

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DHOUGLAS EMANOEL STANULA NOGUEIRA

GIOVANI SPERANDIO DE MORAES

**CONVERSOR INDIRETO CA-CA PROGRAMÁVEL PARA TESTES DE
EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS**

CURITIBA

2024

**DHOUGLAS EMANOEL STANULA NOGUEIRA
GIOVANI SPERANDIO DE MORAES**

**CONVERSOR INDIRETO CA-CA PROGRAMÁVEL PARA TESTES DE
EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS**

Programmable AC-AC Indirect Converter for Electronic Equipment Testing

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.

**DHOUGLAS EMANOEL STANULA NOGUEIRA
GIOVANI SPERANDIO DE MORAES**

**CONVERSOR INDIRETO CA-CA PROGRAMÁVEL PARA TESTES DE
EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS**

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: 01/07/2024

Lucas Sangoi Mendonça
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Luciane Agnoletti dos Santos Pedotti
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Valmir de Oliveira
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

**CURITIBA
2024**

Dedicamos esse trabalho às nossas famílias,
por todo o carinho e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente à Deus, por nos ajudar a concluir mais essa etapa da vida, Ele nos deu forças, saúde e, principalmente, a vida.

Agradecemos ao nosso orientador Prof. Dr. Lucas Sangoi Mendonça, pela paciência, auxílio e pela confiança na qualidade de nosso trabalho.

Agradecemos às nossas famílias, especialmente aos pais por todo o apoio e carinho para que pudéssemos concluir a graduação com tranquilidade.

E agradecemos também à todos os amigos que fizemos durante essa caminhada, por toda a parceria e carinho, principalmente nos momentos difíceis.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e implementação de um conversor indireto CA-CA programável, projetado para simular diversas condições da rede elétrica. Através da programação de diferentes níveis de tensão e frequência, o equipamento é capaz de replicar situações normais e adversas, como variações e distúrbios na rede elétrica, permitindo a realização de testes de validação em produtos eletrônicos. Esses testes são essenciais para garantir que os produtos atendam às normas regulamentadoras e operem de forma confiável em diferentes configurações de distribuição de energia elétrica. O projeto se inicia com o retificador trifásico de ponte completa, seguido de filtro capacitivo. Em seguida, essa corrente passa por um inversor monofásico de ponte completa, revertendo o processo, e convertendo a corrente contínua de volta para corrente alternada. Esse inversor utiliza uma ponte completa de transistores para gerar uma forma de onda senoidal, a qual é essencial para simular diferentes condições da rede elétrica. O conversor indireto CA-CA foi verificado experimentalmente considerando alimentação do inversor proveniente de uma fonte CC externa para testes em baixa tensão com 15 V e 60 V, e também alimentado pelo retificador trifásico para teste de 311 V.

Palavras-chave: conversor ca-ca; conversor ca-ca programável; inversor; retificador trifásico; scpi.

ABSTRACT

This work presents the development and implementation of a programmable indirect AC-AC converter designed to simulate various electrical grid conditions. By programming different voltage and frequency levels, the equipment is able to replicate normal and adverse situations, such as variations and disturbances in the electrical grid, allowing for validation tests on electronic products. These tests are essential to ensure that products comply with regulatory standards and operate reliably under different power distribution configurations. The converter includes a three-phase full-bridge rectifier, followed by a capacitive filter. A single-phase full-bridge inverter reverses the process and converts the DC back into AC. The inverter uses a transistor full-bridge to generate a sine wave, which is essential for simulating different electrical grid conditions. The indirect AC-AC converter was experimentally verified by considering low voltage levels of 15 V and 60 V from an auxiliary power supply. Furthermore, it was verified by supplying the inverter stage with 311 V from the designed three-phase rectifier.

Keywords: ac-ac converter; programmable ac-ac converter; inverter; three-phase rectifier; scpi.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama geral da conversão indireta CA-CA trifásica para monofásica.	16
Figura 2 – Retificador trifásico ponte completa a diodo com carga R.	25
Figura 3 – Forma de onda da tensão de saída do retificador trifásico a diodo para carga resistiva.	26
Figura 4 – Forma de onda da tensão de saída do retificador trifásico a diodo com filtro capacitivo.	27
Figura 5 – Inversor ponte completa.	28
Figura 6 – Circuito para modulação PWM unipolar.	29
Figura 7 – Formas de onda para modulação PWM unipolar.	30
Figura 8 – Fluxograma do projeto.	33
Figura 9 – Conversor indireto CA-CA baseado em retificador trifásico ponte completa a diodo e inversor ponte completa.	34
Figura 10 – Conversor indireto CA-CA simulado no PSIM.	37
Figura 11 – Resultado de simulação para tensão de linha v_{ab} e tensão v_{D1} no diodo D_1 .	37
Figura 12 – Resultado de simulação para modulação do braço 1 do inversor ponte completa.	38
Figura 13 – Resultado de simulação para modulação do braço 2 do inversor ponte completa.	38
Figura 14 – Resultado de simulação para tensão antes do filtro v_{de} e depois do filtro v_L .	39
Figura 15 – Módulo EGS002.	43
Figura 16 – Modificações no módulo EGS002. (a) Sem chip. (b) Com fios. (c) Parte traseira.	44
Figura 17 – Esquemático da placa fonte.	45
Figura 18 – Esquemático da placa principal.	46
Figura 19 – Layout da PCI da fonte. (a) Fonte <i>top</i> . (b) Fonte <i>bottom</i> .	47
Figura 20 – Renderização 3D da placa fonte.	47
Figura 21 – Layout da PCI principal. (a) Principal <i>top</i> . (b) Principal <i>bottom</i> .	48
Figura 22 – Renderização 3D da placa principal.	48

Figura 23 – Modelo mecânico para impressão 3D. (a) Base . (b) Cantoneira. (c) Frente. (d) Traseira.	49
Figura 24 – PCI principal fabricada. (a) Principal <i>top</i> . (b) Principal <i>bottom</i>	51
Figura 25 – PCI fonte fabricada. (a) Fonte <i>top</i> . (b) Fonte <i>bottom</i>	51
Figura 26 – Protótipo pronto da placa principal.	52
Figura 27 – Protótipo pronto da placa fonte.	53
Figura 28 – Captura de tela do programa de interface SCPI.	55
Figura 29 – Sinais de acionamento dos <i>gate-drivers</i>	56
Figura 30 – <i>Dead time</i> com <i>trigger</i> na borda de subida do canal 1.	57
Figura 31 – <i>Dead time</i> com <i>trigger</i> na borda de descida do canal 1.	57
Figura 32 – Sinal V_{GE} chave 1 - 15 V.	58
Figura 33 – Sinal V_{GE} chave 3 - 15 V.	58
Figura 34 – Sinal V_{GE} chave 2 - 15 V.	59
Figura 35 – Sinal V_{GE} chave 4 - 15 V.	59
Figura 36 – Tensão V_{CE} chave 1 com circuito alimentado por 15 V.	60
Figura 37 – Tensão V_{CE} chave 3 com circuito alimentado por 15 V.	60
Figura 38 – Tensão V_{CE} chave 2 com circuito alimentado por 15 V.	61
Figura 39 – Tensão V_{CE} chave 4 com circuito alimentado por 15 V.	61
Figura 40 – Tensões da saída do inversor, quando alimentado por 15 V, antes (canal 2) e depois (canal 1) do filtro, sem carga conectada à saída.	62
Figura 41 – Tensões da saída do inversor, quando alimentado por 15 V, antes (canal 2) e depois (canal 1) do filtro, com carga conectada à saída.	62
Figura 42 – Tensões da saída do inversor, quando alimentado por 60 V, antes (canal 2) e depois (canal 1) do filtro, sem carga conectada à saída.	63
Figura 43 – Tensões da saída do inversor, quando alimentado por 60 V, antes (canal 2) e depois (canal 1) do filtro, com carga conectada à saída.	64
Figura 44 – Foto tirada com câmera térmica na fase de testes.	64
Figura 45 – Tensão V_{CE} chave 1 com circuito alimentado por 60 V.	65
Figura 46 – Tensão V_{CE} chave 3 com circuito alimentado por 60 V.	65
Figura 47 – Tensão V_{CE} chave 2 com circuito alimentado por 60 V.	66
Figura 48 – Tensão V_{CE} chave 4 com circuito alimentado por 60 V.	66

Figura 49 – FFT da saída do circuito quando alimentado por 60 V com carga de 2300 Ω.	67
Figura 50 – Medição da tensão de linha V_{ab} no canal 1 e queda de tensão em V_{D1} no canal 2.	68
Figura 51 – Tensão de saída filtrada do retificado.	69
Figura 52 – <i>Ripple</i> na saída filtrada do retificador com carga de 10 kΩ.	69
Figura 53 – Queda de tensão em cima do NTC no momento de energização do circuito.	70
Figura 54 – Tensão de saída do conversor CA-CA operando em condições nominais de tensão e frequência.	71
Figura 55 – Saída do inversor antes do filtro de saída, com circuito operando em condições nominais de tensão e frequência.	71
Figura 56 – Teste acendendo uma lâmpada de 7 W com o projeto conversor CA-CC-CA.	72
Figura 57 – Protótipo final do conversor CA-CA indireto. (a) Vista da frente. (b) Vista de trás.	73
Figura 58 – Protótipo final com lâmpada e USB conectados.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações do conversor CA-CC-CA.	34
Tabela 2 – Especificações do filtro capacitivo.	36
Tabela 3 – Resultados de simulação.	39
Tabela 4 – Componentes Comerciais.	42
Tabela 5 – Descrição dos comandos SCPI implementados.	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
API	Interface de Programação de Aplicativos, do inglês <i>Application Programming Interface</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
ASIC	Circuito Integrado Específico de Aplicação, do inglês <i>Application-Specific Integrated Circuit</i>
BJT	Transistores Bipolares de Junção, do inglês <i>Bipolar Junction Transistor</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
EDA	Automação de <i>Design</i> Eletrônico, do inglês <i>Electronic Design Automation</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FP	Fator de Potência
GND	<i>Ground</i> , do inglês <i>Terra</i>
GPB	<i>General Purpose Interface Bus</i>
HTR	Retificadores Trifásicos Híbridos, do inglês <i>Hybrid Three-Phase Rectifiers</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada, do inglês <i>Insulated-Gate Bipolar Transistors</i>
IoT	Internet das Coisas, do inglês <i>Internet of Things</i>
IPS	<i>Interruptible Power Supply</i>
MOSFET	Transistores de Efeito de Campo de Metal-Óxido-Semicondutor, do inglês <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
NILM	Monitoramento Não Intrusivo de Carga, do inglês <i>Non-Intrusive Load Monitoring</i>

NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
PCI	Placa de Circuito Impresso
PTH	<i>Pin Through Hole</i>
PWM	Modulação por Largura de Pulso, do inglês <i>Pulse Width Modulation</i>
RAE	Automação de Energia Renovável, do inglês <i>Renewable Automation Energy</i>
SCPI	<i>Standard Commands for Programmable Instruments</i>
SDN	Rede Definida por <i>Software</i> , do inglês <i>Software Defined Networking</i>
SEPIC	<i>Single-Ended Primary Inductor Converter</i>
SMD	<i>Surface Mounted Device</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SPWM	Modulação por Largura de Pulso Senoidal, do inglês <i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>
THD	Distorção Harmônica Total, do inglês <i>Total Harmonic Distortion</i>
UHTR	Retificadores Unidirecionais Híbridos Trifásicos, do inglês <i>Unidirectional Hybrid Three-Phase Rectifiers</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VFD	Acionamento de Frequência Variável, do inglês <i>Variable Frequency Drive</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Considerações iniciais	15
1.2	Objetivos	17
1.2.1	Objetivo geral	17
1.2.2	Objetivos específicos	17
1.3	Justificativa	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Revisão da literatura	19
3	REFERENCIAL TEÓRICO	24
3.1	Retificador trifásico ponte completa não controlado	24
3.2	Inversor ponte completa	27
3.3	Modulação por largura de pulso senoidal unipolar	28
3.4	Circuitos de <i>gate-driver</i> para <i>high-side</i> e <i>low-side</i>	30
3.5	<i>Electronic design automation</i>	31
3.6	Protocolo Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI)	32
4	METODOLOGIA	33
4.1	Diagrama de funcionamento	33
4.2	Especificações de projeto	34
4.3	Projeto do inversor	35
4.4	Filtro capacitivo do retificador trifásico	36
4.5	Resultados de simulação	36
4.6	Escolha dos componentes	39
4.7	Placa de sinais e <i>gate-driver</i>	43
4.8	Diagramas esquemáticos	44
4.9	<i>Layout</i> da placa de circuito impresso	46
4.10	Projeto mecânico	49
4.11	Algoritmos para controle	50
5	RESULTADOS	51
5.1	Montagem das placas de circuito impresso	51

5.2	Programação do Arduino	53
5.3	Programação da interface	54
5.4	Testes iniciais em baixa tensão	55
5.5	Testes do retificador trifásico	67
5.6	Testes do projeto completo	70
5.7	Protótipo final	72
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
6.1	Trabalhos futuros	74
	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A eletrônica de potência concentra seu estudo na conversão eficiente de energia elétrica, o que inclui a adequação da Corrente Alternada (CA) para Corrente Contínua (CC), por meio dos retificadores, e o processo contraparte, contínua para alternada, recorrendo aos inversores. Ademais, é possível adequar níveis de tensão CC por meio dos conversores CC-CC e mudança da frequência e/ou amplitude em tensão CA com os cicloconversores CA-CA (ERICKSON, 1997).

Considerando os processos de conversão de energia elétrica supracitados, diversas aplicações são alvos do uso dos conversores de potência. No processo de retificação, usualmente busca-se alimentar um equipamento em corrente contínua por meio da rede elétrica. Dessa forma, é necessária a conversão CA-CC. Considera-se como uma das principais aplicações os adaptadores e carregadores portáteis usados em *smartphones* e *notebooks* (ONO, 2019). No processo oposto, ou seja, conversão CC-CA, utiliza-se um inversor. Uma das aplicações de destaque desse sistema é a geração de energia fotovoltaica, uma vez que, os painéis solares fornecem tensão em corrente contínua, esse tipo de energia elétrica deve ser adequada para corrente alternada visando a conexão com a rede elétrica (WU; CHOU, 2014). Uma das topologias de inversores é o inversor ponte completa que converte a corrente contínua para corrente alternada por meio da utilização de transistores (geralmente do tipo Transistor Bipolar de Porta Isolada, do inglês *Insulated-Gate Bipolar Transistors* (IGBT) ou Transistores de Efeito de Campo de Metal-Óxido-Semicondutor, do inglês *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET)), o inversor gera uma onda de formato quadrado chaveado ou senoidal. Essa forma de onda é essencial para simular diferentes condições da rede elétrica, permitindo testes rigorosos em produtos eletrônicos (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2002). Um dos desafios no projeto dos inversores é o comando das chaves. Uma das formas de realizar esse acionamento é por meio da Modulação por Largura de Pulso, do inglês *Pulse Width Modulation* (PWM), que é amplamente utilizada em eletrônica de potência para controlar a potência entregue a cargas. No contexto do projeto, a Modulação por Largura de Pulso Senoidal, do inglês *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) é uma modificação da modulação PWM convencional. Ela visa gerar uma forma de onda senoidal na saída do inversor, permitindo a conexão de cargas em corrente alternada, como motores de indução. Através da variação do *duty cycle*, a modulação PWM senoidal cria uma forma de onda senoidal, adequada para acionar cargas CA (RASHID, 2014).

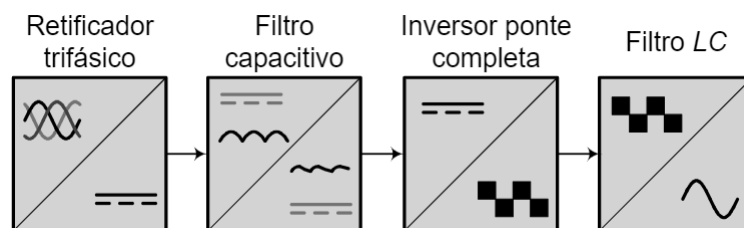
Na conversão CA-CA, é possível modificar a frequência e a amplitude de formas de onda senoidais. Uma das formas de obter uma topologia CA-CA, é conectar um retificador CA-CC em um inversor CC-CA, conhecido como conversor indireto CA-CA. Esse tipo de sistema é encontrado, por exemplo, na geração eólica de energia, na qual, a energia cinética no movimento das

pás de turbinas eólicas é convertida em energia elétrica em corrente alternada, que é convertida para corrente contínua por meio de um retificador e novamente para alternada com o uso do inversor. Esse processo permite transformar a tensão trifásica obtida no gerador para monofásica visando a conexão com a rede elétrica (YARAMASU *et al.*, 2015). Nesse processo, os retificadores trifásicos são dispositivos essenciais. Um exemplo é a configuração de ponte completa com diodos, o conversor retifica cada fase da corrente trifásica, resultando em uma tensão contínua pulsante. Essa saída, embora não ideal, serve como base para o próximo estágio, o inversor (RASHID, 2014).

Os testes de equipamentos na rede elétrica são essenciais para garantir a confiabilidade e a segurança dos dispositivos em ambientes reais de operação. Esses testes simulam diversas condições adversas que os equipamentos podem encontrar ao serem conectados à rede elétrica, como variações de tensão, picos de corrente, quedas de tensão e interrupções momentâneas. A realização desses ensaios é fundamental para verificar se os dispositivos cumprem com normas regulamentadoras, como as estabelecidas pela *International Electrotechnical Commission* (IEC) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que especificam critérios rigorosos de desempenho e imunidade a distúrbios elétricos. Em um mercado cada vez mais exigente e regulamentado, a validação dos equipamentos e dispositivos por meio de testes na rede elétrica não só assegura a conformidade legal, mas também aumenta a confiança dos consumidores e a durabilidade dos produtos (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2002). Nesse âmbito, o presente trabalho visa o desenvolvimento de um conversor indireto CA-CA programável, a fim de servir como base para esses testes realizados em equipamentos eletrônicos, conseguindo simular algumas das situações de variações na rede, mas tendo como foco principal a complexidade no desenvolvimento do hardware desse conversor, mesmo não podendo ser usado para validar um equipamento ao todo antes de sua regulamentação.

O diagrama geral da conversão usada no sistema proposto é mostrado na Figura 1. Observa-se que, a alimentação considerada será a rede trifásica. Busca-se a implementação de um retificador trifásico que será conectado em um filtro capacitivo. Dessa forma, considerando a rede trifásica com tensão eficaz de 127 V na fase, é possível obter uma tensão de saída retificada de aproximadamente 311 V. Essa tensão será usada como alimentação de um inversor ponte completa que, por meio de um filtro *LC*, fornecerá a tensão monofásica em corrente alternada.

Figura 1 – Diagrama geral da conversão indireta CA-CA trifásica para monofásica.



Fonte: Autoria própria (2024).

1.2 Objetivos

Esta seção visa expor os objetivos gerais e específicos do presente trabalho de conclusão de curso. Os objetivos estão alinhados com a área de eletrônica de potência, especialmente no projeto e implementação de um conversor indireto CA-CA.

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo construir um conversor indireto CA-CA programável, que seja capaz de simular algumas variações na rede elétrica, através de ajustes nos parâmetros de tensão e frequência de saída monofásica.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um *hardware* para realizar a integração do retificador com o inversor, bem como filtro capacitivo, a fim de resultar no conversor de corrente alternada programável;
- Elaborar um *software* para realizar o envio de comandos para o módulo embutido no conversor;
- Projetar um protótipo do dispositivo, considerando a integração de todos os componentes, a fim de posicioná-los da forma mais conveniente para a execução dos testes funcionais e também visando o produto final;
- Apresentar os resultados dos testes através dos dados coletados a partir de um osciloscópio, analisando o comportamento do protótipo.

1.3 Justificativa

O desenvolvimento de um conversor indireto CA-CA programável para testes de equipamentos eletrônicos surge como uma resposta à demanda crescente por soluções acessíveis e flexíveis no campo de testes elétricos industriais. A necessidade de realizar testes de validação de produtos em condições simuladas de rede elétrica tornou-se crucial, dada a diversidade de configurações elétricas encontradas em diferentes regiões e as variações nas condições da rede ao longo do tempo. Este projeto visa proporcionar uma alternativa economicamente viável às opções comerciais existentes, cujos altos custos muitas vezes representam um obstáculo para empresas de menor porte. Mas a depender da complexidade da rotina de testes necessária para validar o equipamento, seria necessário um equipamento mais robusto.

O projeto possui flexibilidade e programabilidade, permitindo a simulação de diferentes condições de rede elétrica, o que é essencial para validar a robustez de produtos em face de variações nas condições elétricas.

O projeto se destaca principalmente pela implementação do projeto de um inversor ponte completa em conjunto com um retificador trifásico ponte completa não controlado, bem como o filtro capacitivo. Sendo assim um desafio quanto à sua complexidade, exigindo um conhecimento técnico avançado para a implementação do conversor indireto CA-CA, interface de controle e *firmware*. Além disso, em comparação com algumas opções comerciais de alta especificação, o projeto pode ter limitações em termos de potência e precisão, especialmente considerando que a tensão máxima de saída é igual à tensão de entrada usando a topologia proposta.

Os testes de eletrônicos na rede elétrica são importantes para garantir que os dispositivos funcionem de maneira segura e eficaz em diversas condições de uso. Esses ensaios são necessários para identificar como os equipamentos respondem a perturbações elétricas comuns, como surtos de tensão, quedas de energia e interferências eletromagnéticas. A norma IEC 61000-4-11, por exemplo, especifica os procedimentos de ensaio de imunidade a quedas de tensão e interrupções curtas, assegurando que os dispositivos possam resistir a esses eventos sem falhas significativas (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2004). Testes rigorosos também são cruciais para cumprir requisitos de eficiência energética e durabilidade, especialmente em produtos de iluminação. A norma IEC 60969, que trata de lâmpadas fluorescentes compactas, detalha os testes de desempenho e durabilidade para garantir que essas lâmpadas não só forneçam luz de maneira eficiente, mas também tenham uma vida útil longa. Através desses testes, os fabricantes podem melhorar o projeto dos produtos, aumentar a satisfação do consumidor e garantir a conformidade com regulamentos de segurança e desempenho (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2001).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Revisão da literatura

A rede elétrica em corrente alternada é amplamente usada na transmissão, distribuição e fonte de alimentação para diversos equipamentos em diferentes níveis de tensão. Considerando também, o uso de conversores como interface entre a rede e carga, emular as características da rede elétrica, visando testes de faixa de tensão, compatibilidade, falta, entre outros, é um desafio explorado na literatura. Como mostrado no trabalho de Ma *et al.* (2021), emular a rede elétrica inclui o desenvolvimento de fontes de tensão CA programáveis que visam fornecer sinais com diferentes características, tais como: rede em situação normal, tensão desbalanceada, afundamento de tensão, harmônicos de alta frequência, entre outras condições. Ademais, a definição dos estágios de processamento de energia, escolha das topologias, dimensionamento de componentes e projeto de conversores, são tópicos de interesse no desenvolvimento de uma plataforma para testes de equipamentos conectados na rede elétrica.

