

Lucas Sleyder Machado Dicêncio

Kit Didático para a disciplina de Eletrônica Industrial e Acionamentos

Uberlândia, MG

2024

Lucas Sleyder Machado Dicêncio

Kit Didático para a disciplina de Eletrônica Industrial e Acionamentos

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso
da Engenharia de Controle e Automação
da Universidade Federal de Uberlândia -
UFU - Campus Santa Mônica, como requisito
para a obtenção do título de Graduação em
Engenharia de Controle e Automação.

Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Faculdade de Engenharia Elétrica - FEELT

Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto Bissochi Junior

Uberlândia, MG

2024

Lucas Sleyder Machado Dicêncio

Kit Didático para a disciplina de Eletrônica Industrial e Acionamentos

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso da Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Uberlândia - UFU - Campus Santa Mônica, como requisito para a obtenção do título de Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Trabalho aprovado em 07 de Fevereiro de 2025.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Augusto Bissochi Junior
Orientador

Prof. Dr. Daniel Pereira de Carvalho
Membro Avaliador

Prof. Dr. Aniel Silva de Moraes
Membro Avaliador

Uberlândia, MG
2024

Dedico este trabalho a minha mãe, Libia,
que sob muito sol, fez-me chegar até aqui,
na sombra.

Agradecimentos

Desejo expressar minha gratidão, primeiramente, à minha família, especialmente à minha mãe, Libia Santos Dicencio, que não mediu esforços para me apoiar nos estudos, sempre me proporcionando a base e o conforto necessários para que eu pudesse manter o foco e a dedicação. Sua força e determinação foram fundamentais em todo o caminho que trilhei até aqui. Estendo também meu agradecimento à minha avó, Elisabete Santos Dicencio, que, como uma segunda mãe, sempre esteve ao meu lado, oferecendo seu amor, cuidado e o melhor de si para minha criação, e ao meu tio, Rodrigo Luiz Santos Dicencio, que despertou em mim o interesse pela tecnologia e, desde cedo, me ensinou a valorizar a inovação.

Agradeço a todos os amigos que me acompanharam durante a graduação, especialmente Matheus Menezes, Lucas Dantas e Guilherme Almeida. A presença de vocês foi essencial, trazendo apoio e tornando a jornada mais leve e descontraída. Os momentos que compartilhamos, sejam felizes ou difíceis, foram especiais e ganharam ainda mais significado por terem sido vividos juntos.

Por fim, expresso minha gratidão aos professores do curso, que me transmitiram seu conhecimento e me prepararam para chegar até aqui, com destaque ao meu orientador, Carlos Augusto Bissochi Junior, que, além de oferecer todo o seu apoio no desenvolvimento do trabalho, disponibilizou o laboratório, e a todos que estiveram presentes lá durante o desenvolvimento do projeto, especialmente pela tutoria dada por Ubaldo Elias. A todos, meus sinceros agradecimentos.

“Confia ao Senhor as tuas obras, e teus planos serão bem-sucedidos.”
(Provérbios 16:3)

Resumo

Este projeto visa suprir a carência nos laboratórios de Eletrônica Industrial e Acionamentos em relação a dispositivos de comando para o chaveamento de transistores de potência, como MOSFETs e IGBTs, utilizados em conversores CC-CC e CC-CA. Muitas configurações desses conversores requerem circuitos de comando isolados. O desenvolvimento do kit didático focará em atender as aplicações específicas desses conversores, proporcionando aos alunos uma experiência prática abrangente, melhorando a qualidade do aprendizado prático na disciplina, garantindo que os alunos adquiram um entendimento profundo e aplicado das técnicas de chaveamento e controle em conversores eletrônicos.

Palavras-chaves: Kit Didático; Eletrônica de Potência; Acionamento; Conversores; Chaveamento de Transistores; Gate Driver; Aprendizado.

Abstract

This project aims to address the lack of control devices for switching power transistors, such as MOSFETs and IGBTs, in the Industrial Electronics and Drives laboratories, used in DC-DC and DC-AC converters. Many configurations of these converters require isolated control circuits. The development of the educational kit will focus on meeting the specific applications of these converters, providing students with a comprehensive practical experience and improving the quality of practical learning in the discipline. This ensures that students gain a deep and applied understanding of switching and control techniques in electronic converters.

Key-words: Educational Kit; Power Electronics; Drives; Converters; Transistor Switching; Gate Driver; Learning.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Símbolos esquemáticos do MOSFET: (a) canal n; (b) canal p.	18
Figura 2 – Transistores Bipolares de Porta Isolada (IGBT)	19
Figura 3 – Sinal referência contínuo para conversor CC-CC	20
Figura 4 – Sinal referência contínuo para conversor CC-CA	20
Figura 5 – Sinal dente-de-serra (a) e sinal triangular (b)	21
Figura 6 – PWM - Portadora dente-de-serra e sinal referência contínuo	21
Figura 7 – PWM - Portadora triangular e sinal referência senoidal	21
Figura 8 – Circuito equivalente de retificador chaveado	22
Figura 9 – Conversor Buck ideal.	23
Figura 10 – Conversor Boost ideal.	23
Figura 11 – Conversor Buck-Boost ideal.	24
Figura 12 – Conversor Half Bridge ideal com divisor capacitivo.	24
Figura 13 – Conversor Full Bridge ideal.	25
Figura 14 – Gate Drivers - High Side e Low Side	26
Figura 15 – Miller Plateau	28
Figura 16 – Antigo KIT utilizado no laboratório	30
Figura 17 – STGAP2HDM Gate Driver	31
Figura 18 – EVALSTGAP2HDM placa de demonstração para o STGAP2HDM	32
Figura 19 – Fonte Murata MGJ2D051509SC	33
Figura 20 – Transistor MOSFET IPW60R037CM8XKSA1	33
Figura 21 – Diagrama de blocos STGAP2HD	34
Figura 22 – Pinagem STGAP2HD	35
Figura 23 – Esquema elétrico do Gate Driver STGAP2HDM	37
Figura 24 – Esquema elétrico da fonte MGJ2D051509SC	37
Figura 25 – Esquema elétrico dos conectores	38
Figura 26 – PCB Gate Driver	39
Figura 27 – Modelo 3D da PCB Gate Driver	39
Figura 28 – Placa fabricada pela Micropress (Top Layer)	40
Figura 29 – Placa fabricada pela Micropress (Bottom Layer)	40
Figura 30 – Placa final com os componentes (Top Layer)	41
Figura 31 – Placa final com os componentes (Bottom Layer)	41
Figura 32 – Novo kit.	42
Figura 33 – Equipamentos usados para entrada de sinal.	42
Figura 34 – Gráfico da entrada VDD 5V.	43
Figura 35 – Gráfico do pulso PWM 0 a 5V.	43
Figura 36 – Gráfico do da saída do Gate Driver	44

Figura 37 – Esquemático conversor Buck	44
Figura 38 – Fonte DC Riden RD6024	45
Figura 39 – Elementos passivos do circuito.	45
Figura 40 – Montagem de conversor Buck	46
Figura 41 – Gráfico do da saída com 80% de razão cíclica	46
Figura 42 – Saída do circuito aplicando um pulso com 80% de razão cíclica	47
Figura 43 – Kits finalizados.	47

Lista de tabelas

Tabela 1 – Ganho estático nos conversores.	23
Tabela 2 – Características Principais do STGAP2HD	32
Tabela 3 – Lista de materiais (Parte 1)	53

Lista de abreviaturas e siglas

CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MCU	Micro Controller Unit
DSP	Digital Signal Processor
PWM	Pulse Width Modulation
PCB	Printed Circuit Board
BJT	Bipolar Junction Transistor
SIT	Static Induction Transistor
kHz	Kilohertz
V	Tensão
LED	Light Emitting Diode
CI	Circuito Integrado
UVLO	Under Voltage Lockout
BOM	Bill of Materials
HVDC	High-Voltage Direct Current

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativas	15
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivos Específicos	16
2	REFERENCIAIS TEÓRICOS	17
2.1	Transistores de Potência	18
2.1.1	MOSFET	18
2.1.2	IGBT	19
2.2	PWM	19
2.3	Conversores	21
2.3.1	Conversor Buck	23
2.3.2	Conversor Boost	23
2.3.3	Conversor Buck-Boost	24
2.3.4	Conversor Half Bridge	24
2.3.5	Conversor Full Bridge	25
2.4	Circuitos de Comando	25
2.4.1	Função Interlocking	26
2.4.2	Efeito Miller	27
2.4.3	Sistemas de Segurança	28
2.4.3.1	UVLO (Under Voltage Lockout)	29
2.4.3.2	Proteção Térmica	29
2.4.3.3	Função de Watchdog	29
3	METODOLOGIA	30
3.1	Seleção da Tecnologia	30
3.1.1	Antigo KIT	30
3.1.2	Gate Driver STGAP2HD	31
3.1.3	Placa de Demonstração EVALSTGAP2HDM	31
3.2	Projeto do Hardware	34
3.2.1	Esquemático Elétrico	36
3.2.2	Layout da PCB	38
3.2.3	Fabricação da placa	39
3.2.4	Montagem da placa	40
3.3	Montagem e testes	41
3.3.1	Finalização dos kits	47

4	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
	ANEXOS	52
	ANEXO A – ANEXOS	53

1 Introdução

A eletrônica de potência é uma área essencial da engenharia elétrica, focada no estudo e aplicação de dispositivos eletrônicos para o controle e conversão de energia elétrica. Ao longo dos mais de 200 anos de uso da energia elétrica, esta área evoluiu significativamente, tornando-se cada vez mais presente no cotidiano, tanto em indústrias quanto em dispositivos eletrônicos domésticos. Com o avanço da tecnologia, esses dispositivos têm se tornado menores e mais integrados ao nosso dia a dia, desempenhando funções essenciais de forma quase imperceptível ([BALDNER et al., 2018](#)). Os circuitos mais comuns incluem retificadores, conversores CC-CA (genericamente chamados de inversores) e conversores CC-CC. Todos são projetados para controlar o fluxo de potência de forma eficiente, podendo ser utilizados em aplicações de alta potência, como linhas de transmissão, ou em dispositivos de baixa potência, como fontes de alimentação para computadores ([HART, 2011](#)).

Em algumas aplicações de controle do fluxo de potência, é necessário utilizar chaves que operam em alta frequência. Esse chaveamento é geralmente realizado por transistores de potência, como MOSFETs e IGBTs, que permitem o controle preciso de suas cargas, proporcionando eficiência energética e melhor desempenho operacional ([HART, 2011](#)). O desenvolvimento de tecnologias avançadas para o acionamento e controle desses transistores é vital para otimizar o funcionamento de sistemas industriais e de automação.

De forma geral, esses tipos de transistores necessitam de um circuito de comando para realizar seu acionamento, normalmente atuam como elevadores de corrente e tensão, já que alguns dispositivos de controle como microcontroladores (MCUs) ou processadores digitais de sinais (DSPs) não conseguem fornecer corrente e tensão suficientes. Esses circuitos de comando podem ser isolados ou não isolados, dependendo de sua aplicação ([MORAES, 2020a](#)).

Dessa forma, este trabalho tem como foco o desenvolvimento de um kit didático composto por um circuito de comando contendo chaves e diodos, projetado para operar de forma isolada e abranger uma ampla gama de aplicações. A criação desse kit visa proporcionar um recurso eficiente para o treinamento de estudantes em diversas áreas da tecnologia onde a conversão de energia está presente, permitindo a experimentação prática de circuitos de acionamento e controle de potência.

1.1 Justificativas

No contexto educacional, é crucial que os estudantes de engenharia elétrica e áreas afins tenham acesso a equipamentos didáticos que permitam a aplicação prática dos conceitos teóricos. A inclusão de experiências práticas no currículo de engenharia é essencial para a formação completa dos alunos. Atividades em laboratório que trabalham o conceito de diversas maneiras, fazem com que o aluno tenha em sua memória um elo sólido entre o conhecimento e sua aplicação, processando na mente dos futuros engenheiros uma base para solução de desafios futuros encontrados no mercado de trabalho ([MACHADO et al., 2011](#)). O Instituto de Tecnologia de Faridabad destaca que a aprendizagem prática possibilita aos alunos aplicar o conhecimento teórico em cenários reais, desenvolvendo competências técnicas e habilidades de resolução de problemas fundamentais para sua preparação para os desafios da indústria ([EIT Faridabad, 2022](#)). Essas abordagens não apenas reforçam a compreensão dos conceitos teóricos, mas também preparam os alunos para enfrentar situações práticas no ambiente profissional, promovendo um aprendizado mais eficaz e abrangente.

Compreendendo a importância da eletrônica de potência e, em especial, dos conversores, este trabalho resultou no desenvolvimento de um kit didático para o acionamento de transistores de potência de forma acessível e utilizando tecnologias inovadoras. Esse kit proporciona uma melhoria significativa para os laboratórios, permitindo a aplicação prática dos conceitos teóricos estudados. Além disso, ele abrange diversas aplicações de conversores eletrônicos, possibilitando seu uso tanto em cargas resistivas quanto no acionamento de motores CC e motores de indução trifásicos.

A introdução desses novos kits didáticos tem como objetivo não apenas suprir a atual carência de equipamentos no laboratório, mas também aprimorar a qualidade do ensino. Isso permitirá que os alunos obtenham uma compreensão mais profunda e aplicada das técnicas de acionamento e controle em conversores eletrônicos. Dessa forma, os estudantes estarão melhor preparados para enfrentar os desafios na indústria e em futuras pesquisas na área de eletrônica de potência e acionamentos.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um kit didático para uso nos laboratórios da disciplina de Eletrônica Industrial e Acionamentos, servindo como uma ferramenta de chaveamento isolado de transistores de potência em montagens de conversores CC-CC e CC-CA. Além disso, o kit também incorpora diodos, permitindo sua aplicação em conversores chaveados, ampliando suas possibilidades de uso em diferentes configurações de circuitos.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Pesquisar e selecionar CIs de *Gate Drive* com tecnologia moderna, garantindo compatibilidade com uma ampla gama de aplicações;
- Possibilitar a montagem de conversores CC-CC e CC-CA, isolados ou não, como *Buck*, *Boost*, *Forward*, *Full Bridge*, entre outros, no laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamentos;
- Desenvolvimento de PCB com todo circuito de comando para facilitar utilização com bornes para conexão.

