se a carga R_o :

$$R_o = \frac{V_o^2}{P_o} = \frac{24^2}{10} = 57,6\Omega. \quad (57)$$

Na Tabela 3 pode-se observar os valores calculados.

Tabela 3 – Valores calculados

Parâmetros	Valores
I_o	416,66 mA
T_s	50 μ s
M	2,0
L	0,6 mH
C_o	20,83 μ F
R_o	57,6 Ω
D_c	0,5

Fonte: Autoria própria (2024).

4.3 Simulação inicial

Com o objetivo de validar os cálculos vistos na Seção 4.2, foram realizadas simulações iniciais em *software*. O algoritmo 1 apresenta um código em *Python* que apresenta o cálculo dos componentes do conversor, onde as variáveis de saídas calculadas pelo *script* estão apresentadas na Tabela 4 e também a obtenção dos parâmetros de simulação que foram utilizados no *software PSIM*.

O algoritmo de projeto pode ser utilizado em aulas de Eletrônica de Potência com o intuito de realizar outras simulações para outras especificações de projeto. Dessa forma, é possível alterar os parâmetros do conversor e obter os valores dos componentes do estágio de potência.

O algoritmo mostrado na Listagem 1 segue os conceitos teóricos apresentados anteriormente para projeto do conversor *Boost*. Nota-se que, o ganho é calculado em função da conversão de tensão e posteriormente a razão cíclica é calculada para atender esse ganho.

O *software PowerSim, Inc (PSIM - versão para estudante)*, o qual inclui o pacote de simulação de circuitos eletrônicos, amplamente utilizado em Eletrônica de Potência, e simulações que necessitam emular o acionamento de motores, foi utilizado para realização da simulação do conversor projetado. Baseado nos resultados obtidos para o projeto, a Tabela 5 resume os parâmetros do conversor e de simulação. Esses valores foram utilizados para a simulação no *software PSIM*. A Figura 22 mostra o circuito simulado no PSIM.

Listagem 1 – Algoritmo para cálculo dos componentes

```

1 ##### PROJETO – CONVERSOR BOOST #####
2 # TCC2 – Joyce Pereira e Matheus Gimenes #
3 # Orientador: Lucas Mendonca #
4
5 ##### ESPECIFICACAO #####
6 Vo = 24 # tensao de saida
7 Vin = 12 # tensao de entrada (12–15)
8 Po = 10 # potencia saida
9 f = 20e3 # frequencia
10 Delta_iL = 0.5 # ondulacao corrente
11 Delta_vo = 0.5 # ondulacao tensao
12
13 ##### CALCULO AUXILIAR #####
14 Io = Po/Vo # corrente saida
15 T = 1/f # periodo
16 M = Vo/Vin # ganho
17 Dc =(M-1)/M # razao ciclica
18
19 ##### COMPONENTES #####
20 L = Vin*Dc/(Delta_iL*f) # indutor
21 C = Io*Dc/(Delta_vo*f) # capacitor
22 R = Vo**2/Po # carga
23
24 print("M=", M)
25 print("Io=", Io)
26 print("L=", L)
27 print("C=", C)
28 print("R=", R)

```

Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 4 – Saída do algoritmo de projeto

Variável	Valor
M	2
I_o	416,66 mA
L	0,6 mH
C_o	20,833 μF
R_o	57,6 Ω

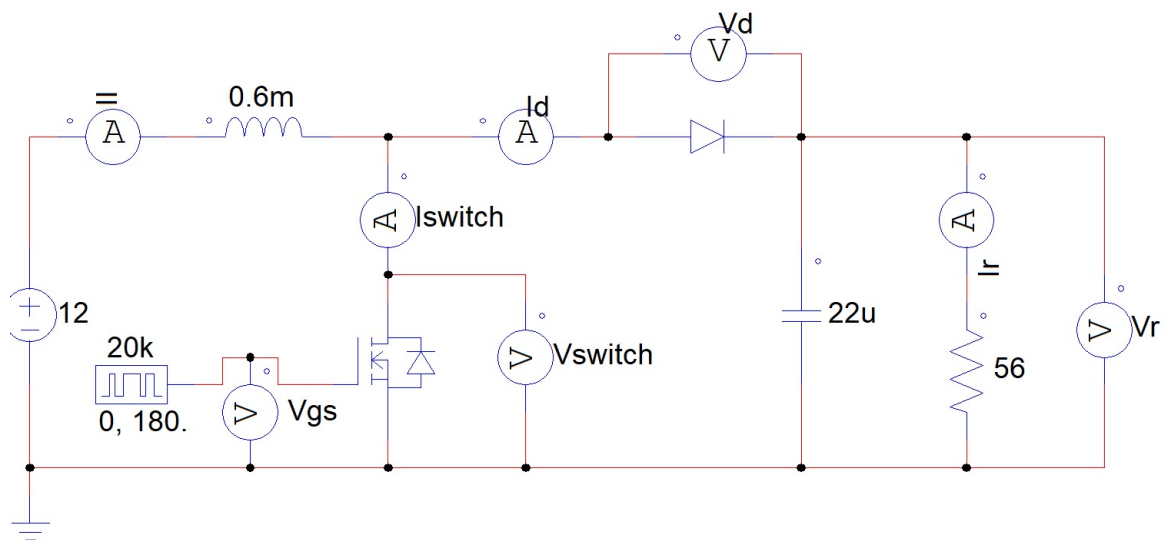
Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 5 – Parâmetros de simulação

Parâmetro	Valor
V_{in}	12 V
T_s	50 μ s
F_c	20 kHz
L	0,6 mH
C_o	22 μ F
R_o	56 Ω
D_c	0,5

Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 22 – Esquemático da Simulação do conversor Boost

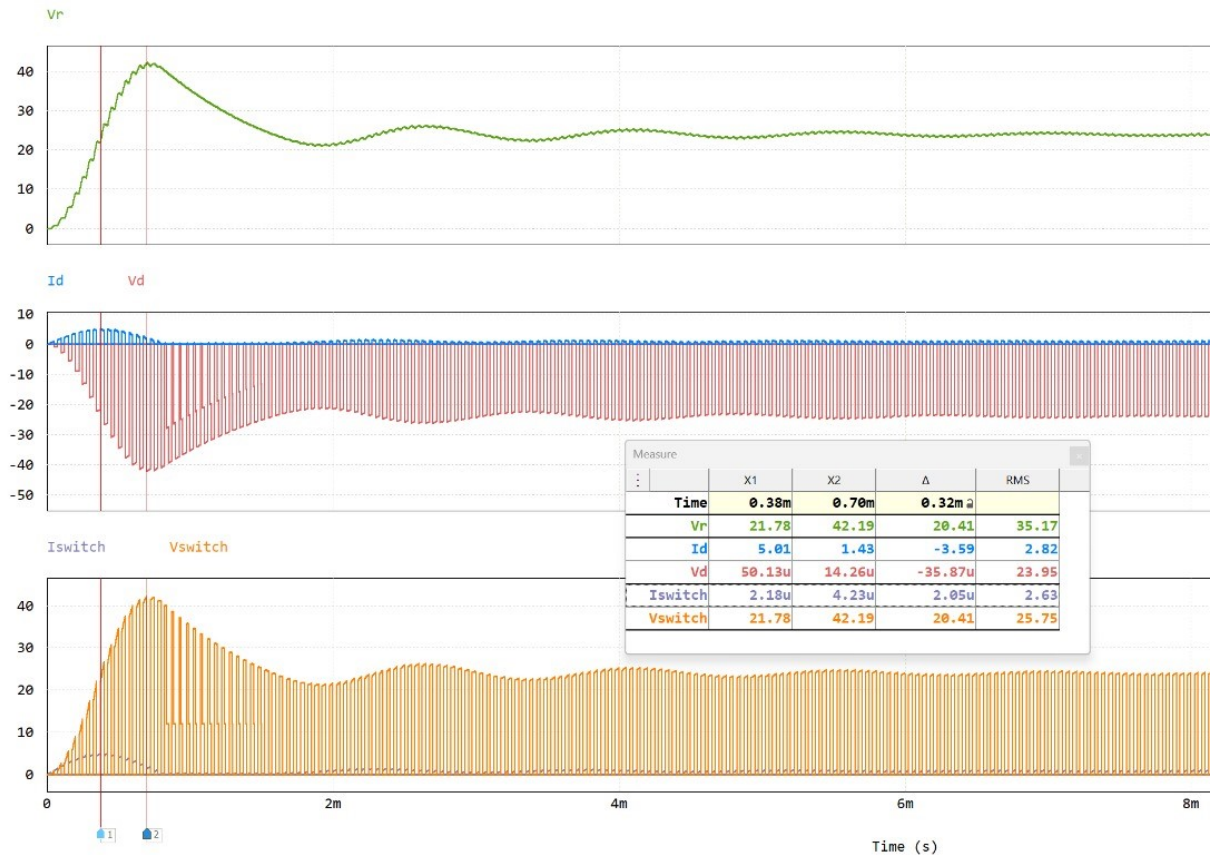


Fonte: Autoria própria (2024).

Pode-se observar os resultados de simulação apresentados na Figura 23, que mostra o sinal na porta da chave V_{gs} , a tensão de saída V_r , a corrente de saída I_r , tensão na chave V_{switch} e tensão no diodo V_d .

A partir desses resultados da simulação, foi possível verificar que a tensão e corrente de saída estão de acordo com o projeto, consequentemente, a potência de saída também. Ademais, as formas de onda da tensão na chave, no diodo, e os valores máximos e mínimos estão de acordo com a análise teórica. Para a verificação no PSIM, as ferramentas do programa, tais como *zoom*, medição, cálculo de valores médio, máximo e mínimo, dentre outras, foram usadas para confirmação de que a simulação inicial está de acordo com a teoria.

Figura 23 – Resultado da simulação do conversor *Boost*



Fonte: Autoria própria (2024).

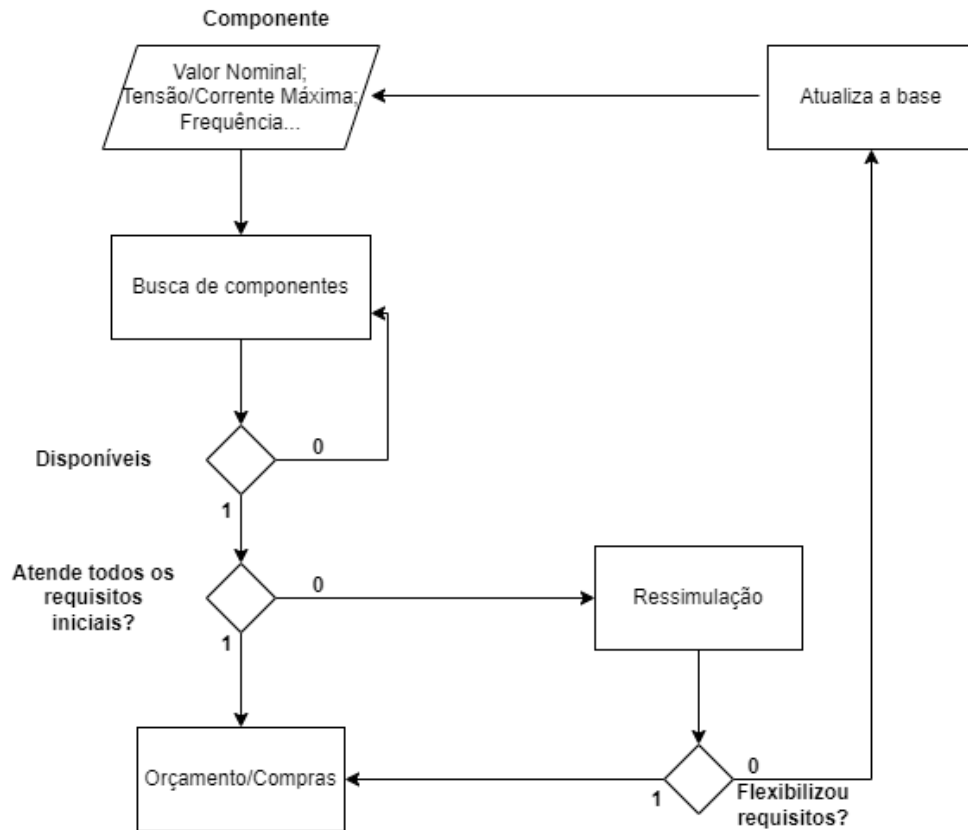
4.4 Escolha dos componentes do estágio de potência

Nessa etapa, o projeto entrou na escolha dos componentes, sendo necessário buscar os componentes que estavam disponíveis no mercado, que foi de fácil obtenção, baixo custo, tendo em vista a falta de componentes que os países tem enfrentado depois da pandemia, para a composição da plataforma física. O fluxograma pode ser observado na Figura 24, o qual representa como foram escolhidos os componentes.

Posteriormente a essas escolhas, feita a análise teórica e a simulação, foi possível verificar os valores nominais, tensão e corrente máxima, frequência, dentre outras especificações as quais os componentes precisavam suportar, para que a plataforma fosse construída corretamente, e também foram verificados os *datasheets* dos mesmos, para poder seguir com os componentes desejados.

A relação completa dos componentes utilizados está apresentada na Tabela 6.

Figura 24 – Fluxograma da escolha dos componentes



Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 6 – Componentes Comerciais

Componente	Quantidade	Descrição	Part Number	Total (USD)
Conector	10	2 vias 2,54mm	826629-2	3,120
Conector	01	3 vias 2,54mm	826629-3	0,555
Capacitor	01	22 μ F	UCS2G220MHD	0,807
Capacitor	02	10nF	MPP103K2J1306106LC	0,070
Capacitor	01	12nF	SMQP123K275D1XXB1515	0,047
Diodo	01	DIODE SCHOTTKY 30V 5A	B530C-13-F	0,252
Diodo	02	DIODE GEN PURP 50V 1A	1N4001	0,120
Socket Fusível	01	FUSE BLOCK CART 250V	64600001003	0,767
Fusível	01	0218.032MXP	0218.032MXP	2,500
LM555	01	IC OSC SINGLE TIMER	LM555CN	1,310
MOSFET	01	N-CH 30V 11A	FDS6690A	0,790
Resistor	01	1k Ω 0,25W	PCF14JT1K00	0,015
Resistor	02	330 Ω 0,25W	CF14JT330R	0,080
Resistor	01	1 Ω 10W	MO1W-1 Ω \pm 5%-TT63	0,015
Resistor	01	1 Ω 5W	EWWR0010J1R00T9	0,592
Regulador	01	IC GATE DRVR LOW-SIDE	UCC27519DBVR	0,848
Socket	01	8 Pins DIP	08BT1NSF6X-JKB	0,123
Total (USD)				12,011

Fonte: Autoria própria (2024).

4.4.1 Diodo e chave

O diodo tem como função atuar junto ao transistor para executar o chaveamento, o qual permite a passagem da corrente, isolando a carga da fonte de entrada e permitem a transferência eficiente de energia do indutor para a carga. O transistor controla o fluxo de corrente no indutor durante o ciclo *ON* ou ligado, acumulando energia no indutor. A energia armazenada no indutor e capacitor é dissipada pelo resistor. Para o projeto escolheu-se o diodo B530C, o qual atende aos limites de corrente de operação.

A chave escolhida foi a FDS6690A. Este MOSFET de nível lógico de canal N é produzido usando o avançado processo *PowerTrench* da *Fairchild Semiconductor*, que foi especialmente adaptado para minimizar a resistência, e ainda manter um desempenho de comutação superior. Esses dispositivos são adequados para aplicações de baixa tensão, e alimentadas por bateria, onde são necessárias baixas perdas de energia em linha e comutação rápida. A Tabela 7 apresenta os componentes escolhidos para o chaveamento.