O trabalho de Mezaroba *et al.* (2007) apresenta o desenvolvimento de uma fonte de alimentação CA que possibilita a variação de frequência e amplitude e introdução de componentes harmônicos no sinal de saída. A fonte desenvolvida é alimentada pela rede monofásica e possui um retificador conectado com um conversor CC-CC isolado de alta frequência que fornece tensão de barramento regulada e ajustável. Na sequência, um inversor é utilizado para prover tensão em corrente alternada. Para o estágio de conversão CC-CC, a topologia escolhida no trabalho citado inclui característica de comutação suave em tensão, visando reduzir as perdas e operação em alta frequência. Para validação da fonte, o trabalho apresentou uma análise harmônica comparativa da tensão original da rede com a produzida pela fonte por meio de resultados experimentais.

Os tópicos de modelagem, projeto e implementação de um inversor monofásico conectado à rede elétrica são apresentados por Dias (2019) considerando aplicação fotovoltaica. O inversor supracitado possui como principais especificações: tensão de entrada de 200 V, potência nominal de 900 W, 12 kHz de frequência de chaveamento e tensão eficaz de saída de 127 V. O trabalho aborda uma aplicação considerando um painel fotovoltaico como fonte de energia e uma estrutura que inclui um conversor *Boost* para prover a tensão de um *link* CC que é utilizado como alimentação do inversor. Por fim o inversor é conectado na rede. Apesar do trabalho elencar diferentes estágios de conversão, os resultados experimentais foram realizados apenas no estágio do inversor. Considerando o inversor operando conectado na rede, o trabalho mostrou que o inversor é capaz de injetar corrente eficaz de 6,48 A, resultando em 788,6 W de potência gerada, ou seja, 87,6 % da potência nominal.

Considerando aplicação de geração distribuída, o trabalho de Natividade (2019) mostra o desenvolvimento de um inversor com controle de corrente. O inversor possui um filtro indutivo e a implementação do sistema de controle foi realizada em um microcontrolador SAM3X8E da

Atmel. A modulação utilizada foi a PWM bipolar com frequência da onda portadora de 5 kHz. O trabalho apresenta como principal resultado experimental a corrente de saída obtida para uma referência de 2 A.

O artigo de Gonçalves *et al.* (2021) aborda uma solução inovadora no campo dos Retificadores Trifásicos Híbridos, do inglês *Hybrid Three-Phase Rectifiers* (HTR). O estudo realiza uma revisão sistemática da literatura, analisando 34 artigos científicos que exploram as configurações e desempenhos dos HTR, que combinam dois retificadores distintos para produzir uma corrente de entrada senoidal ou multinível. Os resultados indicam que os Retificadores Unidirecionais Híbridos Trifásicos, do inglês *Unidirectional Hybrid Three-Phase Rectifiers* (UHTR) são eficazes na distribuição de potência entre os retificadores, especialmente quando empregam topologias de conversor *Single-Ended Primary Inductor Converter* (SEPIC) ou VIENNA, resultando em correntes de entrada com baixa Distorção Harmônica Total, do inglês *Total Harmonic Distortion* (THD) e alto Fator de Potência (FP). Esses achados são significativos para o avanço da tecnologia de retificação e sua aplicação em sistemas de energia, cumprindo com os padrões internacionais e contribuindo para a sustentabilidade energética.

O trabalho de Mamun *et al.* (2013) aborda a crise energética atual e a necessidade de inversores de classificação de potência para operar aparelhos elétricos e eletrônicos de forma eficiente. A maioria dos *Uninterruptible Power Supply* (UPS) ou *Interruptible Power Supply* (IPS) disponíveis comercialmente são inversores de onda quadrada ou quase onda quadrada, que podem danificar dispositivos eletrônicos devido ao conteúdo harmônico. Inversores de onda senoidal disponíveis são caros e com saída de qualidade questionável. Para obter uma onda senoidal pura, é necessário aplicar a técnica de SPWM, que é simples e amplamente utilizada no controle de motores e aplicações de inversores. O artigo propõe uma abordagem alternativa que utiliza um microcontrolador, especificamente o PIC16F73, que é de baixo custo e reduz a complexidade do circuito para o inversor de ponte completa de fase única. Este microcontrolador possui um circuito de controle de tempo morto integrado. Como conclusão, o trabalho implementou um inversor PWM de fase única com o microcontrolador PIC16F73 e o IC de *driver* TLP250, resultando em um inversor PWM senoidal com menor conteúdo harmônico, baixo custo, simplicidade e compactação, adequado para aplicações de baixa potência e baixa tensão.

O artigo de Hannon, Yan e Jin (2016) apresenta o DSSnet, uma plataforma de teste que combina um simulador de sistema de energia elétrica e um emulador de rede baseado em Rede Definida por *Software*, do inglês *Software Defined Networking* (SDN). O DSSnet é projetado para modelar e simular fluxos de energia, redes de comunicação e aplicativos de controle de rede inteligente, permitindo avaliar o impacto das aplicações na rede inteligente. A introdução destaca a importância das tecnologias de comunicação modernas para o desenvolvimento de *microgrids* inteligentes, que são essenciais para a integração bem-sucedida com a rede elétrica principal, trazendo benefícios econômicos e ambientais significativos. O artigo também enfatiza os desafios de incorporar novas tecnologias em sistemas de controle críticos, como a necessidade de sincronização entre o simulador de energia e o emulador baseado em contêineres.

Como conclusão, os autores indicam que trabalhos futuros incluirão a exploração de métodos para extrair antecipação da emulação para melhorar o desempenho do sistema híbrido, além do desenvolvimento de uma versão distribuída do *testbed* para experimentos em larga escala e a investigação de aplicações SDN inovadoras para segurança e resiliência de *microgrids*.

O trabalho de Jamil, Sharma e Singh (2015) aborda a detecção e classificação de falhas em sistemas de transmissão de energia elétrica utilizando redes neurais artificiais. O estudo utiliza correntes e tensões trifásicas de uma extremidade como entradas para um sistema proposto que emprega uma rede neural *feedforward* com algoritmo de retropropagação para analisar cada uma das três fases envolvidas no processo. Com uma análise detalhada variando o número de camadas ocultas, os resultados da simulação concluíram que o método baseado em rede neural é eficiente na detecção e classificação de falhas em linhas de transmissão, apresentando desempenho satisfatório. O método proposto pode ser estendido para a rede de distribuição do sistema de energia, e as várias simulações e análises de sinais são realizadas no ambiente MATLAB®.

O estudo de Nurhaida *et al.* (2019) explora o uso de motores de indução trifásicos, que são predominantes na indústria devido à sua simplicidade, robustez, baixo custo e facilidade de manutenção. Tradicionalmente operados em velocidade fixa, a pesquisa destaca os benefícios da operação em velocidade variável, como eficiência aprimorada, economia de energia e redução de custos. O controle de velocidade variável é alcançado por meio de um Acionamento de Frequência Variável, do inglês *Variable Frequency Drive* (VFD), que ajusta a frequência da corrente alternada trifásica fornecida ao estator do motor. O artigo detalha a implementação de um circuito experimental que gera saída de frequência variável para tensão de linha a neutro em três configurações de frequência diferentes, demonstrando a viabilidade de gerar o sinal de comutação SPWM para uma aplicação de motor trifásico usando um algoritmo de comutação criado via MATLAB/SIMULINK. A limitação identificada é a vulnerabilidade do circuito a picos de tensão inesperados, sugerindo como trabalho futuro a melhoria do circuito para resistir a tais contratempos elétricos.

O artigo de Chandramohan *et al.* (2017) discute a gestão inteligente de sistemas de energia, enfatizando a importância da utilização conjunta de corrente e a minimização de perdas de energia durante a transmissão. A tecnologia de redes inteligentes é considerada essencial para a proteção do consumidor e a eficiência energética. O estudo apresenta um sistema de automação residencial baseado em Arduino e Wi-Fi, controlável por um aplicativo Android. O sistema proposto utiliza um servidor *web micro* baseado em Arduino, que é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto, flexível e fácil de usar, com 54 pinos de entrada/saída digital. A interface Wi-Fi no Arduino, através dos pinos *Serial Peripheral Interface* (SPI), e relés de baixa tensão são usados para integrar dispositivos com funcionalidade de comutação. O sensor de temperatura LM35 é utilizado para controlar o ambiente de uma casa inteligente. A conclusão do artigo destaca a implementação de uma nova topologia de circuito para monitoramento e controle de dispositivos elétricos domésticos, utilizando um *smartphone* Android e transceptor

sem fio, proporcionando uma solução acessível e flexível para serviços de automação residencial e segurança.

O artigo de Makonin, Wang e Tumpach (2018) apresenta o conjunto de dados de Automação de Energia Renovável, do inglês *Renewable Automation Energy* (RAE) da floresta tropical para auxiliar pesquisadores de rede inteligente a testar seus algoritmos que utilizam dados de medidores inteligentes. A primeira versão do RAE contém dados de 1 Hz (medidores principais e submedidores) de duas casas residenciais. Além dos dados de energia, inclui dados ambientais e de sensores do termostato da casa. Os dados do submedidor de uma das casas incluem capturas da bomba de calor e da suíte de aluguel, o que é de interesse para as empresas de energia. O artigo também demonstra uma análise do consumo de energia de cada casa e exemplifica como o RAE pode ser usado para testar algoritmos de Monitoramento Não Intrusivo de Carga, do inglês *Non-Intrusive Load Monitoring* (NILM). O conjunto de dados é relevante para medir a precisão dos algoritmos de rede inteligente e seu desempenho em situações reais, sendo crucial testar a precisão com conjuntos de dados do mundo real.

O trabalho de Stolojescu-Crisan, Crisan e Butunoi (2021) discute um sistema de automação residencial inteligente baseado na Internet das Coisas, do inglês *Internet of Things* (IoT). O sistema, chamado qToggle, utiliza uma poderosa e flexível Interface de Programação de Aplicativos, do inglês *Application Programming Interface* (API) para interconectar sensores, atuadores e outras fontes de dados com o objetivo de realizar múltiplas automações domésticas. Os dispositivos usados pelo qToggle são geralmente sensores ou atuadores com conexão de rede e implementam a API qToggle. A maioria dos dispositivos é baseada em chips ESP8266/ESP8285 e/ou placas Raspberry Pi. Foi desenvolvido um aplicativo para *smartphones* que permite aos usuários controlar uma série de eletrodomésticos e sensores. O sistema qToggle é amigável, flexível e pode ser expandido com diferentes dispositivos e complementos.

Também é possível encontrar conversores patenteados para testes de equipamentos. Um dispositivo para testes de equipamentos em alta tensão é descrito na patente de Annowsky e Thiede (2020). A patente descreve a vantagem dos conversores estáticos em contraste com os conversores rotativos e o objetivo de um conversor de frequência de produzir tensão alternada senoidal com fator de distorção menor que 5 %. A patente reivindica um dispositivo para teste especialmente voltado para transformadores de potência e indutores. A configuração proposta utiliza um retificador trifásico conectado em um inversor trifásico. A saída do inversor é ligada em um filtro que possui na sua saída uma configuração de capacitores conectados em estrela. Essa estrutura permite a filtragem por meio da separação do potencial do conversor com a carga teste, por exemplo, transformadores. Já a patente de Li (2019) tem como objetivo fornecer uma fonte CA programável que monitora dados de potência e aciona o fechamento e abertura da distribuição de energia. A patente, além de reivindicar a parte mecânica do compartimento da fonte, também elenca uma placa eletrônica com o circuito de potência, sistema de detecção de corrente e conjunto de chaves eletromagnéticas.

Em última análise, o desenvolvimento de um conversor indireto CA-CA hasteia desafios no projeto dos sistemas de retificação e inversão. Não somente no estágio de potência, mas também nos circuitos de comando das chaves, especialmente visando o teste de equipamentos eletrônicos. Com base nos tópicos descritos nos trabalhos dessa revisão bibliográfica, o próximo Capítulo apresenta os conceitos teóricos necessários para o desenvolvimento do trabalho.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, serão apresentados os fundamentos e tecnologias dos conversores estáticos de eletrônica e de potência utilizados nesse trabalho. Ademais, as tecnologias utilizadas para desenvolvimento de *hardware* e *software* serão discutidas.

Inicia-se com uma análise do retificador trifásico ponte completa. Serão exploradas a operação, características e o papel que desempenha na conversão eficiente de energia.

Posteriormente, o estudo do inversor ponte completa será apresentado. Busca-se a discussão do processo de inversão de tensão em corrente contínua para alternada e as implicações dessa topologia. Uma vez que, os transistores são acionados em uma sequência de ativação, a SPWM será discutida.

Uma seção é dedicada também aos circuitos de *gate-driver* para *high-side* e *low-side*. Destaca-se sua importância no acionamento dos transistores em configurações de alta e baixa tensão, respectivamente, e como eles são cruciais para o desempenho e segurança dos sistemas eletrônicos.

Em seguida, será apresentado o campo da automação de *design* eletrônico (Automação de *Design* Eletrônico, do inglês *Electronic Design Automation* (EDA)), explorando as ferramentas e metodologias que transformam os conceitos eletrônicos em projetos práticos e fabricáveis, enfatizando o processo desde o desenho do circuito esquemático até a produção final das Placa de Circuito Impresso (PCI)s.

Por fim, será abordado sobre o protocolo *Standard Commands for Programmable Instruments* (SCPI). Será discutido como ele padroniza a comunicação com instrumentos programáveis de teste e medição, permitindo uma automação robusta e eficiente dos processos de teste.

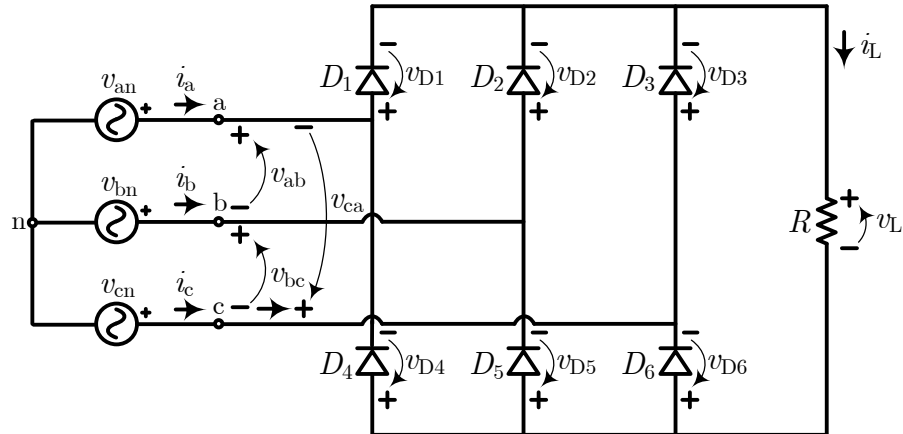
3.1 Retificador trifásico ponte completa não controlado

Um retificador trifásico de ponte completa não controlado com carga resistiva é um circuito utilizado para converter tensão em corrente alternada trifásica em corrente contínua. Este tipo de retificador é amplamente utilizado em aplicações de Eletrônica de Potência devido à capacidade de fornecer uma saída de CC com baixa ondulação. Seu funcionamento básico consiste na utilização de seis diodos, que são dispostos em uma configuração de ponte. A configuração permite que, durante cada ciclo de 60° da alimentação CA, dois diodos conduzam simultaneamente, criando um caminho para a corrente fluir do lado positivo para o lado negativo da saída CC. Em cada intervalo de 60° do ciclo de alimentação CA, um novo par de diodos começa a conduzir, resultando em seis pulsos de tensão por ciclo. Isso pode ser observado na Figura 3. A saída CC apresenta menor ondulação e não desce a zero em comparação com retificadores monofásicos, devido à sobreposição dos pulsos de tensão das três fases. A carga

resistiva recebe a tensão retificada, que é a tensão de pico das fases menos a queda de tensão nos diodos (RASHID, 2014).

A topologia de retificador trifásico com ponte completa a diodo é mostrada na Figura 2. Identifica-se a utilização de 6 diodos, D_1 , D_2 , D_3 , D_4 , D_5 e D_6 , e é caracterizada pela retificação das tensões de linha v_{ab} , v_{bc} e v_{ca} .

Figura 2 – Retificador trifásico ponte completa a diodo com carga R.



Fonte: Autoria própria (2024).

Cada diodo conduz por $\pi/3$ (60°). Dessa forma, a frequência de ondulação da tensão de saída será 6 vezes a frequência da rede, logo, 360 Hz. i_a , i_b e i_c denotam as correntes de linha.

Para análise das etapas de operação, pode-se avaliar quais diodos estão polarizados para cada intervalo de $\pi/3$ (60°). Por exemplo, de $\pi/6$ até $3\pi/6$, o diodo D_1 é diretamente polarizado pela tensão de fase v_{an} e o diodo D_5 por v_{bn} no seu ciclo negativo. Com os diodos D_1 e D_5 conduzindo, a tensão na carga será a tensão de linha v_{ab} descrita na Equação 1:

$$v_{ab} = \sqrt{3}V_m \sin(\omega t + 30^\circ) \text{ V}, \quad (1)$$

onde: V_m é a amplitude da tensão da rede e ω a frequência angular da rede.

A forma de onda da tensão na carga é mostrada na Figura 3, onde destacam-se também as três tensões de fase descritas pelas Equações de 2 até 4:

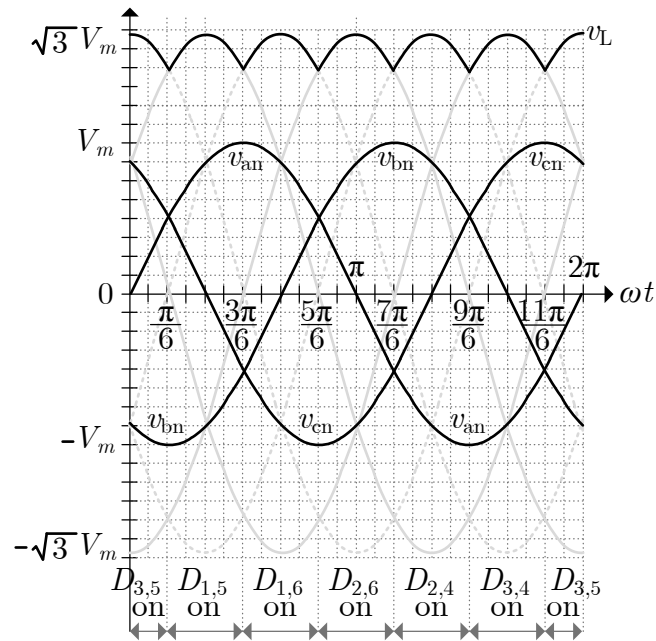
$$v_{an} = V_m \sin(\omega t) \text{ V}, \quad (2)$$

$$v_{bn} = V_m \sin(\omega t - 120^\circ) \text{ V} \quad (3)$$

e

$$v_{cn} = V_m \sin(\omega t - 240^\circ) \text{ V}. \quad (4)$$

Figura 3 – Forma de onda da tensão de saída do retificador trifásico a diodo para carga resistiva.



Fonte: Autoria própria (2024).

Ademais, a tensão v_L na carga é desenhada baseada nas linhas de gráfico que representam as tensões de linha. Dessa forma, observa-se a amplitude de uma tensão de fase como V_m e a amplitude de uma tensão de linha como $\sqrt{3}V_m$.

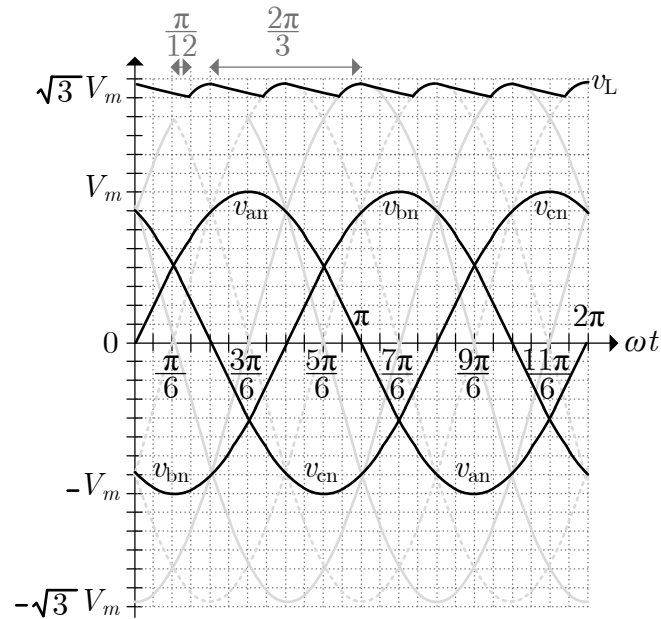
Comumente insere-se um filtro capacitivo em paralelo com a carga R . Dessa forma, o retificador terá etapas de carga e descarga de um capacitor C . Nas etapas de carga, a tensão de saída v_L terá formato das tensões de linha da rede. Já nas etapas de descarga, a tensão de saída será descrita por uma exponencial negativa com constante de tempo RC . Ao inserir o filtro capacitivo, a ondulação da tensão de saída é reduzida, porém, pela expressão mostrada na Equação 5, o fator de potência diminui devido à alteração do formato das correntes de linha. A Figura 4 apresenta a tensão de saída do retificador considerando a inserção do filtro capacitivo (RASHID, 2014).

O capacitor C de saída pode ser projetado por:

$$C = \frac{P_L}{6f(V_{C_{\max}}^2 - V_{C_{\min}}^2)}, \quad (5)$$

onde P_L é a potência ativa na carga, f a frequência da rede e $V_{C_{\max}}$ e $V_{C_{\min}}$ determinam a ondulação da tensão de saída.