2 Referenciais Teóricos

Desde a descoberta da eletricidade, a evolução dos conversores de energia elétrica tem sido notável. Inicialmente, a eletricidade era predominantemente distribuída em corrente contínua (CC). Esse período foi seguido pela famosa guerra das correntes, que levou à adoção da corrente alternada (CA) como padrão de distribuição devido às suas vantagens na transformação de tensão e na transmissão a médias e longas distâncias. No entanto, com os avanços tecnológicos, a transmissão em alta tensão por corrente contínua (HVDC) passou a ser amplamente utilizada para longas distâncias, devido à sua maior eficiência em determinadas aplicações ([Brasil Escola, 2024](#)). Em 1885, L. Gaulard e J.D. Gibbs desenvolveram os transformadores, dispositivos que permitiram converter a tensão de CA para CA, melhorando significativamente a eficiência da distribuição de energia em longas distâncias. O próximo grande marco para os conversores foi o surgimento dos conversores eletrônicos, trabalhando com o avanço dos semicondutores na década de 1950, especialmente com a invenção do transistor, permitindo a criação de retificadores eficientes, que convertiam CA para CC, e inversores, que convertem CC para CA. No fim desta década e início dos anos 60, ainda foram introduzidos os tiristores que revolucionaram a eletrônica de potência, pois permitiram o controle eficaz de altas potências, levando ao desenvolvimento de conversores controlados por fase e frequências variáveis. Com o objetivo de reduzir as perdas nos conversores de energia, os semicondutores passaram por contínuas melhorias. Entre 1975 e 1995, os transistores MOSFET e IGBT foram desenvolvidos, permitindo o chaveamento em alta velocidade e com alta eficiência. Esses dispositivos são fundamentais nos conversores modernos, como os conversores CC-CC e os inversores CC-CA, devido à sua capacidade de operar com maior eficiência e menor dissipação de calor, aprimorando significativamente o desempenho dos sistemas de eletrônica de potência ([ZHANG et al., 2018](#)).

Desde então, os transistores de potência passaram por uma modernização significativa. Os circuitos de acionamento agora são projetados para fornecer transições rápidas e utilizam técnicas avançadas de modulação por largura de pulso (PWM) e circuitos *snubber*. Esses avanços têm como objetivo reduzir as perdas de potência nas chaves eletrônicas, que podem ocorrer devido a vários fatores, como a tensão não ser zero durante a condução e as transições não ocorrerem de forma instantânea. Essas melhorias são essenciais para aumentar a eficiência e a confiabilidade dos conversores de energia ([HART, 2011](#)).

Atualmente, os conversores estão presentes em praticamente todas as áreas da eletrônica de potência. Os conversores CC-CC, em suas diversas topologias, como *Buck*, *Boost*, *Buck-Boost*, *Full Bridge* e *Half Bridge*, são utilizados em uma variedade de aplicações, incluindo controle de velocidade de motores CC, fontes chaveadas e carregadores de bateria

(INTRODUÇÃO..., 2012). Já os conversores CC-CA, abordados nas topologias *Full Bridge* e *Half Bridge*, são essenciais para o acionamento de motores de corrente alternada, além de serem utilizados em filtros ativos, estabilizadores de tensão e podem ser utilizados para acionar cargas CC e CA, modificando os pulsos de gatilho (CONVERSORES..., 2014).

Dado o contexto geral, é possível encaminhar para o detalhamento dos componentes mencionados anteriormente.

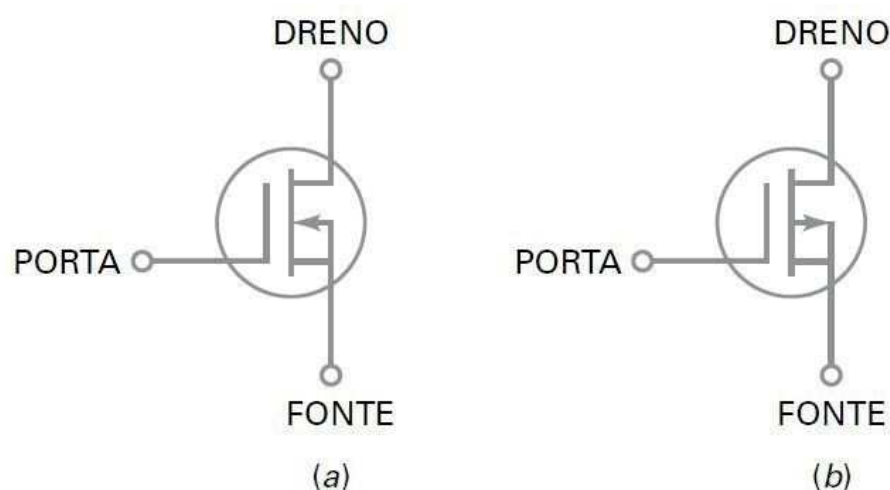
2.1 Transistores de Potência

Um transistor de potência é um dispositivo semicondutor utilizado como chave para controle nos conversores CC-CC e CC-CA, operando sempre na região de saturação para que haja uma baixa queda de tensão enquanto conduz e ainda possui uma velocidade de chaveamento bem alta em comparação a tiristores, tudo isso resultando em uma redução das perdas. Os transistores de potência podem ser divididos em quatro categorias: os Transistores Bipolares de Junção (BJT), os Transistores de Efeito de Campo de Semicondutor de Óxido Metálico (MOSFET), os Transistores de Indução Estática (SIT) e os Transistores Bipolares de Porta Isolada (IGBT) (CRISTOFOLETTI, 2006).

Será dado destaque para os MOSFETs e os IGBTs, os mais comuns em aplicações de conversores.

2.1.1 MOSFET

Figura 1 – Símbolos esquemáticos do MOSFET: (a) canal n; (b) canal p.



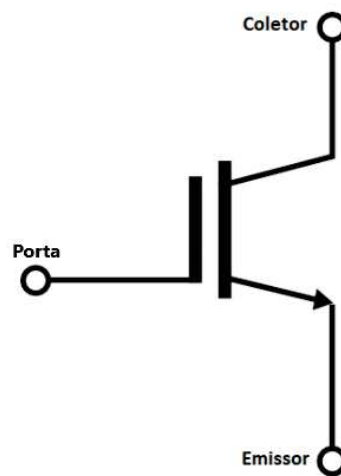
Fonte: Extraído de (Tec Dicas, 2019).

MOSFET é um dos dispositivos utilizados como chave em aplicações de potência. Conforme ilustrado na Figura 1, ele possui três terminais: dreno (D), fonte (S) e porta (G). O MOSFET de canal N utiliza elétrons como portadores majoritários, tornando-o mais

eficiente e rápido, enquanto o de canal P usa lacunas, o que resulta em maior resistência e menor velocidade. Para conduzir, o canal N requer uma tensão positiva na porta em relação à fonte, enquanto o canal P precisa de uma tensão negativa. Esta tensão de controle, que varia conforme a região resistiva do MOSFET, geralmente está na faixa de 10 a 15 V (FISCH, 2019). Os MOSFETs são particularmente eficazes em aplicações de baixa potência, na faixa de quilowatts, e em alta frequência, até 100 kHz (SILVA, 2019).

2.1.2 IGBT

Figura 2 – Transistores Bipolares de Porta Isolada (IGBT)



Fonte: Extraído de (FREITAS, 2017).

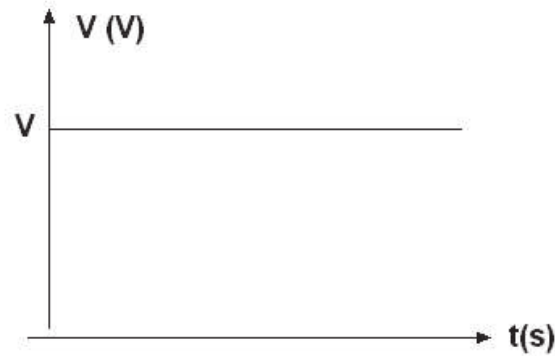
IGBT também utilizado como chave em aplicações de potência, porém atua em situações inversas à do MOSFET, ou seja, alta tensão e, porém, em frequências mais baixas, até 50 kHz (SILVA, 2019). Embora os terminais possuam uma diferença de nomenclatura, sendo aqui coletor (C), emissor (E) e porta (G), o funcionamento segue a mesma dinâmica do MOSFET, também sendo controlado por tensão e essa tensão está na faixa de 15 V (BRAGA, 2023).

2.2 PWM

O controle dos conversores vem do sinal enviado para realizar o chaveamento dos transistores de potência, esse sinal é transmitido através da variação da largura de pulso de uma onda quadrada. A Modulação por Largura de Pulsos (PWM) é realizada através da comparação entre dois sinais, dos quais é gerado um terceiro, que é a onda quadrada enviada ao destino desejado. Os sinais a serem comparados recebem o nome de Modulante ou Referência e Portadora. (OLIVEIRA, 2022).

O sinal referência é um sinal de tensão que precisa ser a imagem da tensão desejada na saída. Portanto, nos conversores CC-CC, a referência precisa ser um sinal de tensão contínuo para se obter uma tensão contínua na saída do conversor, vide Figura 3.

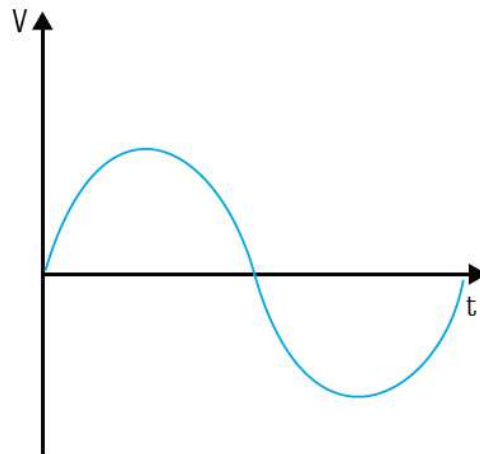
Figura 3 – Sinal referência contínuo para conversor CC-CC



Fonte: Extraído de (BRAGA, 2019).

Quando o objetivo se torna adquirir uma tensão alternada na saída, ou seja, nos conversores CC-CA, é preciso usar um sinal senoidal com a mesma frequência desejada na saída como referência, conforme a Figura 4.

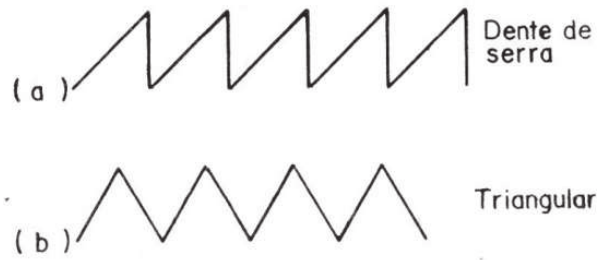
Figura 4 – Sinal referência contínuo para conversor CC-CA



Fonte: Extraído de (MMA, 2021).

Já o sinal de portadora é responsável pela frequência de chaveamento e o sinal de referência. De acordo com o Teorema de Nyquist, essa frequência precisa ser no mínimo 2 vezes maior que o sinal referência, se tratando de uma referência alternada; porém, para se ter qualidade na saída, é preciso ser pelo menos 10 vezes maior (PUHLMANN, 2014). A forma de onda da portadora será de dente-de-serra ou triangular.

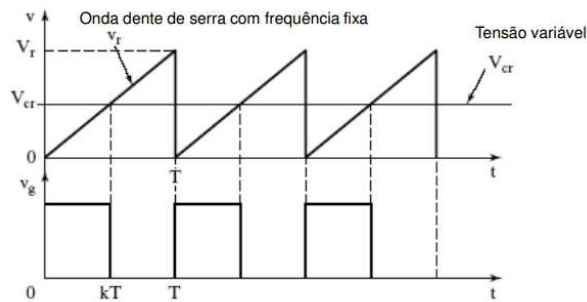
Figura 5 – Sinal dente-de-serra (a) e sinal triangular (b)



Fonte: Extraído de (BRAGA, 2020).

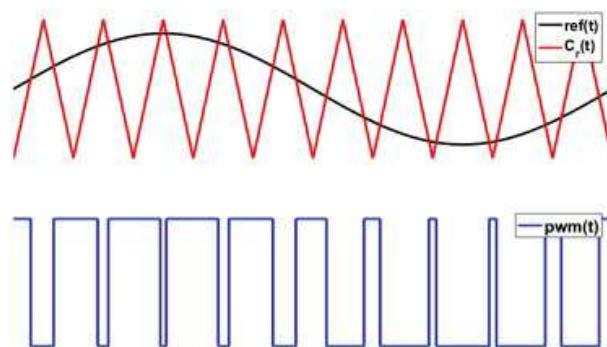
Dessa forma, o sinal PWM pode ser obtido a partir da comparação entre a onda de referência e a portadora, como ilustrado nas Figuras 6 e 7.

Figura 6 – PWM - Portadora dente-de-serra e sinal referência contínuo



Fonte: Extraído de (JúNIOR, 2016).

Figura 7 – PWM - Portadora triangular e sinal referência senoidal



Fonte: Extraído de (RAMU, 2022).

2.3 Conversores

Os conversores são dispositivos eletrônicos responsáveis por modificar a forma da energia elétrica, permitindo a adaptação da tensão e corrente para diferentes aplicações. Eles desempenham um papel fundamental em sistemas eletrônicos e de potência, garantindo

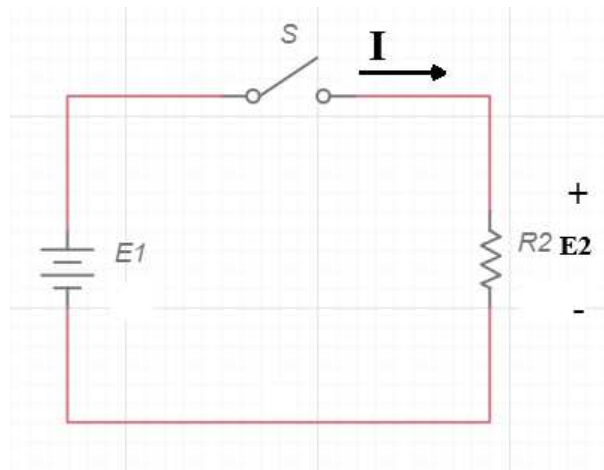
a eficiência na conversão e distribuição da energia. De maneira geral, os conversores podem ser classificados em dois grandes grupos: conversores CC-CC e CC-CA.