Tabela 7 – Componentes para o chaveamento

Componente	Part Number	Função
MOSFET	FDS6690A	Comutação ativa
Diodo	B530C	Comutação passiva

Fonte: Autoria própria (2024).

4.4.2 Capacitor, resistor e indutor

O resistor que foi utilizado como carga, deve suportar a corrente e potência aplicada pelo conversor. Através dos cálculos e simulações anteriormente demonstradas, o valor do resistor comercial que mais se aproxima é de 56Ω e uma potência de 10 W, se aproximando do valor calculado de $57,6 \Omega$.

O capacitor utilizado, de valor comercial que se aproxima do valor calculado, é de $22 \mu\text{F}$, valor que mais se aproxima do simulado de $20,08 \mu\text{F}$. Ademais, o capacitor é do tipo eletrolítico e apresenta tensão máxima de 100 V.

Para o indutor, o valor dimensionado de 0,6 mH e com a corrente podendo chegar até 3 A, a equipe decidiu que seria necessário a fabricação para garantir a funcionalidade desejada do componente. Como mencionado por Tacca (2009) em *Eletrônica de Potência*, é comum a utilização de indutores de ferrite de baixa indutância e alta corrente para implementar filtros de entrada (de modo diferencial e/ou de modo comum), imprescindíveis como etapa de entrada em fontes chaveadas, em filtros de saída ou desacoplamento de múltiplas fontes em conversores *Flyback*.

Para o indutor do projeto, foi utilizado um indutor dentre os disponíveis no próprio laboratório da Universidade. Como o indutor foi reaproveitado de outro projeto, utilizou-se uma ponte LCR para confirmação da indutância.

4.5 Circuito de *gate-driver*

Para o presente projeto, foi necessário realizar a escolha dos componentes do circuito de *gate-driver*, que é o circuito de comando da chave. Para essa etapa, existem diversas soluções para realizar a comutação de um conversor estático, tanto analógica quanto digital.

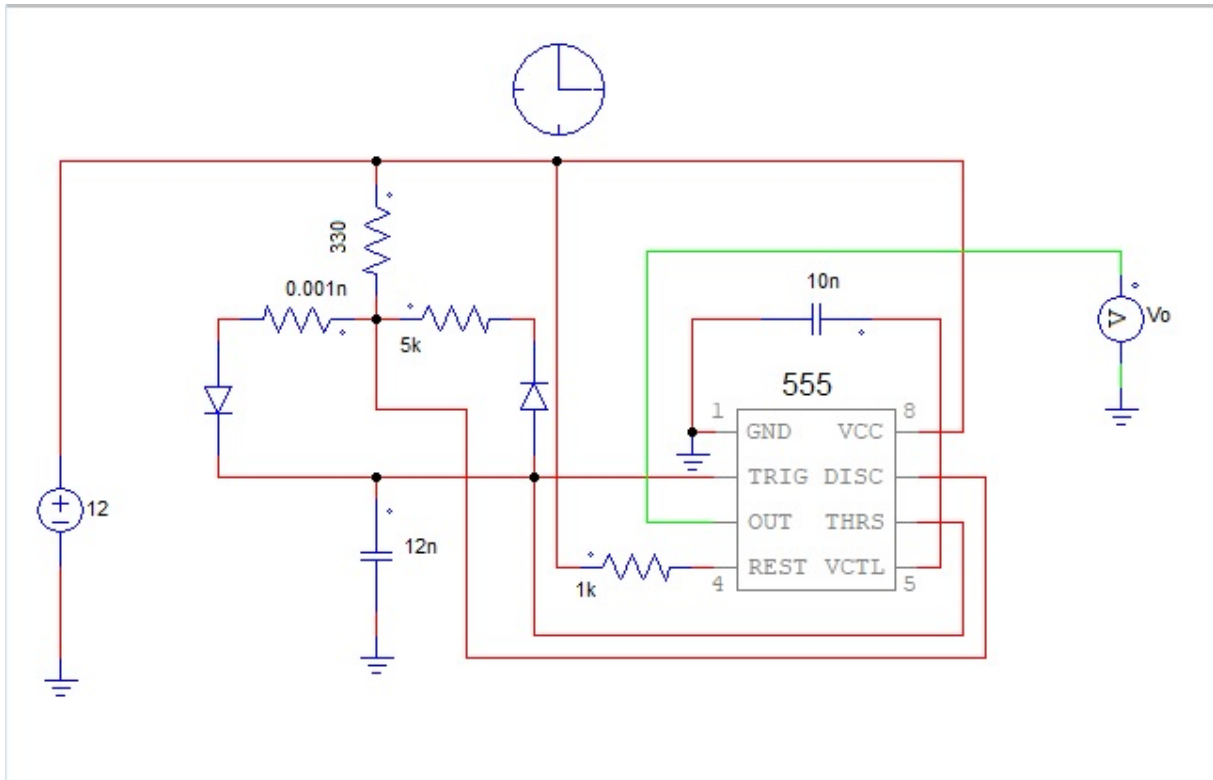
O *gate-driver* é importante na área de Eletrônica de Potência, pois essa parte envolve tanto habilidade de *software* na programação de microcontrolares, quando chaveamento digital, quanto habilidades na parte de *hardware* na concepção e implementação de circuitos analógicos.

O principal objetivo nessa etapa, é utilizar esse circuito como solução para fornecer tensão e frequência compatíveis com a chave escolhida na etapa anterior, realizar a alimentação da fonte principal do circuito, sem a necessidade de uma fonte externa auxiliar, e possibilitar a variação da razão cíclica. As instruções detalhadas no *datasheet* do circuito integrado, escolhido na etapa anterior, o *LM555*, foram usadas para configurar o *gate-driver*. A Figura 25 apresenta a solução proposta para o *gate-driver* do conversor. O oscilador recebeu uma tensão de alimentação em corrente contínua e fornece uma forma de onda quadrada com frequência fixa estipulada pelo projeto dos componentes externos ao circuito integrado, e de razão cíclica variável, através de um potenciômetro. No presente projeto foi optado por utilizar o componente *LM555*. A saída do oscilador é conectada na entrada do circuito analógico, que recebe um sinal lógico e fornece uma saída em tensão como onda quadrada que foi utilizada para acionar a chave, sendo necessário para fornecer nível de tensão e corrente compatíveis com a ativação do *MOSFET*, o qual não seria possível com a utilização direta do oscilador pois a corrente necessária prejudicaria o circuito integrado podendo causar falhas críticas no projeto e/ou vida útil reduzida.

O bloco *gate-driver* é capaz de fornecer os parâmetros elétricos necessários para acionar um semicondutor controlado. Para esse teste do circuito de *gate-driver* foi utilizado os modelos SPICE dos componentes. Para a montagem do projeto, foram utilizados os *datasheets* de todos os componentes. Para o *LM555*, foi determinado, inicialmente, os valores dos resistores externos ao circuito integrado R_1 e R_2 , e utilizada a frequência definida nas especificações iniciais do projeto, encontrada na Tabela 5 e com isso o capacitor externo C_1 foi calculado por:

$$C_1 = \frac{(R_1 + 2R_2)}{f_s} \quad (58)$$

Figura 25 – Esquemático da simulação do circuito *gate-driver*



Fonte: Autoria própria (2024).

A razão cíclica D_c do sinal de saída é dada por:

$$D_c = \frac{R_2}{(R_1 + 2R_2)}, \quad (59)$$

e os tempos de sinal alto e baixo, T_{on} e T_{off} , respectivamente, por:

$$T_{on} = 0,693(R_1 + R_x)C_1 \quad (60)$$

e

$$T_{off} = 0,693(R_y)C_1, \quad (61)$$

onde $R_1 = 330 \Omega$, R_x é o terminal do potenciômetro representado por $0.001n$ na Figura 25 e R_y é o valor de $5k$ representado na mesma Figura, sendo que, pela característica do próprio elemento potenciômetro, tem-se:

$$R_x + R_y = 5000 \Omega. \quad (62)$$

4.6 Simulação com modelos SPICE

Para simulação do circuito de potência e do circuito de gate-driver operando juntos, foi necessário utilizar *software* de integração de simulação que suportasse os modelos *SPICE*, devido à necessidade da inclusão de circuitos integrados, e também foi uma etapa de verificação do projeto, o qual analisou se os componentes escolhidos apresentaram os resultados esperados.

Na prática, sabe-se que a curva de variação do circuito de *gate-driver* não fornece uma frequência constante, porém, é possível aproximá-la para simulação visando o estudo da viabilidade da utilização deste modelo de circuito.

Para simulação os seguintes valores de razão cíclica foram considerados: 20%, 35%, 50% e 60%. Por se tratar de um circuito que apresenta uma característica de variação linear para os ciclos propostos, variando os valores de R_x e R_y , é possível verificar as mudanças nas frequências avaliando se o circuito pode ou não ser utilizado e qual o erro esperado, sendo apresentada essa análise na Tabela 8.

A Tabela 8 apresenta os valores para R_x e R_y , do potenciômetro, para obtenção da razão cíclica desejada.

Tabela 8 – Valores de resistência do potenciômetro

D_c (%)	Teórico	R_x (Ω)	R_y (Ω)	T_{on} (μs)	T_{off} (μs)
20		1000	4000	11,06	33,26
35		1750	3250	17,29	27,02
50		2500	2500	23,53	20,79
60		3000	2000	27,69	16,63

Fonte: Autoria própria (2024).

Para comparar os valores de razão cíclica, a Tabela 9 apresenta a comparação entre o valor esperado e o atingido através do ajuste linear de variação do circuito.

Tabela 9 – Razão cíclica da simulação com modelo SPICE

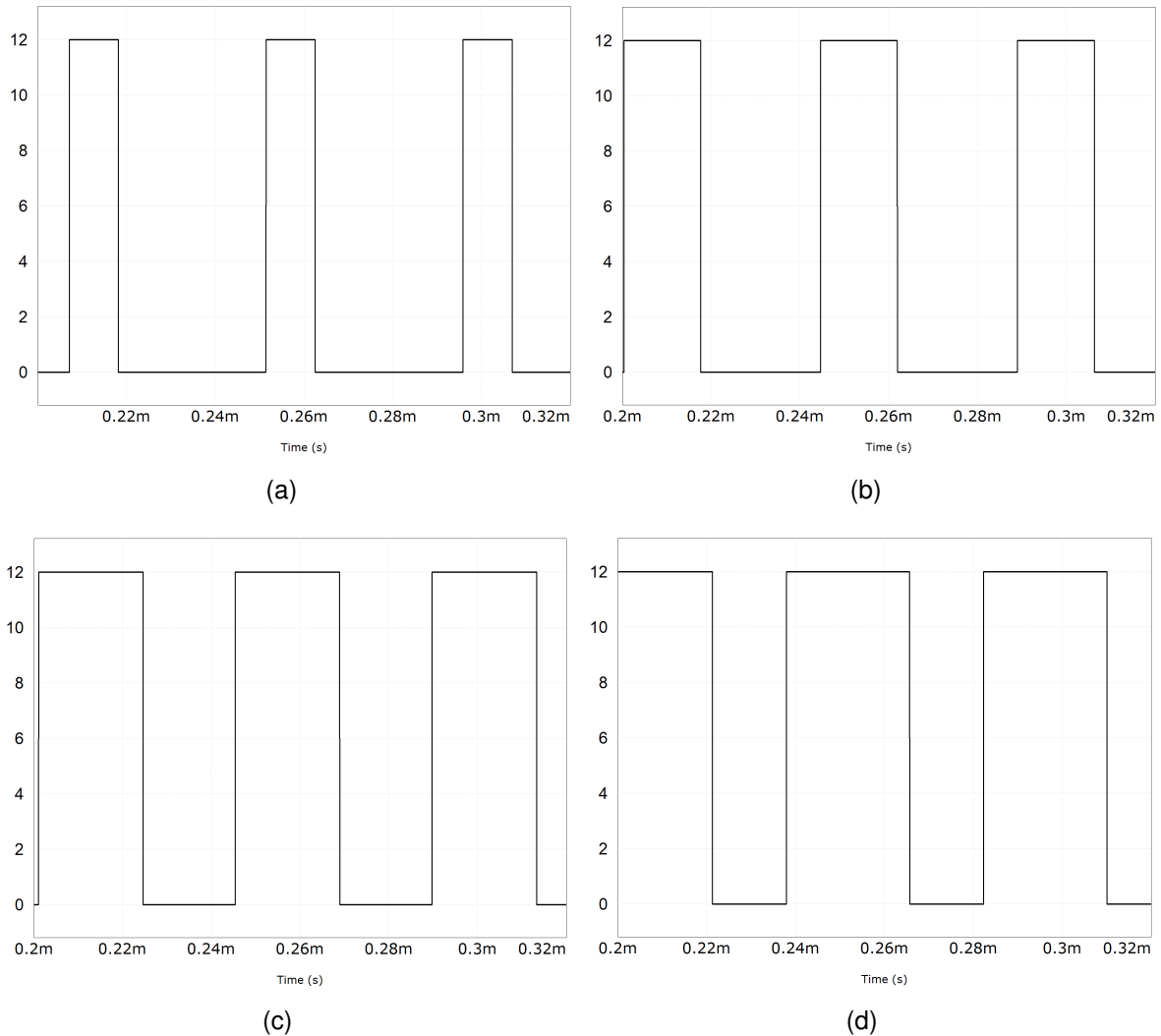
D_c (%)	Teórico	D_c (%) SPICE	Erro (%)
20		24,95	4,95
35		39,02	4,02
50		53,09	3,09
60		62,47	2,47

Fonte: Autoria própria (2024).

Como esperado, pode-se observar que os valores seguem um padrão aproximadamente linear, com erro menor do que 5%. Logo, o projeto do *driver* atende as especificações do projeto.

Os resultados das simulações são apresentadas na Figura 26.

Figura 26 – Simulação do *driver*. (a) 20%. (b) 35%. (c) 50%. (d) 60%.