Figura 4 – Forma de onda da tensão de saída do retificador trifásico a diodo com filtro capacitivo.



Fonte: Autoria própria (2024).

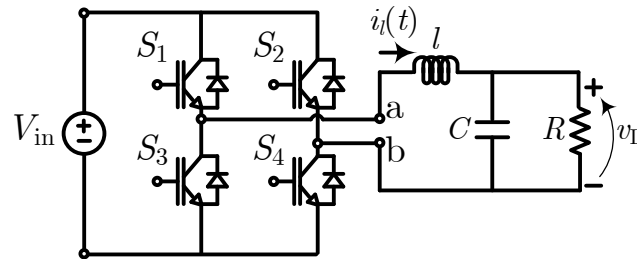
3.2 Inversor ponte completa

Um inversor ponte completa é um tipo de conversor CC-CA que utiliza dois braços, cada um com duas chaves. Essas chaves normalmente são MOSFETs ou IGBTs, que são controlados de forma a alternar a conexão da carga com a fonte de tensão CC, criando assim uma saída de tensão CA (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2002).

Cada braço do inversor é composto por duas chaves (S_1 , S_2 para o primeiro braço e S_3 , S_4 para o segundo braço, cada um com seus respectivos diodos em antiparalelo, com a função de tornar a tensão de saída unidirecional, evitando curtos-circuitos), como pode-se observar na Figura 5. Esses braços são também conhecidos como "Ponte H". A ordem de ativação das chaves é S_1 , S_4 e depois S_2 , S_3 havendo tempo morto entre as comutações para evitar curto-circuito. É utilizado também um filtro LC na saída do inversor para obter o sinal senoidal em baixa distorção, reduzindo as componentes harmônicas de alta frequência (BARBI, 2006).

O acionamento é sincronizado para criar uma onda de tensão CA com a frequência desejada. É importante notar que, a sequência de acionamento das chaves depende da técnica de modulação empregada.

Figura 5 – Inversor ponte completa.



Fonte: Autoria própria (2024).

As vantagens de utilizar o inversor de ponte completa são eficiência e flexibilidade, pois utiliza apenas uma fonte de tensão CC, o que simplifica o circuito e reduz custos, e também permite a modulação por dois ou três níveis, oferecendo versatilidade para diferentes aplicações.

O filtro LC pode ser projetado considerando a frequência de corte desejada f_c :

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (6)$$

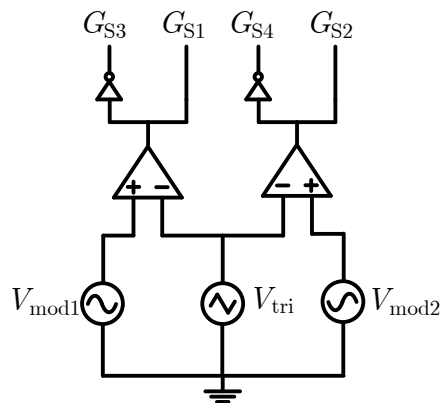
onde a escolha de f_c depende da frequência de chaveamento do inversor.

3.3 Modulação por largura de pulso senoidal unipolar

A modulação por largura de pulso (PWM) é uma técnica que varia a largura de pulso de um sinal quadrado em relação ao seu período. O período é o tempo necessário para que o sinal se repita, enquanto a largura é o tempo em que o sinal está em nível alto. Essa técnica é amplamente utilizada para controlar a potência fornecida a uma carga, seja ela um motor, um LED ou outro dispositivo eletrônico (RASHID, 2014).

Na modulação senoidal unipolar (SPWM), com circuito mostrado na Figura 6, o sinal modulante é uma onda senoidal, e a portadora é uma onda triangular ou de dente de serra de alta frequência, conforme pode-se observar na Figura 7. A largura dos pulsos é variada de acordo com a comparação entre as amplitudes de sinal modulante e da portadora. Isso resulta em uma série de pulsos com larguras que variam de forma senoidal ao longo do tempo. Todos os pulsos têm a mesma polaridade, diferentemente da modulação bipolar, onde os pulsos alternam entre positivo e negativo. Como os pulsos são todos da mesma polaridade, há menos estresse térmico nos dispositivos de comutação (RASHID, 2014).

Figura 6 – Circuito para modulação PWM unipolar.



Fonte: Autoria própria (2024).

A PWM unipolar é uma técnica de controle de inversores de tensão onde os pulsos gerados são sempre de mesma polaridade. Na modulação unipolar, os transistores são acionados de tal forma que a tensão na carga alterna entre o positivo da fonte de tensão CC e o ponto neutro.

Sobre o acionamento, G_{S1} é complementar de G_{S3} , o que significa que quando G_{S1} está conduzindo, G_{S3} está desligado, e vice-versa. O mesmo acontece com G_{S2} e G_{S4} , como pode ser observado na Figura 6.

Para evitar curtos-circuitos e garantir a operação adequada do inversor, as seguintes regras de acionamento devem ser seguidas:

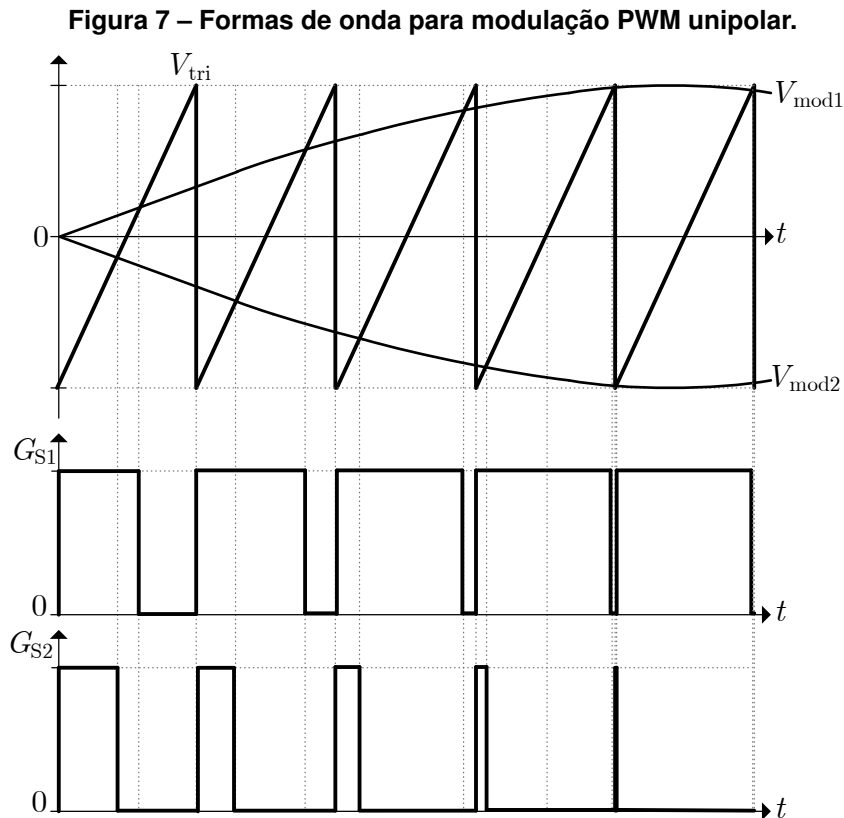
- Nunca acionar G_{S1} e G_{S3} ou G_{S2} e G_{S4} ao mesmo tempo;
- Garantir um pequeno intervalo de tempo entre o desligamento de uma chave e o acionamento da sua complementar (*dead time*);
- A sequência de acionamento deve ser sincronizada com a onda de referência para gerar a forma de onda desejada na saída.

Para medir a amplitude dos pulsos de tensão em relação à tensão máxima da fonte CC, é utilizado o índice de modulação. Ele pode ser dividido em dois parâmetros:

- Índice de Modulação em Amplitude (ma): Relaciona a amplitude da onda moduladora (onda senoidal) com a amplitude da onda portadora (onda quadrada);
- Índice de Modulação em Frequência (mf): É o quociente entre a frequência da portadora e a frequência fundamental do sinal de referência.

Esses índices determinam a forma da onda de saída do inversor e são ajustados para atender aos requisitos específicos da aplicação, como a qualidade da forma de onda e a eficiência do inversor.

Conforme a Figura 7, pode-se observar as regras de acionamento das chaves. Juntamente com o dente de serra, que é a onda triangular, tem as duas moduladoras em formato de seno (V_{mod1} e V_{mod2}). Quando a moduladora V_{mod1} que está no positivo é maior do que a triangular (V_{tri}), é enviado o sinal para acionar a chave G_{S1} , e o mesmo ocorre com a moduladora que está no negativo, ou seja, quando V_{mod2} é maior que V_{tri} , é enviado o sinal alto para acionar G_{S2} . A chave G_{S3} é o oposto de G_{S1} e G_{S4} oposto de G_{S2} .



Fonte: Autoria própria (2024).

A modulação senoidal unipolar é particularmente útil em aplicações onde a baixa distorção de onda de saída é crítica, como em inversores de frequência para acionamento de motores elétricos, onde se deseja uma onda senoidal pura para evitar ruído e desgaste.

3.4 Circuitos de *gate-driver* para *high-side* e *low-side*

Os *gate-drivers* são circuitos essenciais para acionar transistores de potência como MOSFETs e IGBTs em conversores. Eles são responsáveis por adaptar os sinais de controle, geralmente provenientes de um microcontrolador ou controlador PWM, para os níveis de tensão e corrente necessários para ativar as chaves de potência. Em geral, os *gate-drivers* visam acionar dois tipos de configuração de chaves:

- Configuração básica do *gate-driver* para *low-side*: É usado para acionar os transistores inferiores (*low-side*) do conversor. Ele utiliza uma referência comum (*Ground*, do inglês *Terra* (GND)) entre o sinal de comando e o sinal de potência (*Emitter/Source*). A mesma tensão de alimentação supre tanto o lado de sinal quanto o lado de potência do *driver*. Esse tipo de *driver* é adequado para transistores com o *Emitter/Source* conectados ao terra do circuito;
- Configuração básica do *gate-driver* para *high-side*: é utilizado para acionar os transistores superiores (*high-side*) do conversor. Para acionar o transistor *high-side*, é necessário um potencial mais elevado do que o fornecido pela fonte de alimentação. Isso é conseguido através do método de *bootstrap*.

O método de *bootstrap* utiliza um capacitor e um diodo para criar uma tensão mais alta que a tensão de alimentação e fornecer o potencial necessário para acionar o *gate* do transistor *high-side*. O diodo de *bootstrap* permite que o capacitor de *bootstrap* seja carregado quando o transistor *low-side* está conduzindo. Dessa forma, quando o transistor *low-side* está conduzindo, o diodo de *bootstrap* conduz, carregando o capacitor de *bootstrap*. Quando o transistor *low-side* é bloqueado, o capacitor de *bootstrap* fornece a tensão necessária para acionar o *gate* do transistor *high-side* (DULAU *et al.*, 2006).

Essa configuração permite que ambos os transistores, *low-side* e *high-side*, sejam acionados de forma eficiente, permitindo a operação do conversor em diversas topologias como meia-ponte ou ponte completa.

3.5 **Electronic design automation**

Projetos de PCI são uma parte crucial da automação de design eletrônico EDA. O primeiro passo é criar um esquemático eletrônico que detalha todos os componentes e suas conexões. Utiliza-se *softwares* de EDA para desenhar o esquemático, que é um diagrama representando componentes eletrônicos e suas interconexões. É importante garantir que o esquemático esteja correto, pois erros nesta etapa levam a problemas no produto final. Depois, o *layout* é desenhado, onde se define a localização dos componentes na placa e se desenha as trilhas de interconexão do circuito. O *layout* deve considerar aspectos como interferência eletromagnética, dissipação de calor e facilidade de montagem. *Softwares* específicos são usados para verificar se o *layout* atende às regras de *design* estabelecidas, como distâncias mínimas entre trilhas e componentes, largura das trilhas para suportar a corrente esperada, e outras especificações técnicas (JANSEN *et al.*, 2003).

Ferramentas de simulação eletrônica podem ser usadas para avaliar o comportamento do circuito sob diferentes condições, permitindo a identificação e correção de problemas antes da fabricação. Então, protótipos da PCI são fabricados em pequena escala para testar se o projeto funciona conforme esperado. Testes funcionais e inspeções visuais são realizados para

verificar a qualidade e a funcionalidade. Com os protótipos aprovados, inicia-se a fabricação em massa das placas. Este processo inclui etapas como aplicação de máscara de solda, gravação das trilhas, montagem dos componentes (*Surface Mounted Device* (SMD) e/ou *Pin Through Hole* (PTH)) e testes finais de qualidade. Cada uma dessas etapas requer atenção aos detalhes e uma compreensão sólida dos princípios de eletrônica e fabricação de PCs (JANSEN *et al.*, 2003).

3.6 Protocolo Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI)

O SCPI é um padrão de comunicação utilizado em instrumentos de medição e teste. Ele define comandos padronizados que os instrumentos devem entender e responder. O SCPI foi criado como uma camada adicional sobre o padrão *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) 488.2, especificando uma sintaxe comum, estrutura de comandos e formatos de dados. Ele permite a interoperabilidade entre diferentes fabricantes e modelos de instrumentos. O SCPI pode ser usado não apenas com o barramento IEEE 488.1, mas também com RS-232, RS-422, *Ethernet*, *Universal Serial Bus* (USB), *General Purpose Interface Bus* (GPIB), entre outros. Os comandos SCPI são *strings* de texto do tipo *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII) enviadas aos instrumentos, e as respostas a comandos de consulta geralmente são *strings* ASCII. Ele oferece uma base sólida para a comunicação eficiente e padronizada entre computadores e instrumentos de teste (GUILI; QUANCUN, 2013).

O protocolo SCPI é utilizado para controlar instrumentos de teste e medição, como osciloscópios, multímetros e analisadores de espectro. O SCPI padroniza a sintaxe dos comandos, facilitando a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes. Os comandos SCPI são baseados em texto e seguem uma estrutura hierárquica, o que permite um controle detalhado do instrumento. Por serem baseados em texto, os comandos SCPI são relativamente fáceis de entender e usar em *scripts* de automação. Além disso, muitos instrumentos modernos suportam comandos SCPI, permitindo aos usuários criar configurações e rotinas de teste que podem ser reutilizadas em diferentes dispositivos.

Os comandos SCPI são estruturados em uma sequência de palavras-chave, geralmente separadas por dois-pontos (:). Cada palavra-chave representa um nível na hierarquia do comando. Alguns exemplos de comandos são: "*IDN?", que solicita a identificação do instrumento; "MEASure:VOLTage:DC?", que mede a tensão contínua (DC); "MEASure:VOLTage:AC?", que mede a tensão alternada (AC); e "CONFigure:VOLTage:DC", que configura o instrumento para medir tensão contínua.

O protocolo SCPI possui consistência, uma vez conhecida a estrutura dos comandos, pode operar uma ampla gama de instrumentos sem ter que aprender um novo conjunto de comandos para cada um. E possui também flexibilidade, já que comandos podem ser combinados e personalizados para realizar medições complexas ou rotinas específicas.

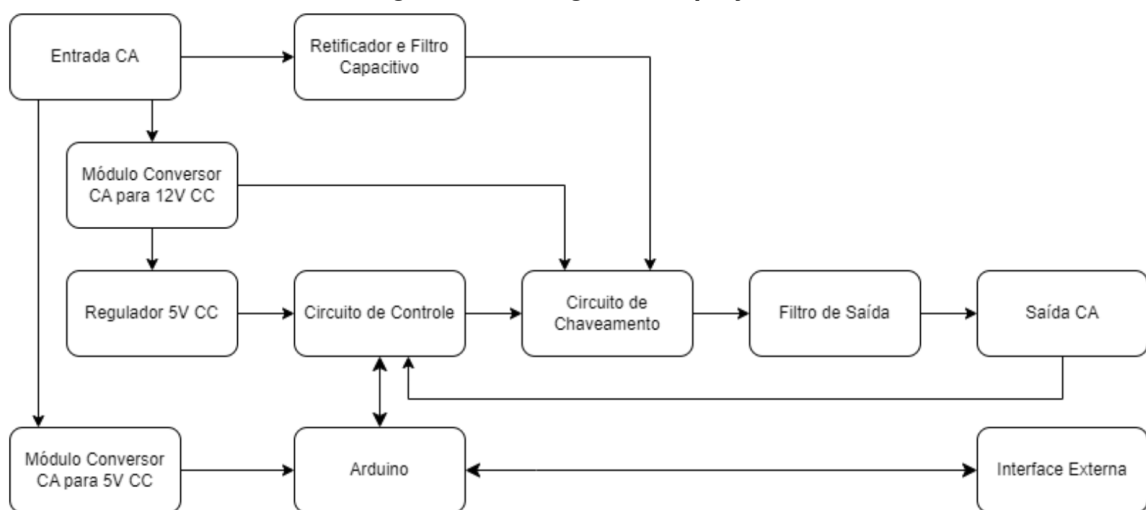
4 METODOLOGIA

Neste capítulo, serão detalhados os procedimentos metodológicos adotados para a realização deste projeto, incluindo as especificação, projeto do inversor, escolha do filtro capacitivo do retificador trifásico, resultados de simulação, escolha de componentes, esquemáticos e desenho das placas de circuito impresso. Destaca-se que os resultados de simulação são utilizados para obtenção de valor de máximo/mínimo, médio e eficaz das formas de onda dos conversores com o objetivo de dimensionamento dos componentes.

4.1 Diagrama de funcionamento

O conversor será gerido pela rede elétrica disponível, alimentando o circuito de controle e chaveamento da tensão CC. A tensão de entrada é retificada e filtrada, promovendo uma tensão maior no circuito de chaveamento para a excitação do próximo estágio. O circuito de controle será responsável por interpretar os parâmetros de entrada e saída por meio da interface externa e funções pré-programadas. Como resultado de sua ação, será gerada a saída em tensão alternada desejada, verificando a realimentação da malha de controle para garantir que os níveis estejam de acordo com o especificado, mesmo variando a carga sob teste. O circuito de chaveamento atuará recebendo o sinal de controle do microcontrolador do circuito de controle e ligando/desligando os transistores de forma a reconstruir uma forma de onda senoidal, com os parâmetros desejados. Porém o circuito chaveado poderá apresentar ruídos de alta frequência, que serão filtrados no próximo estágio, para obter a saída do conversor. Esse funcionamento pode ser observado na Figura 8 que inclui as etapas supracitadas.

Figura 8 – Fluxograma do projeto.

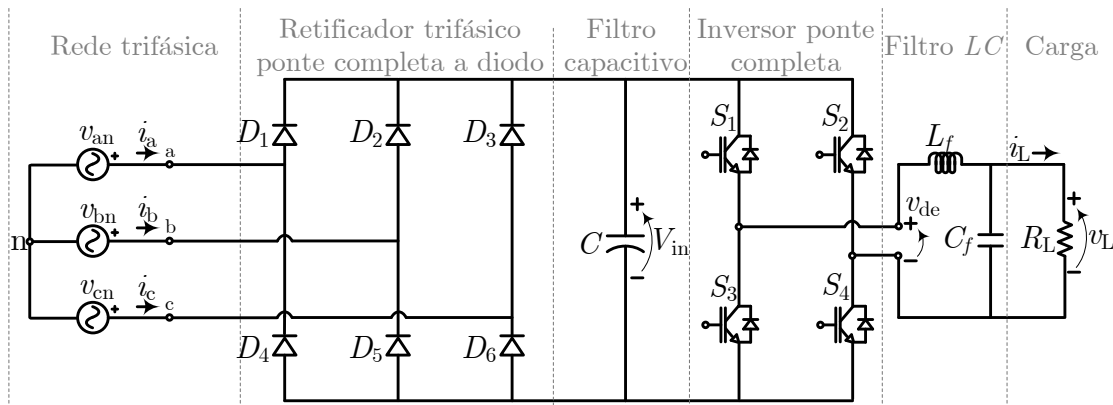


Fonte: Autoria própria (2024).

4.2 Especificações de projeto

A configuração do conversor indireto CA-CA considerando o estágio de potência é ilustrada na Figura 9. A rede trifásica é composta pelas fontes conectadas em estrela que descrevem as tensões de fase v_{an} , v_{bn} e v_{cn} . Ademais, i_a , i_b e i_c representam as correntes de linha. O retificador é composto pelos diodos D_1 a D_6 . A interface entre o retificador trifásico e o inversor é realizada pelo filtro capacitivo C . O inversor ponte completa possui 4 chaves indicadas por S_1 , S_2 , S_3 e S_4 . O filtro de saída é composto por um indutor L_f e um capacitor C_f . A carga do conversor é indicada por R_L . A tensão no filtro capacitivo, que serve como entrada para o inversor, é denotada por V_{in} . v_{de} indica a tensão gerada pelo inversor. Por fim, i_L é a corrente na carga e v_L a tensão na carga.

Figura 9 – Conversor indireto CA-CA baseado em retificador trifásico ponte completa a diodo e inversor ponte completa.



Fonte: Autoria própria (2024).

O projeto do conversor CA-CA foi dimensionado para conseguir alimentar uma grande parcela de produtos eletroeletrônicos disponíveis para o consumidor amplo, como lâmpadas, fontes de alimentação de notebooks, televisores, computadores, sistemas de som e aparelhos de automação residencial. Para atender às necessidades destes aparelhos, foram definidas as especificações nominais descritas na Tabela 1. O valor da frequência de chaveamento é limitado pelo microcontrolador escolhido.

Tabela 1 – Especificações do conversor CA-CC-CA.

Especificação	Valor
Tensão de entrada do inversor, V_{in}	310 V (CC)
Frequência de chaveamento, f_s	23,4 kHz
Tensão de saída do inversor (RMS), $V_{L_{RMS}}$	127 V
Ondulação de corrente (%), $\Delta_{i1}\%$	0,07 %
Potência de saída, P_L	100 W

Fonte: Autoria própria (2024).

4.3 Projeto do inversor

O projeto do inversor baseado na modulação unipolar, seguindo os parâmetros especificados na seção 4.2, é apresentado nessa seção.