Este capítulo apresenta as principais topologias de conversores, abordando seus princípios de funcionamento e características específicas. As configurações aqui descritas poderão ser implementadas utilizando o kit didático, permitindo a exploração prática de conceitos fundamentais da eletrônica de potência e do chaveamento de semicondutores.

Os conversores CC-CC são dispositivos eletrônicos responsáveis por regular o nível de tensão contínua de uma fonte de entrada, permitindo sua adaptação para diferentes cargas e aplicações. Esse controle é realizado por meio da comutação de semicondutores de potência, em conjunto com elementos passivos, como indutores e capacitores, garantindo a conversão eficiente da energia elétrica (PETRY, 2001).

Tanto os conversores CC-CC quanto os conversores CC-CA são dispositivos que controlam o fluxo de potência utilizando semicondutores de potência e componentes passivos. A principal diferença entre eles está na forma de modulação utilizada para o chaveamento dos transistores. Nos conversores CC-CA, é comum o uso de modulação por largura de pulso (PWM) com uma onda senoidal ou quadrada para gerar uma forma de onda alternada na saída. As topologias mais comuns são *Half-Bridge* e *Full-Bridge*, que podem ser configuradas para funcionar tanto como conversores CC-CC quanto como conversores CC-CA, alterando os pulsos de comando das chaves dependendo da aplicação.

Figura 8 – Circuito equivalente de retificador chaveado



Fonte: Autoria própria (2024).

Existem diversas topologias para os conversores, sendo as principais *Buck*, *Boost* e *Buck-Boost*. Cada uma possui características e aplicações específicas. O principal fator analisado é o ganho estático entre a tensão de entrada e a tensão de saída dos conversores, o qual é determinado pela razão cíclica (D). Em termos simples, a razão cíclica representa o período em que a chave permanece fechada durante o ciclo de operação. A Tabela 1 reflete o ganho estático dos conversores citados, observando as seguintes condições de análise:

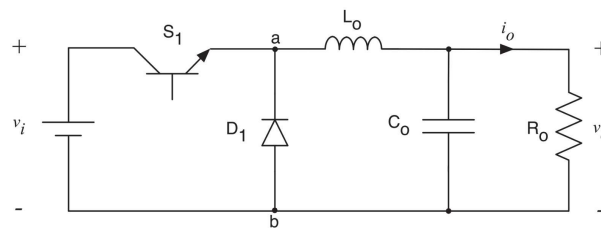
1. Os conversores não apresentam perdas de potência.
2. Os interruptores são ideais.
3. Operação em regime permanente.
4. Modo de Condução Contínua (MCC) da corrente no indutor.

Tabela 1 – Ganho estático nos conversores.

Conversor	Ganho estático
Buck	D
Boost	$1/(1 - D)$
Buck-Boost	$D/(1 - D)$

2.3.1 Conversor Buck

Figura 9 – Conversor Buck ideal.

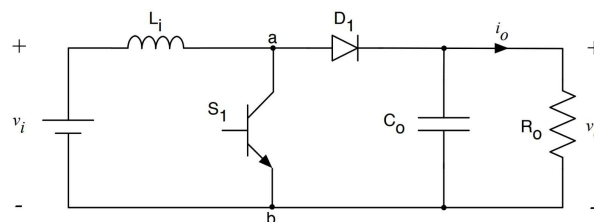


Fonte: Extraído de (PETRY, 2020).

O conversor abaixador de tensão, ou conversor *Buck*, possui como característica a entrada em tensão e a saída em corrente. Ele pode substituir reguladores lineares, pois apenas reduz a tensão de saída, sendo amplamente utilizado em fontes de alimentação de baixa tensão para dispositivos eletrônicos. Na Figura 9 apresenta-se o diagrama elétrico do conversor *Buck*.

2.3.2 Conversor Boost

Figura 10 – Conversor Boost ideal.

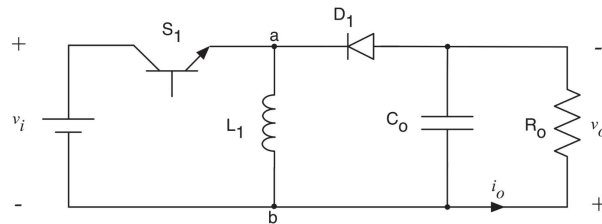


Fonte: Extraído de (PETRY, 2020).

O conversor elevador de tensão, ou conversor *Boost*, possui como característica a entrada em corrente e a saída em tensão. Sua estrutura é semelhante à do conversor *Buck*, porém com a disposição dos componentes alterada para permitir o aumento da tensão na saída. A Figura 10 apresenta o diagrama elétrico do conversor *Boost*.

2.3.3 Conversor Buck-Boost

Figura 11 – Conversor Buck-Boost ideal.

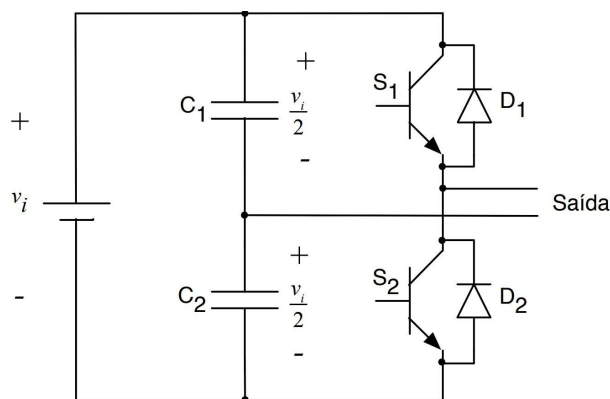


Fonte: Extraído de (PETRY, 2020).

O conversor *Buck-Boost* é um dispositivo capaz de abaixar ou elevar a tensão, possuindo tanto a entrada quanto a saída em tensão. Sua estrutura é similar à dos conversores *Buck* e *Boost*, porém com os componentes reposicionados para permitir que a tensão de saída seja maior, igual ou menor que a tensão de entrada, tornando-o adequado para diversas aplicações. A Figura 11 apresenta o diagrama elétrico do conversor *Buck-Boost*.

2.3.4 Conversor Half Bridge

Figura 12 – Conversor Half Bridge ideal com divisor capacitivo.



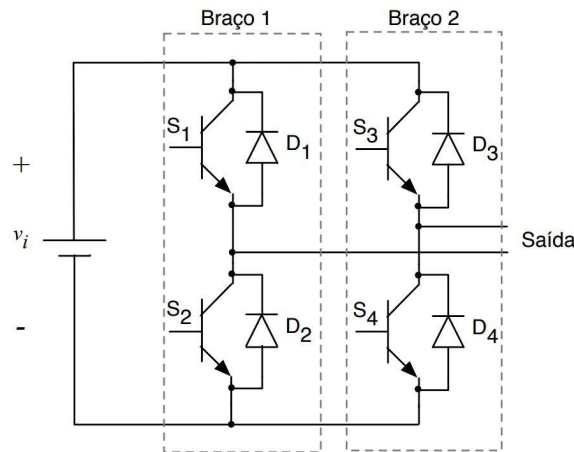
Fonte: Extraído de (PETRY, 2020).

O conversor *Half Bridge* pode funcionar tanto abaixando ou elevando a tensão, quanto convertendo a tensão CC em tensão CA. Uma desvantagem dessa estrutura é a necessidade de duas fontes de alimentação, sendo comum a utilização de um divisor capacitivo. Ele é amplamente utilizado em fontes de alimentação de comutação e no sistema

de controle de motores. A Figura 12 apresenta o diagrama elétrico do conversor *Half Bridge*.

2.3.5 Conversor Full Bridge

Figura 13 – Conversor Full Bridge ideal.



Fonte: Extraído de (PETRY, 2020).

O conversor *Full-Bridge* também pode operar tanto como conversor CC-CA quanto como CC-CA. Devido à sua composição com quatro transistores, ele é capaz de gerar uma onda CA mais estável e de maior qualidade. Este tipo de conversor é amplamente utilizado em aplicações de alta potência, acionamento de motores de alta eficiência e sistemas de energia renovável. A Figura 13 apresenta o diagrama elétrico do conversor *Full-Bridge*.

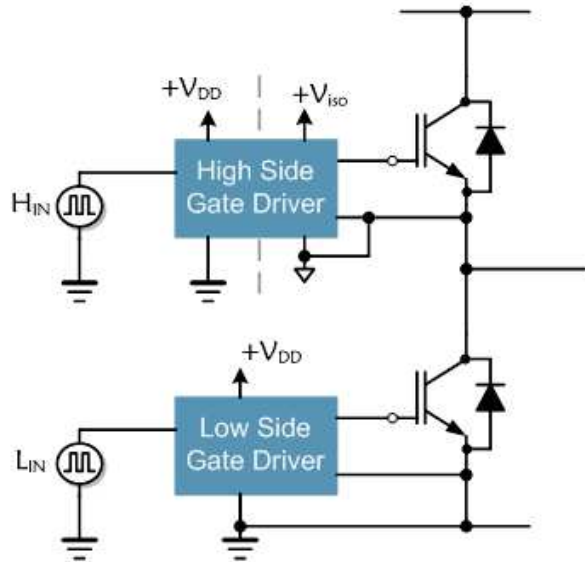
2.4 Circuitos de Comando

O circuito de comando é utilizado para fornecer a tensão e corrente necessárias para o chaveamento dos transistores, pois microcontroladores ou processadores digitais de sinais, que normalmente realizam o comando, não possuem capacidade para fornecer essas exigências. Esses circuitos podem ser isolados ou não isolados, dependendo da configuração dos transistores no circuito do conversor. Quando os terminais de fonte/emissor dos transistores não compartilham o mesmo terra do conversor, é necessário o uso de circuitos de comando isolados para garantir o funcionamento correto e seguro do sistema (MORAES, 2020a).

O dimensionamento do circuito de comando pode ser bastante simplificado atualmente, especialmente com a disponibilidade de circuitos integrados (CIs) dedicados, que ocupam consideravelmente menos espaço (MORAES, 2020b). Os gate drivers, termo utilizado para descrever os CIs responsáveis por condicionar o sinal para acionar os

transistores, não apenas executam suas funções primárias, mas também incluem esquemas de proteção e detecção de falhas.

Figura 14 – Gate Drivers - High Side e Low Side



Fonte: Extraído de (OLIVEIRA, 2024a).

Existem duas categorias principais de gate drivers: os *Low Side* e os *High Side*. Os *Low Side* não são isolados e compartilham o mesmo terra do circuito onde o terminal de fonte/emissor do transistor está conectado. Por outro lado, os *High Side* são isolados e são especialmente adequados para configurações em que o terminal de fonte/emissor não está conectado ao terra do circuito. Apesar disso, os *Gate Drivers High Side* são versáteis, pois podem ser adaptados para diversas configurações e ainda oferecem isolamento galvânico (OLIVEIRA, 2024b).

Os circuitos integrados (CIs) de *Gate Drivers* estão se modernizando para atender a uma variedade de demandas nas aplicações de controle de potência. Entre suas características mais relevantes estão as versões com duas portas integradas, que permitem a comutação em série, operando em *High Side* e *Low Side*, ou de forma independente, com a proteção da função de *Interlocking*. Além disso, a implementação de filtros é essencial para mitigar perdas, como aquelas provocadas pelo Efeito Miller, e funções de monitoramento para a segurança do sistema. Ambas as funções serão detalhadas a seguir.

2.4.1 Função Interlocking

A função de *Interlocking* é um mecanismo de proteção que impede que ambas as saídas do *Driver* estejam ativas simultaneamente. Em topologias de meia-ponte, essa proteção é essencial para evitar uma condição conhecida como *Shoot-through*, onde um

curto-circuito ocorre entre os barramentos de alta e baixa tensão, caso os dois transistores da ponte sejam acionados ao mesmo tempo.

Quando o *Interlocking* está habilitado, se os sinais de entrada indicarem que ambas as saídas deveriam ser ativadas simultaneamente, o *Driver* automaticamente desativa ambas, garantindo que não haja sobreposição nos estados de condução dos transistores. Esse recurso é configurável e pode ser desabilitado para aplicações onde se deseja que as duas saídas funcionem em paralelo ou de forma independente (STMicroelectronics, 2022).

2.4.2 Efeito Miller

O efeito Miller é um fenômeno que ocorre durante a comutação de transistores MOSFET e IGBT, especialmente em aplicações de alta frequência. Esse efeito surge devido à capacitância parasita entre o *Gate* e o *Drain* (CGD), que cria um caminho de realimentação entre a entrada e a saída do dispositivo. Durante a transição de chaveamento, essa capacitância armazena e transfere carga, impactando o comportamento dinâmico do transistor.

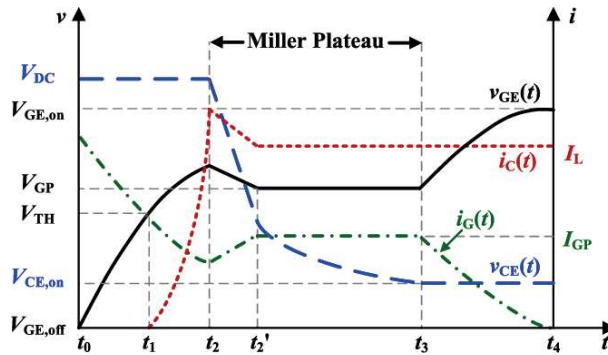
Quando o transistor muda de estado (ligando ou desligando), a capacitância CGD influencia diretamente a velocidade de comutação, pois ela precisa ser carregada ou descarregada durante o processo. Como resultado, a tensão no *Gate* apresenta um patamar conhecido como *Miller Plateau*, representado na Figura 15, no qual a tensão permanece constante por um período, enquanto a carga é transferida entre o *Gate* e o *Drain*. Esse comportamento pode limitar a rapidez com que o transistor é comutado, aumentando as perdas de chaveamento.