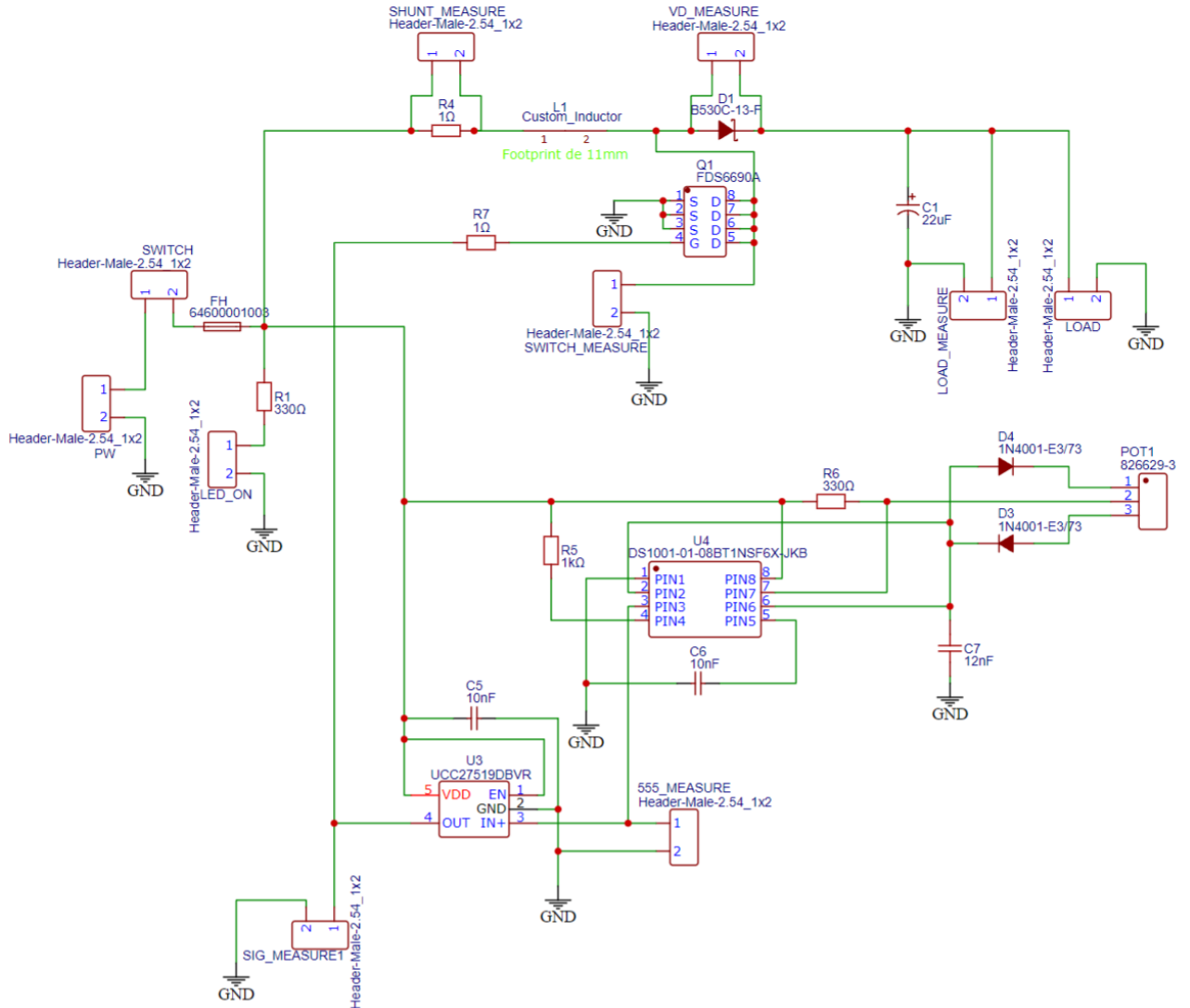


4.7 Projeto do *hardware*

Após as etapas de projeto, escolha dos componentes e simulações, busca-se realizar a implementação prática do conversor. Existem algumas possibilidades para essa etapa, tais como utilização de *protoboard*, placas universais e placas de circuito impresso. Para o conversor *Boost* em estudo, o *hardware* foi desenvolvido em PCB. Para isso, a primeira parte consistiu na criação de um esquemático em um *software* de desenvolvimento de PCB. O *software* adotado foi o *EasyEDA Designer*, que é uma plataforma gratuita. A etapa de criação do esquemático é muito similar com a montagem de um circuito elétrico em um *software* de simulação. Contudo, buscou-se no esquemático, além de uma representação do circuito, a inclusão dos componentes reais que seriam utilizados. Em outras palavras, a escolha de cada componente estava associada com o componente físico que foi adquirido para a montagem. No ambiente de criação de esquemático do *EasyEDA Designer*, foi possível procurar os componentes pelo *part number*. Ao inserir um componente, usualmente o *software* já possui as dimensões físicas dos

terminais que serão utilizados na PCB. A Figura 27 apresenta o esquemático desenvolvido para o conversor *Boost*.

Figura 27 – Esquemático de produção



Fonte: Autoria própria (2024).

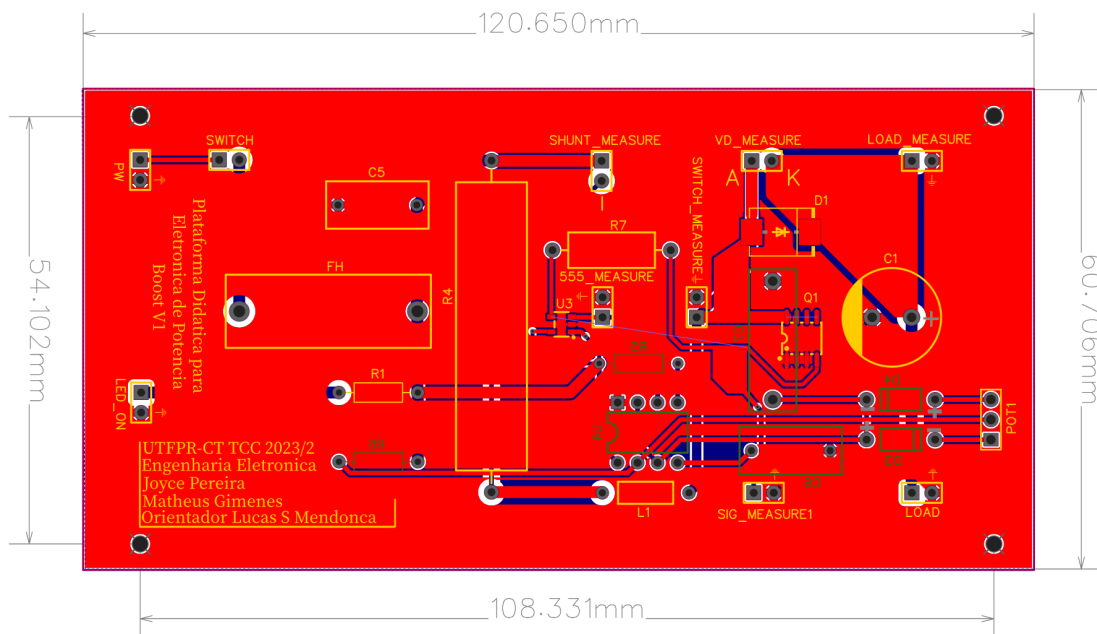
4.8 Placa de circuito impresso

A ferramenta *EasyEDA Designer*, foi utilizada para realizar a montagem da placa de circuito impresso, convertendo o esquemático para placa de circuito impresso e na Lista de Material (BOM), que é a lista de materiais, ou componentes, necessários para fabricação. Nessa etapa, uma representação orientada às dimensões físicas de cada componente foi utilizada visando o desenvolvimento da placa. Na produção da placa foram feitas considerações para as implementações em PCB, e alguns pontos foram considerados para realizar a etapa de roteamento, que é a realização das conexões entre os componentes escolhidos:

- Foram utilizadas conexões curtas (dispondo os componentes próximos uns dos outros);
- Foram evitadas as trilhas com mudanças de direção de 90 graus;
- Polígonos foram usados, quando possível, para as conexões elétricas;
- Separou-se o estágio de potência do estágio de comando;
- Foram criados dois planos de terra (*ground*), sendo um destinado ao *top layer* e outro para o *bottom layer*.

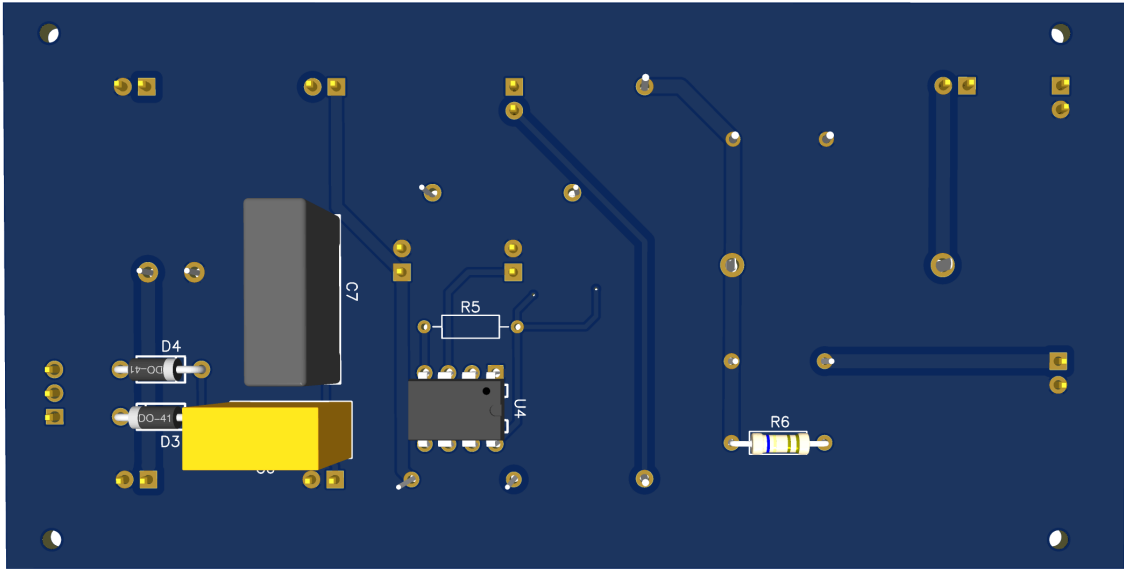
Para o presente projeto, a PCB foi desenvolvida utilizando 2 camadas (*2-layers*) com dimensões de 120,65 mm por 60,706 mm. Em ambas as camadas, foi criado um plano de terra. Portanto, as trilhas elétricas que conectam os componentes foram determinadas pelos limites dos caminhos que foram fresados na placa. As Figuras 28 e 29 mostram o projeto da placa de circuito impresso, sendo a Figura 28 o *top layer* e a Figura 29 o *bottom layer*. Durante as etapas de roteamento, realizou-se a confecção das trilhas para cada uma das camadas.

Figura 28 – Top layer



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 31 – Bottom layer 3D



Fonte: Autoria própria (2024).

4.9 Estrutura mecânica

O circuito foi implementado de maneira que os circuitos internos, os quais não necessitam serem testados em aula, ficassem de maneira que não seja possível o manuseio dos alunos. Porém, as partes que possuem pontos de teste e necessitam de ligação com outros circuitos, foram colocadas de maneira expostas, permitindo o manuseio dos alunos e ajuste dos parâmetros. Posteriormente a montagem, foi avaliada a firmeza e segurança da plataforma didática, a fim de verificar se a mesma se encontrava apta para uso dos alunos. Na estrutura mecânica, também foram inseridos conectores para realizar a interface entre os pontos de medição da placa de circuito impresso e os instrumentos de medição.

Para que a placa pudesse ser manuseada de maneira segura, foi construída uma caixa de de acrílico transparente de 5 mm de espessura, possuindo as dimensões de 200 x 80 x 80 mm, apresentando os pontos de conexões, medições e maçaneta para manuseamento seguro da bancada, possibilitando que os alunos vejam a placa em si em funcionamento e ainda mantendo a segurança isolando as ligações elétricas e as altas temperaturas que os resistores *shunts* podem atingir, em torno de 90 à 120 °C.

4.10 Material didático

Para a melhora da didática para com os alunos, foi escrito um roteiro de aula para uso da plataforma didática, apresentado no APÊNDICE A. O material é considerado uma sugestão de sequência de análise do conversor. Dessa forma, pode ser modificado para atender às demandas da aula.

5 RESULTADOS

Esse capítulo apresenta os resultados para validação do conversor CC/CC projetado. Em um primeiro momento, será mostrada a montagem da plataforma, o que inclui tanto a inserção dos componentes elétricos na PCB, caixa de proteção e interface e conexões entre pontos de medição da placa e conectores da caixa. Posteriormente, os resultados experimentais serão apresentados por meio de uma comparação entre simulação e medição. Ademais, o conversor foi avaliado em termos de eficiência para alguns pontos de operação. Por fim, um comparativo entre a plataforma desenvolvida e as soluções comerciais será discutido.

5.1 Montagem da plataforma

Nessa seção, serão apresentados os resultados físicos das montagens da placa com os componentes soldados, e da caixa que envolve a placa, fornecendo segurança, isolamento e integridade ao sistema, contando com pontos de medições através de conectores, protegendo tanto o usuário quanto a placa de circuito impresso e suas conexões.

A montagem da placa foi realizada em dois estágios, no primeiro, foi solicitado que o fornecedor montasse a placa usando a linha de produção, soldando apenas alguns componentes, visando o barateamento da produção da placa. Após o recebimento das placas, a equipe comprou no comércio local o restante dos componentes, de acordo com os valores dos componentes planejados na produção da placa, o qual gerou um gasto reduzido em comparação à cotação direta do fornecedor. O valor final dos componentes faltantes foi de R\$ 28,75 para montagem de uma placa.

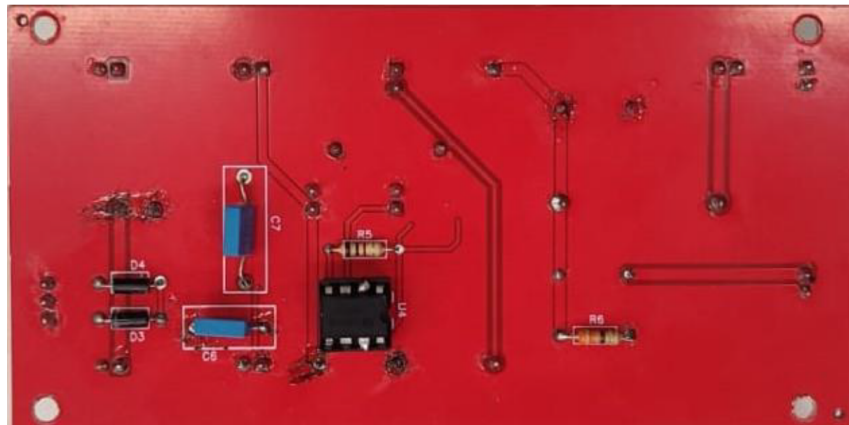
As Figuras 32 e 33 mostram como ficou o projeto concluído após a soldagem dos componentes pelos integrantes do grupo, garantindo as conexões e integridade das ligações elétricas, também sendo disposta no *top layer* e *bottom layer*.

Figura 32 – Placa soldada - *top layer*



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 33 – Placa soldada - *bottom layer*



Fonte: Autoria própria (2024).

Para montagem da caixa, foram utilizadas placas de acrílico, onde foram feitas furações e a colagem das placas, utilizando cola específica do material. As Figuras 34(a)-(d), mostram como ficou cada face após a montagem, indicando os pontos de conexões, os quais são extensores dos pontos de conexões diretamente da placa, possibilitando assim um acesso mais seguro e confiável entre o usuário e o projeto. As conexões são feitas por meio de conectores externos e não ligando-os nos pontos de medição direto na placa de circuito impresso, o que poderia acarretar em curtos e danos.

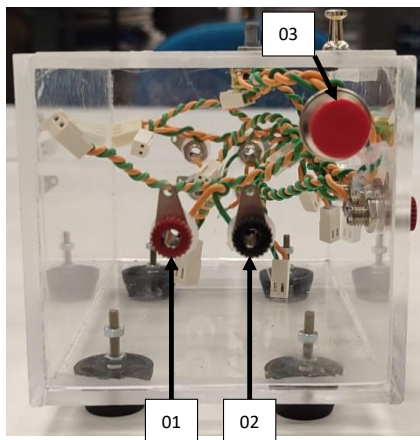
A Tabela 10 mostra as conexões das ligações elétricas correspondente na placa de circuito impresso, apresentadas na Figura 34 nos respectivos pontos de conexão. A numeração de 01 até 15 é usada para indicar cada conector da plataforma.