A corrente na carga $I_{L_{RMS}}$ é calculada por:

$$I_{L_{RMS}} = \frac{P_L}{V_{L_{RMS}}} = \frac{100}{127} = 787,40 \text{ mA.} \quad (7)$$

A corrente de pico na carga $I_{L_{peak}}$ é calculada por:

$$I_{L_{peak}} = \sqrt{2} \times I_{L_{RMS}} = \sqrt{2} \times 787,40 = 1,11 \text{ A.} \quad (8)$$

Usualmente, a frequência de corte f_c definida como 10 vezes menor do que a frequência de chaveamento. Uma vez que, optou-se pela modulação unipolar utilizando duas frequências para as portadoras, ou seja, a frequência de 23,4 kHz para as chaves S_1 e S_3 e a frequência de 60 Hz para as chaves S_2 e S_4 , optou-se por uma frequência de corte um pouco acima da menor frequência de chaveamento, dessa forma, f_c é calculada por:

$$f_c = 60 \times 1,3 = 78 \text{ Hz.} \quad (9)$$

O período T_S é calculado por:

$$T_S = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{23400} = 42,76 \mu\text{s.} \quad (10)$$

A ondulação de corrente Δ_{il} é calculada por:

$$\Delta_{il} = \Delta_{il}\% \times I_{L_{peak}} = 0,07 \times 1,11 = 77,95 \text{ mA.} \quad (11)$$

O índice de modulação M é encontrado por:

$$M = \frac{\sqrt{2} \times V_{L_{RMS}}}{V_{in}} = \frac{\sqrt{2} \times 127}{310} = 0,58. \quad (12)$$

O filtro indutivo L_f é calculado por:

$$L_f = \frac{V_{in} T_S}{4 \Delta_{il}} = \frac{310 \times 42,76 \times 10^{-6}}{4 \times 77,95 \times 10^{-3}} = 42,47 \text{ mH.} \quad (13)$$

Dessa forma, considerando a frequência de corte obtida anteriormente, calcula-se o o capacitor do filtro LC :

O filtro capacitivo C_f é calculado por:

$$C_f = \frac{1}{L_f(2\pi f_c)^2} = \frac{1}{42,47 \times 10^{-3} \times (2\pi \times 78)^2} = 99,1 \mu\text{F}. \quad (14)$$

Para a potência nominal de 100 W, a carga resistiva R_L é:

$$R_L = \frac{(V_{L_{RMS}})^2}{P_L} = \frac{(127)^2}{100} = 161,29\Omega. \quad (15)$$

Também obtém-se aqui o valor da carga considerando a potência de 7 W. Esse valor é considerado uma vez que, antecipando os resultados, uma lâmpada de 7 W é usada para validação experimental, como mostrado na Equação 16.

$$R_L = \frac{(V_{L_{RMS}})^2}{P_L} = \frac{(127)^2}{7} = 2300,14\Omega. \quad (16)$$

4.4 Filtro capacitivo do retificador trifásico

Para garantir uma alimentação estável para o circuito do inversor, a tensão convertida pelo retificador trifásico deve ser filtrada. O projeto conta com um filtro capacitivo para atingir o resultado esperado, seguindo as especificações conforme a Tabela 2, e usando a Equação 17 (BARBI, 2006).

Tabela 2 – Especificações do filtro capacitivo.

Especificação	Valor
Frequência da rede, f_{rede}	60 Hz
Tensão máxima no capacitor, $V_{C_{pico}}$	310 V
Tensão mínima no capacitor, $V_{C_{min}}$	308,45 V
Potência de saída, P_L	100 W

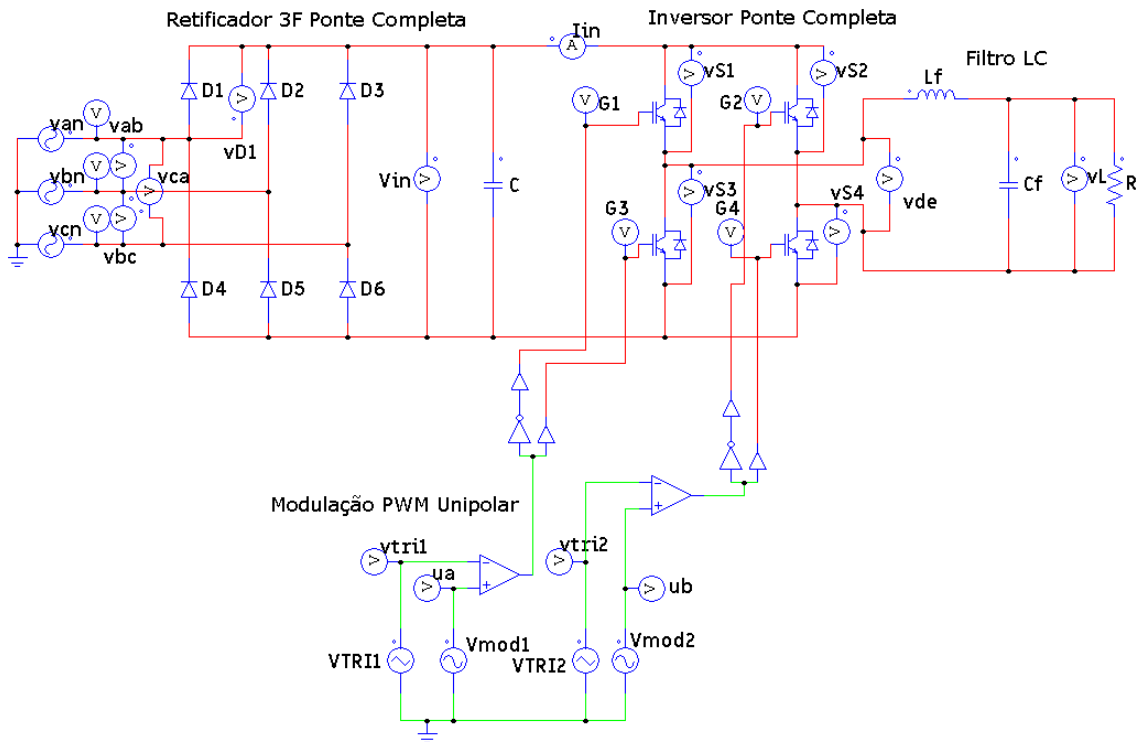
Fonte: Autoria própria (2024).

$$C = \frac{P_L}{6f(V_{C_{max}}^2 - V_{C_{min}}^2)} = \frac{100}{6 \times 60 \times (310^2 - 308,45^2)} = 289,78\mu\text{F}. \quad (17)$$

4.5 Resultados de simulação

Visando verificar o projeto do conversor indireto CA-CA, realizou-se uma simulação no *software* PSIM. O circuito simulado é mostrado na Figura 10.

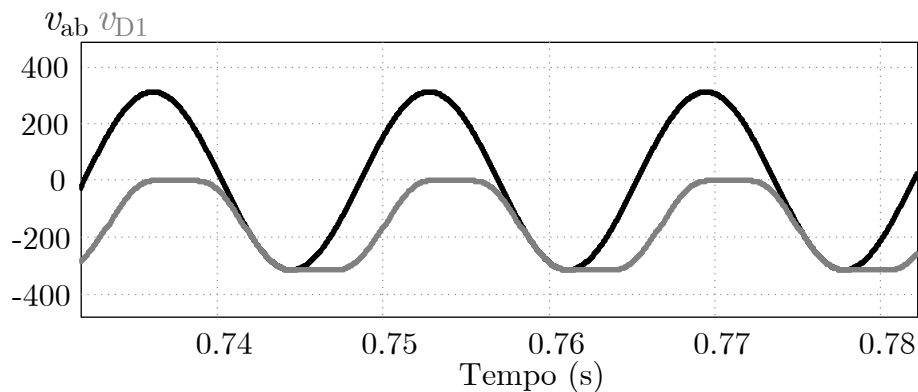
Figura 10 – Conversor indireto CA-CA simulado no PSIM.



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 11 apresenta a tensão de linha v_{ab} e a tensão v_{D1} no diodo D_1 . Observa-se que a tensão máxima reversa é referente ao valor máximo absoluto da tensão de linha. Esse resultado é utilizado para o dimensionamento dos diodos.

Figura 11 – Resultado de simulação para tensão de linha v_{ab} e tensão v_{D1} no diodo D_1 .

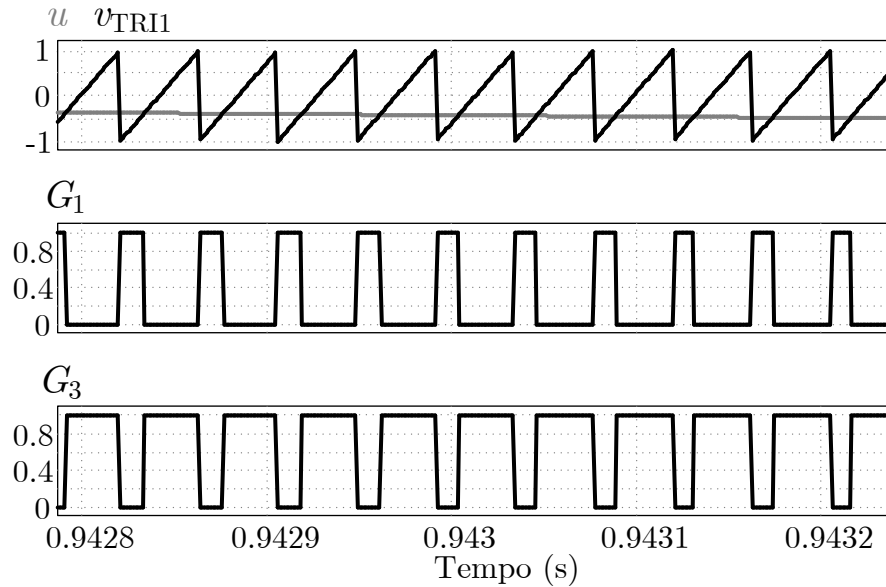


Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 12 mostra o resultado da simulação para modulação do braço 1 do inversor ponte completa. Onde pode-se observar a comparação da onda senoidal com a triangular, característica da modulação SPWM. Quando a senoide é maior que a onda dente de serra, a chave G_1 é acionada, e a chave G_3 é o seu oposto, nunca deixando as duas chaves acionadas simultaneamente. O mesmo ocorre na Figura 13, mas para o braço 2 do inversor, sendo acio-

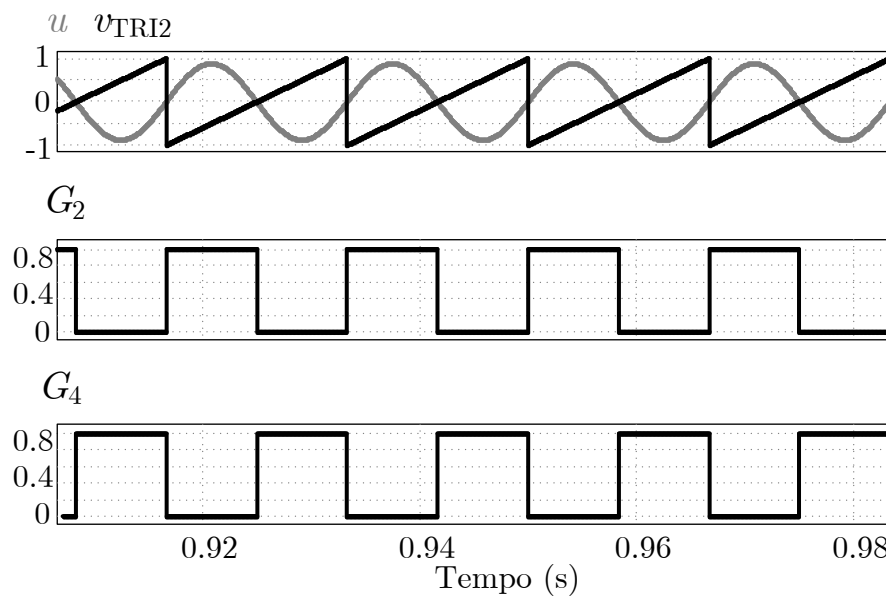
nada a chave G_2 quando a onda senoidal é maior que a triangular, sendo o oposto da chave G_4 . O braço 1 opera a 23,4 kHz e o braço 2 a 60 Hz.

Figura 12 – Resultado de simulação para modulação do braço 1 do inversor ponte completa.



Fonte: Autoria própria (2024).

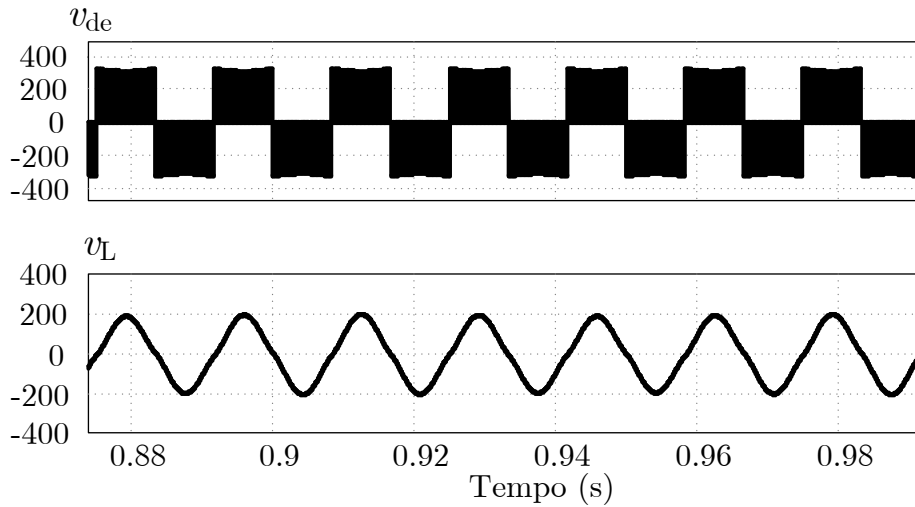
Figura 13 – Resultado de simulação para modulação do braço 2 do inversor ponte completa.



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 14 mostra o resultado da simulação para tensão antes e depois do filtro. Observa-se que a tensão v_{de} , antes do filtro, representa a modulação SPWM, e a tensão v_L , depois do filtro, passa a ser uma senoide.

Figura 14 – Resultado de simulação para tensão antes do filtro v_{de} e depois do filtro v_L .



Fonte: Autoria própria (2024).

A Tabela 3 mostra os resultados da simulação com os valores mais relevantes para o projeto do conversor. Esses valores serão usados para cálculos na seção 4.6.

Tabela 3 – Resultados de simulação.

Variável	Designação	Valor
Corrente média no diodo	i_{D1}	12,68 mA
Tensão máxima reversa no diodo	v_{D1RRM}	-311,15 V
Corrente eficaz no capacitor de barramento	$i_{C_{ORMS}}$	2,62 A
Corrente eficaz de entrada	i_{RMS}	2,62 A
Tensão média nas chaves 1 e 3	v_{S13}	157,29 V
Tensão média nas chaves 2 e 4	v_{S24}	157,29 V
Tensão máxima nas chaves 1 e 3	v_{S13}	325,43 V
Tensão máxima nas chaves 2 e 4	v_{S24}	325,43 V
Corrente eficaz no indutor do filtro	$i_{Lf_{RMS}}$	5,12 A
Corrente eficaz no capacitor do filtro	$i_{Cf_{RMS}}$	5,12 A
Tensão eficaz de saída	v_L	132,50
Potência média de saída	P_L	7,63 W

Fonte: Autoria própria (2024).

4.6 Escolha dos componentes

Baseado nos resultados da simulação e nos valores especificados no projeto, foram selecionados componentes comerciais adequados, conforme mostrado na Tabela 4. A escolha dos diodos retificadores foi feita considerando o valor da corrente média obtida na simulação e a tensão reversa máxima que os diodos devem suportar. Além disso, foi considerado o fator de segurança para garantir a confiabilidade do circuito.

Para limitar o pico de corrente que ocorre ao carregar o capacitor de filtro nos primeiros ciclos de rede, foi utilizado um resistor *Negative Temperature Coefficient* (NTC). A resistência

nominal do NTC foi calculada com base no parâmetro de corrente máxima não repetitiva especificado para o diodo selecionado, seguindo a Equação 18. O componente selecionado foi o valor comercial mais próximo encontrado.

$$R_{\text{NTC}} = \frac{\sqrt{2}V_o}{I_{\text{pk}}} = \frac{\sqrt{2} \times 127}{400} = 0,45 \Omega. \quad (18)$$

Devido ao fato de o valor do NTC comercial ser significativamente maior do que o calculado, foi projetado um circuito de desvio. Este circuito utiliza um relé para curto-circuitar o ramo do NTC após um tempo determinado, controlado por um circuito temporizador baseado no circuito integrado *NE555*, que ativará o relé após um período de tempo pré-determinado, suficiente para que o capacitor de filtro seja carregado sem picos de corrente prejudiciais. Após esse tempo, o relé é acionado, removendo o NTC da trajetória da corrente e evitando assim seu aquecimento prolongado, o que poderia comprometer a vida útil do componente.

O circuito integrado *NE555* foi configurado como comparador, onde a saída será acionada quando a tensão no terminal *trigger* for inferior a 1/3 da tensão de alimentação do circuito. O tempo para o circuito ser acionado é contado através de um capacitor em série com um resistor, onde o circuito será acionado no momento em que o capacitor atingir 2/3 da tensão de alimentação. Sabe-se que em uma constante de tempo o capacitor se carrega em aproximadamente 63,2% da tensão de alimentação. Desta forma, foi utilizada uma aproximação para escolher os valores de resistor e capacitor considerando que o capacitor estaria carregado em 2/3 da tensão em uma constante de tempo. Foi definido que 5 segundos seria um tempo adequado para realizar o acionamento do circuito, uma vez que o NTC limita a corrente apenas nos primeiros ciclos de rede. Portanto, este tempo garante uma margem de estabilização do circuito. Através da Equação 19, e definindo o capacitor com 10 μF , foi determinado que o resistor comercial que atenderia aproximadamente o tempo de 5 segundos seria de 470 $k\Omega$ para garantir que o capacitor esteja carregado a aproximadamente 2/3 da tensão de alimentação em aproximadamente 4,7 segundos.

$$\tau = RC = 10 \times 10^{-6} \times 470000 = 4.7\text{s}. \quad (19)$$

A escolha do capacitor de filtro do retificador trifásico foi baseada na corrente eficaz e na tensão máxima resultadas na simulação, além de possuir no mínimo a capacitância calculada na seção 4.3, necessária para atingir a regulação da tensão do projeto dentro das especificações de segurança e desempenho.

A escolha dos fusíveis foi baseada na corrente eficaz de entrada. Fusíveis adequados foram selecionados para proteger o circuito contra sobrecorrentes que poderiam danificar os componentes. A corrente nominal dos fusíveis foi escolhida para ser ligeiramente superior à corrente eficaz de entrada, garantindo proteção sem causar interrupções desnecessárias na operação normal do circuito.

Para os componentes de chaveamento, foram selecionados IGBT, considerando as demandas específicas do circuito e as vantagens que esses dispositivos oferecem em relação às opções como MOSFET e Transistores Bipolares de Junção, do inglês *Bipolar Junction Transistor* (BJT), devido a combinação de alta corrente e alta tensão suportadas pelos IGBTs, além das baixas perdas de condução e desempenho na comutação. As chaves (IGBTs) foram selecionadas com base nos resultados da simulação de tensão máxima nas chaves e na corrente eficaz no indutor de filtro. Além disso, foi considerada a capacidade de comutação rápida e as perdas de comutação para garantir eficiência, confiabilidade do circuito e que os IGBTs operem dentro de seus limites seguros durante toda a faixa de operação do circuito.

Foi escolhido um Arduino Nano para realizar a interface com um computador através da interface USB. O Arduino se comunicará através de optoacopladores com o circuito de controle da parte de potência para garantir a isolamento galvânica necessária, protegendo assim os circuitos que estão diretamente ligados à rede elétrica.

Para a alimentação dos circuitos de controle e acionamento das chaves, e visando a simplicidade de implementação, foram selecionadas fontes de alimentação comerciais do tipo *flyback*. Uma fonte de 12V foi escolhida para alimentar os circuitos de controle e acionamento das chaves, junto com um regulador de tensão de 5V. Uma segunda fonte, também do tipo *flyback* e dimensionada para 5V, foi escolhida para a alimentação do Arduino. A escolha das fontes de alimentação com esta topologia se deve a isolamento galvânica garantida por pelo transformador *flyback*, essencial para a proteção dos equipamentos. Além disso, essas fontes são compactas, eficientes e de baixo custo, o que as torna ideais para a aplicação em questão.

Os demais componentes, como conectores, resistores, capacitores, entre outros, foram dimensionados conforme suas especificações de valor nominal, tensão, corrente e precisão, de acordo com as necessidades específicas de cada parte do circuito onde foram integrados. Além disso, foram considerados os requisitos mecânicos desejados para a fabricação da PCI.

Tabela 4 – Componentes Comerciais.