O *Miller Plateau* é uma fase crítica durante o chaveamento, na qual a tensão no *Gate* $v_{GE}(t)$ se mantém constante por um determinado período, mesmo com a corrente de *Gate* $i_G(t)$ fluindo continuamente. Esse fenômeno é causado pelo efeito Miller, devido à capacitância parasita entre o *Gate* e o *Drain* ou *Collector* (CGD). A seguir, cada fase do processo é descrita com base na Figura 15:

- Antes do *Miller Plateau* (t_0 a t_1): A tensão no *Gate* $v_{GE}(t)$ começa a subir a partir do ponto $V_{GE,off}$, com a corrente de *Gate* $i_G(t)$ fluindo para carregar a capacitância de entrada. Durante esse período, o transistor ainda não entrou em condução total, e a tensão $v_{CE}(t)$ (entre o coletor e emissor) permanece alta.
- Início do *Miller Plateau* (t_1 a t_2): Quando a tensão no *Gate* atinge o limiar V_{TH} , o transistor começa a conduzir, e a corrente de coletor $i_C(t)$ aumenta, como mostrado pela curva vermelha pontilhada. Simultaneamente, a tensão entre o coletor e o emissor $v_{CE}(t)$ começa a cair.

- Durante o *Miller Plateau* (t_2 a t_2'): Neste ponto, a tensão no *Gate* $v_{GE}(t)$ atinge uma região plana, chamada de *Miller Plateau*. Isso acontece porque a capacitância CGD precisa ser carregada devido à variação de tensão entre o coletor e o emissor $v_{CE}(t)$. Durante essa fase, toda a corrente do *Gate* é direcionada para carregar a capacitância parasita, mantendo a tensão do *Gate* constante em V_{GP} . Assim, a energia é consumida na capacitância Miller, em vez de aumentar a tensão no *Gate*.
- Após o *Miller Plateau* (t_2' a t_3): Após a capacitância *Miller* ser completamente carregada, a tensão no *Gate* $v_{GE}(t)$ volta a subir até atingir seu nível final $V_{GE,on}$, ativando completamente o transistor. A essa altura, a tensão $v_{CE}(t)$ alcança seu valor mínimo $V_{CE,on}$, indicando que o transistor está totalmente em condução, e a corrente de carga $i_C(t)$ atinge seu valor estável I_L .
- Conclusão do Ciclo (t_3 a t_4): Com a comutação completa, o sistema atinge um estado de equilíbrio, com o transistor totalmente ligado. A tensão $v_{GE}(t)$ permanece em $V_{GE,on}$, e a corrente de carga $i_C(t)$ mantém-se constante em I_L .

Figura 15 – Miller Plateau



Fonte: Extraído de (LIU et al., 2019).

Além disso, o efeito Miller pode induzir ligamentos indesejados do transistor devido a variações rápidas de tensão (dv/dt) no *Drain*, afetando a estabilidade e a eficiência do circuito. Para mitigar esse efeito, é comum empregar circuitos *Gate Drivers* com controle aprimorado de corrente e capacitância, além de filtros e técnicas como o uso de clamps Miller para evitar oscilações indesejadas (BALOGH, 2018).

2.4.3 Sistemas de Segurança

Os *Gate Drivers* modernos integram diversas funções de segurança para garantir a operação confiável e proteger os sistemas de potência contra falhas. Entre essas funções, destacam-se o UVLO (*Under Voltage Lockout*), a proteção térmica e a função de *Watchdog*, essenciais para evitar danos aos componentes e garantir a continuidade do funcionamento seguro dos circuitos.

2.4.3.1 UVLO (Under Voltage Lockout)

O UVLO é um mecanismo que monitora a tensão de alimentação do *Gate Drivers*. Se a tensão cair abaixo de um valor predeterminado, o sistema desativa automaticamente as saídas para evitar que os transistores sejam acionados com níveis insuficientes de tensão. Isso é fundamental para evitar chaveamentos incompletos que poderiam levar a sobreaquecimento ou falhas catastróficas no circuito. Quando a tensão volta ao nível seguro, o *Driver* retoma a operação normal, garantindo que o sistema funcione dentro dos parâmetros especificados.

2.4.3.2 Proteção Térmica

A proteção térmica é responsável por monitorar a temperatura do CI e proteger o sistema contra sobreaquecimento. Quando a temperatura interna atinge um limite crítico, o *Gate Drivers* desativa suas saídas, colocando o dispositivo em estado seguro. Essa função previne danos permanentes aos componentes e aumenta a longevidade do sistema, retomando o funcionamento apenas quando a temperatura retornar a níveis aceitáveis.

2.4.3.3 Função de Watchdog

A função de *Watchdog* é projetada para detectar falhas na comunicação entre a seção de controle e a seção de potência do *Gate Drivers*. Em caso de perda de sinal ou comunicação interrompida, o *Watchdog* coloca o sistema em um estado seguro, forçando as saídas para um nível inativo até que a comunicação seja restabelecida. Isso é essencial para prevenir comportamentos imprevistos e garantir a integridade do sistema em ambientes críticos e de alta frequência de operação.

Esses filtros e sistemas de segurança atuam em conjunto para proteger os dispositivos e circuitos, garantindo a operação estável e eficiente dos conversores e *Drivers* de motor. Em aplicações industriais e de alta potência, essas funções são indispensáveis para manter a integridade dos sistemas e evitar danos, interrupções ou falhas inesperadas.

3 Metodologia

Com base no referencial teórico, esta seção detalha a metodologia aplicada para a construção do kit didático, abordando a seleção das tecnologias e dos componentes utilizados, bem como o processo de construção do hardware e seu desenvolvimento.

Essa estrutura metodológica oferece uma visão abrangente do projeto antes da etapa de testes e aplicação, assegurando que o desenvolvimento seja orientado para a qualidade e precisão nos resultados finais.

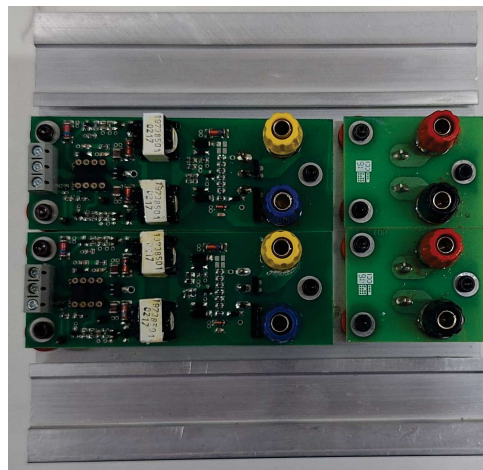
Para isso, este capítulo será estruturado em três etapas: (i) Seleção da Tecnologia, (ii) Projeto do *Hardware* e (iii) Desenvolvimento do Kit.

3.1 Seleção da Tecnologia

3.1.1 Antigo KIT

No início do projeto, identificou-se que a disciplina de Eletrônica Industrial e Acionamentos possuía um kit antigo no laboratório, mostrado na Figura 16 que já foi utilizado para demonstrar aplicações de conversores CC-CC e CC-CA. Entretanto, o equipamento havia deixado de funcionar adequadamente e seu projeto original foi perdido, o que dificultava sua manutenção. Além disso, o *design* estava defasado, uma vez que atualmente existem circuitos integrados (CIs) mais avançados, capazes de realizar a função de *Gate Drive* com tecnologia atualizada e filtros que minimizam efeitos indesejados e potenciais problemas.

Figura 16 – Antigo KIT utilizado no laboratório



Fonte: Autoria Própria (2024).

3.1.2 Gate Driver STGAP2HD

Com base nessa necessidade, foi realizado um estudo aprofundado das tecnologias atuais de *Gate Drivers* e dos circuitos integrados (CIs) disponíveis no mercado. A escolha recaiu sobre a família STGAP, da STMicroelectronics, que oferece diversos modelos de *Gate Drivers*. O modelo selecionado para o projeto foi o STGAP2HD, Figura 17.

A escolha foi feita devido à sua capacidade distinta de operar dois *gates* simultaneamente. No entanto, diferentemente do que é descrito na teoria dos circuitos de comando, onde dispositivos com dois *gates* geralmente possuem uma divisão entre *Low Side* e *High Side* — sendo que o *Low Side* precisa estar na referência —, neste caso, os *gates* operam de forma totalmente isolada. Isso ocorre porque esse CI possui um terra isolado do circuito e um *Interlocking* configurável, permitindo tanto a isolamento dos *gates* para operação em série quanto seu funcionamento em paralelo, uma funcionalidade não encontrada em outros modelos da mesma família.

Figura 17 – STGAP2HDM Gate Driver



Fonte: Extraído de (STMicroelectronics, 2022).

Como o kit está sendo desenvolvido para a disciplina de Eletrônica Industrial e Acionamentos, foi necessário escolher um *Gate Driver* projetado para aplicações que requerem controle preciso e confiável de transistores de potência, como MOSFETs e IGBTs. Com alta capacidade de isolamento galvânico e suporte a tensões elevadas. Na Tabela 2 a seguir, são apresentadas as principais características técnicas do STGAP2HD, que evidenciam suas capacidades e funcionalidades avançadas para uso em ambientes industriais e de automação:

3.1.3 Placa de Demonstração EVALSTGAP2HDM

Após a seleção do *Gate Driver*, foi identificada uma recomendação da STMicroelectronics para montagem em uma placa de demonstração específica para esse componente, conforme ilustrado na Figura 18. No entanto, embora essa PCB esteja disponível comercialmente, ela apresenta algumas limitações, como o fato de o *Interlocking* estar permanentemente aterrado, impedindo a operação em paralelo dos transistores. Considerando também o custo elevado da placa, optou-se pelo desenvolvimento de uma montagem própria para atender melhor às necessidades do projeto.

Tabela 2 – Características Principais do STGAP2HD

Parâmetro	Descrição
Isolamento galvânico	Até 6 kV
Capacidade de corrente	4 A (sink/source)
Tensão máxima de operação	1200 V
Imunidade a transientes	± 100 V/ns
Atraso de propagação entrada-saída	75 ns
Funções adicionais	Miller Clamp, UVLO, Interlocking configurável
Pinos dedicados	SD (Shutdown), BRAKE
Tensão de acionamento	Até 26 V
Entradas compatíveis	3,3 V / 5 V TTL e CMOS
Tipo de encapsulamento	SO-36W

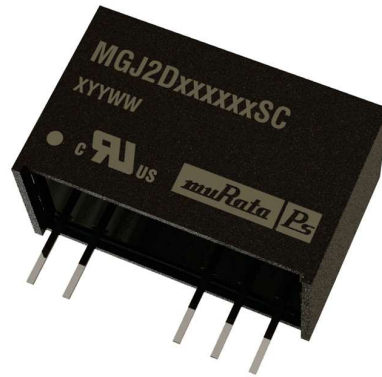
Figura 18 – EVALSTGAP2HDM placa de demonstração para o STGAP2HDM



Fonte: Extraído de (STMicroelectronics, 2021).

Seguindo as recomendações da placa de demonstração, os componentes necessários foram adquiridos na *Mouser Electronics*, uma loja virtual especializada na distribuição global de componentes eletrônicos e semicondutores para prototipagem e produção. Entre os itens selecionados estão resistores, diodos, capacitores e conectores, que, em sua maioria, são genéricos. No entanto, destaca-se a escolha de dois circuitos integrados específicos: a fonte Murata MGJ2D051509SC, Figura 19, selecionada conforme a recomendação da *STMicroelectronics*, e o MOSFET IPW60R037CM8XKSA1, Figura 20, que já foi utilizado em projetos anteriores da disciplina e atende plenamente aos requisitos desta aplicação.

Figura 19 – Fonte Murata MGJ2D051509SC



Fonte: Extraído de ([Murata Power Solutions, 2022](#)).

Esta é uma fonte DC-DC isolada utilizada para o acionamento de *gates* de transistores IGBT e MOSFET, atendendo às demandas de aplicações industriais. Com isolamento de 5,2 kVDC e potência de 2 W, é adequada para circuitos de alta tensão, como inversores e *drivers* de motor. A fonte opera com tensões de entrada de 5 V, 12 V, 15 V e 24 V, fornecendo saídas bipolares como +15 V/-5 V e +20 V/-5 V, otimizando o acionamento e minimizando perdas. Sua faixa de operação de -40°C a +100°C, aliada à baixa capacitância de acoplamento, reduz interferências eletromagnéticas e garante imunidade a transientes superiores a 200 kV/ μ s.

Figura 20 – Transistor MOSFET IPW60R037CM8XKSA1



Fonte: Extraído de ([Infineon Technologies AG, 2024](#)).