Tabela 10 – Indicação das conexões entre a placa e a caixa

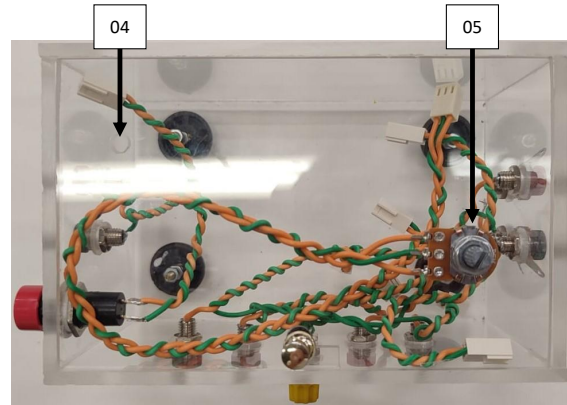
Indicador	Sinal	Nome do Conector	Pino do Conector
01	Fonte externa 12 V (CC)	PW	1
02	Fonte externa GND	PW	2
03	Botão liga-desliga	SWITCH	1-2
04	LED	LED	1-2
05	Potenciômetro variador do <i>Duty Cycle</i>	POT1	1-2-3
06	GND comum	Múltiplos GND	2
07	Saída do LM555	555_MEASURE	1
08	V_{GS}	SIG_MEASURE1	1
09	V_{DS}	SWITCH_MEASURE	1
10	Conexão da carga externa	LOAD	1
11	Carga externa	LOAD_MEASURE	1
12	<i>Shunt</i>	SHUNT_MEASURE	1
13	Referência do sinal <i>Shunt</i>	SHUNT_MEASURE	2
14	Referência do sinal V_D	VD_MEASURE	2
15	V_D	VD_MEASURE	1

Fonte: Autoria própria (2024).

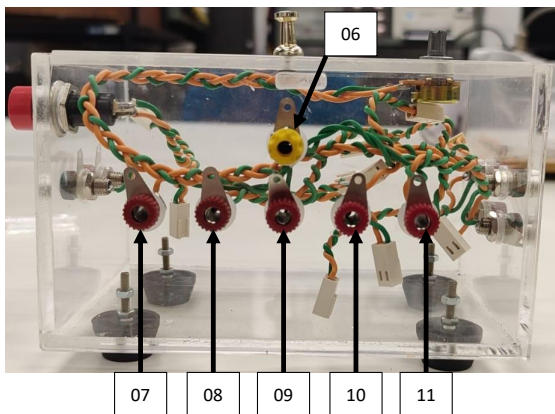
Figura 34 – Caixa montada sem placa. (a) Visão lateral 1. (b) Visão de cima. (c) Visão frontal. (d) Visão lateral 2.



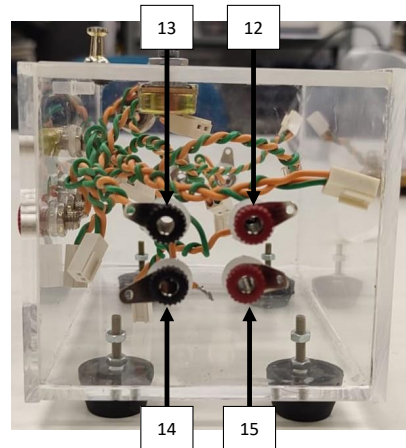
(a)



(b)



(c)

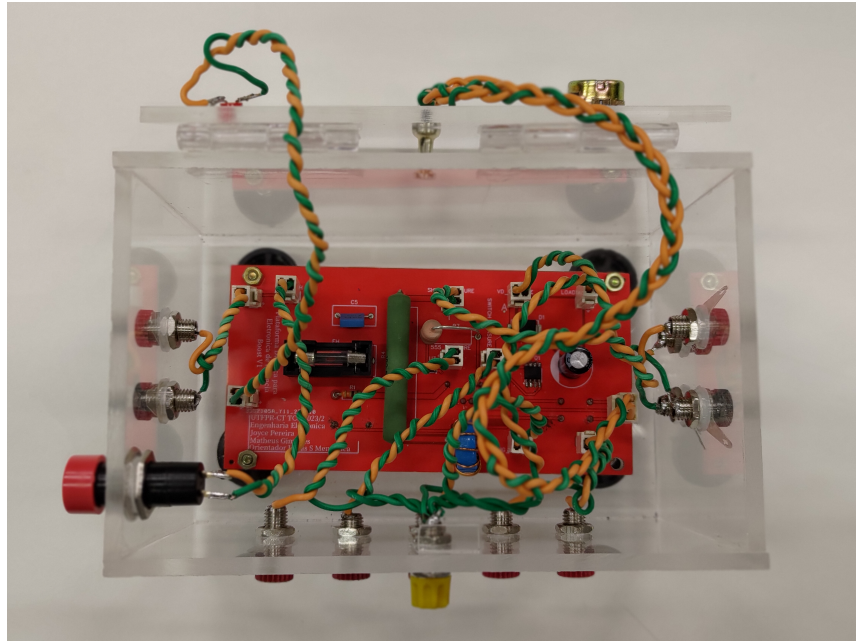


(d)

A Figura 35 mostra o resultado final da montagem da plataforma didática incluindo a PCB do conversor CC/CC e também a caixa. A plataforma é mostrada com a tampa aberta, situação que permite acesso aos conectores e componentes da placa.

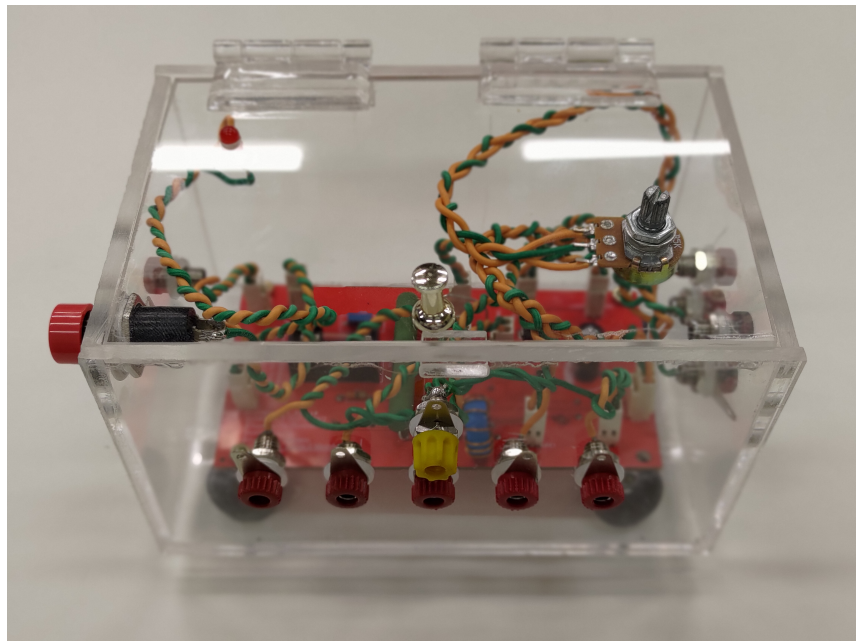
Já na Figura 36, a plataforma é mostrada com a tampa fechada, situação de uso da placa. A plataforma foi montada com conectores fixados na caixa que possuem tanto um *plug* para conectores do tipo banana, como também ganchos para inserção das ponteiros de medição do osciloscópio. A caixa de acrílico transparente permite a visualização da placa de circuito impresso, dos componentes e dos conectores. Dessa forma, cria-se uma expectativa visual mais interessante do que as plataformas que são completamente fechadas. Ao visualizar a placa de circuito impresso, o aluno tem a experiência de fato utilizar um equipamento eletrônico com uma contemplação industrial.

Figura 35 – Plataforma didática com conversor CC/CC Boost - Aberta



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 36 – Plataforma didática com conversor CC/CC Boost - Fechada



Fonte: Autoria própria (2024).

5.2 Comparação entre resultados de simulação e experimental

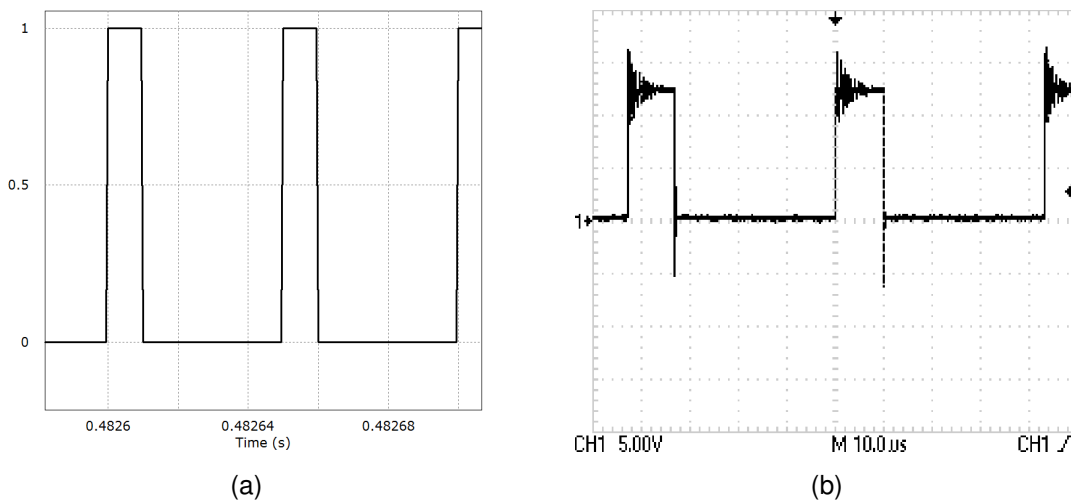
A seguir, os resultados de simulação e experimental são apresentados. Optou-se por escolher 4 pontos de operação, e avaliar o funcionamento do conversor realizando a medição no sinal de acionamento da chave, tensões de saída, chave e diodo, e corrente no indutor.

5.2.1 Razão cíclica 20%

A seguir são apresentados os resultados de simulação e experimental considerando razão cíclica de 20%. Os resultados são mostrados visando comparar a simulação realizada no *software* PSIM com as medidas no conversor físico desenvolvido.

A Figura 37 mostra o sinal de gatilho para a chave S . Observa-se que o sinal da simulação possui amplitude unitária devido ao uso da chave ideal. Porém, no experimental, o sinal de gatilho apresenta amplitude compatível com o nível de *threshold* da chave real.

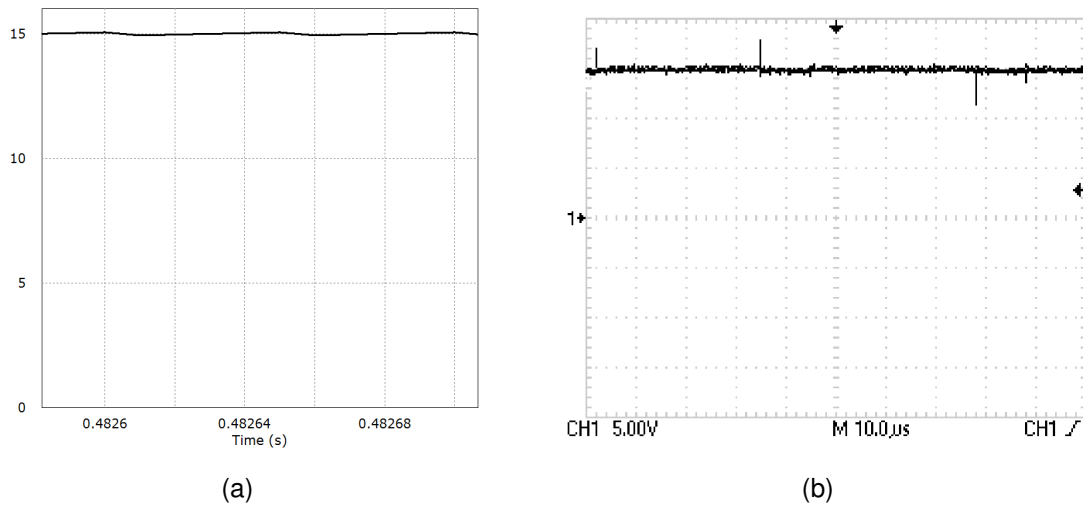
Figura 37 – Resultados para sinal de gatilho para razão cíclica de 20%. (a) Simulação. (b) Experimental.



A Figura 38 mostra a comparação entre simulação e experimental para a tensão de saída V_o . Sabendo que o ganho do conversor *Boost* é dado pela Equação (29), para razão cíclica de 0,2, o ganho teórico é 1,25. Portanto, para tensão de entrada é de 12 V, a tensão de saída teórica é 15 V. Análise que é confirmada na simulação e medida como mostrado na Figura 38.

Os resultados para tensão na chave v_S e tensão no diodo v_D são mostrados nas Figuras 39 e 40, respectivamente. Dada a operação complementar de S e D , observa-se que quando a chave está conduzindo, sua tensão é nula e a tensão no diodo assume o valor da tensão de saída em módulo. Por outro lado, quando a chave está bloqueada, sua tensão é igual à tensão de saída e a tensão no diodo é nula.

Figura 38 – Resultados para tensão de saída para razão cíclica de 20%. (a) Simulação. (b) Experimental.



É possível analisar o tempo de bloqueio da chave. Nota-se pela Figura 39(a) que a chave está com tensão de 15 V no intervalo de tempo de 0,46936 s até 0,4694 s, ou seja, bloqueada por $40 \mu\text{s}$. Considerando a frequência de operação de 20 kHz, o período de um ciclo é $50 \mu\text{s}$. Logo, para razão cíclica de 0,2, o tempo de bloqueio é $50 \mu\text{s} \times 0,8$, resultando em $40 \mu\text{s}$. No resultado experimental, visualiza-se na Figura 39(b) um tempo de bloqueio de aproximadamente $35 \mu\text{s}$. Essa diferença ocorre devido a frequência de chaveamento gerada pelo circuito de *gate-driver* que não é exatamente 20 kHz. Observa-se na Figura 39(b), $10 \mu\text{s}$ por divisão na escala de tempo do osciloscópio, ou seja, a frequência do sinal de gatilho é aproximadamente 22 kHz.

Figura 39 – Resultados para tensão na chave para razão cíclica de 20%. (a) Simulação. (b) Experimental.