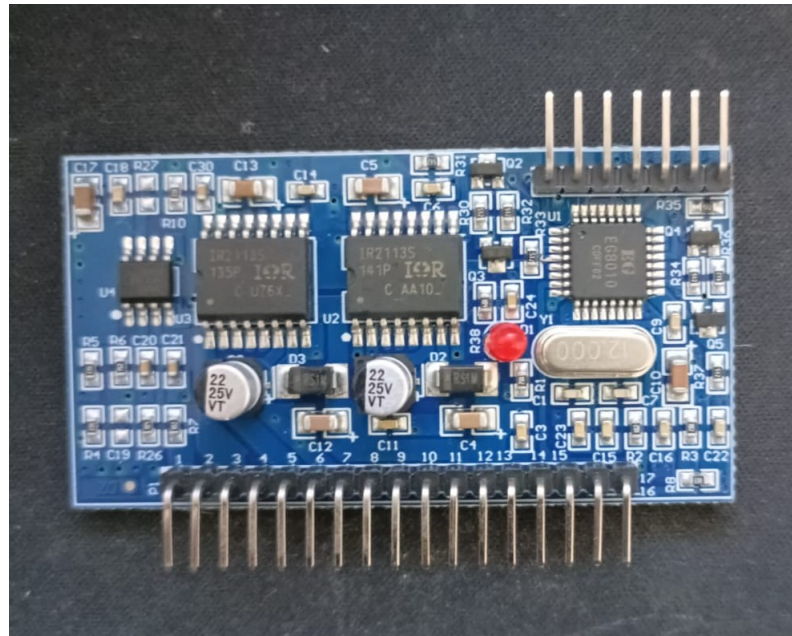
Componente	Fabricante	Código do Fabricante
Fonte DC310V 5V 3,5W	Genérico	WX-DC05007
Fonte DC310V 12V 3,5W	Genérico	WX-DC12003
Capacitor 470nF	JURCC	X2 474K310V P15
Capacitor 1uF	Genérico	Genérico
Capacitor 100nF	Genérico	Genérico
Capacitor 10uF	Genérico	Genérico
Capacitor 10nF	Genérico	Genérico
Capacitor 330uF	NCC	EKM451VSN331MR40S
Capacitor 100nF	KYET	KP104J2J1501
Conector WJ129V-5.0-2P-14-00A	KANGNEX	WJ129V-5.0-2P-14-00A
Conector HDR-F-2.54_1x5	Genérico	Genérico
Conector WJ129V-5.00-3P	KANGNEX	WJ129V-5.0-3P
Diodo 10A10	MDD	10A10
Diodo 1N4148	SMC	1N4148
Controlador DS1023-1X17SF11	CONNFLY	DS1023-1x17SF11
Fusível 10A 5.0x20mm	Genérico	Genérico
Porta Fusível FH1-200CK-B	HONGJU	FH1-200CK-B
Conector HDR-M-2.54_1x4	Genérico	Genérico
Conector HDR-M-2.54_1x3	Genérico	Genérico
Conector HDR-M-2.54_1x15	Genérico	Genérico
Indutor 42mH	Genérico	Genérico
LED TH-3mm_B	EVERLIGHT	204-10SDRD/S530-A3-L
NTC 10k Ω	Genérico	Genérico
NTC 25 Ω	Genérico	Genérico
Mosfet 2N7000TA	onsemi	2N7000TA
Resistor 100m Ω	Genérico	Genérico
Resistor 4,7 Ω	Genérico	Genérico
Resistor 470 Ω	Genérico	Genérico
Resistor 1k Ω	Genérico	Genérico
Resistor 3.3k Ω	Genérico	Genérico
Resistor 10k Ω	Genérico	Genérico
Resistor 200k Ω	Genérico	Genérico
Resistor 470k Ω	Genérico	Genérico
Potenciômetro 10k Ω	BOURNS	3296W-1-103LF
Relé 12V NA-NF	Metaltek	AX1RC2
Regulador 7805(TO-220)	STMicroelectronics	L7805CV-DG
IGBT IKW75N60TFKSA1	Infineon	IKW75N60TFKSA1
CI NE555L-D08-T	UTC	NE555L-D08-T
Opto acoplador PC817MB	Genérico	PC817MB
Arduino NANO	Genérico	Genérico
Módulo controlador EGS002	EGmicro	EGS002

Fonte: Autoria própria (2024).

4.7 Placa de sinais e *gate-driver*

Para realizar o sistema de controle e acionamento das chaves do inversor, foi escolhido o módulo EGS002 da fabricante EGmicro, que integra o Circuito Integrado Específico de Aplicação, do inglês *Application-Specific Integrated Circuit* (ASIC) EG8010 da mesma marca. Esse ASIC desempenha a função completa de controlador para inversores de onda senoidal por modulação unipolar. Suas funcionalidades abrangem o controle de tensão, amplitude, configuração de *dead time* e *soft start*, além de possuir um protocolo de comunicação serial, sendo possível realizar as configurações de controle através de um computador, essencial para o funcionamento do equipamento.

Figura 15 – Módulo EGS002.



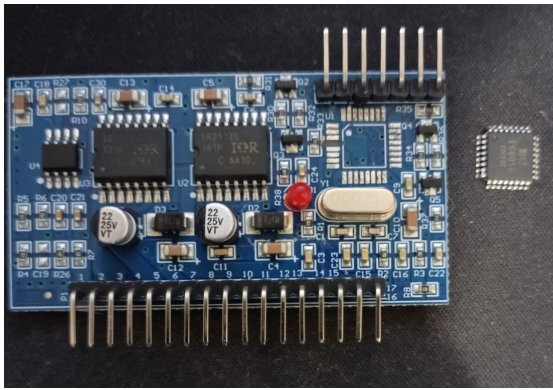
Fonte: Autoria própria (2024).

O módulo também inclui dois circuitos integrados IR2113S da *Infineon Technologies* (*International Rectifier*), que são *drivers* de alta tensão e alta velocidade para IGBTs e MOSFETs de canal N. Esses *drivers* são capazes de acionar as chaves tanto em lado baixo quanto em lado alto, utilizando um circuito do tipo *bootstrap*. Eles recebem comandos de entrada em níveis lógicos a partir de 3,3V.

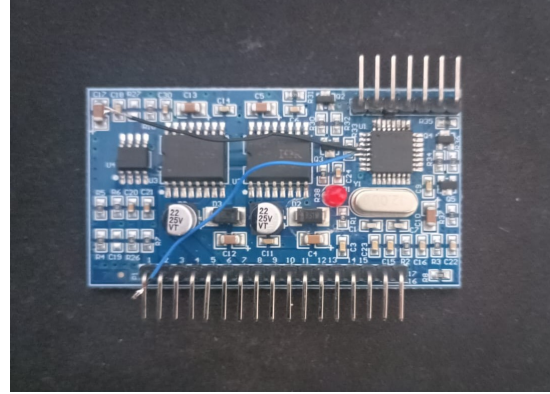
Entretanto, este módulo escolhido não faz uso da comunicação serial disponibilizada pelo ASIC. Portanto, foram necessárias modificações no EGS002 para disponibilizar os terminais seriais do EG8010. Neste módulo, também foi necessário realizar uma interrupção da trilha do terminal 5 (SPWMEN) do ASIC, conectando-o diretamente ao GND, garantindo que a saída do controlador permaneça desabilitada até que um comando seja enviado via comunicação serial para habilitá-la. A Figura 16 ilustra a modificação realizada no circuito do módulo EGS002, onde a trilha abaixo do terminal 4 (RXD) foi removida e foram soldados fios diretamente nos

terminais 4 e 5 (TXD) do EG8010 para permitir a comunicação serial. A Figura 16 mostra a trilha vinda do terminal 6 (SPWMEN) sendo interrompida e soldada diretamente ao GND, desabilitando a saída do controlador conforme descrito.

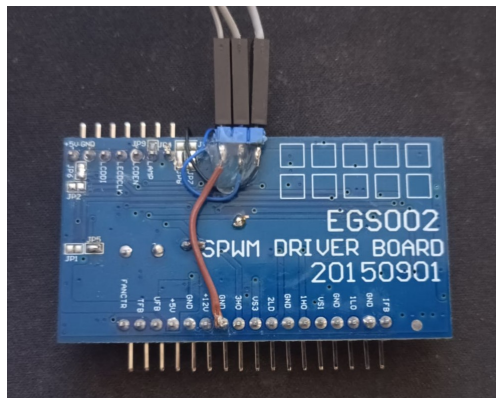
Figura 16 – Modificações no módulo EGS002. (a) Sem chip. (b) Com fios. (c) Parte traseira.



(a) Módulo EGS002 com o chip removido



(b) Módulo EGS002 com modificações nos terminais



(c) Módulo EGS002 com modificações na parte traseira

Fonte: Autoria própria (2024).

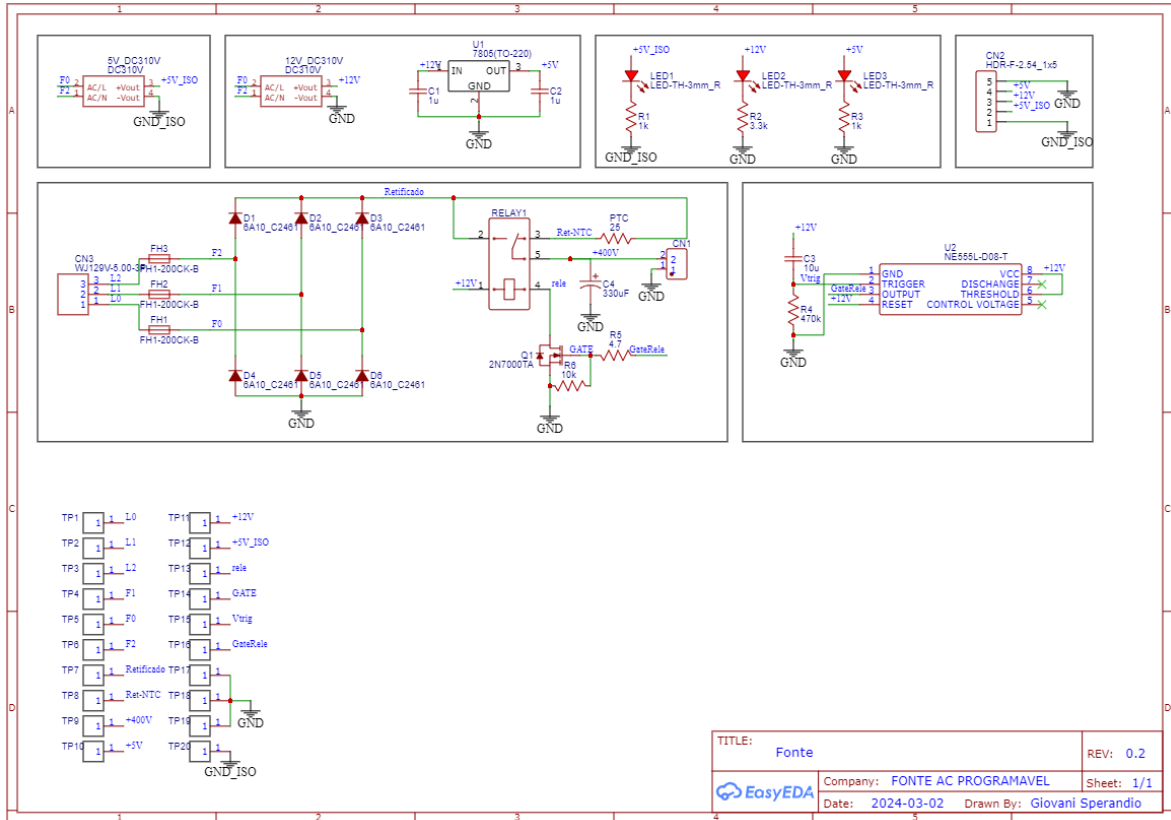
4.8 Diagramas esquemáticos

A partir da definição de todos os componentes, foram criados os esquemáticos do projeto utilizando a ferramenta *EasyEDA*, organizados em duas folhas distintas. A primeira folha é dedicada às fontes de alimentação e retificador trifásico, enquanto a segunda contém o circuito de controle e as chaves do inversor. Os esquemáticos foram projetados em blocos funcionais para proporcionar um melhor entendimento do sistema. Além disso, pontos de testes foram colocados nos principais nós do circuito. Esses pontos de teste serão integrados na PCI para facilitar a realização de testes e diagnósticos necessários quando o circuito estiver montado.

A escolha da plataforma *EasyEDA* para a montagem do esquemático se deve à praticidade e eficiência da ferramenta, pois ela oferece um catálogo completo de componentes com

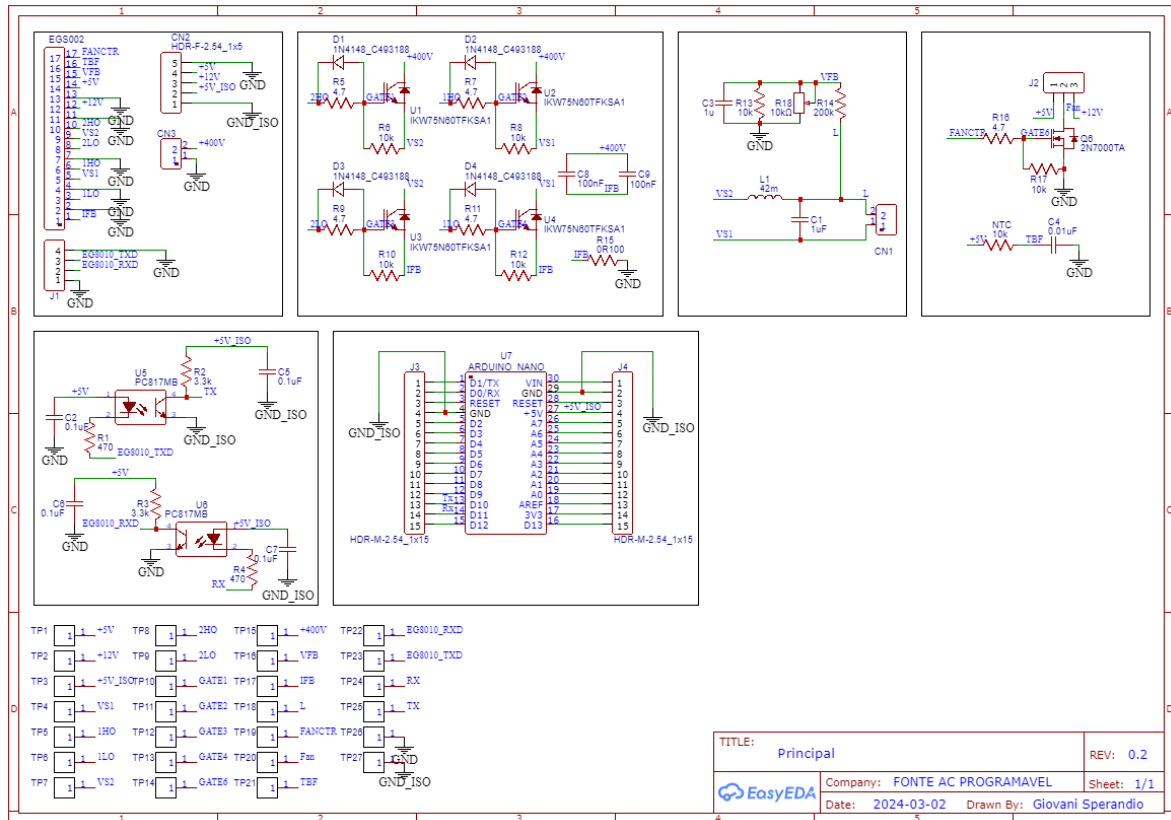
bibliotecas oficiais e arquivos disponibilizados pela comunidade, facilitando enormemente o processo do projeto. Grande parte dos componentes já possui informações para a montagem da placa de circuito impresso, permitindo que tanto o esquemático quanto a PCB sejam desenhados na mesma plataforma.

Figura 17 – Esquemático da placa fonte.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 18 – Esquemático da placa principal.



Fonte: Autoria própria (2024).

4.9 Layout da placa de circuito impresso

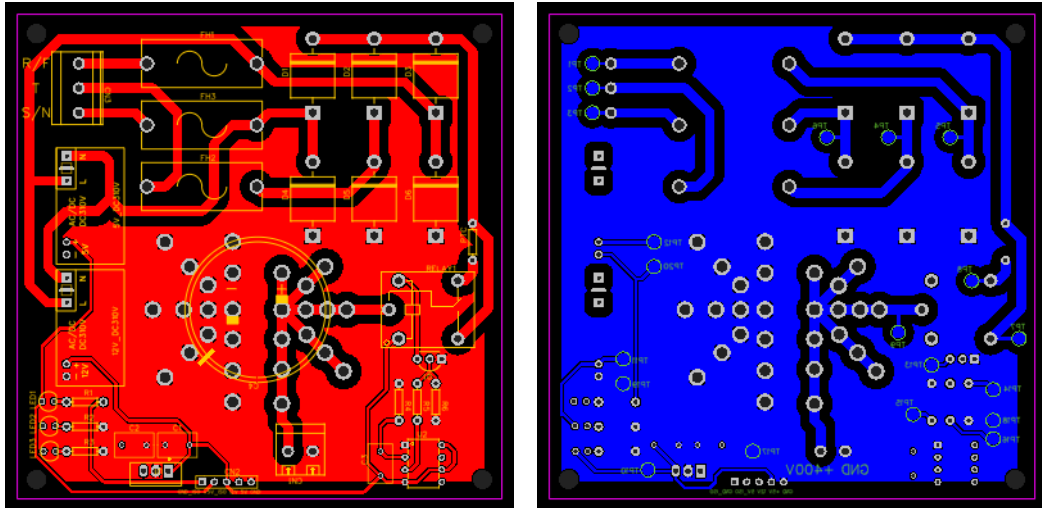
A ferramenta *EasyEDA* também foi utilizada para a elaboração do *layout* da placa de circuito impresso. A plataforma oferece integração direta com o esquemático criado anteriormente, facilitando a transição entre o *design* do circuito e a implementação física da PCI. Essa integração garante que todas as conexões e componentes do esquemático sejam corretamente refletidos no *layout* da placa, minimizando erros e melhorando a eficiência do processo de *design*.

Para o processo de desenho das PCI, foram considerados parâmetros como o tamanho do circuito, a separação entre os circuitos de potência e os de controle, além da praticidade para os testes. Observou-se que os principais fabricantes de PCI oferecem preços mais competitivos para placas com dimensões de até 100 x 100 mm. Para cumprir essa limitação e facilitar a fase de testes, o projeto foi dividido em duas placas: uma dedicada ao retificador e fontes de alimentação, fornecendo os níveis de tensão necessários para o conversor (Figuras 19 e 20), e outra placa, responsável pelo inversor e seu controle, denominada placa principal (Figuras 21 e 22).

Para prevenir ou atenuar possíveis problemas no circuito e garantir maior compatibilidade com componentes, foram projetadas conexões extras para alguns componentes. Adicio-

nalmente, previu-se que as trilhas da parte de potência do circuito fossem expostas na parte inferior das placas. Essa abordagem permite aumentar a capacidade de corrente das trilhas com a inserção de solda para aumentar a seção transversal dos condutores.

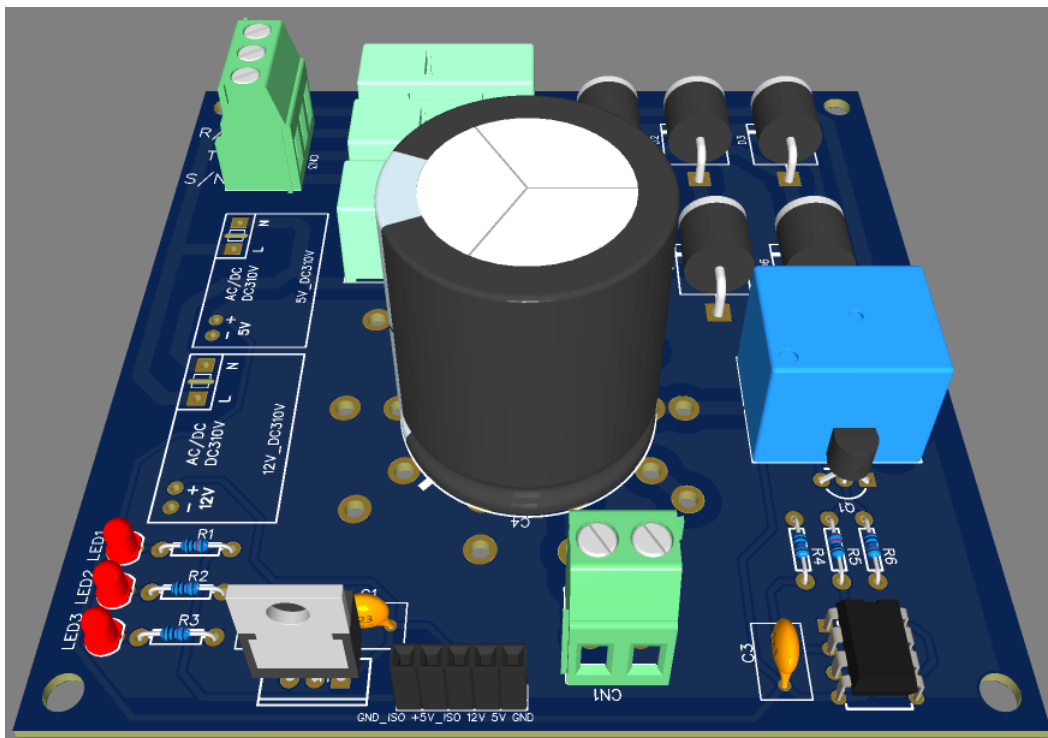
Figura 19 – Layout da PCI da fonte. (a) Fonte *top*. (b) Fonte *bottom*.



(a) Layout da parte de cima da PCI da fonte (b) Layout da parte de baixo da PCI da fonte

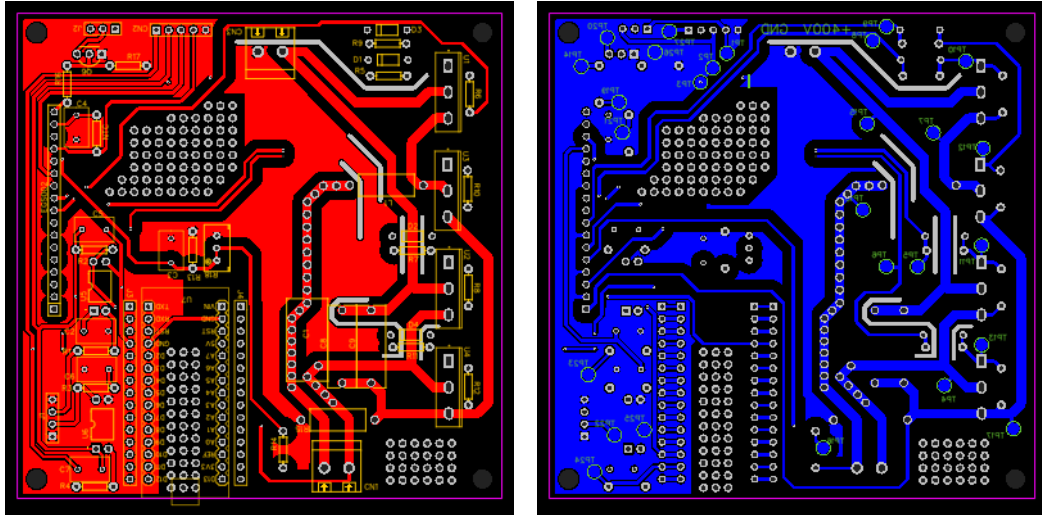
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 20 – Renderização 3D da placa fonte.



Fonte: Autoria própria (2024).