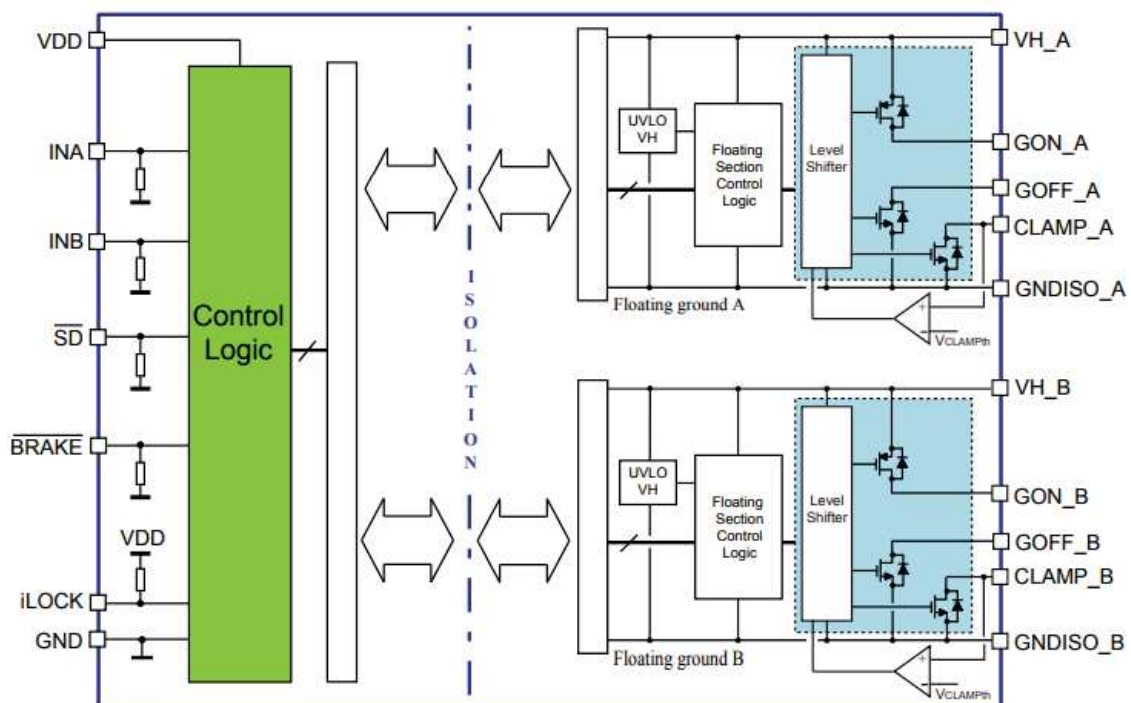
O transistor MOSFET de alta tensão é projetado para aplicações de chaveamento rápido e eficiente, como conversores e fontes de alimentação. Com tensão nominal de 600 V e baixa resistência de condução ($R_{DS(on)}$ de 37 m Ω), ele minimiza perdas e melhora a eficiência do sistema. O dispositivo é equipado com um diodo de recuperação rápida, oferecendo alta robustez contra comutações duras e proteção contra sobrecargas dinâmicas. Seu encapsulamento PG-TO247-3 facilita a dissipação térmica e a montagem mecânica, permitindo operar em temperaturas de -55°C a 150°C.

Assim, concluiu-se a seleção dos componentes do projeto, permitindo avançar para o desenvolvimento e a construção do hardware.

3.2 Projeto do Hardware

Após a seleção dos componentes, torna-se essencial compreender o funcionamento do *Gate Driver*. Por meio da análise do seu *datasheet* (STMicroelectronics, 2022), é possível examinar o diagrama de blocos e identificar as funções de cada uma de suas portas, conforme ilustrado na Figura 21.

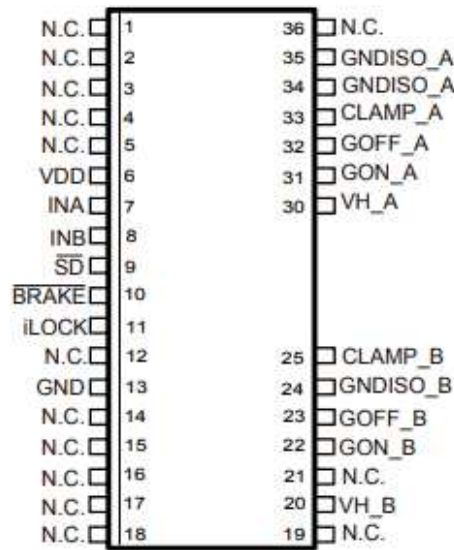
Figura 21 – Diagrama de blocos STGAP2HD



Fonte: Extraído de (STMicroelectronics, 2022).

A análise do diagrama revela, primeiramente, a presença de isolamento galvânico, permitindo a criação de um terra flutuante como referência para o chaveamento de transistores cujo *source* não está conectado ao terra do conversor. Além disso, o CI integra um sistema interno para mitigar o efeito Miller, comum em operações de alta frequência. A seguir, apresentam-se os pinos na Figura 22 e suas descrições:

Figura 22 – Pinagem STGAP2HD



Fonte: Extraído de (STMicroelectronics, 2022).

- **VDD (Pino 6)**

- *Função:* Alimentação da lógica de controle.
- *Descrição:* Tensão de alimentação para a seção de controle do CI.

- **INA (Pino 7) e INB (Pino 8)**

- *Função:* Entradas lógicas para controle dos canais A e B, respectivamente.
- *Descrição:* Controlam a ativação das saídas correspondentes dos *gates*. Operam em nível TTL/CMOS com histerese.

- **SD (Pino 9)**

- *Função:* Entrada de desligamento (*shutdown*), ativa em nível baixo.
- *Descrição:* Garante que ambas as saídas sejam desativadas para evitar falhas no sistema.

- **BRAKE (Pino 10)**

- *Função:* Entrada de frenagem, ativa em nível baixo.
- *Descrição:* Utilizada para desativar o canal de saída e aplicar frenagem no motor.

- **iLOCK (Pino 11)**

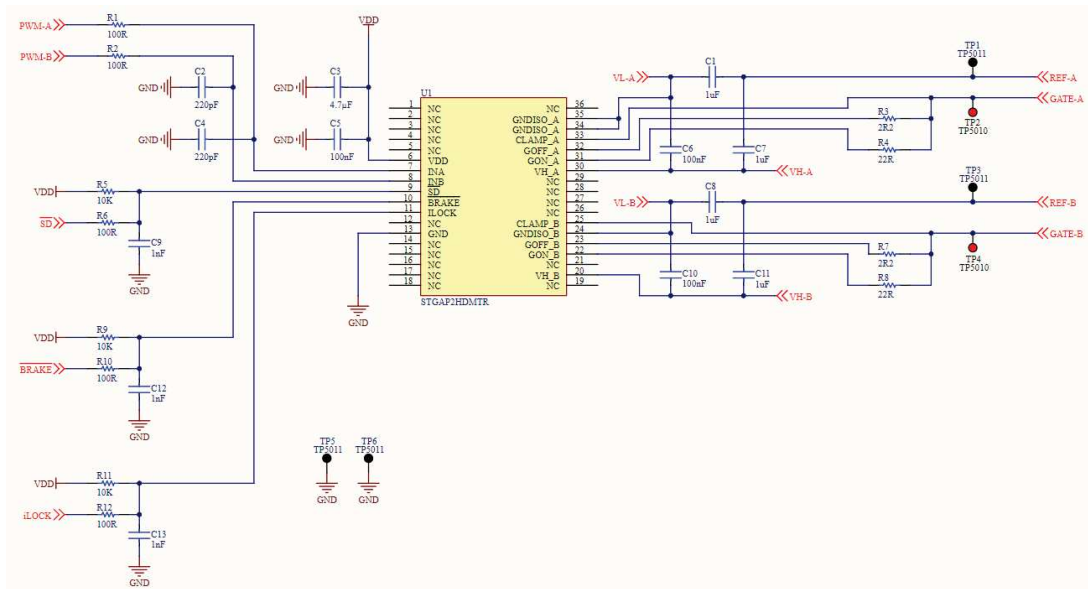
- *Função:* Habilitação ou desabilitação da função de intertravamento.

- *Descrição*: Garante que os dois canais não sejam ativados simultaneamente, evitando *shoot-through*.
- **GND (Pino 13)**
 - *Função*: Terra da lógica de controle.
 - *Descrição*: Conecta o CI ao terra do circuito de controle.
- **VH_A e VH_B (Pinos 20 e 30)**
 - *Função*: Alimentação dos canais A e B para o acionamento dos *gates*.
 - *Descrição*: Fornecem a tensão necessária para os *drivers* dos *gates*.
- **GON_A e GON_B (Pinos 22 e 31)**
 - *Função*: Saídas de fonte dos canais A e B.
 - *Descrição*: Ativam os transistores conectados aos *gates*.
- **GOFF_A e GOFF_B (Pinos 23 e 32)**
 - *Função*: Saídas de *sink* dos canais A e B.
 - *Descrição*: Fornecem um caminho de descarga para desligar os *gates*.
- **CLAMP_A e CLAMP_B (Pinos 25 e 33)**
 - *Função*: Função *Miller Clamp* para os canais A e B.
 - *Descrição*: Evita picos indesejados nos *gates* durante comutações rápidas.
- **GNDISO_A e GNDISO_B (Pinos 24, 34 e 35)**
 - *Função*: Terra isolado dos canais A e B.
 - *Descrição*: Proporciona isolamento galvânico entre os canais e a lógica de controle.

3.2.1 Esquemático Elétrico

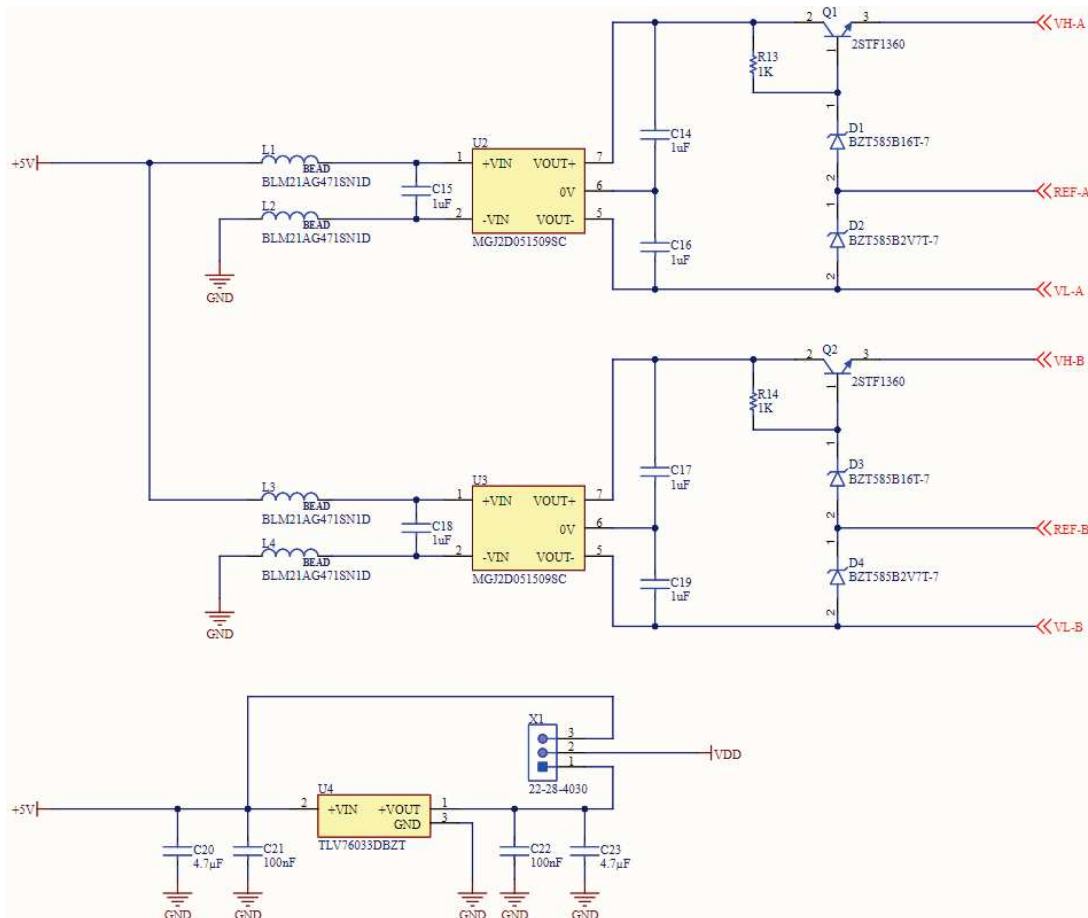
Com o mapeamento dos pinos concluído, a análise do datasheet da placa de demonstração EVALSTGAP2HDM (STMicroelectronics, 2021) permitiu compreender a montagem do sistema, servindo como base para o projeto da PCB. Para o desenvolvimento, utilizou-se o *Altium Designer*, um software amplamente empregado no *design* eletrônico, especializado na criação e *layout* de placas de circuito impresso (PCBs). Os esquemáticos elétricos podem ser vistos nas Figuras 23, 24 e 25.

Figura 23 – Esquema elétrico do Gate Driver STGAP2HDM



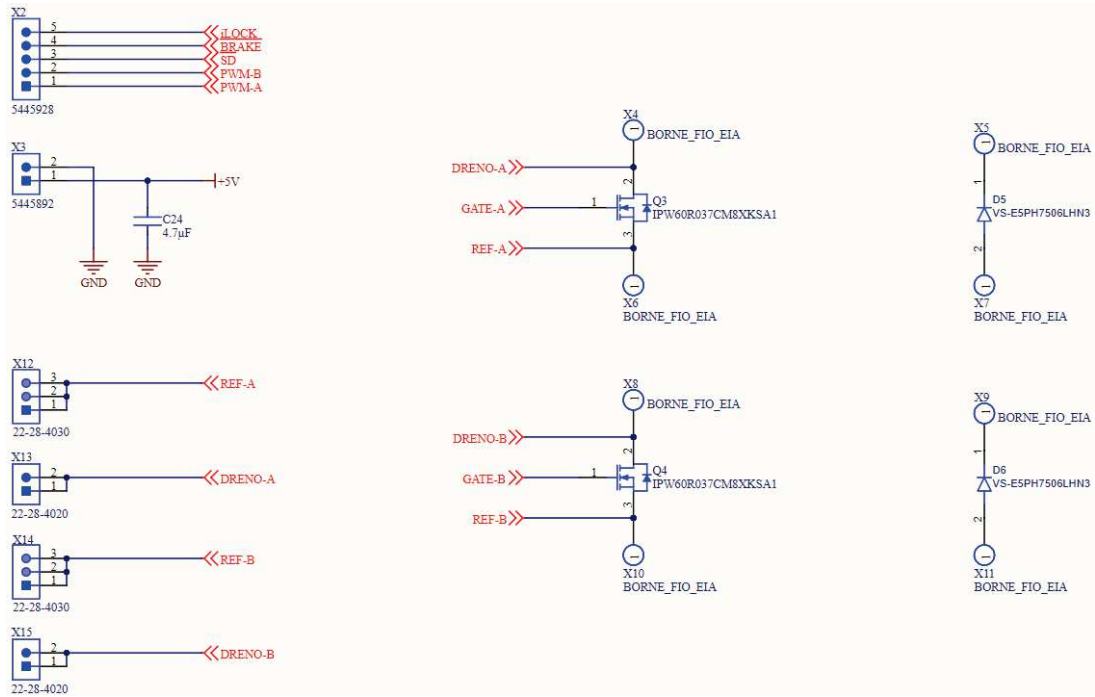
Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 24 – Esquema elétrico da fonte MGJ2D051509SC



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 25 – Esquema elétrico dos conectores



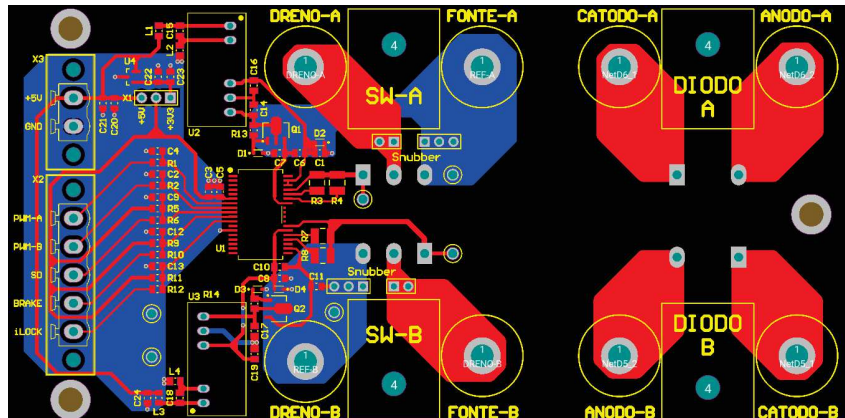
Fonte: Autoria Própria (2024).