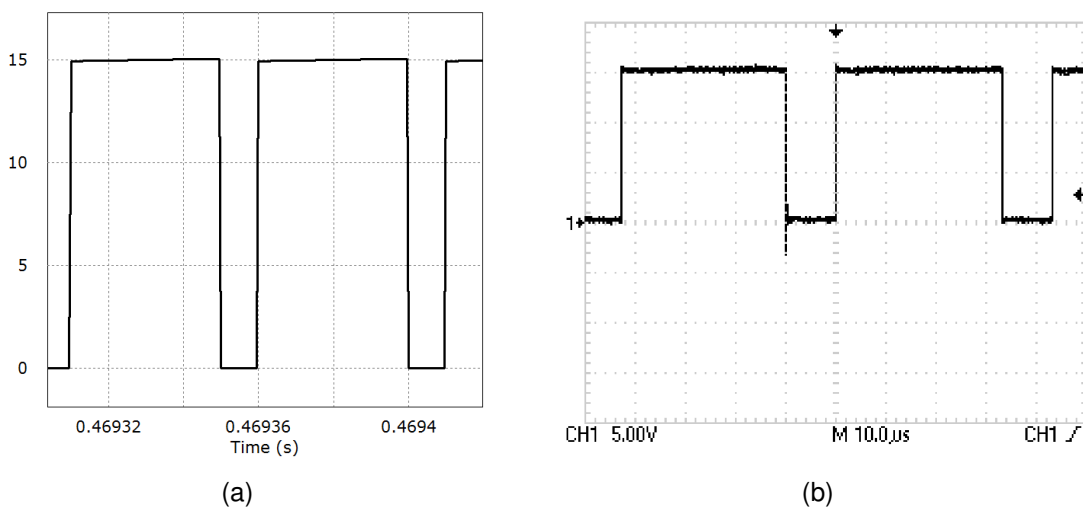
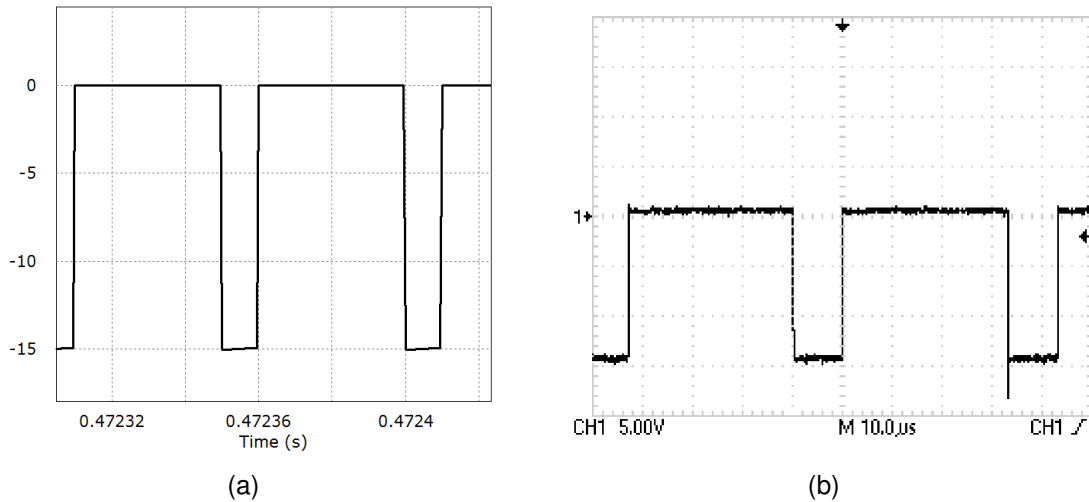
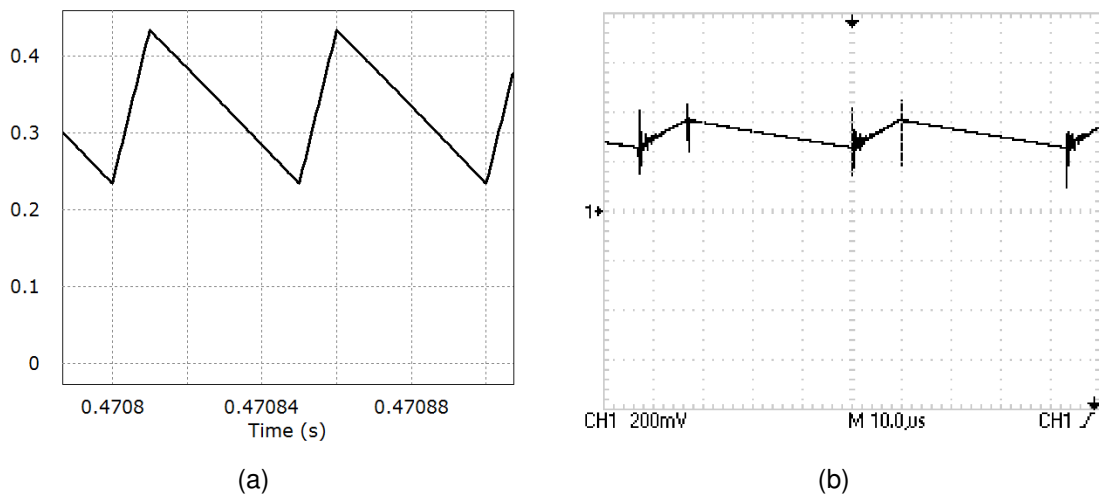


Figura 40 – Resultados para tensão no diodo para razão cíclica de 20%. (a) Simulação. (b) Experimental.



A corrente no indutor é mostrada na Figura 41. Observa-se que, a corrente cresce linearmente por 20% do tempo de um ciclo de operação. Ou seja, quando a chave está conduzindo.

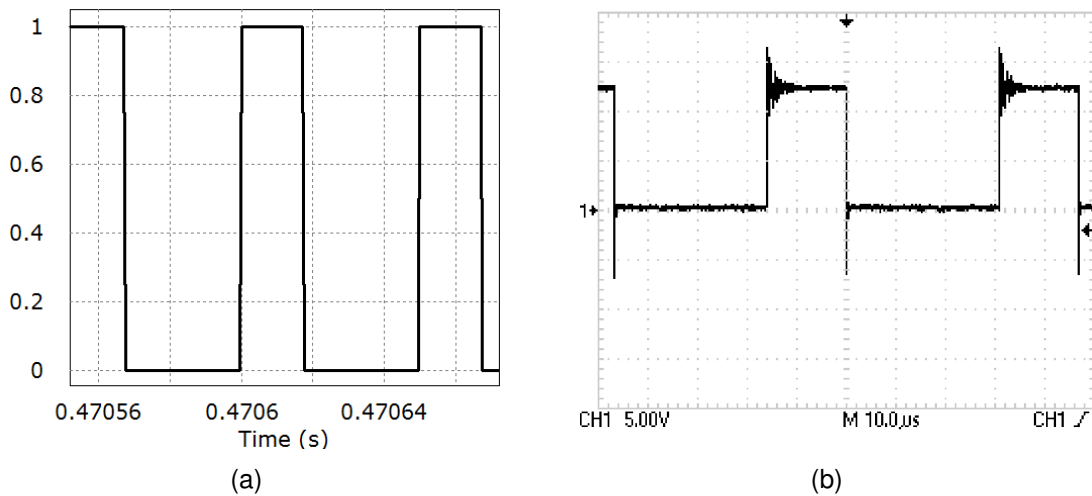
Figura 41 – Resultados para corrente no indutor para razão cíclica de 20%. (a) Simulação. (b) Experimental.



5.2.2 Razão cíclica 35%

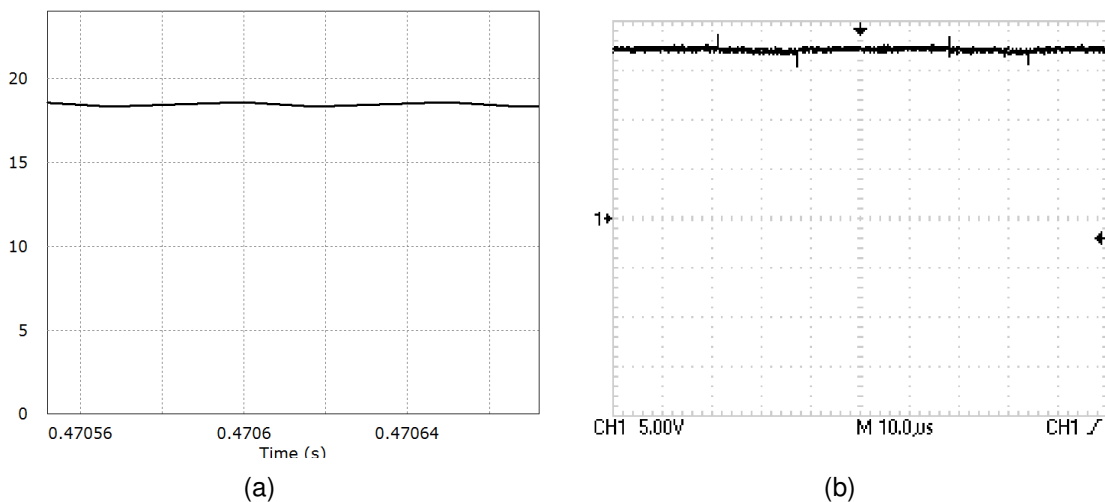
Considerando a razão cíclica de 35%, os resultados são mostrados visando comparar a simulação realizada no *software* PSIM com as medidas no conversor físico. A Figura 42 mostra o sinal de gatilho para a chave S . Observa-se na 42(b) que o sinal de acionamento da chave permanece *ON* por aproximadamente $16 \mu\text{s}$, o que corresponde com a razão cíclica de 35 %, uma vez que o período de chaveamento é $50 \mu\text{s}$.

Figura 42 – Resultados para sinal de gatilho para razão cíclica de 35%. (a) Simulação. (b) Experimental.



A Figura 43 mostra a comparação entre simulação e experimental para a tensão de saída V_o . Para razão cíclica de 0,35, o ganho teórico é aproximadamente 1,53. Portanto, para tensão de entrada é de 12 V, a tensão de saída teórica é 18,46 V. Valores verificados conforme simulação e medida como mostrado na 43.

Figura 43 – Resultados para tensão de saída para razão cíclica de 35%. (a) Simulação. (b) Experimental.



A tensão na chave para razão cíclica 35% é mostrada na Figura 44 e a tensão no diodo na Figura 45. Para ambas variáveis elétricas, os resultado de simulação é validado pela medição. Observa-se aproximadamente 18 V para tensão máxima na chave e também tensão máxima reversa no diodo. Em complemento, a corrente no indutor é apresentada na Figura 46.

Figura 44 – Resultados para tensão na chave v_S para razão cíclica de 35%. (a) Simulação. (b) Experimental.

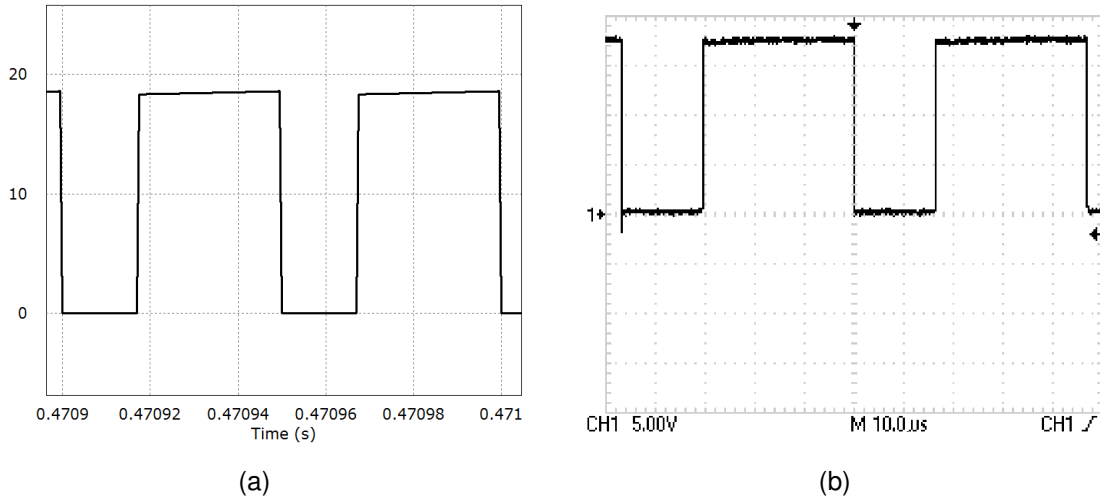
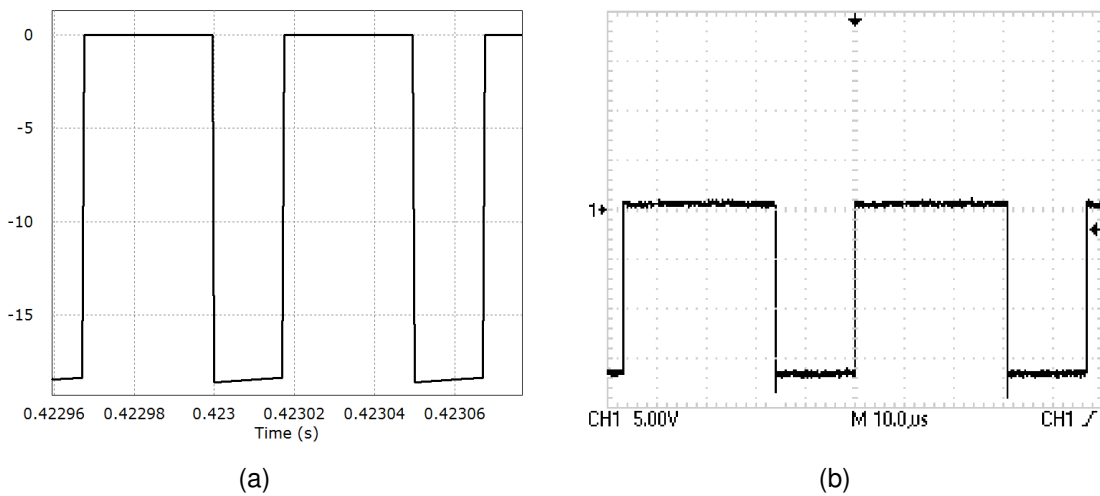


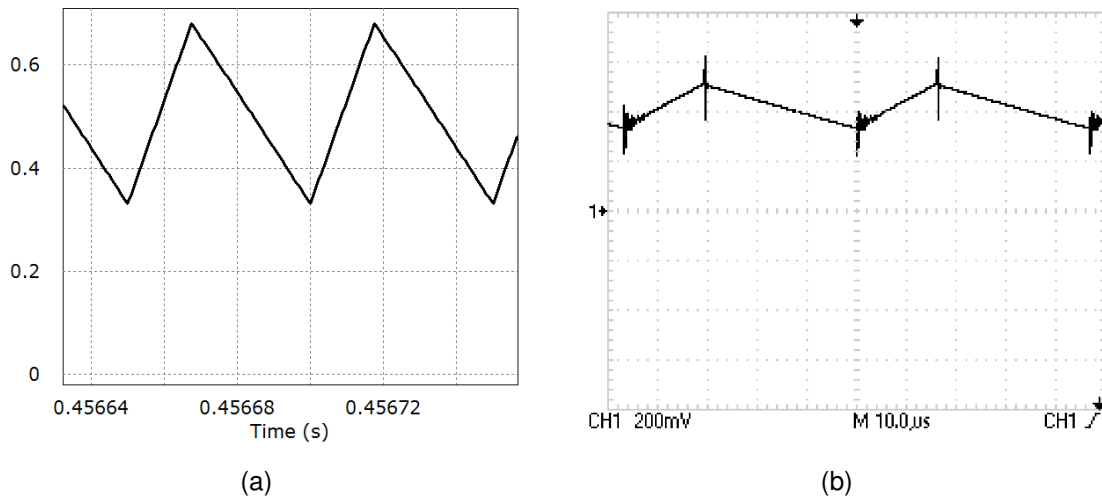
Figura 45 – Resultados para tensão no diodo para razão cíclica de 35%. (a) Simulação. (b) Experimental.



Verifica-se também, pela comparação das Figuras 44 e 45, a correta operação complementar do conversor. Isto é, quando a chave S está conduzindo, o diodo D está bloqueado, e vice-versa.

Na Figura 46, nota-se que, a corrente cresce linearmente por 35% de um ciclo de chaveamento. Complementarmente, a corrente decresce linearmente por 65% do ciclo, como analisado na teoria.

Figura 46 – Resultados para corrente no indutor para razão cíclica de 35%. (a) Simulação. (b) Experimental.