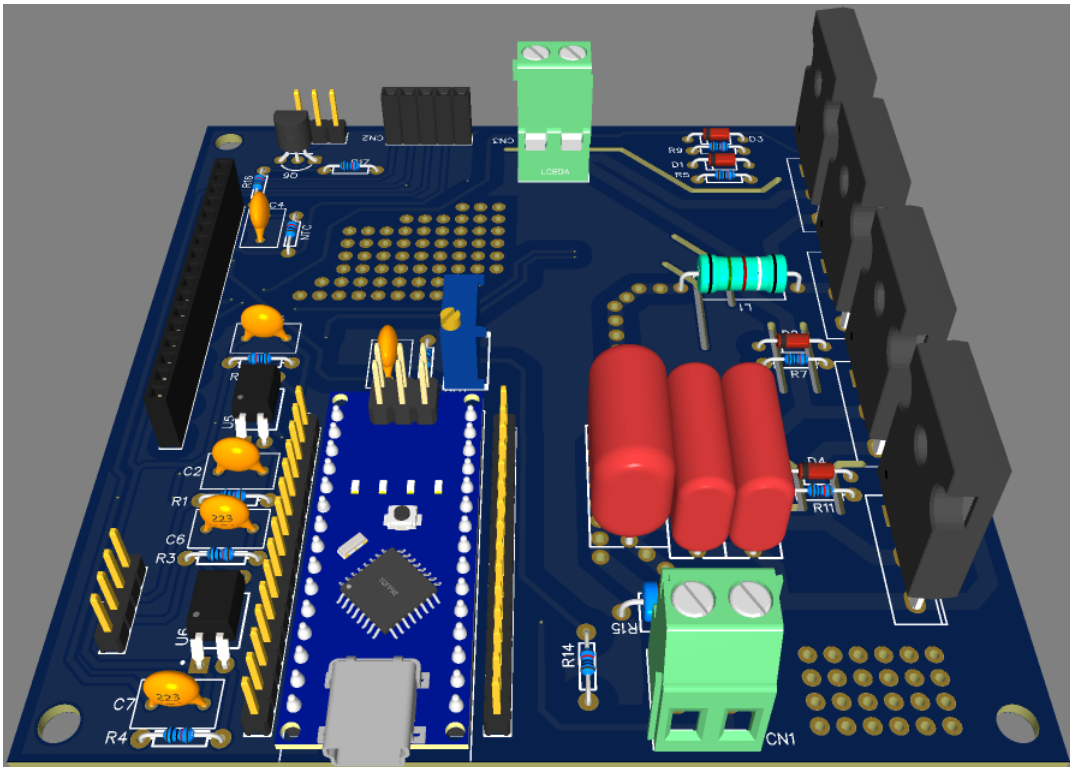
Figura 21 – Layout da PCI principal. (a) Principal *top*. (b) Principal *bottom*.



(a) Layout da parte de cima da PCI principal (b) Layout da parte de baixo da PCI principal

Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 22 – Renderização 3D da placa principal.

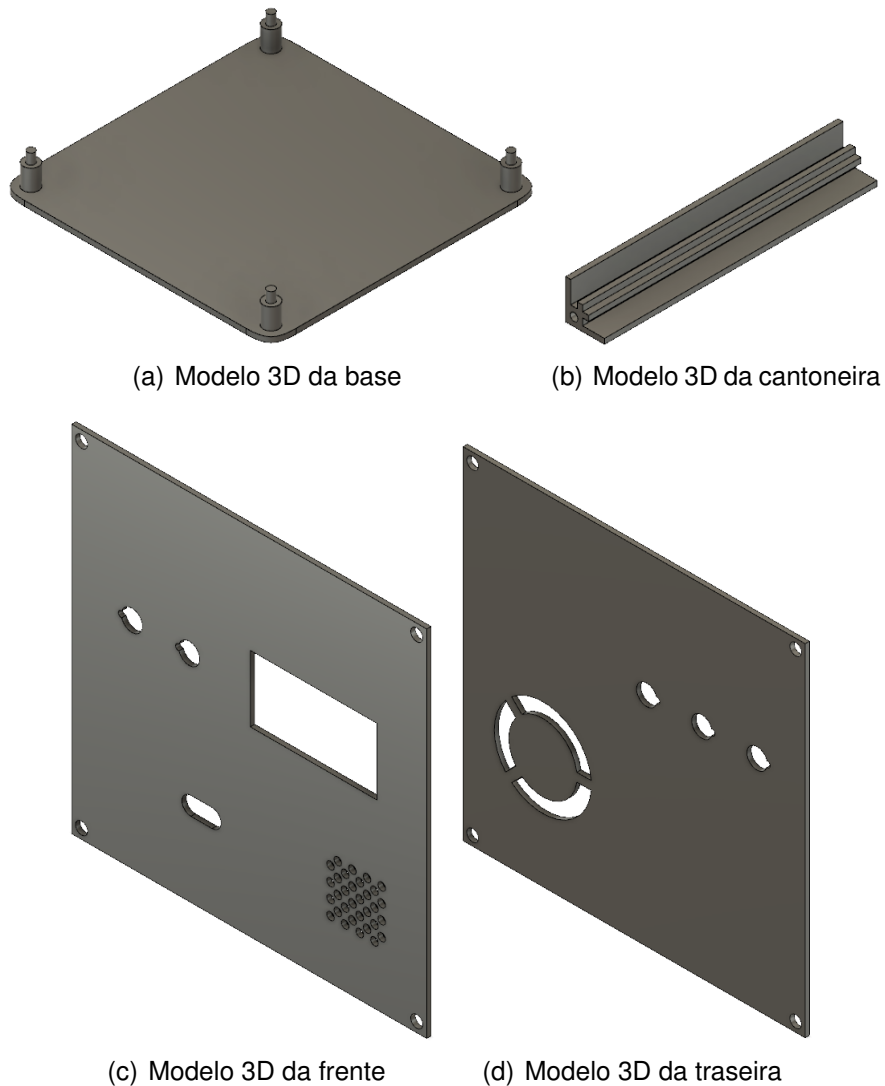


Fonte: Autoria própria (2024).

4.10 Projeto mecânico

A parte mecânica, concebida com o objetivo de assegurar a fixação eficiente das placas e garantir a segurança durante a operação do circuito, foi desenvolvida utilizando a ferramenta de desenho assistido por computador *Fusion 360*. Para a fabricação do protótipo, optou-se pela utilização de impressora 3D, devido à rapidez do processo de manufatura aditiva e ao material plástico empregado na impressão 3D oferecer isolamento elétrico, essencial para a segurança durante a operação do circuito. A Figura 23 mostra o modelo 3D já criado e pronto para impressão. O modelo foi desenvolvido de forma que todas as peças se encaixem formando uma caixa isolada, onde quatro peças de base formam as laterais do equipamento, e quatro cantoneiras são responsáveis pela conexão de todas as peças, formando uma caixa para acomodar o conversor CA-CA.

Figura 23 – Modelo mecânico para impressão 3D. (a) Base . (b) Cantoneira. (c) Frente. (d) Traseira.



Fonte: Autoria própria (2024).

4.11 Algoritmos para controle

Para implementar o controle programável do inversor, foi utilizado um Arduino Nano, configurado para receber comandos SCPI via comunicação USB. O Arduino interpreta esses comandos e os traduz, enviando as instruções adequadas para o ASIC EG8010 através de comunicação serial. Para desenvolver essa funcionalidade, empregou-se a plataforma Arduino IDE e utilizou-se a biblioteca *SoftwareSerial*, que permite a criação de portas seriais adicionais no Arduino. Este arranjo garante que o inversor possa ser controlado de maneira precisa e flexível, permitindo a integração com sistemas de automação e controle maiores.

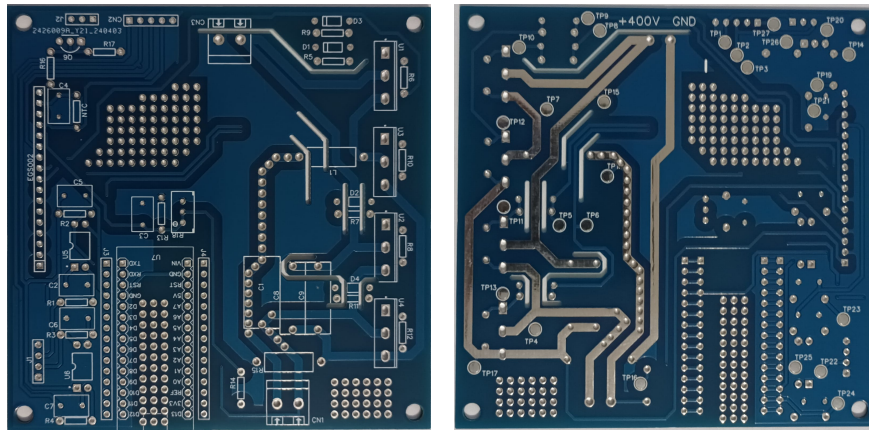
Para enviar os comandos SCPI para o circuito, foi desenvolvida uma interface gráfica em *Python*, utilizando as bibliotecas *PyQt* e *pySerial*. Esta interface permite que o usuário configure facilmente os níveis de tensão e frequência diretamente pelo computador, proporcionando um controle intuitivo do inversor. A escolha do *PyQt* possibilitou a criação de uma interface de usuário responsiva, enquanto a biblioteca *pySerial* foi utilizada para estabelecer a comunicação serial entre o computador e o Arduino.

5 RESULTADOS

5.1 Montagem das placas de circuito impresso

Os conversores foram implementados em placas de circuito impresso. As Figuras 24 e 25 mostram as placas sem os componentes. Observa-se o *layout* do inversor na Figura 24(a) e do retificador na 24(b). Já na PCIs, como ilustrado nas Figuras 26 e 27. Neste momento já foram fabricadas duas peças base, em impressão 3D, para garantir a proteção do circuito durante os testes iniciais, evitando curtos-circuitos com peças metálicas que possam estar sobre as bancadas.

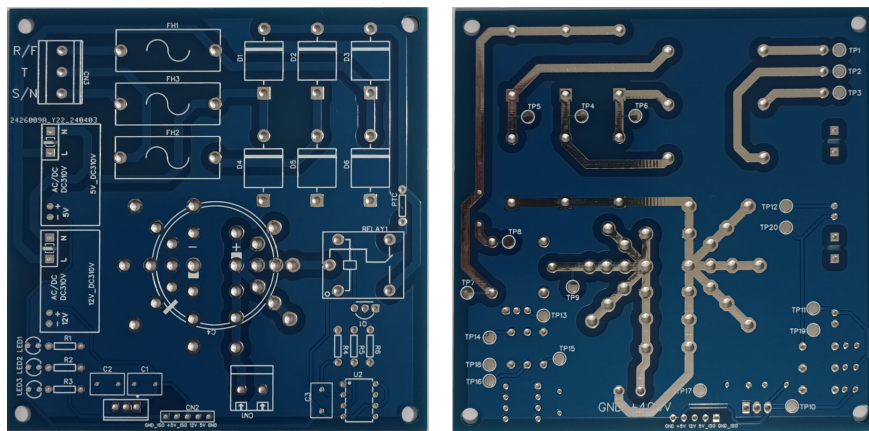
Figura 24 – PCI principal fabricada. (a) Principal *top*. (b) Principal *bottom*.



(a) Layout da parte de cima da PCI principal (b) Layout da parte de baixo da PCI principal

Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 25 – PCI fonte fabricada. (a) Fonte *top*. (b) Fonte *bottom*.

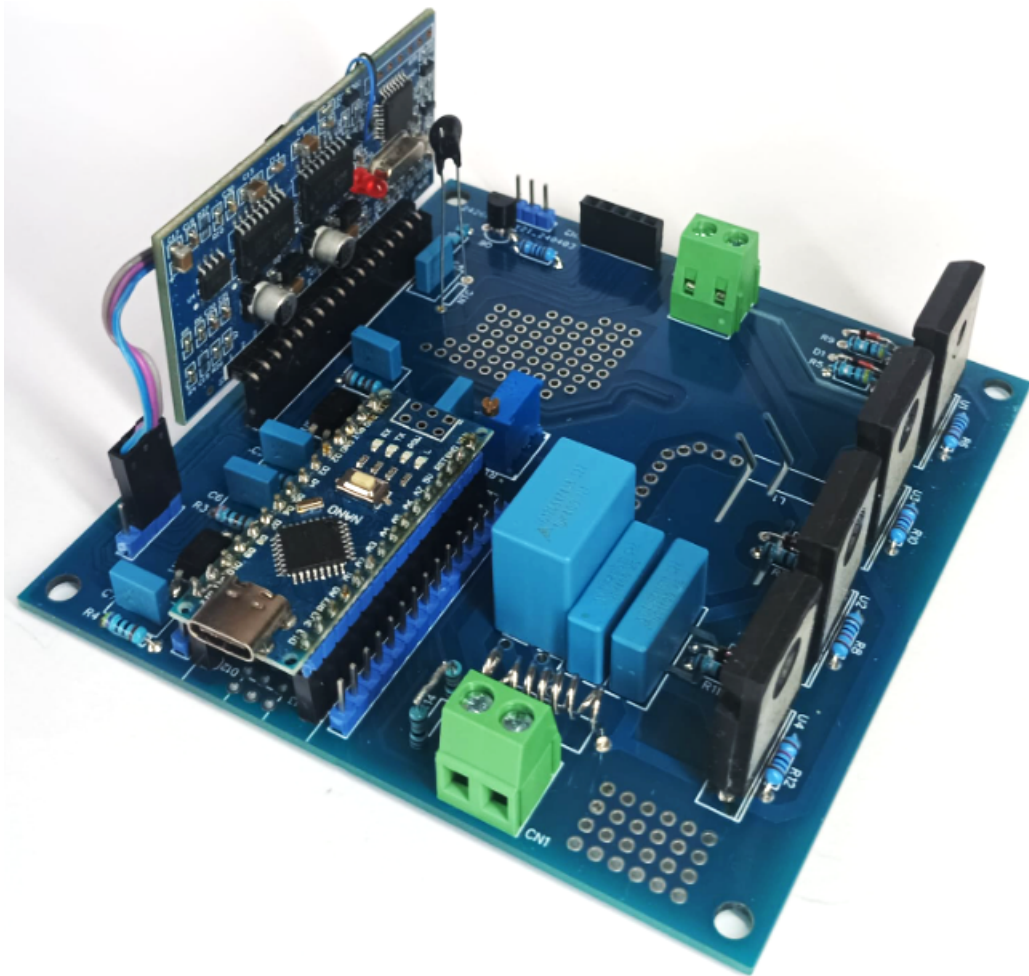


(a) Layout da parte de cima da PCI da fonte (b) Layout da parte de baixo da PCI da fonte

Fonte: Autoria própria (2024).

No entanto, alguns componentes não estavam disponíveis conforme especificado no projeto nos fornecedores. Para contornar essas questões, foram realizadas associações e adaptações para garantir o funcionamento correto do circuito. O indutor do filtro, devido ao seu valor relativamente alto, foi substituído por uma associação de indutores menores, soldados em uma placa universal.

Figura 26 – Protótipo pronto da placa principal.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 27 – Protótipo pronto da placa fonte.



Fonte: Autoria própria (2024).

5.2 Programação do Arduino

A programação do Arduino Nano incluiu a implementação dos principais comandos SCPI necessários para o funcionamento básico do conversor CA-CA programável. Os comandos foram implementados conforme a Tabela 5. Além disso, durante a inicialização, o Arduino envia os comandos parâmetros padrão para o ASIC EG8010, configurando o conversor com: configuração de *range* de frequência de 0 a 100 Hz, modulação unipolar, *soft start* desligado, *variable frequency constant voltage*, *dead time* de 1500 ns, controle através dos registradores internos, saída desligada, frequência nominal de 60 Hz e tensão nominal de 0 V.

Tabela 5 – Descrição dos comandos SCPI implementados.

Comando	Descrição
*IDN?	Identificação do dispositivo
*RST	Reset do dispositivo
:SOURce:VOLTage[:LEVel]	Configura a tensão de saída [0 - 255]
:SOURce:FREQuency[:LEVel]	Configura a frequência de saída [0 - 255]
:SOURce:VOLTage?	Retorna a tensão de saída configurada
:SOURce:FREQuency?	Retorna a frequência de saída configurada
:OUTPut[:STATe]	Liga ou desliga a saída (Estado [ON/OFF])
:OUTPut?	Retorna o estado da saída
:MEASure:VOLTage?	Retorna a tensão de saída medida
:MEASure:TEMPerature?	Retorna a temperatura do dispositivo medida
:MEASure:CURRent?	Retorna a corrente de saída medida
:MEASure:ALL?	Retorna todos os parâmetros disponíveis medida

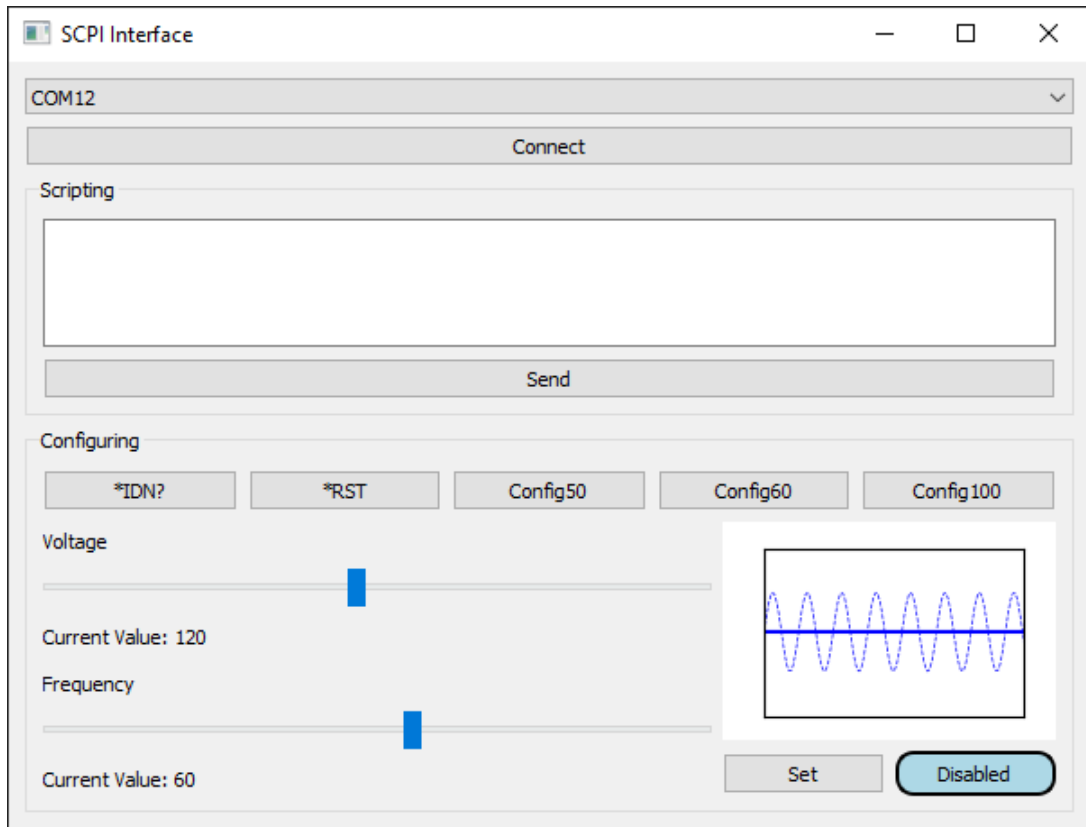
Fonte: Autoria própria (2024).

5.3 Programação da interface

A implementação da interface gráfica em Python, utilizando as bibliotecas PyQt e pySerial, incluiu funcionalidades para facilitar o controle do inversor. A Figura 28 mostra a captura de tela do programa desenvolvido.

Um menu de seleção foi programado para permitir configurar a porta em que o Arduino está conectado ao computador, acompanhada de um botão para iniciar e finalizar a conexão. Além disso, foi criada uma seção "*Scripting*" onde o usuário pode inserir uma lista de comandos SCPI para serem enviados ao Arduino de uma só vez. Foram criados botões dedicados para os comandos *IDN?, *RST e diferentes *setups* de configuração, permitindo um acesso rápido a essas funções. Duas barras deslizantes foram implementadas para ajustar os níveis de tensão e frequência. Um botão "*Set*" envia os valores selecionados nas barras deslizantes para o Arduino. O botão "*Enable/Disable*" controla o estado de operação do inversor, entre ligado e desligado. A interface também inclui um gráfico que ilustra os valores ajustados pelas barras deslizantes, mostrados em tracejado, e os valores efetivamente configurados, exibidos em linha sólida. Essa visualização gráfica oferece um *feedback* visual imediato ao usuário, facilitando o ajuste dos parâmetros em tempo real.

Figura 28 – Captura de tela do programa de interface SCPI.



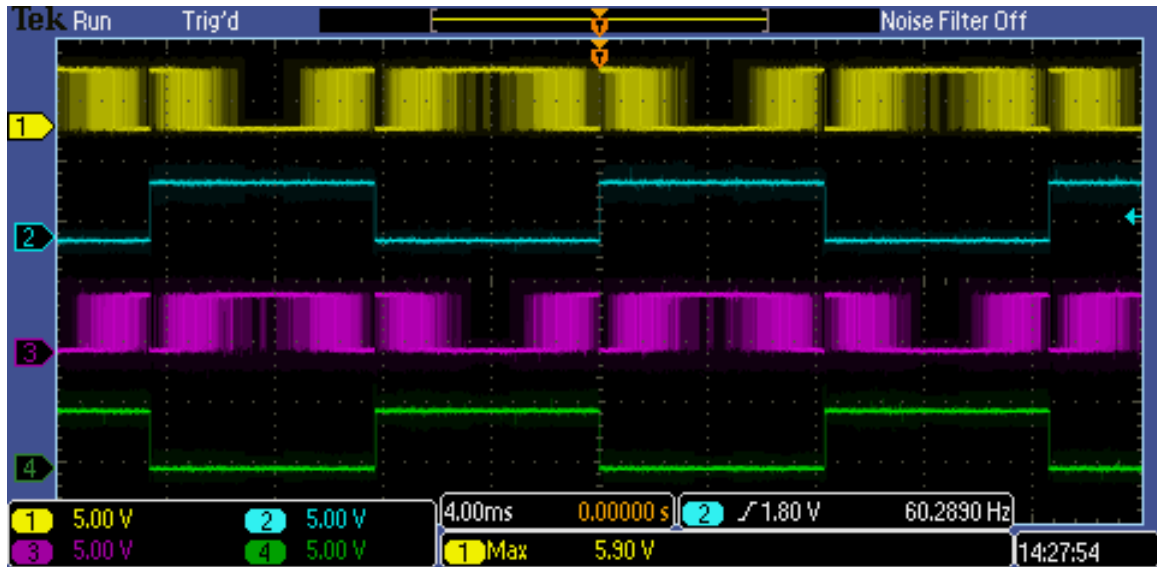
Fonte: Autoria própria (2024).