Para incorporar a função de *Interlocking* ao *Gate Driver*, que não foi prevista na placa de demonstração, foi adicionada a entrada booleana *iLOCK*. Essa entrada é responsável por comutar entre VDD e GND no respectivo pino, permitindo configurar se as portas A e B serão utilizadas em paralelo ou em série, de acordo com a necessidade da montagem.

3.2.2 Layout da PCB

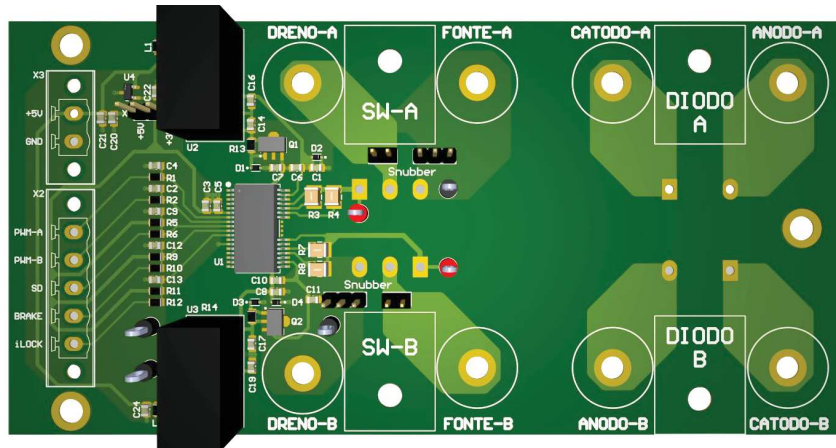
Dando continuidade ao projeto, a confecção da PCB foi realizada no software *Altium Designer*. Optou-se por uma placa com apenas duas camadas, considerando a simplicidade do circuito. Comparando com o antigo kit, que era subdividido em quatro placas (dois gates e dois diodos), decidiu-se unificar tudo em uma única placa. Essa abordagem foi possível devido ao CI utilizado, que já possui duas saídas de *gate*, e à integração dos diodos, o que também facilitou o dimensionamento da placa para fixação no dissipador. O resultado final da PCB está apresentado nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 – PCB Gate Driver



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 27 – Modelo 3D da PCB Gate Driver



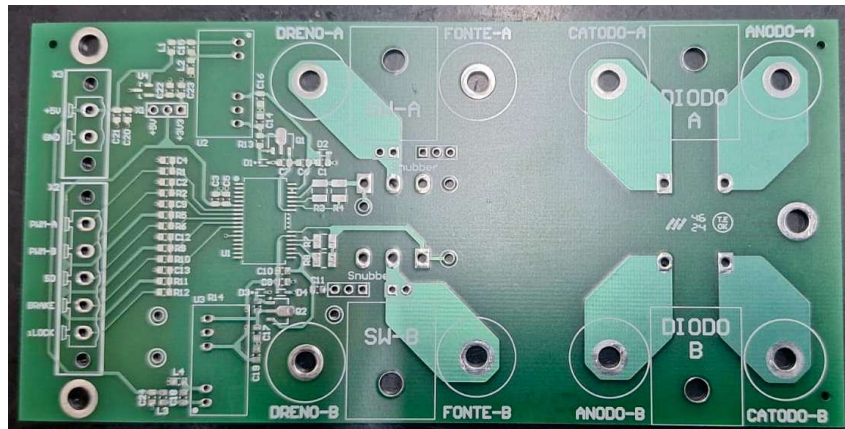
Fonte: Autoria Própria (2024).

3.2.3 Fabricação da placa

Devido ao tempo e aos custos envolvidos na importação, optou-se pela fabricação nacional da placa. Para isso, a produção foi realizada pela *Micropress*, uma empresa líder na fabricação de protótipos de placas de circuito impresso no Brasil, reconhecida por suas boas avaliações que asseguram qualidade e confiabilidade na produção.

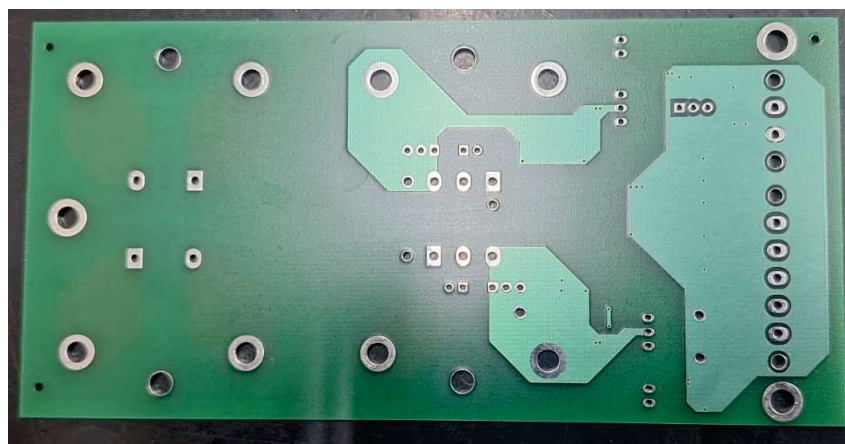
O pedido foi realizado com base no layout previamente apresentado, e as Figuras 28 e 29 ilustram o resultado final da placa física fabricada pela *Micropress*.

Figura 28 – Placa fabricada pela Micropress (Top Layer)



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 29 – Placa fabricada pela Micropress (Bottom Layer)



Fonte: Autoria Própria (2024).

3.2.4 Montagem da placa

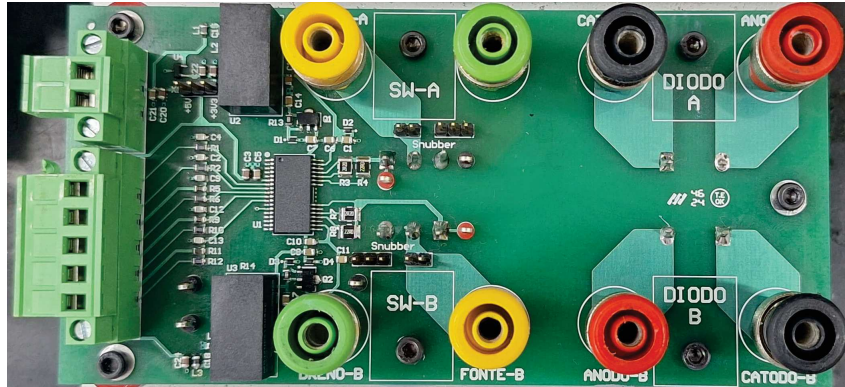
Paralelamente ao pedido da placa, foi gerada a BOM (*Bill of Materials*), ou Lista de Materiais, que detalha os componentes utilizados no projeto, incluindo suas referências, quantidades, descrições e preços. Essa lista pode ser consultada na Tabela 3. Alguns componentes não possuem preço informado porque já estavam disponíveis na própria universidade.

Com a lista de materiais pronta, os componentes necessários foram adquiridos por meio da *Mouser*, uma das maiores distribuidoras globais de semicondutores e componentes eletrônicos. A escolha da *Mouser* garantiu a qualidade e confiabilidade dos itens fornecidos, assegurando que os componentes fossem compatíveis com as exigências do projeto.

Após a chegada da PCB e dos componentes, iniciou-se o processo de montagem da placa. Esse procedimento foi realizado com extremo cuidado e precisão, de modo a garantir

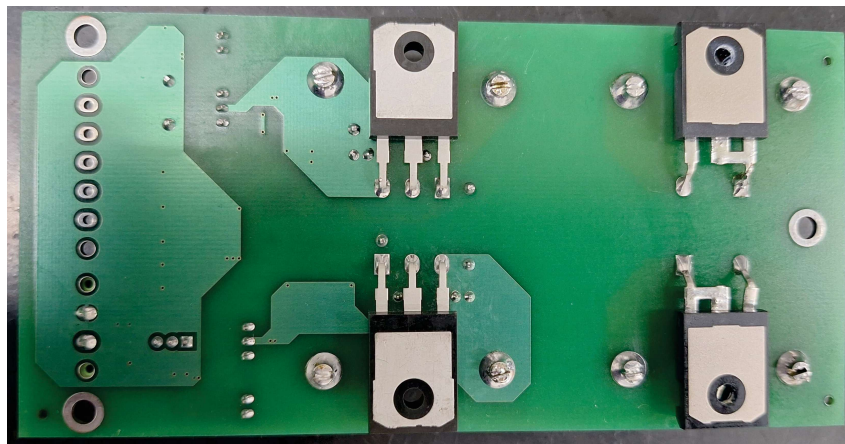
o pleno funcionamento e a eficiência do circuito. As Figuras 30 e 31 ilustram o resultado final da montagem, enquanto a Figura 27 apresenta o projeto original para comparação.

Figura 30 – Placa final com os componentes (Top Layer)



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 31 – Placa final com os componentes (Bottom Layer)

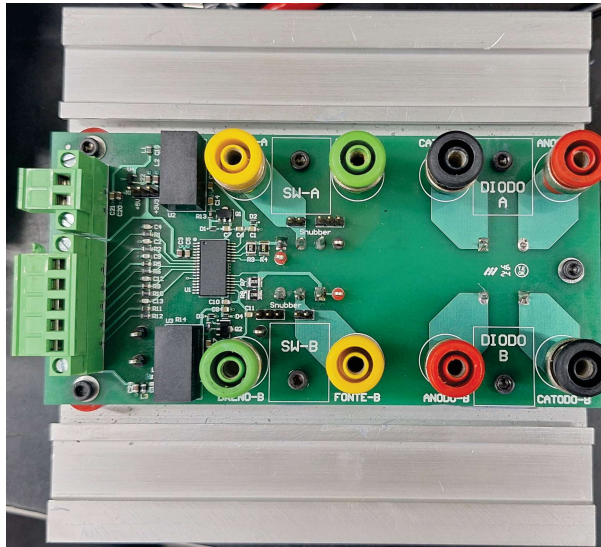


Fonte: Autoria Própria (2024).

3.3 Montagem e testes

Prosseguindo com as montagens, as antigas PCBs do dissipador do kit, ilustradas na Figura 16, foram removidas e substituídas por uma nova placa unificada. O resultado final dessa substituição é apresentado na Figura 32. A atualização consolidou o *design* anterior, que utilizava quatro PCBs separadas, em uma única placa mais compacta e eficiente, reduzindo a quantidade de componentes e simplificando tanto o processo de produção quanto a manutenção futura do kit.

Figura 32 – Novo kit.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Com o kit finalizado, o próximo passo é realizar os testes de funcionamento para garantir sua eficácia. O primeiro teste realizado consiste na verificação do chaveamento, etapa fundamental antes de proceder com a montagem de um conversor. Para isso, foram definidos os seguintes parâmetros de teste:

- **VDD:** 5 V;
- **PWM:** 0 V a 5 V;
- **Saída esperada:** -2,7 V a 15 V.

Essa configuração foi escolhida para validar o desempenho do circuito em condições típicas de operação. Foram utilizados um gerador de funções HP 33120A e uma fonte DC Instrutherm FA-3030, Figura 33, para realizar as entradas que podem ser vistas nos Gráficos 34 e 35.

Figura 33 – Equipamentos usados para entrada de sinal.



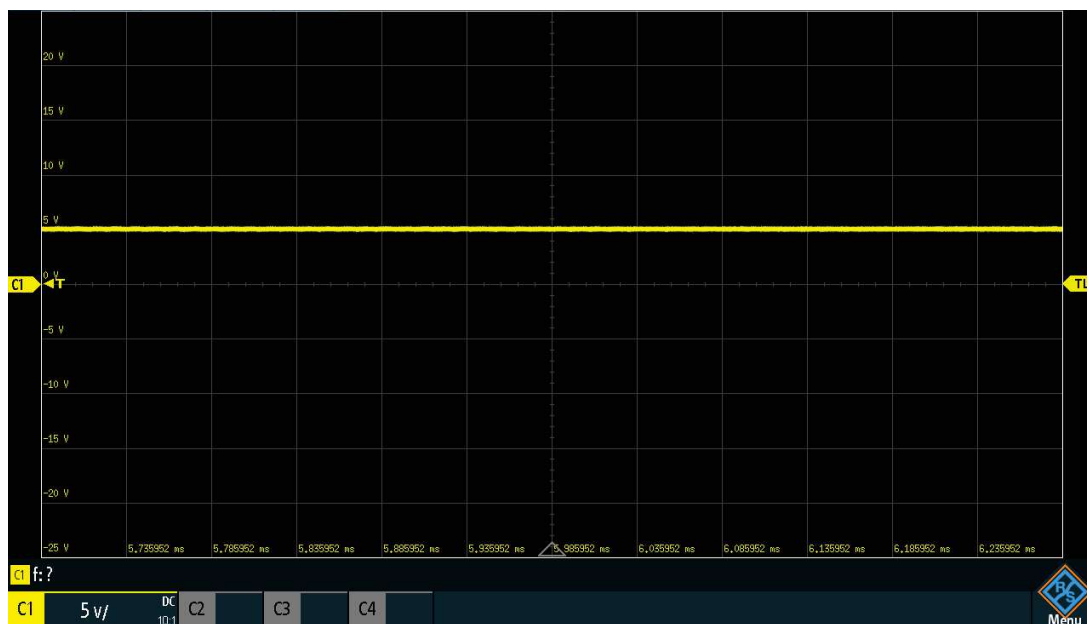
(a) Gerador de funções HP 33120A.