5.2.3 Razão cíclica 50%

Os resultados para razão cíclica 50% são mostrados nas Figuras 47, 48, 49, 50 e 51 para as variáveis: sinal de comando da chave, tensão de saída, tensão na chave, tensão no diodo e corrente no indutor, respectivamente. Analisando a Figura 47(b), é possível calcular a frequência de chaveamento experimental como 22 kHz. Não obstante, os valores obtidos pelas medições estão de acordo com a simulação como mostrado, por exemplo, na tensão de saída experimental de 22 V e tensão de saída da simulação de 23,9 V.

Figura 47 – Resultados para sinal de gatilho para razão cíclica de 50%. (a) Simulação. (b) Experimental.

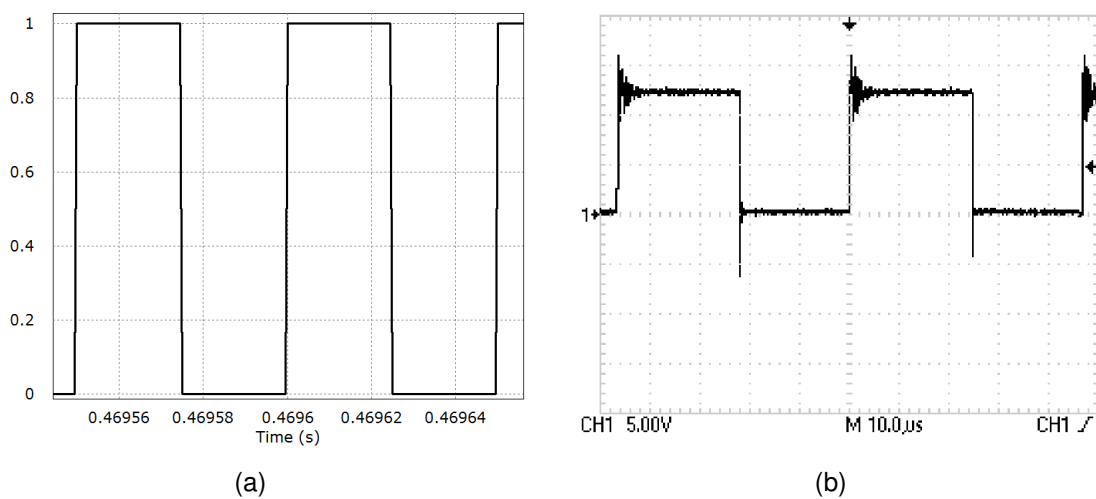
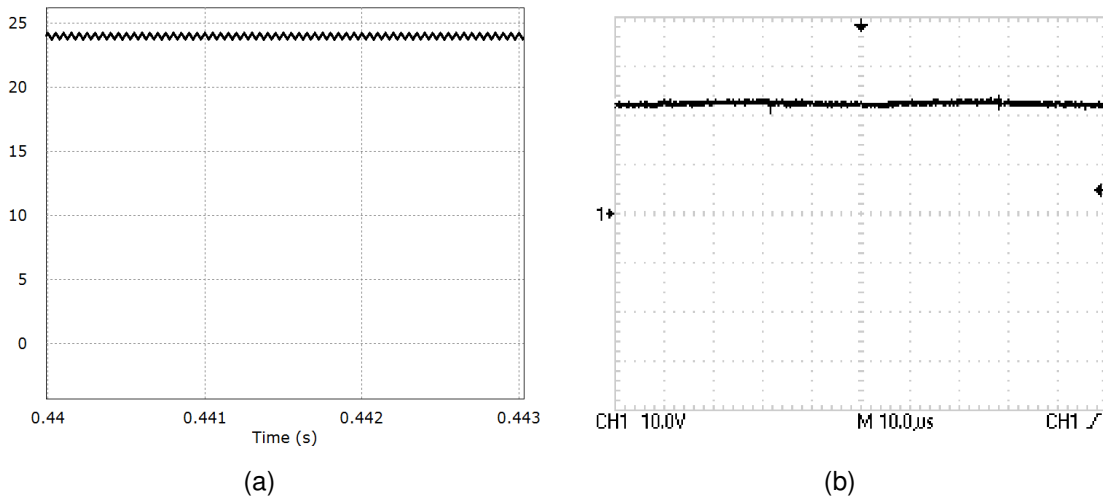


Figura 48 – Resultados para tensão de saída para razão cíclica de 50%. (a) Simulação. (b) Experimental.



A tensão na chave possui valor máximo igual ao valor da tensão de saída quando a chave está bloqueada, como mostrado na Figura 49. Em contrapartida, a tensão máxima reversa no diodo assume valor igual ao valor da tensão de saída quando esse dispositivo está bloqueado.

Na etapa 1, com a chave conduzindo, a tensão na chave é nula. Já na etapa 2, com a chave bloqueada, sua tensão corresponde ao valor da tensão de 22 V no resultado experimental da Figura 49.

Figura 49 – Resultados para tensão na chave para razão cíclica de 50%. (a) Simulação. (b) Experimental.

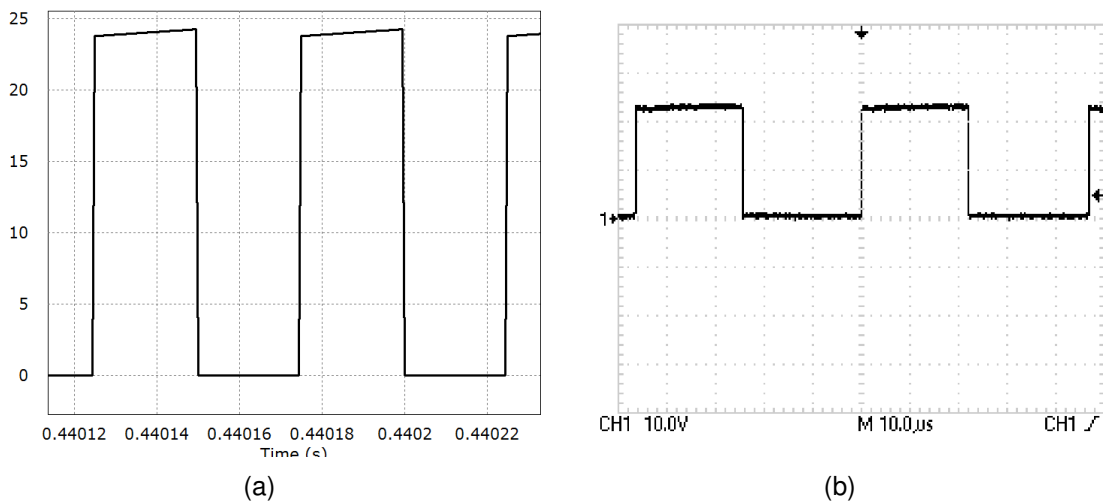
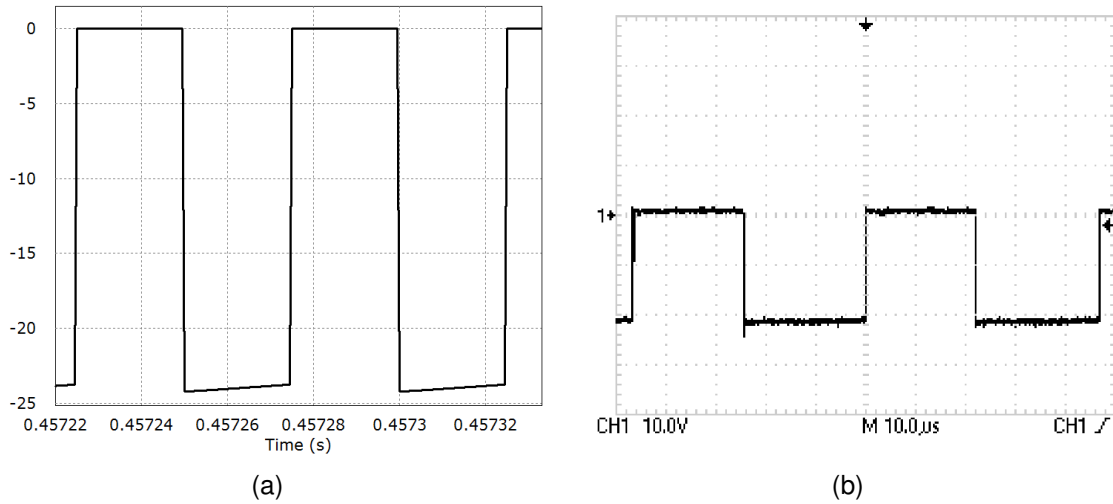
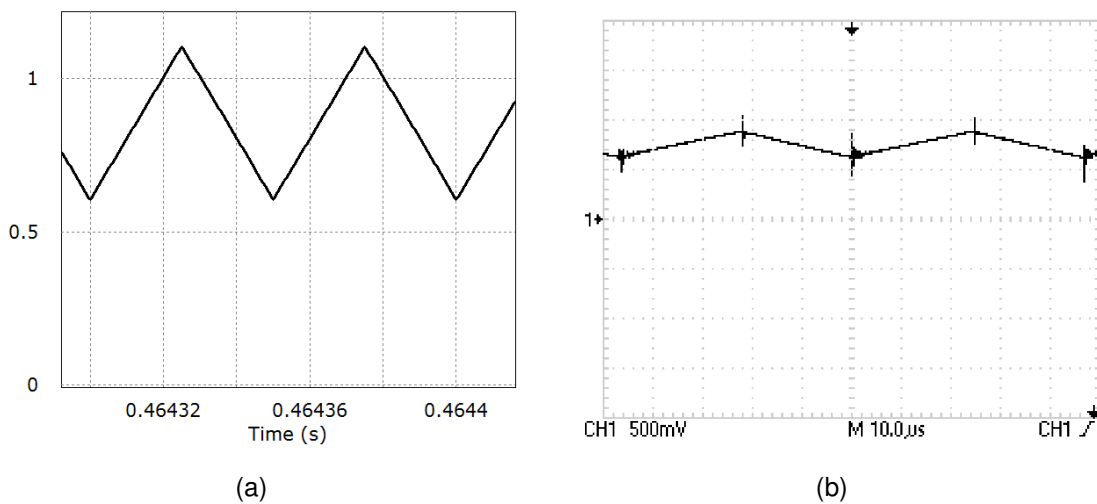


Figura 50 – Resultados para tensão no diodo para razão cíclica de 50%. (a) Simulação. (b) Experimental.



Para razão cíclica de 50%, o tempo da etapa 1 é igual ao da etapa 2. Na etapa 1, com chave conduzindo, observa-se que a corrente no indutor cresce linearmente por aproximadamente $25 \mu\text{s}$. Na etapa 2, a corrente decresce linearmente por também aproximadamente $25 \mu\text{s}$. Resultados avaliados na Figura 51.

Figura 51 – Resultados para corrente no indutor para razão cíclica de 50%. (a) Simulação. (b) Experimental.

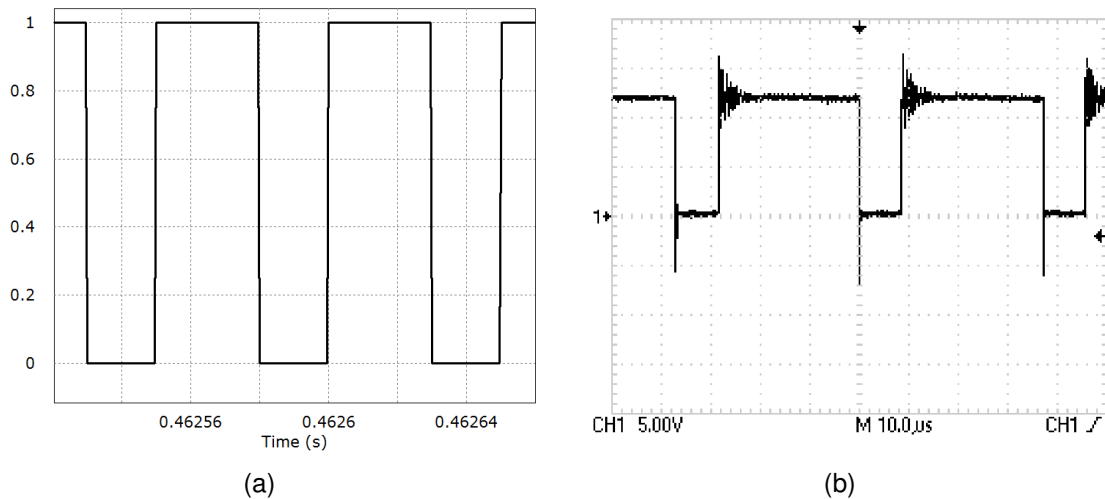


Observa-se na Figura 51(b), que com a divisão de 500 mV na escala de tensão, o valor máximo da corrente é calculada pelo ponto máximo obtido no osciloscópio dividido pelo valor do resistor *shunt*. Isso porque, a corrente no indutor foi medida utilizando ponteira de tensão e resistor como sensor de corrente. Dessa forma, a ondulação de corrente experimental é aproximadamente 250 mA. Em contraste, a ondulação na simulação é aproximadamente 500 mA. Essa diferença surge do indutor utilizado na prática que possui valor levemente maior que o ideal simulado.

5.2.4 Razão cíclica 60%

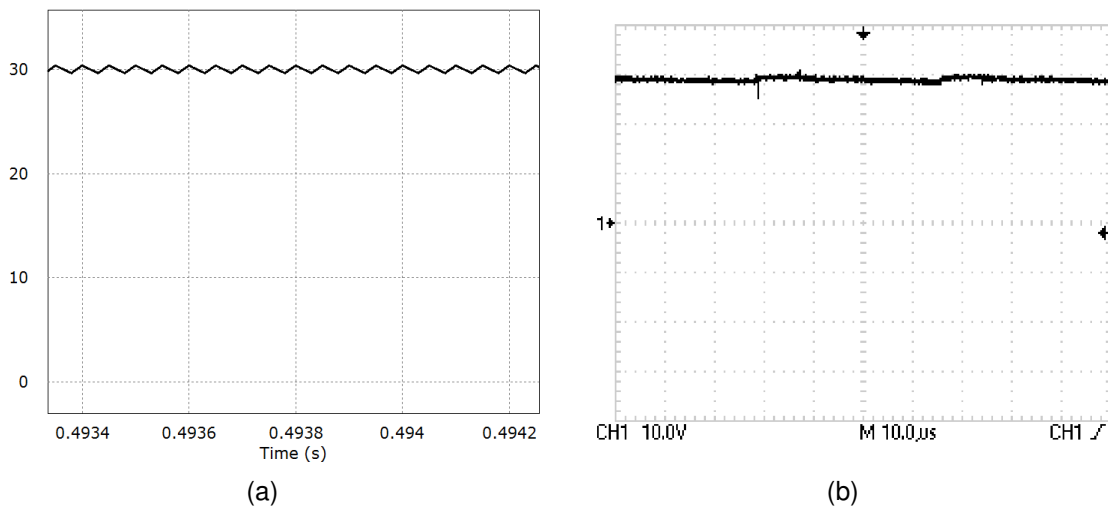
O último conjunto de resultados é para razão cíclica 60%. Como mostrado na Figura 52(b), a frequência de chaveamento experimental é aproximadamente 25 kHz. Isso porque, com os valores maiores de razão cíclica, a frequência gerada pelo circuito de *gate-driver* sofre variação do valor nominal de projeto. Essa condição pode ser melhorada no projeto de definição do capacitor comercial que é conectado ao *trigger* do circuito integrado oscilador 555. De qualquer forma, mesmo com uma diferença de 5 kHz, ainda é possível validar o conversor para o ponto de operação de razão cíclica de 60 %.

Figura 52 – Resultados para sinal de gatilho para razão cíclica de 60%. (a) Simulação. (b) Experimental.