5.4 Testes iniciais em baixa tensão

Com a interface entre o computador e o conversor CA-CA operando corretamente, foram iniciados os testes do circuito controlador do inversor. Inicialmente, os circuitos de controle foram alimentados pelas fontes do retificador, enquanto o circuito do inversor foi alimentado por uma fonte de tensão de bancada, em vez do retificador trifásico. A escolha da fonte de bancada para esses testes iniciais foi dada devido à sua proteção contra correntes altas, a fim de minimizar possíveis danos ao circuito durante a fase de testes.

O primeiro passo da sequência de testes foi realizar as medições dos sinais de comando das chaves. A Figura 29 mostra a tela do osciloscópio com os sinais de controle enviados pelo EG8010 para os *gate-drivers*. No osciloscópio, os canais 1, 2, 3 e 4 exibem os sinais de acionamento das chaves 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Nesta figura, é possível ver que os sinais estão coerentes com os resultados da simulação, onde as chaves 1 e 3 possuem o formato da SPWM de 23,4 kHz e os canais 2 e 4 estão sendo chaveados em 60 Hz.

Figura 29 – Sinais de acionamento dos *gate-drivers*.

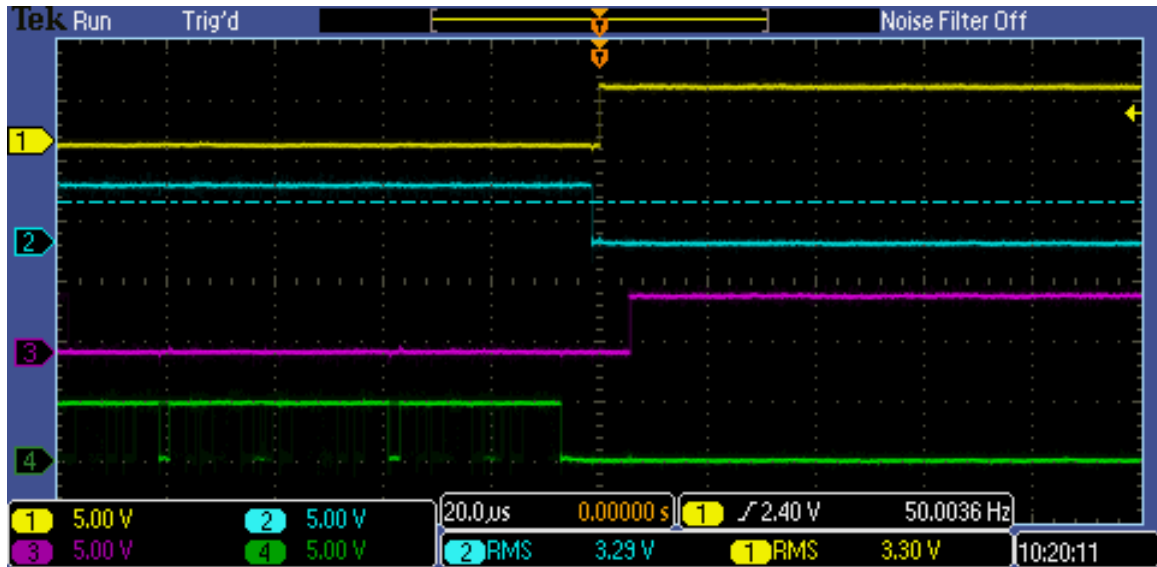


Fonte: Autoria própria (2024).

As Figuras 30 e 31 representam os sinais de acionamento dos *gate-drivers* com a escala de tempo reduzida para exibir a configuração de *dead-time*. No projeto, o tempo configurado para evitar a condução simultânea das chaves foi de 1500 ns. As medições realizadas confirmaram o funcionamento correto dessa função. Nessas figuras, o canal 1 do osciloscópio mostra o sinal de acionamento da chave 4, o canal 2 mostra o sinal de acionamento da chave 2, o canal 3 mostra o sinal de acionamento da chave 3 e o canal 4 mostra o sinal de acionamento da chave 1.

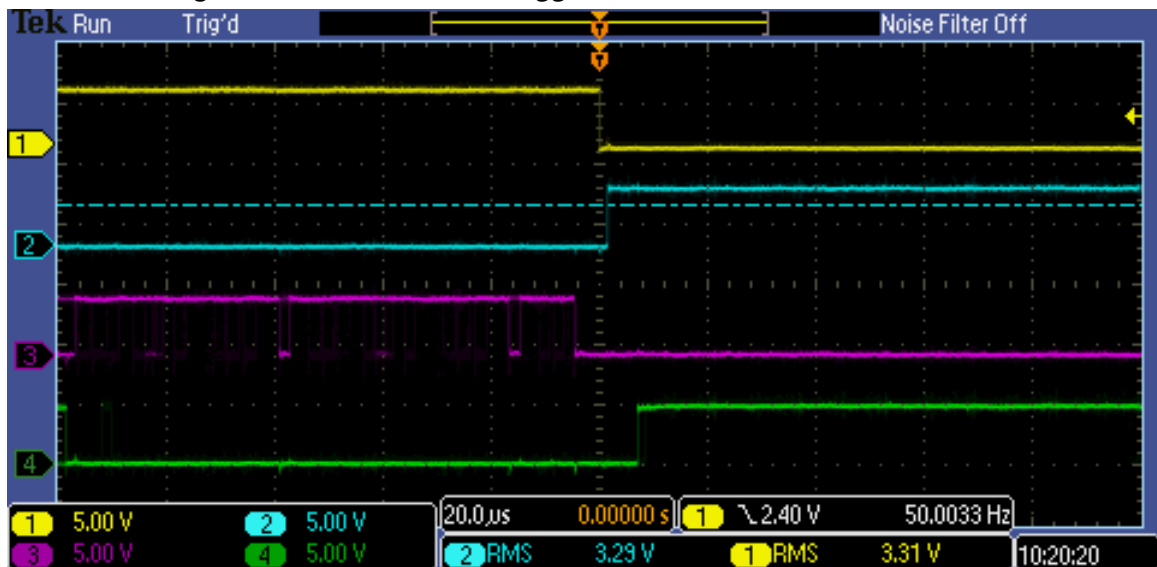
Na Figura 30, é possível ver o momento em que a chave 4 começa a conduzir, evidenciando que a chave 2 para de conduzir 1500 ns antes. A Figura 31 mostra o momento em que a chave 4 deixa de conduzir, onde é possível ver que a chave 2 começa a conduzir 1500 ns depois. Esses resultados confirmam que a configuração de *dead-time* está funcionando conforme projetado, prevenindo a condução simultânea das chaves e garantindo a operação segura do circuito.

Figura 30 – *Dead time* com *trigger* na borda de subida do canal 1.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 31 – *Dead time* com *trigger* na borda de descida do canal 1.



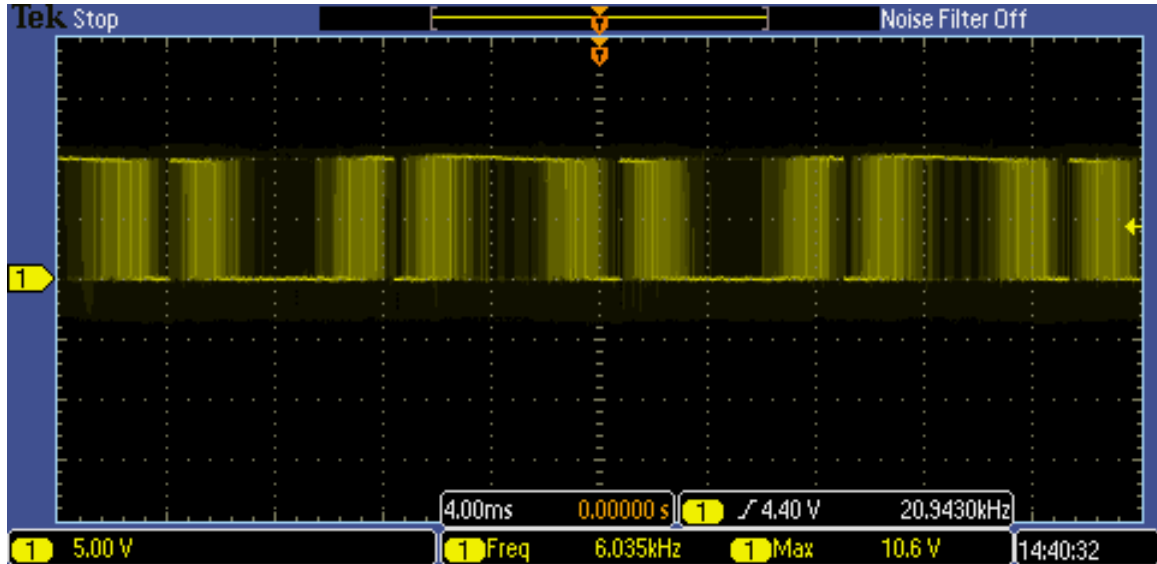
Fonte: Autoria própria (2024).

A partir da validação dos sinais de acionamento dos *gate-drivers*, o circuito do inversor foi alimentado com 15 V através de uma fonte de alimentação de bancada. Em seguida, foram medidos os valores de tensão entre o *gate* e emissores dos IGBTs (V_{GE}). O resultado esperado era a replicação dos sinais visualizados na Figura 29, mas com uma diferença de potencial de 12 V, que é a tensão utilizada pelos *gate-drivers* para o acionamento das chaves.

A Figura 32 mostra a tensão V_{GE} da chave 1, a Figura 33 mostra a tensão V_{GE} da chave 3, a Figura 34 mostra a tensão V_{GE} da chave 2 e a Figura 35 mostra a tensão V_{GE} da chave 4. O resultado obtido estava de acordo com o esperado, apesar de haver uma pequena queda de tensão no acionamento das chaves do lado alto. No entanto, essa queda não influencia

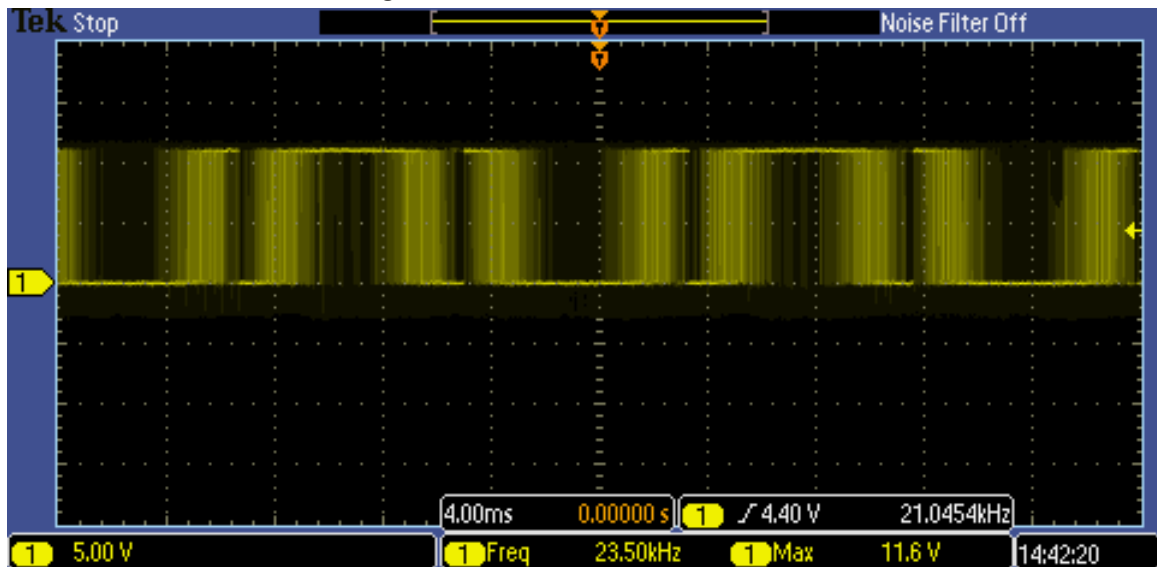
significativamente o circuito, pois os IGBTs selecionados possuem uma tensão de acionamento relativamente baixa.

Figura 32 – Sinal V_{GE} chave 1 - 15 V.



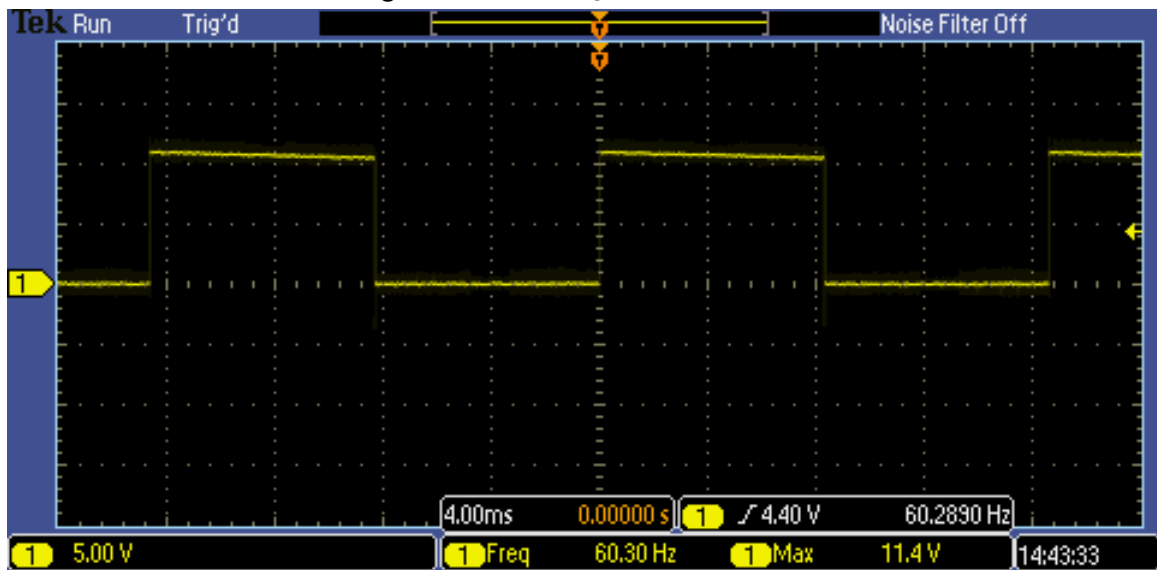
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 33 – Sinal V_{GE} chave 3 - 15 V.



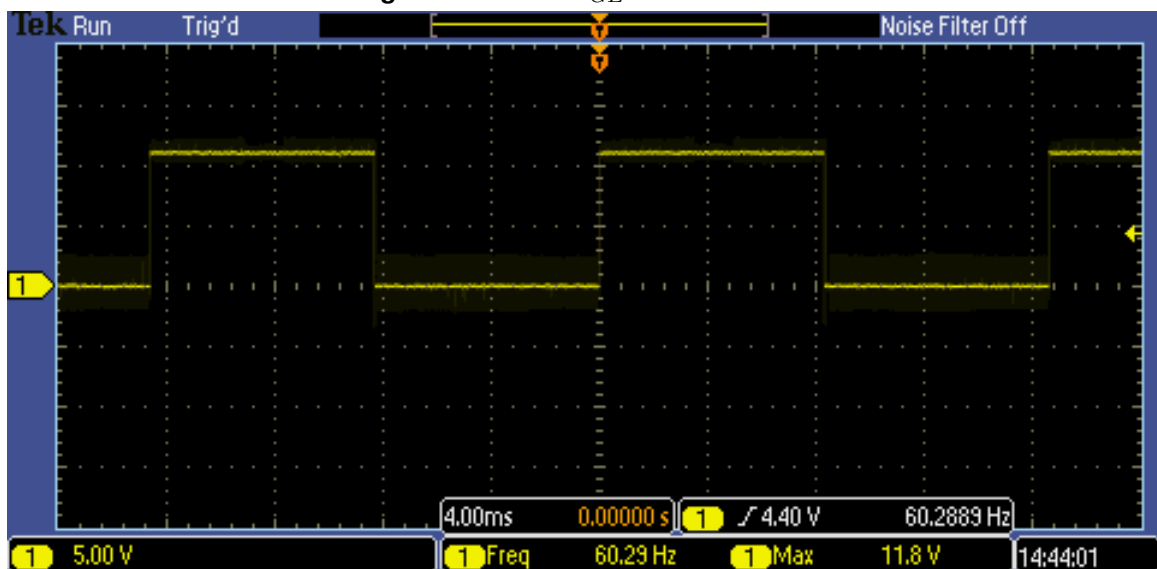
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 34 – Sinal V_{GE} chave 2 - 15 V.



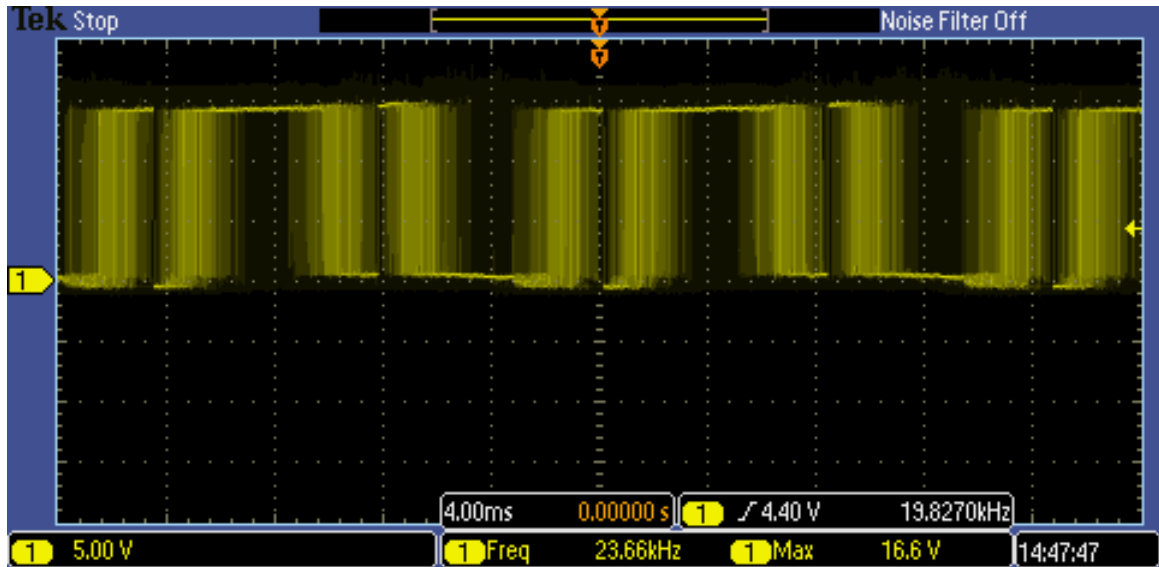
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 35 – Sinal V_{GE} chave 4 - 15 V.

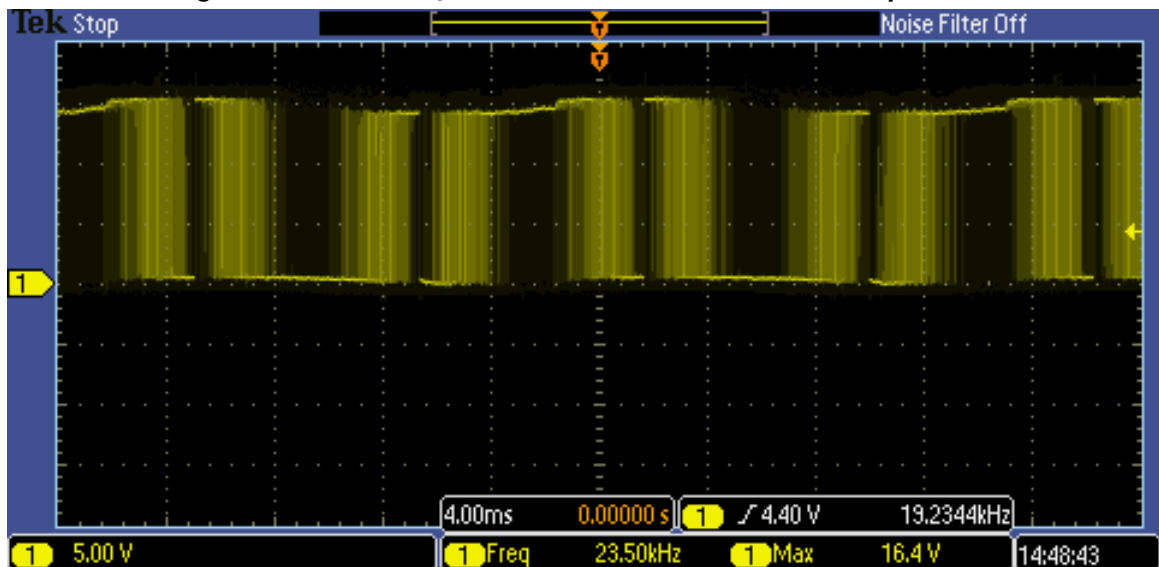


Fonte: Autoria própria (2024).

Em seguida, foram realizadas as medições das tensões sobre as chaves (V_{CE}). Os resultados, exibidos nas Figuras 36, 37, 38 e 39, mostram as tensões V_{CE} das chaves 1,3, 2 e 4, respectivamente. O sinal esperado era uma tensão de 15 V sobre as chaves quando o sinal de acionamento estivesse desligado. O teste validou que as chaves estão sendo acionadas corretamente. Essas medições confirmam que as chaves estão operando conforme projetado, com as tensões esperadas sendo aplicadas adequadamente.