(b) Fonte DC Instrutherm FA-3030.

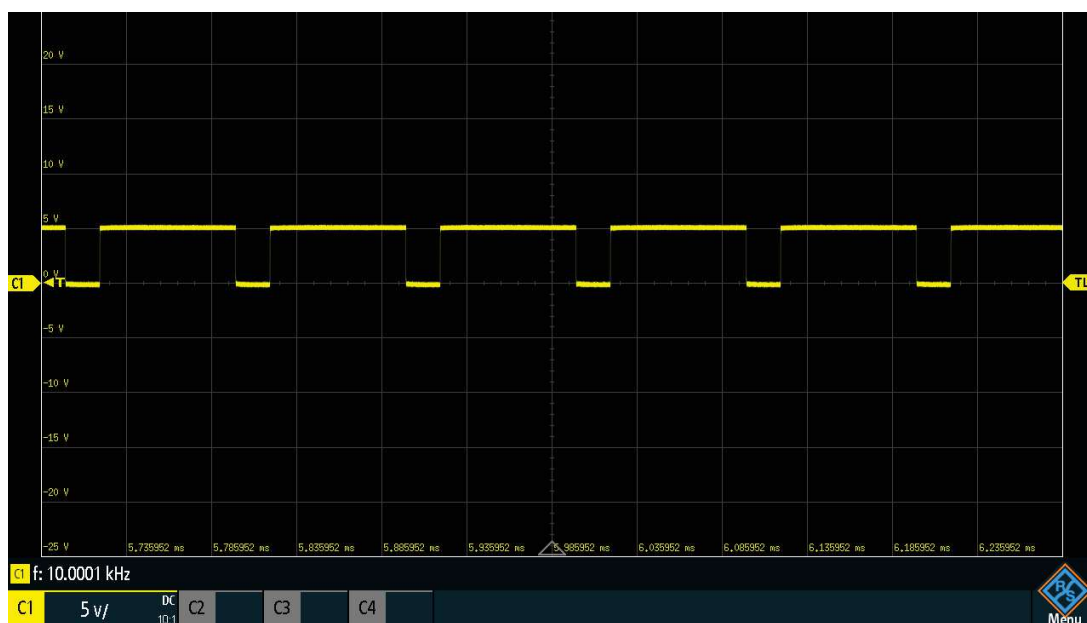
Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 34 – Gráfico da entrada VDD 5V.



Fonte: Autoria Própria (2024).

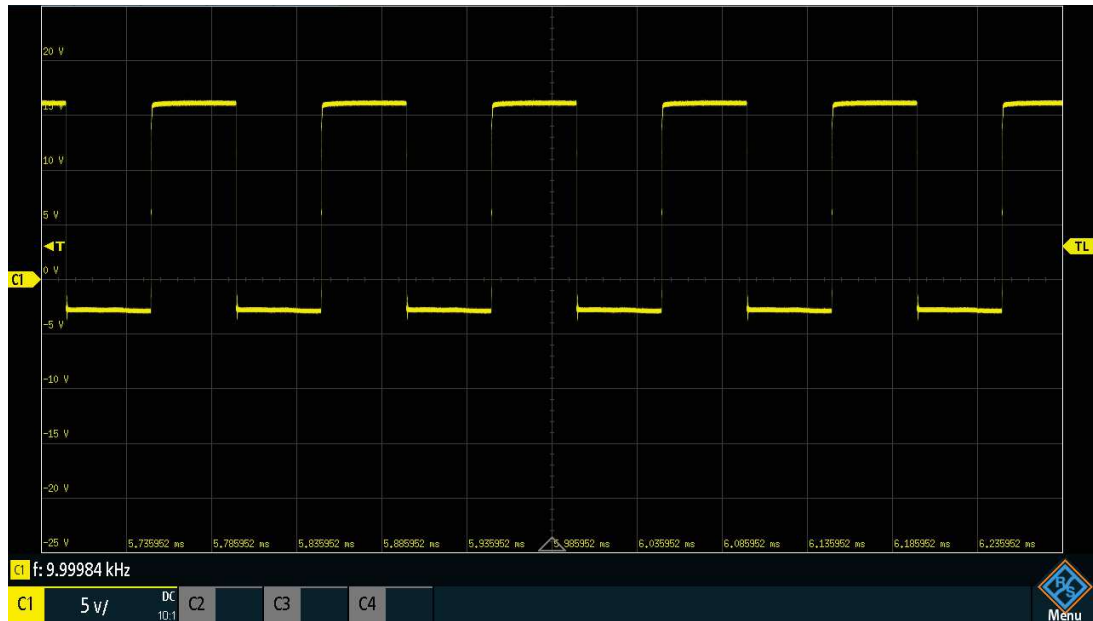
Figura 35 – Gráfico do pulso PWM 0 a 5V.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Como esperado, tivemos a saída de -2,7 a 15V visto no Gráfico 36.

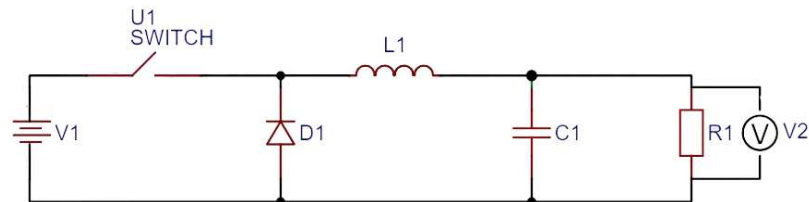
Figura 36 – Gráfico do da saída do Gate Driver



Fonte: Autoria Própria (2024).

Para o teste de chaveamento em um conversor, optou-se pela montagem de um conversor *Buck*. A configuração desse circuito está ilustrada no esquemático apresentado na Figura 37.

Figura 37 – Esquemático conversor Buck



Fonte: Autoria Própria (2024).

Para os elementos passivos do circuito, mostrados na Figura 39, foram utilizados materiais disponíveis no laboratório. Por esse motivo, o foco não foi obter o melhor desempenho, mas sim demonstrar o funcionamento do conversor. Para a tensão de entrada, foi empregada uma fonte DC modelo Riden RD6024, Figura 38.

Figura 38 – Fonte DC Riden RD6024



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 39 – Elementos passivos do circuito.



(a) Indutor.



(b) Capacitor.



(c) Resistência.

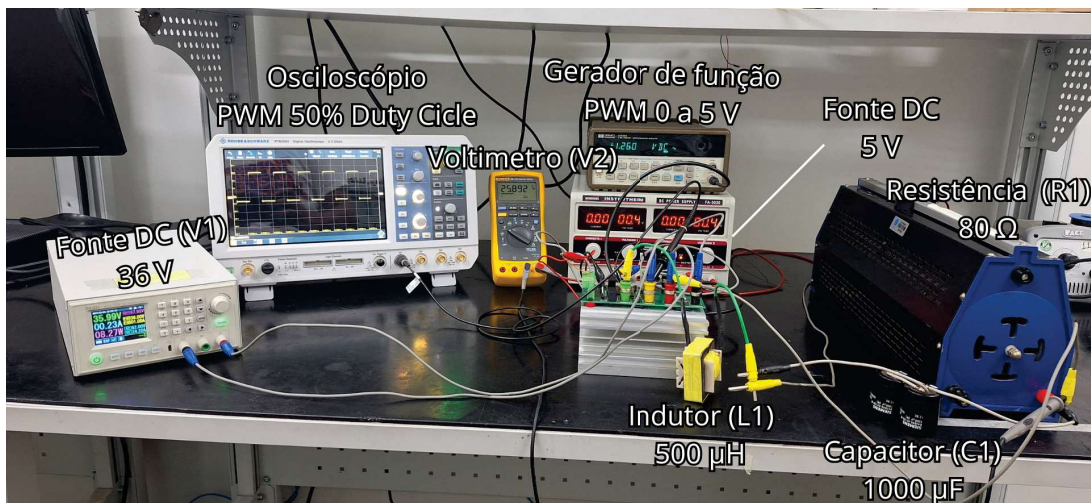
Fonte: Autoria Própria (2024).

Os valores dos componentes utilizados foram os seguintes:

- $V1 = 36 \text{ V}$;
- Indutor = $500 \mu\text{H}$;
- Capacitor = $1000 \mu\text{F}$;
- Resistência = 80Ω .

A montagem ilustrada na Figura 40 foi realizada com uma razão cíclica inicial (D) de 50%. Essa razão está representada no Gráfico 36, enquanto a tensão de saída, registrada no voltímetro (V2), foi de aproximadamente 26 V. No entanto, esse valor não condiz com a razão cíclica aplicada, pois, considerando uma tensão de entrada de 36 V, a saída esperada para um conversor *Buck* conforme a Tabela 1 seria em torno de 18 V.

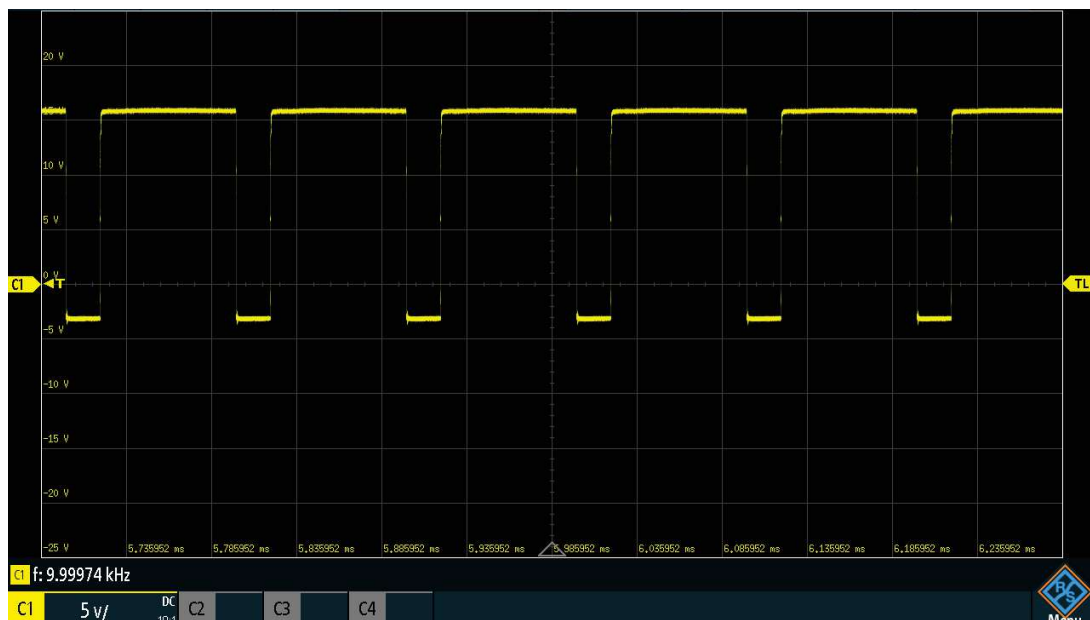
Figura 40 – Montagem de conversor Buck



Fonte: Autoria Própria (2024).

Essa discrepância nos valores ocorre devido à descontinuidade da corrente no indutor, o que poderia ser resolvido ajustando os valores e a qualidade do componente. Contudo, neste caso, optou-se por alterar a razão cíclica, aplicando um pulso com razão de 80%, como mostrado no Gráfico 41.

Figura 41 – Gráfico do da saída com 80% de razão cíclica



Fonte: Autoria Própria (2024).

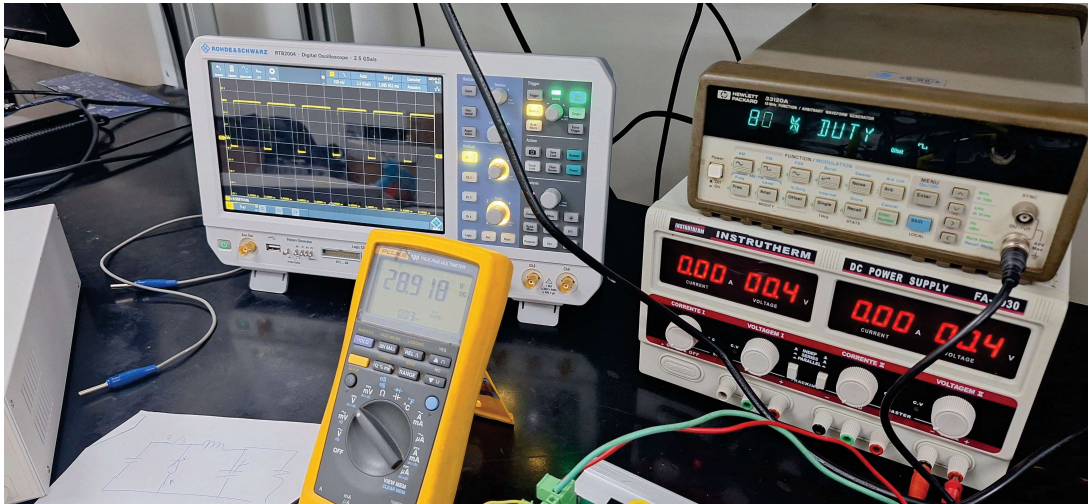
Para 80% de razão cíclica (D), o valor na saída seria de:

$$V1 \cdot D = V2$$

$$36 \cdot 80\% = 28,8V$$

Com a alteração realizada, é possível observar na Figura 42 que, com uma razão cíclica de 80%, o sistema passou a operar de forma satisfatória, apresentando uma tensão de saída (V2) de 28,9 V, um valor bastante próximo do esperado.