A Figura 53 mostra a tensão de saída. O valor de 30 V obtido corresponde ao valor teórico calculado pelo ganho do conversor. Para razão cíclica de 0,6, o ganho é 2,5. Considerando a tensão de entrada como 12 V, obtém-se 30 V de tensão de saída.

Figura 53 – Resultados para tensão de saída para razão cíclica de 60%. (a) Simulação. (b) Experimental.



A Figura 54 apresenta a tensão na chave. Dessa forma, constata-se que, a razão cíclica de 60% fornece maior ganho de tensão que os outros pontos avaliados. Em contrapartida, o esforço de tensão na chave é maior, uma vez que, a chave deve suportar a tensão de saída quando está bloqueada. Análise similar pode ser feita para a tensão no diodo mostrada na Figura 54.

Figura 54 – Resultados para tensão na chave para razão cíclica de 60%. (a) Simulação. (b) Experimental.

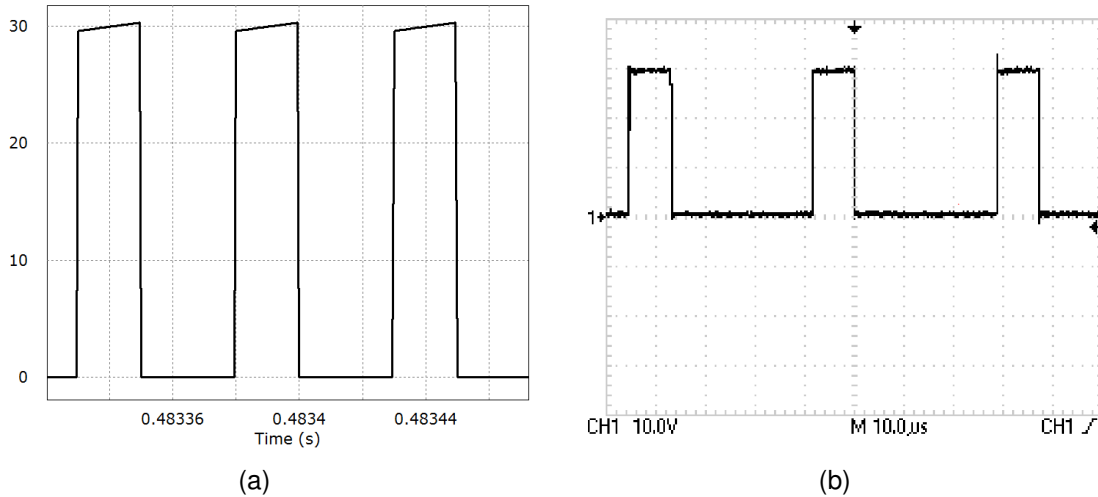
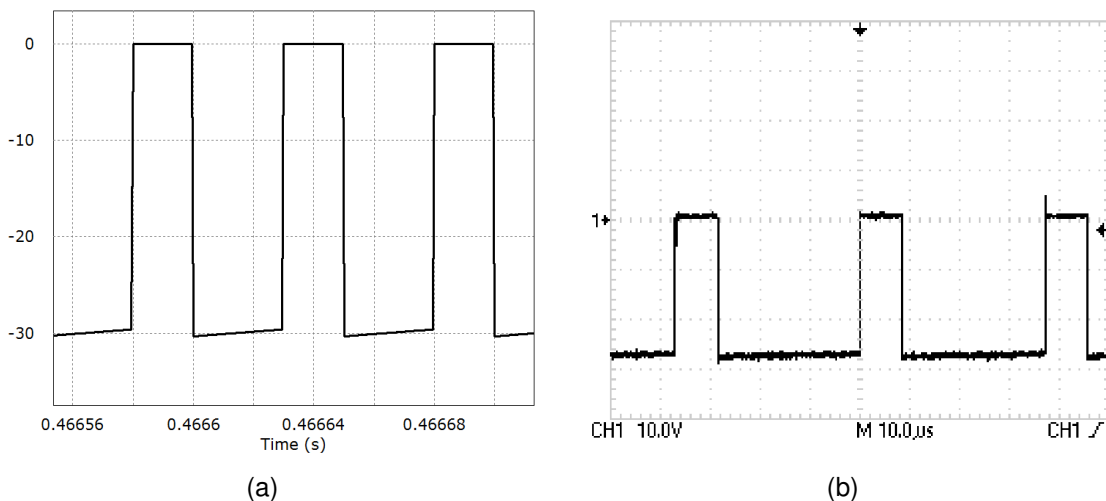
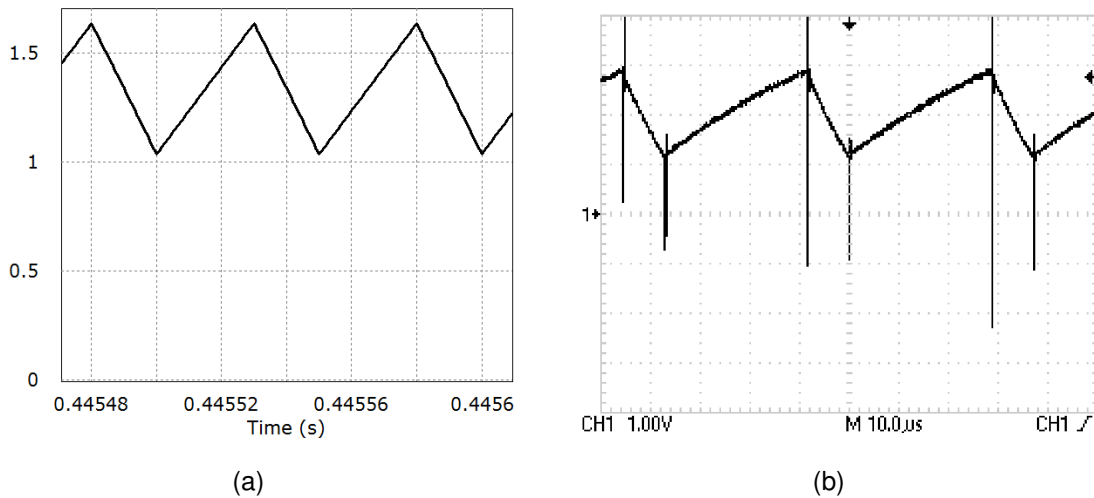


Figura 55 – Resultados para tensão no diodo para razão cíclica de 60%. (a) Simulação. (b) Experimental.



Por fim, a corrente no indutor para razão cíclica de 0,6 é mostrada na Figura 56. Nota-se que, durante 60% de um ciclo de operação, a corrente cresce linearmente.

Figura 56 – Resultados para corrente no indutor para razão cíclica 60%. (a) Simulação. (b) Experimental.



5.3 Potência e eficiência

Visando avaliar a potência e a eficiência do conversor para os pontos de operação medidos, a potência de entrada P_{in} , dada por,

$$P_{in} = V_{in}I_{in}, \quad (63)$$

foi calculada considerando a corrente de entrada I_{in} medida no indutor. Calculando a potência de saída P_o baseada na medida de tensão de saída, obtém-se a eficiência η por:

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}}. \quad (64)$$

Os resultados para potência e eficiência são mostrados na Tabela 11. Ressalta-se que, para o cálculo da potência de saída, utilizou-se a resistência medida na carga de 57Ω e tensão de entrada de 12 V.

Tabela 11 – Eficiência do conversor CC/CC

Razão cíclica	Potência de entrada (W)	Potência de saída (W)	Eficiência %
0,2	3,96	3,94	99
0,35	6,00	5,37	89
0,5	10,28	8,49	82
0,6	16,056	15,78	98

Fonte: Autoria própria (2024).

Os valores encontrados para eficiência são típicos do conversor *Boost*. Vale ressaltar que, o objetivo do trabalho não é melhorar o conversor em termos de eficiência. Não obstante, esse parâmetro foi calculado como forma de avaliar o conversor desenvolvido.

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos para diversas razões cíclicas conforme indicadas, seguindo os mesmos procedimentos da Seção 5.2, a fim de comparar os ganhos práticos com a curva teórica da Figura 14.

Tabela 12 – Resultado experimental para variação da razão cíclica

Razão cíclica	T_{on} (μ s)	T_{off} (μ s)	V_o (V)	I_{in} (A)
0,05	2,5	47,5	12,7	0,33
0,10	5	45	12,7	0,33
0,15	7,5	42,5	13,1	0,34
0,20	10	40	13,7	0,37
0,25	12,5	37,5	15	0,42
0,30	15	35	15,6	0,44
0,35	17,5	32,5	18,4	0,48
0,40	20	30	17,1	0,54
0,45	22,5	27,5	18,7	0,60
0,50	25	25	22	0,8
0,55	27,5	22,5	22,5	0,9
0,60	30	20	30	1,66
0,70	32,5	17,5	24,5	1,51
0,75	35	15	23,6	1,87

Fonte: Autoria própria (2024).

A comparação do ganho teórico com o experimental é apresentada na Figura 57. Observa-se que, a partir da razão cíclica 70%, o ganho experimental destoa do teórico. Isso ocorre devido ao comportamento não linear do circuito de *gate-driver* para valores a partir de 70%, o que acarreta em mudança na frequência de chaveamento. Não obstante, para valores até 60% de razão cíclica, o ganho experimental é próximo da teoria.

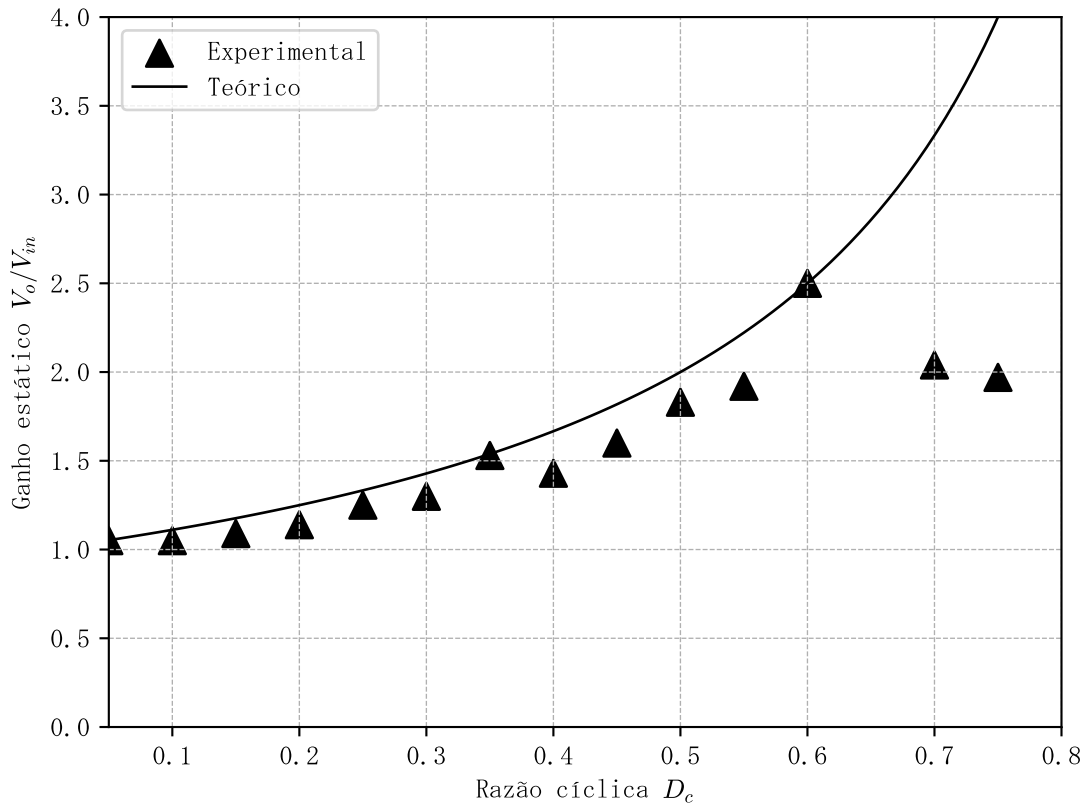
Para realização do experimento, foi utilizado o osciloscópio da marca *Tectronix*. O *setup* de testes é mostrado na Figura 58.

5.4 Comparação com outras soluções

Com o intuito de avaliar a plataforma desenvolvida em contraste com soluções comerciais para bancadas didáticas de Eletrônica de Potência, a Tabela 13 apresenta um comparativo do presente trabalho com outros equipamentos. A comparação utiliza os seguintes parâmetros: dimensões, conversores e valor de aquisição.

As soluções comerciais apresentam mais opções de conversão. Contudo, em termos de dimensões e valor, o presente trabalho é mais acessível para o desenvolvimento e também

Figura 57 – Comparação do ganho teórico com experimental



Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 13 – Comparação com outras soluções

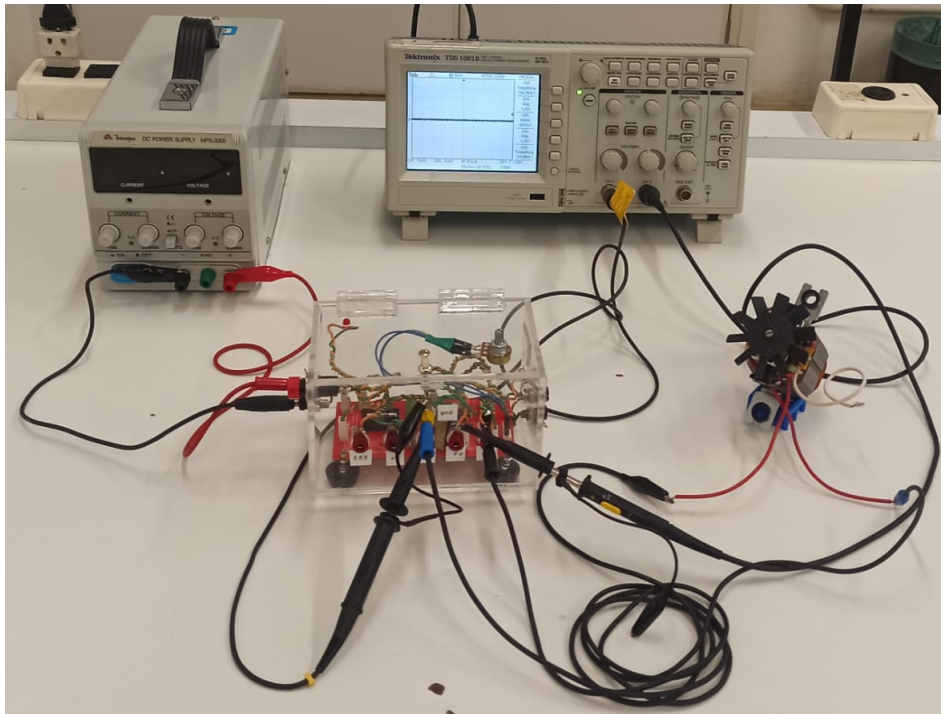
Plataforma	Dimensões (L×A×P)	Conversores	Valor (Jan. 2024)
(TEXAS-INSTRUMENTS, 2017)	-	<i>Boost</i> CC/CC <i>Buck</i> CC/CC <i>Buck-Boost</i> CC/CC	R\$ 292,27
(EXSTO, 2017)	426×575×400 mm	CA/CC 1Φ, 3Φ CC/CA	R\$ 13.040,00
(OHMINI, 2013)	270×190×100 mm	<i>Boost</i> CC/CC <i>Buck</i> CC/CC <i>Buck-Boost</i> CC/CC	R\$ 9.857,90
(ZILOCCHI., 2017)	485×180×400 mm	CA/CC 1Φ, 3Φ CC/CA	R\$ 15.000,00
Presente trabalho	200×80×80 mm	<i>Boost</i> CC/CC	R\$ 73,50

Fonte: Autoria própria (2024).

apresenta volume reduzido. Além disso, o valor final e dimensões do presente trabalho contemplam a caixa acrílica.