Figura 42 – Saída do circuito aplicando um pulso com 80% de razão cíclica

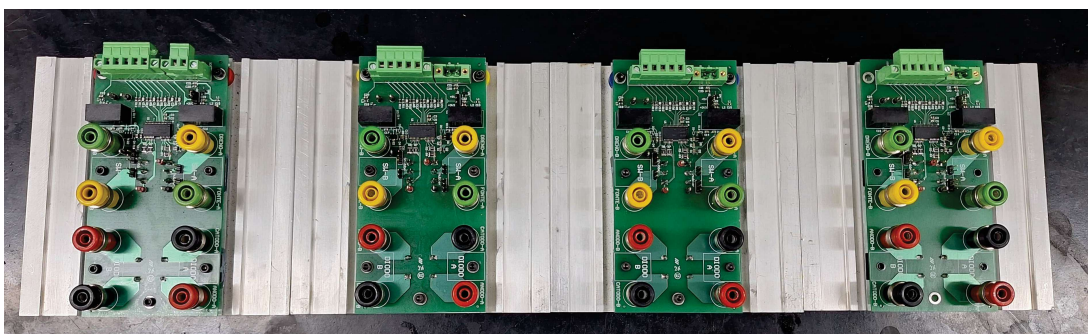


Fonte: Autoria Própria (2024).

3.3.1 Finalização dos kits

Após a realização dos testes e a validação da funcionalidade do projeto em uma montagem prática de laboratório, foram construídos mais quatro kits para atender configurações que demandam um maior número de chaves e permitir que vários alunos realizem experimentos simultaneamente durante as aulas. Os kits finalizados podem ser visualizados na Figura 43.

Figura 43 – Kits finalizados.



Fonte: Autoria Própria (2024).

4 Conclusão e trabalhos futuros

O desenvolvimento deste projeto foi essencial para atender a uma importante demanda acadêmica, visando proporcionar aos alunos uma experiência prática mais robusta no estudo de eletrônica de potência. Realizar a manutenção do antigo kit didático não apenas permitiu restaurar seu funcionamento, mas também viabilizou a busca por novas soluções tecnológicas mais atuais, tornando sua aplicação menos complexa e mais acessível. A adoção de um CI central, responsável por desempenhar todas as funções, possibilitará a fabricação de um maior número de kits e facilitará futuras manutenções necessárias.

A construção da PCB e os testes realizados confirmaram o funcionamento esperado do projeto, validando a eficiência e a confiabilidade da solução proposta, além de possibilitar a montagem dos conversores que serão utilizados no laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamentos. Ademais, a produção de múltiplos kits permite que diversos alunos utilizem o sistema simultaneamente, promovendo maior dinamismo e interação nas aulas práticas.

Apesar de algumas limitações nos componentes utilizados, devido à disponibilidade no laboratório, os resultados obtidos foram satisfatórios, demonstrando a viabilidade do projeto e abrindo caminho para melhorias futuras. Entre as possíveis evoluções, destacam-se o uso de materiais com melhor desempenho e o refinamento dos parâmetros operacionais, como a redução da descontinuidade de corrente no indutor.

Como trabalho futuro, sugere-se o desenvolvimento de uma segunda placa que funcione em conjunto com o *Gate Driver*, responsável pela geração do sinal PWM e pulsos configuráveis a partir de um microcontrolador. Essa abordagem substituiria a necessidade de um gerador de funções, permitindo a implementação de funcionalidades adicionais, como a geração automática de um tempo morto entre dois pulsos, além de maior personalização e automação no processo de geração de sinais. Essa melhoria ampliaria significativamente a gama de aplicações do projeto, tornando-o mais versátil e adaptável a diferentes cenários.

Por fim, este trabalho contribuiu não apenas para o aprimoramento do ensino de técnicas de chaveamento e controle em conversores eletrônicos, mas também para o desenvolvimento de habilidades práticas e de projeto, fortalecendo a integração entre teoria e prática no ambiente acadêmico.

Referências Bibliográficas

BALDNER, F. de O. et al. *Eletrônica de Potência*. [S.l.]: Grupo A, Selo Sagah, 2018. ISBN 978-85-9502-613-1. Citado na página 14.

BALOGH, L. *Fundamentals of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits*. Rev. a. [S.l.], 2018. Accessed: October 28, 2024. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ml/slua618a/slua618a.pdf>>. Citado na página 28.

BRAGA, N. C. *Uma corrente continua não varia com o tempo. A tensão no circuito se mantém constante*. 2019. Acesso em: 2024-05-29. Disponível em: <<https://www.newtonbraga.com.br/images/stories/artigos2018/el0073-0001.png>>. Citado na página 20.

BRAGA, N. C. *Formas de onda ART1575S*. 2020. Acesso em: 2024-05-30. Disponível em: <<https://br.newtonbraga.com.br/images/stories/artigo2022/art4103-0017.jpg>>. Citado na página 21.

BRAGA, N. C. *Curso de Eletrônica de Potência - Parte 5 - Os IGBTs (CUR3005)*. 2023. <<https://eletronicadepotencia.com/transistor-mosfet-de-potencia/>>. Accessed: 2024-05-29. Citado na página 19.

Brasil Escola. *Sistema de transmissão HVDC - Corrente Contínua em Alta Tensão - Conversores multiníveis modulares (MMC)*. 2024. Acessado em: 01 fev. 2025. Disponível em: <<https://monografias.brasile scola.uol.com.br/engenharia/sistema-de-transmissao-hvdc-corrente-continua-em-alta-tensao-conversores-multiniveis-modulares-mm htm>>. Citado na página 17.

CONVERSORES CC-CA e CA-CA. 2014. Apresentação, Conversores Estáticos e Fontes Chaveadas, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Disponível em: <https://www.professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_CEFET/Conversores_Estaticos/Pos_2014/Apresentacao_Aula_07.pdf>. Citado na página 18.

CRISTOFOLETTI, S. L. *DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES DE POTÊNCIA: Características, Funcionamento e Aplicações*. TCC — UNICEP – Centro Universitário Central Paulista, SÃO CARLOS, 2006. Citado na página 18.

EIT Faridabad. *The Importance of Practical Learning in Engineering Education*. 2022. <<https://eitfaridabad.com/importance-of-practical-learning-in-engineering-education/>>. Accessed: 2024-05-26. Citado na página 15.

FISCH, L. B. K. *TRANSISTOR MOSFET DE POTÊNCIA*. 2019. <<https://eletronicadepotencia.com/transistor-mosfet-de-potencia/>>. Accessed: 2024-05-29. Citado na página 19.

FREITAS, C. M. *Simbologia do IGBT*. 2017. Acesso em: 2024-05-29. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/principios-basicos-do-igbt/>>. Citado na página 19.

HART, D. W. *Eletrônica de Potência*. [S.l.]: AMGH; 1ª edição, 2011. ISBN 978-85-8055-047-4. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 17.

Infineon Technologies AG. *IPW60R037CM8: 600V CoolMOS™ CM8 Power Transistor*. Rev 2.1. [S.l.], 2024. Accessed: October 28, 2024. Disponível em: <https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPW60R037CM8-DataSheet-v02_01-EN.pdf>. Citado na página 33.

INTRODUÇÃO aos Conversores CC-CC. 2012. Apresentação, Eletrônica de Potência, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Disponível em: <https://professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia-CEFET/Eletronica_Potencia/2012_2/Apresentacao_Aula_13.pdf>. Citado na página 18.

JÚNIOR, L. R. S. *Geração analógica de um sinal PWM*. 2016. Acesso em: 2024-05-30. Disponível em: <https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQIEbJcx28Jav8tYNl2r_BiughWb3dOmD1xQl4xkXNnv77xLYK>. Citado na página 21.

LIU, J. et al. In situ condition monitoring of igbts based on the miller plateau duration. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 34, p. 769–782, 2019. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54437358>>. Citado na página 28.

MACHADO, F. et al. Educação em eletrônica de potência: a problemática entre teoria e prática e a carência de recursos laboratoriais. In: *Congresso Brasileiro de Ensino em Engenharia*. [S.l.: s.n.], 2011. v. 39. Citado na página 15.

MMA, H. *Exemplo de tensão alternada*. 2021. Acesso em: 2024-05-29. Disponível em: <<https://hangarmma.com.br/glossary/glossary-categories/tensao-eletrica-alternada/>>. Citado na página 20.

MORAES, C. *Circuito de Comando*. 2020. <<https://eletronicadepotencia.com/circuito-de-comando/>>. Accessed: 2024-05-19. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 25.

MORAES, C. *CIRCUITOS INTEGRADOS PARA ACIONAMENTO DE TRANSISTORES MOSFET E IGBT*. 2020. <https://eletronicadepotencia.com/acionamento_transistores_mosfet_igbt/>. Accessed: 2024-05-19. Citado na página 25.

Murata Power Solutions. *MGJ2 Series: 5.2kVDC Isolated 2W Gate Drive DC-DC Converters*. [S.l.], 2022. Accessed: October 28, 2024. Disponível em: <<https://www.murata.com/products/productdata/8807029997598/kdc-mgj2.pdf>>. Citado na página 33.

OLIVEIRA, T. *ENTENDENDO O QUE É PWM: A TÉCNICA DE CONTROLE DE ENERGIA EM ELETRÔNICA!* 2022. <<https://eltgeral.com.br/o-que-e-pwm/>>. Accessed: 2024-05-29. Citado na página 19.

OLIVEIRA, T. *Gate Drivers Individuais – High Side e Low Side*. 2024. Acesso em: 2024-05-30. Disponível em: <https://i0.wp.com/eltgeral.com.br/wp-content/uploads/2023/03/GateDrivers_Individuais.png?w=344&ssl=1>. Citado na página 26.

OLIVEIRA, T. *TIPOS DE GATE DRIVER PARA MOSFET E IGBT*. 2024. <<https://eltgeral.com.br/tipos-de-gate-driver-para-mosfet-e-igbt/>>. Accessed: 2024-05-20. Citado na página 26.

PETRY, C. A. *Introdução aos Conversores CC-CC*. 2001. <https://professorpetry.com.br/Bases_Dados/Apostilas_Tutoriais/Introducao_Conversores_CC_CC.pdf>. Accessed: 2024-05-30. Citado na página 22.

PETRY, C. A. *Eletrônica de Potência*. 1^a. ed. Florianópolis: Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), 2020. Acessado em: 01 fev. 2025. Disponível em: <https://www.professorpetry.com.br/Ensino/Curso_Eletronica_Potencia/Curso_Eletronica_Potencia.html>. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 25.

PUHLMANN, H. F. W. *Processamento Digital de Sinais – DSP – Parte 2*. 2014. <<https://embarcados.com.br/processamento-digital-de-sinais-dsp-parte-2/>>. Accessed: 2024-05-30. Citado na página 20.

RAMU, V. *Triangular carrier based modulation scheme*. 2022. Acesso em: 2024-05-30. Disponível em: <<https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2214785321069170-gr3.jpg>>. Citado na página 21.

SILVA, J. P. da. Apostila de eletrônica de potência. *INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RN – (IFRN)*. Disponível em: http://professorcesarcosta.com.br/upload/imagens_upload/Apostila-Eletronica-Potencia-IFRN-Zona-Norte.pdf. Acesso em 2024-05-27, v. 27, 2019. Citado na página 19.

STMicroelectronics. *EVALSTGAP2HDM: Demonstration board for STGAP2HDM isolated 4 A half-bridge gate driver*. Rev 1. [S.l.], 2021. Accessed: October 28, 2024. Disponível em: <<https://br.mouser.com/datasheet/2/389/evalstgap2hdm-2956162.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 36.

STMicroelectronics. *STGAP2HD: Galvanically isolated 4 A dual gate driver*. Rev 2. [S.l.], 2022. Accessed: October 28, 2024. Disponível em: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stgap2hd.pdf>>. Citado 4 vezes nas páginas 27, 31, 34 e 35.

Tec Dicas. *Representação esquemática do transistor MOSFET canal P e N*. 2019. Acessado em: 19 fev. 2025. Disponível em: <<https://tecdicas.com/content/images/2019/11/representacao-esquematica-transistor-mosfet-channel-p-n.jpg>>. Citado na página 18.

ZHANG, G. et al. Power electronics converters: Past, present and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 81, p. 2028–2044, 2018. Citado na página 17.

Anexos

ANEXO A – Tabela BOM - Materiais

PCB

Tabela 3 – Lista de materiais (Parte 1)

Mouser	Preço	Ref	Quantidade
CC0805KKX7R9BB105	\$0.01	C1, C7, C8, C11, C14, C15, C16, C17, C18, C19	10
C0805C221J5GACAUTO	\$0.01	C2, C4	2
C2012X7R1E475K125AB	\$0.01	C3, C20, C23, C24	4
C0805C104K5RACTU	N/A	C5, C6, C10, C21, C22	5
C0805C102J5GACTU	\$0.01	C9, C12, C13	3
BZT585B16T-7	\$0.07	D1, D3	2
BZT585B2V7T-7	\$0.02	D2, D4	2
VS-E5PH7506LHN3	\$2.83	D5, D6	2
BLM21AG471SN1D	\$0.02	L1, L2, L3, L4	4
2STF1360	\$0.05	Q1, Q2	2
IPW60R037CM8XKSA1	\$7.57	Q3, Q4	2
RC0805FR-07100RL	N/A	R1, R2, R6, R10, R12	5
RC1210FR-072R2L	\$0.01	R3, R7	2
RC1210FR-0722RL	N/A	R4, R8	2
RC0805FR-1310KL	N/A	R5, R9, R11	3
RC0805FR-131KL	N/A	R13, R14	2
TP5011	\$0.14	TP1, TP3, TP5, TP6	4
TP5010	\$0.01	TP2, TP4	2
STGAP2HDMTR	\$1.77	U1	1
MGJ2D051509SC	\$6.94	U2, U3	2
TLV76033DBZT	\$0.16	U4	1
22-28-4030	\$0.05	X1, X12, X14	3
5445928	N/A	X2	1
5445892	\$0.22	X3	1
BORNE_FIO_EIA	N/A	X4, X5, X6, X7, X8, X9, X10, X11	8
22-28-4020	\$0.03	X13, X15	2