Aponta-se também que, a plataforma em Texas-Instruments (2017), possui os conversores CC/CC *Boost*, *Buck* e *Buck-Boost* em módulos separados. Ou seja, o custo informado é para apenas uma topologia.

Figura 58 – Setup de teste



Fonte: Autoria própria (2024).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo aprimorou a compreensão dos métodos de ensino, especialmente na disciplina de Eletrônica de Potência, onde a realização de experimentos práticos é fundamental para a aprendizagem dos alunos. Após a análise de mercado, observou-se que as soluções existentes para plataformas didáticas são, geralmente, dispendiosas e possuem grandes dimensões. Muitas delas não proporcionam interação direta com o circuito, ou apresentam o circuito de maneira pouco intuitiva. Por essa razão, a bancada didática desenvolvida nesse trabalho visa contornar essas deficiências.

O estudo concentrou-se em desenvolver um conversor CC/CC *Boost*, implementado em placa de circuito impresso e instalado em uma plataforma didática. O trabalho apresentou as etapas de um projeto de Eletrônica de Potência, envolvendo, simulação, escolha dos componentes e *layout* de placa de circuito impresso.

O conversor *Boost* projetado teve sua saída de tensão variada entre 16,4 V e 34,8 V para carga fixa. Ressalta-se que a máxima razão cíclica foi de 60% pois foi a capacidade suportada pelo indutor e que também não acarretaria variação significativa na frequência de chaveamento.

Propostas futuras incluem aprimoramentos no *design* da caixa protetora, a realização de novos experimentos para obter diferentes formas de onda para outras cargas e a possível alteração do circuito para que também possa ser selecionado uma opção de chaveamento digital, possibilitando a integração com outras disciplinas ministradas no curso, como Controle 1 e 2, Microcontroladores, Embarcados, entre outras.

Dada a amplitude da disciplina de Eletrônica de Potência, sugere-se a aplicação de um projeto semestral ao final do curso, variando as configurações para cada grupo. Isso permitirá que os alunos comparem os resultados práticos com o conhecimento adquirido em sala de aula e analisem as diferentes formas de onda e valores obtidos em seus projetos, considerando variações de carga e razão cíclica.

De maneira geral, ao se avaliar os resultados obtidos, o protótipo atendeu os requisitos previstos, garantindo sua utilização como bancada didática e, um preço acessível para a fabricação, envio e taxas aplicadas à PCB, sua qualidade final justifica tal investimento, além de ser um circuito que oferece proteção tanto para o projeto quanto para os usuários, de forma dinâmica, interativa e assertiva.

Em comparação com soluções comerciais, a plataforma didática desenvolvida, fornece apenas um tipo de conversão, possui dimensões reduzidas e custo inferior aos equipamentos comparados. Em última análise, o trabalho pode ser aplicado no estudo da Eletrônica de Potência como forma de validar os conceitos teóricos por meio de testes de laboratório.

REFERÊNCIAS

- ANAND, S.; FARSWAN, R. S.; FERNANDES, B. G. Unique Power Electronics and Drives Experimental Bench (PEDEB) to Facilitate Learning and Research. **IEEE Transactions on Education**, v. 4, n. 55, p. 573–579, fev. 2012.
- BARBI, I. **Conversores CC-CC Básicos Não Isolados - 2ed.** [S.l.]: Edição dos Autores, 2006. 198 p. Acesso em: 28 jan. 2023.
- BASTAMI, A. A.; AVESTRUZ, A.-T.; LEEB, S. B. Teaching modeling, control, and simulation in a modular kit for power electronics. *In: .* Orlando: [s.n.], 2014. p. 1–10.
- CAVILHA, P. P. Bancada Didática para Acionamento de Motores. **Universidade Federal de Santa Maria**, p. 54, 2020.
- DIGILENT. **Digilent Reference: Analog Discovery 2.** 2023. Disponível em: <https://digilent.com/reference/test-and-measurement/analog-discovery-2/start>. Acesso em: 21 dez. 2023.
- EXSTO. **Banco de Ensaios para Eletrônica de Potência.** 2017. Disponível em: <https://exsto.com.br/Catalogos/XC137PD00.PT.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2023.
- HARVEY, F. *et al.* James webb space telescope mid infra-red instrument cryocooler electronics. *In: International Cryocooler Conference.* [S.l.: s.n.], 2016.
- ISMAIL, A. A.; ELNADY, A. Advanced Drive System for DC Motor Using Multilevel DC/DC Buck Converter Circuit. **IEEE Access**, v. 7, 2019.
- JOSEMAR, M. Projeto e construção de um conversor didático cc-cc buck. *In: Núcleo do Conhecimento.* [S.l.: s.n.], 2018.
- LAMAR, D. G. *et al.* Experiences in the Application of Project-Based Learning in a Switching-Mode Power Supplies Course. **IEEE Transactions on Education**, v. 55, n. 1, p. 69–77, fev. 2012.
- LUO, L. F.; YE, H.; RASHID, M. **Digital Power Electronics and Applications - 1ed.** Elsevier, 2005. 421 p. ISBN 0120887576. Disponível em: http://server0.unhas.ac.id/tahir/BAHAN-KULIAH/ELIN/BOOK/Digital_Power_Electronics_and_Applications.pdf. Acesso em: 28 jan. 2024.
- MACHADO, P.; COSTA, I.; CARMO, M. Educação em eletrônica de potência: A problemática entre teoria e prática e a carência de recursos laboratoriais. *In: .* Blumenau: [s.n.], 2011.
- MACHADO, P.; COSTA, I.; CARMO, M. Desenvolvimento de laboratório modular para aprimoramento de competências e habilidades em eletrônica de potência. *In: .* Belém: [s.n.], 2012.
- MARTÍNEZ, J. M. A New Approach for Teaching Power Electronics Converter Experiments. **IEEE Transactions on Education**, v. 48, p. 513–519, set. 2005.
- NORONHA, R. V. **Projeto Pedagógico do Curso.** 2019. Disponível em: <https://portal.utfpr.edu.br/cursos/coordenacoes/graduacao/curitiba/ct-engenharia-de-computacao/documentos/projeto-pedagogico-do-curso-ppc>. Acesso em: 21 dez. 2023.

- OHMINI. **Conversores de Energia**. 2013. Disponível em: <https://ohmini.com.br/conversao-de-energia>. Acesso em: 21 dez. 2023.
- PEREZ, D.; BALCELLS, J.; LAMICH, M. Training kit for power electronics teaching. *In: .* Orlando: [s.n.], 2008. p. 3541–3545.
- PITOL, R. Projeto e Implementação de um Retificador Controlado a Tiristor para Bancada Didática de Eletrônica de Potência. **Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão**, p. 54, 2019.
- POMILIO, J. A. **TOPOLOGIAS BÁSICAS DE FONTES CHAVEADAS - 1ed.** Escola de Extensão da UNICAMP., 2014. 22 p. Disponível em: <https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/files/eltpot/cap5.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2024.
- PRANGE, N. G. Desenvolvimento de Bancada Didática de Eletrônica de Potência baseada nos Circuitos Retificadores a Diodo e Tiristor. **Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão**, p. 125, 2019.
- PRZYBYŁA, K. *et al.* Educational platform for remote power electronics laboratory classes. *In: MYCROFT, A. (Ed.). 2022 IEEE 20th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 311–314.
- RASHID, M. H. **ELECTRONICS HANDBOOK DEVICES, CIRCUITS, AND APPLICATIONS - 3ed.** Elsevier, 2011. 1409 p. ISBN 9780123820365. Disponível em: https://powerunit-ju.com/wp-content/uploads/2016/11/Book-Power_Electronics_Handbook_3rd_Edition_M_Rashid.pdf. Acesso em: 28 jan. 2024.
- SUSIN, R. M. *et al.* Laboratório de ensino da eletrônica de potência – uma experiência contruída para e pelos estudantes. *In: .* Porto Alegre: [s.n.], 2000.
- TACCA, H. E. Ferrite toroidal inductor design. **IEEE Latin America Transactions**, v. 7, n. 6, p. 630–635, dez. 2009.
- TEXAS-INSTRUMENTS. **Power management lab kit series**. 2017. Disponível em: <https://www.university.ti.com/en/university-home/faculty/teaching-materials-and-classroom-resources/ti-based-teaching-kits-for-analog-and-power-design>. Acesso em: 21 dez. 2023.
- ZILOCCHI. **Módulo Didático de Eletrônica de Potência – ZL-POT**. 2017. Disponível em: <https://www.zilocchi-loja.com.br/modulo-didatico-de-eletronica-de-potencia-zl-pot>. Acesso em: 21 dez. 2023.

APÊNDICE A – Roteiro de aula para uso da plataforma didática

Esse apêndice apresenta uma possibilidade de roteiro de aula para uso da plataforma didática. A sugestão é que esse roteiro seja aplicado em aula prática de laboratório após o conteúdo teórico de conversor CC/CC *Boost* tenha sido explanado.

1. Procedimento Padrão para Preparação do Experimento

- Testar o fusível e integridade da plataforma didática;
- Testar as ponteiros de tensão utilizando o gerador de onda quadrada do próprio osciloscópio;

OBS. 1: Sempre as referências das ponteiros do osciloscópio devem estar conectadas no mesmo ponto do circuito;

OBS. 2: A configuração do osciloscópio deve ser realizada antes de ligar o circuito. Ajustar: escala de tensão, escala de tempo, acoplamento, atenuação e *trigger*.

2. Componentes do Experimento

- Indutor: $L = 0.6 \mu\text{H}$ (bancada);
- Capacitor: $C_o = 22 \mu\text{F}$ (bancada);
- Chave S FDS6690A (bancada);
- Diodo D : B530C (bancada);
- Resistor de carga: $R = 56 \Omega/10\text{W}$ (externo);
- Osciloscópio (externo);
- 2× Ponteiros atenuadoras;
- Fonte CC (externo).

3. Configuração da Fonte CC

- Limitar a corrente da fonte CC para 3 A;
- Definir a tensão de entrada na fonte CC como 12 V.

4. Verificação do Sinal de Acionamento da Chave

- Posicionar uma ponteira do osciloscópio para medir o sinal de *gate* da chave S (Indicador 08);
- Com o conversor desligado, preparar o osciloscópio para medir de 2 a 4 ciclos para frequência de chaveamento de 20 kHz;

- Ligar o conversor e visualizar a forma de onda no osciloscópio;
- Regular o potenciômetro visando obter razão cíclica $D_c = 0.2$;
- Desligar o conversor;

5. Verificação do Ganho Estático

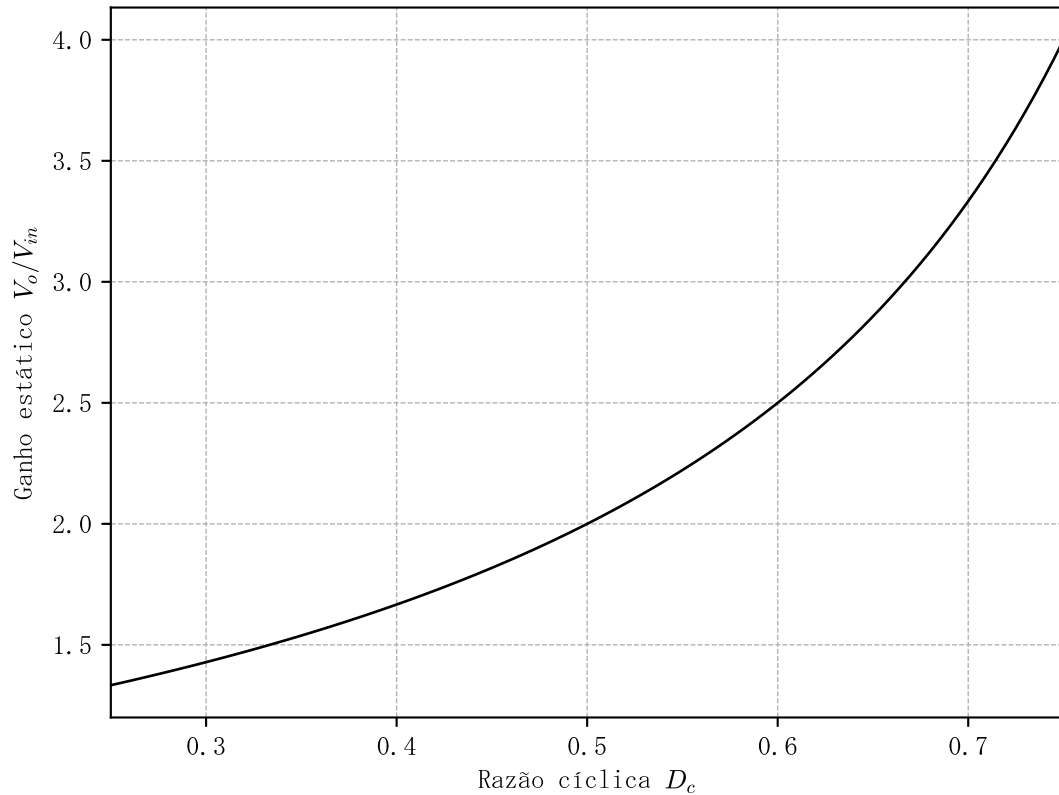
- Posicionar uma ponteira do osciloscópio para medir o sinal de *gate* da chave S (Indicador 08) e outra ponteira para medir a tensão de saída (Indicador 11);
- Com o conversor desligado, preparar o osciloscópio para medir de 2 a 4 ciclos para frequência de chaveamento de 20 kHz;
- Ligar o conversor e visualizar as formas de onda no osciloscópio;
- Obter o valor médio da tensão de saída pelo osciloscópio para a razão cíclica configurada;
- Calcular o ganho estático do conversor e preencher as informações na Tabela 14;
- Repetir o procedimento considerando os valores de razão cíclica indicados na Tabela 14.
- Utilizando os ganhos experimentais obtidos na Tabela 14, anotar os pontos na Figura 59 e comparar com os ganhos teóricos.

Tabela 14 – Resultados para tensão de saída

Razão cíclica	Ganho teórico	Ganho experimental
0,05		
0,10		
0,15		
0,20		
0,25		
0,30		
0,35		
0,40		
0,45		
0,50		
0,55		
0,60		
0,70		
0,75		
0,80		
0,85		

Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 59 – Ganho estático do conversor *Boost* em função da razão cíclica



Fonte: Autoria própria (2024).

6. Verificação da Ondulação de Corrente

- Posicionar uma ponteira do osciloscópio para medir a corrente no indutor usando o resistor *shunt* (Indicadores 12 e 13);
- Com o conversor desligado, preparar o osciloscópio para medir de 2 a 4 ciclos para frequência de chaveamento de 20 kHz;
- Ligar o conversor e visualizar as formas de onda no osciloscópio;
- Obter os valores máximo e mínimo da forma de onda;
- Calcular a ondulação de corrente e preencher a Tabela 14;
- Repetir o procedimento considerando os valores de razão cíclica indicados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados para ondulação de corrente

Razão cíclica	Ondulação teórica	Ondulação experimental
0,2		
0,3		
0,4		
0,5		
0,6		
0,7		

Fonte: Autoria própria (2024).