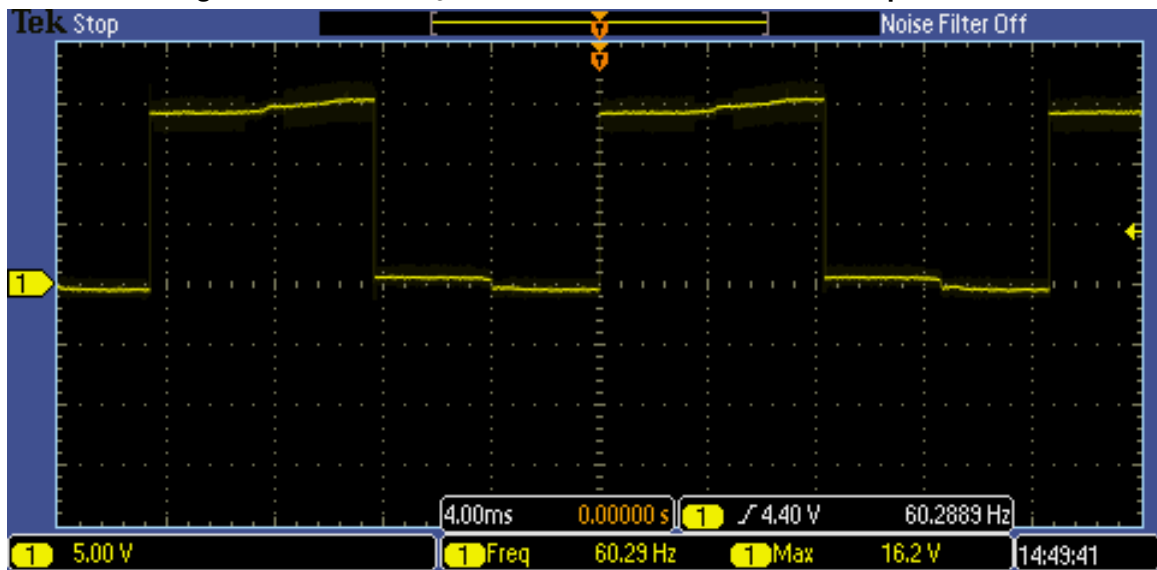
Figura 36 – Tensão V_{CE} chave 1 com circuito alimentado por 15 V.

Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 37 – Tensão V_{CE} chave 3 com circuito alimentado por 15 V.

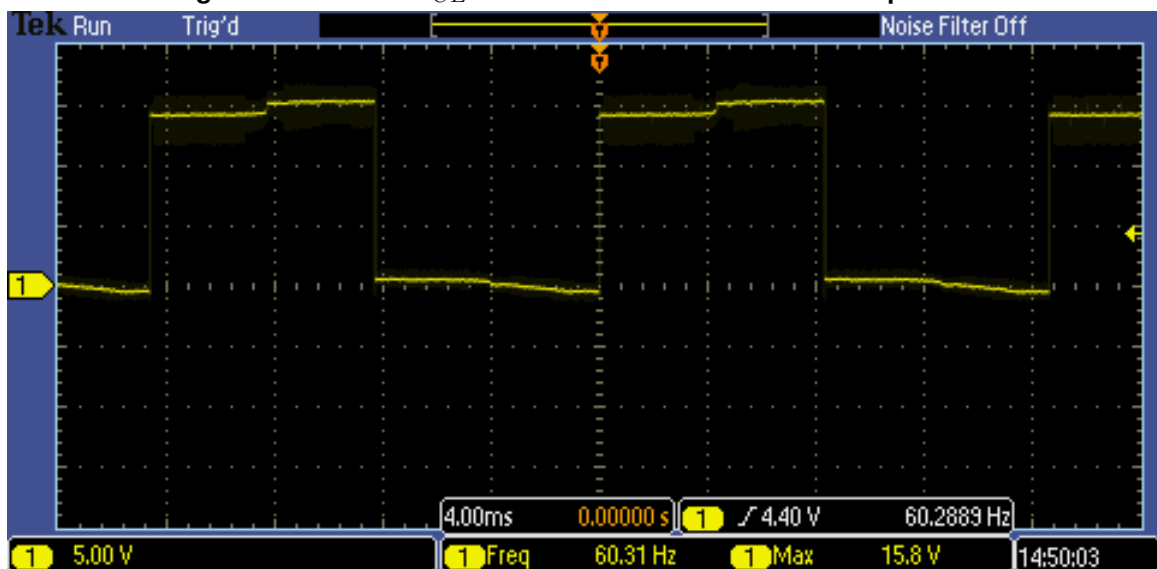
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 38 – Tensão V_{CE} chave 2 com circuito alimentado por 15 V.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 39 – Tensão V_{CE} chave 4 com circuito alimentado por 15 V.



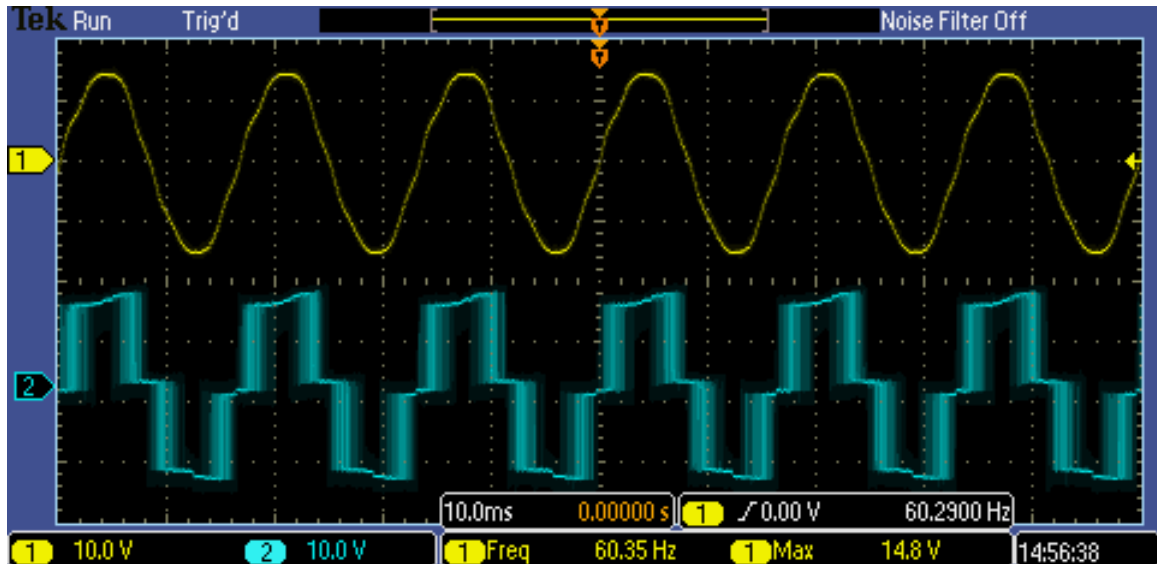
Fonte: Autoria própria (2024).

Por fim, foram realizadas as medições das tensões de saída ao alimentar o circuito do inversor com 15 V. Na Figura 40, o canal 2 mostra a forma de onda do circuito antes do filtro e o canal 1 mostra a saída do circuito após o filtro. Neste teste, o conversor CA-CA foi ligado em aberto. É possível ver que o resultado está de acordo com as simulações realizadas anteriormente. O sinal da saída não filtrada representa o sinal esperado da topologia SPWM, enquanto após o filtro a onda aparece em formato senoidal, apesar de haver distorções harmônicas.

A Figura 41 mostra os resultados do circuito quando uma carga de 2300Ω é ligada à saída. Nota-se uma redução nos níveis de ruído, o que pode ser explicado pela maior proximidade com os valores nominais do filtro projetado. Esses testes confirmam que o conversor

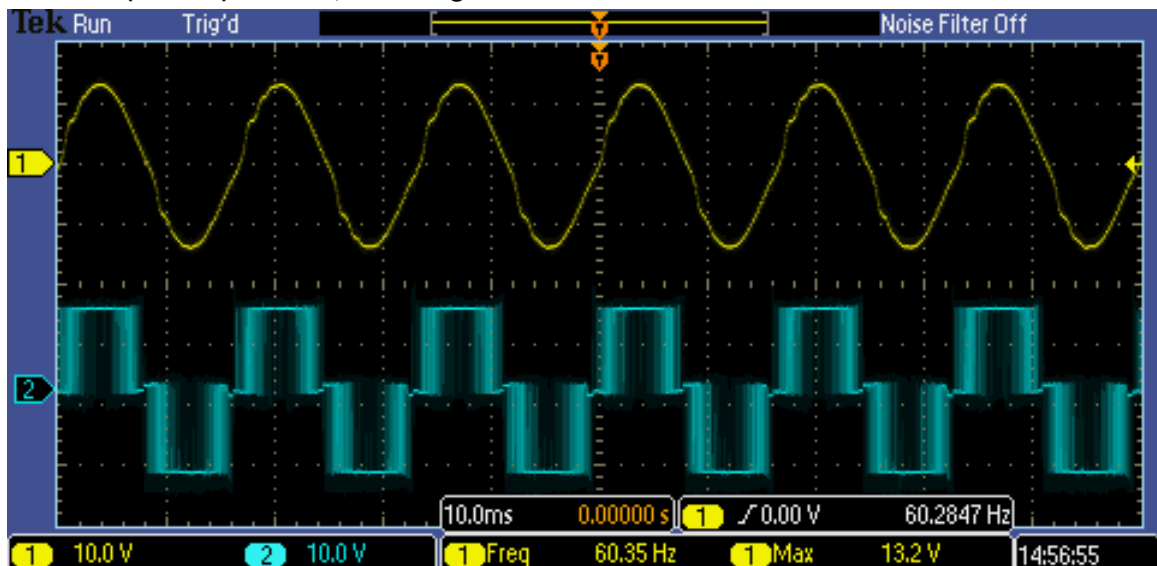
CA-CA está operando conforme esperado, com a saída filtrada exibindo uma forma de onda senoidal e uma resposta adequada sob carga.

Figura 40 – Tensões da saída do inversor, quando alimentado por 15 V, antes (canal 2) e depois (canal 1) do filtro, sem carga conectada à saída.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 41 – Tensões da saída do inversor, quando alimentado por 15 V, antes (canal 2) e depois (canal 1) do filtro, com carga conectada à saída.



Fonte: Autoria própria (2024).

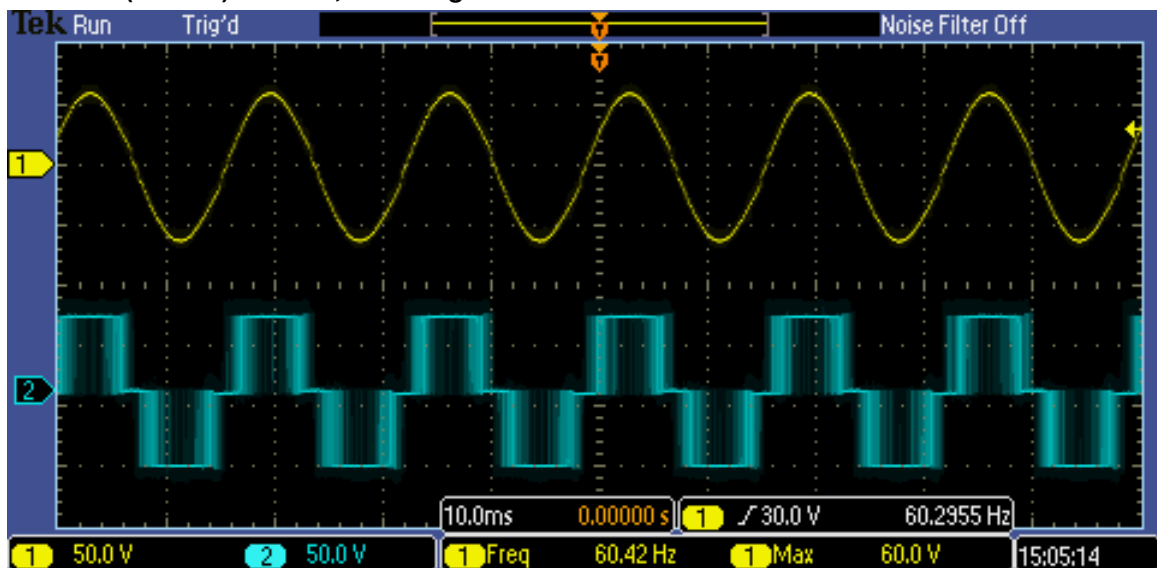
Os resultados dos testes básicos utilizando a alimentação do inversor com 15 V confirmam que o circuito está operando conforme projetado, com os sinais de controle replicados corretamente, uma queda de tensão dentro dos limites aceitáveis e a saída senoidal após o filtro. Partindo deste ponto, foram realizados novos testes utilizando uma alimentação mais alta,

de 60 V, sendo este o limite da fonte de bancada utilizada nos testes. Os resultados de saída, antes e depois do filtro, podem ser vistos nas Figuras 42 e 43.

A Figura 42 mostra a saída em aberto, enquanto a Figura 43 apresenta os resultados quando uma carga de 2300Ω foi conectada ao circuito. Esses testes com a alimentação de 60 V permitiram observar o comportamento do conversor CA-CA em condições mais próximas das de operação normal. A saída em aberto ilustra a forma de onda esperada antes e depois do filtro, com uma onda senoidal clara após a filtragem. Quando a carga de 2300Ω foi conectada, houve uma redução nos níveis de ruído. Pode-se observar que com o nível de tensão mais alta no teste, a forma de onda da saída possuem menos distorções, sendo uma onda mais próxima de uma senoide pura.

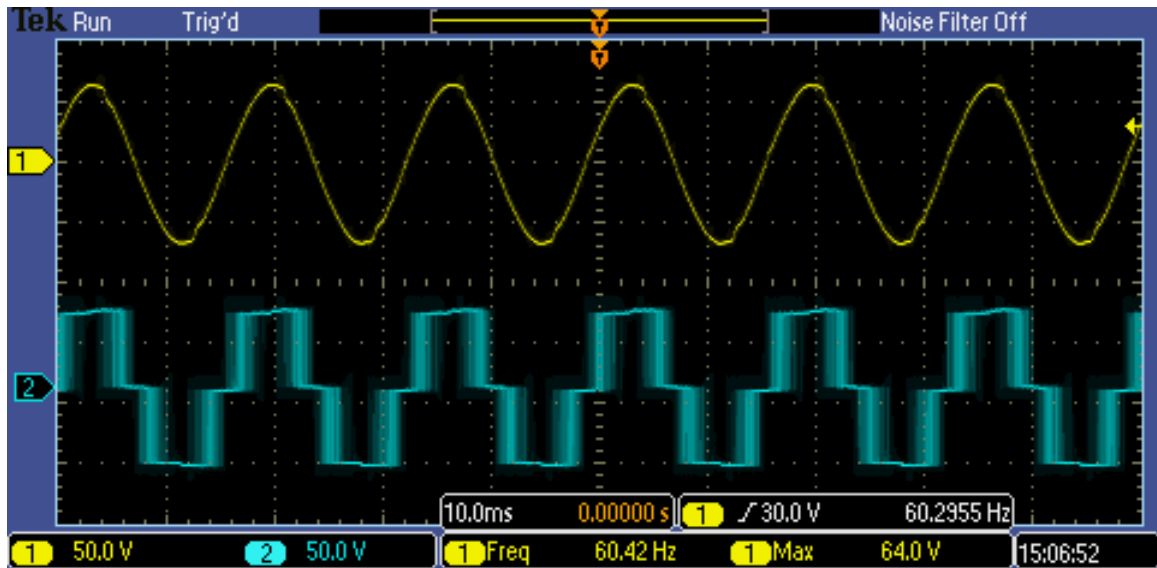
A Figura 44 mostra uma foto tirada com uma câmera térmica durante a realização desses testes, indicando que não há aquecimento no circuito.

Figura 42 – Tensões da saída do inversor, quando alimentado por 60 V, antes (canal 2) e depois (canal 1) do filtro, sem carga conectada à saída.



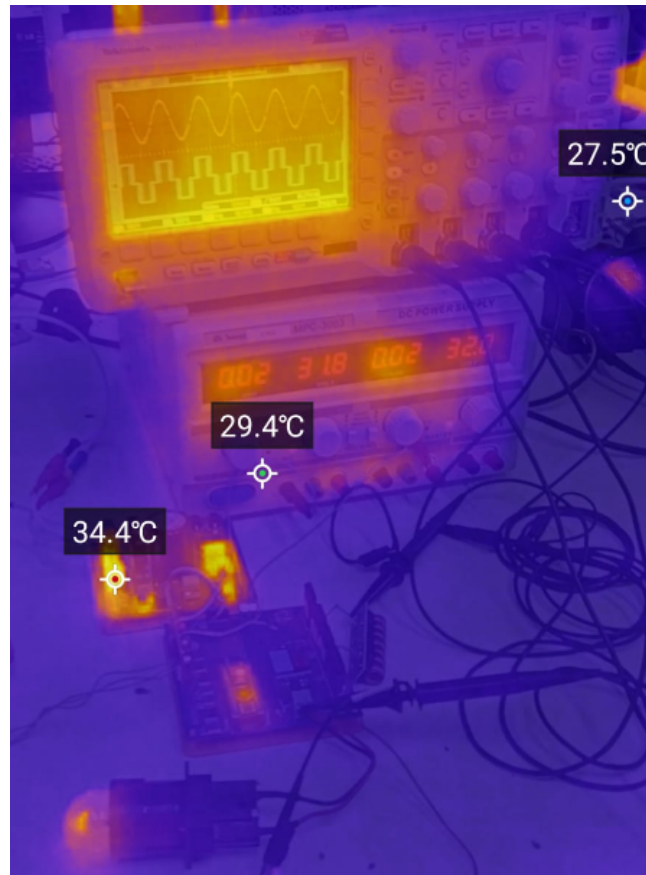
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 43 – Tensões da saída do inversor, quando alimentado por 60 V, antes (canal 2) e depois (canal 1) do filtro, com carga conectada à saída.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 44 – Foto tirada com câmera térmica na fase de testes.

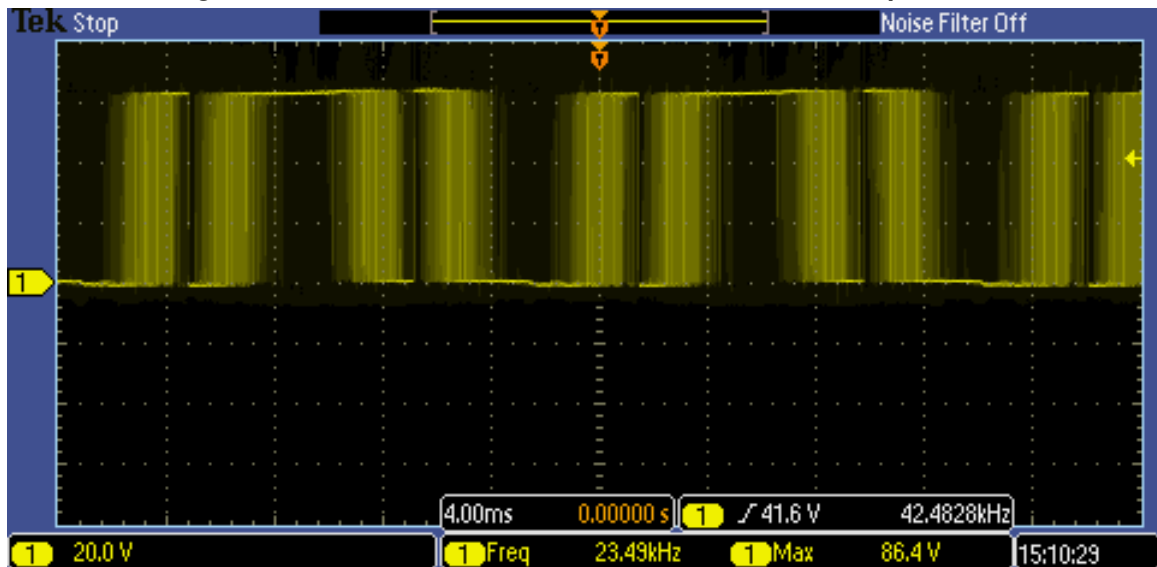


Fonte: Autoria própria (2024).

As Figuras 45, 46, 47 e 48 mostram as quedas de tensão V_{CE} das chaves 1, 3, 2 e 4, respectivamente, quando o circuito foi alimentado com 60 V e alimentando uma carga de 2300 Ω .

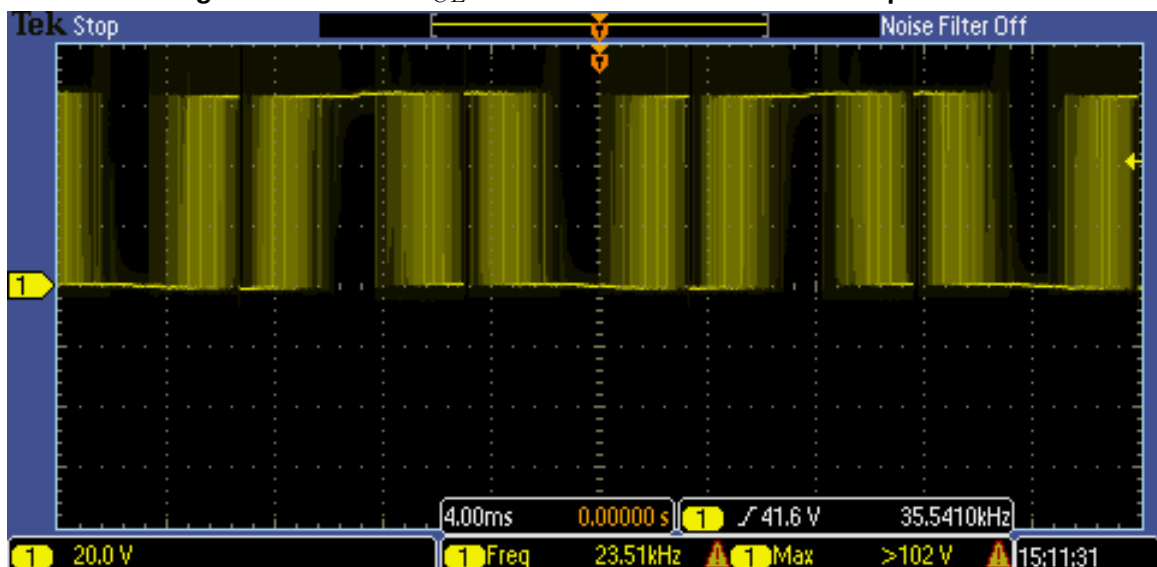
É possível notar que o funcionamento do circuito está de acordo com o esperado, apresentando as formas de onda previstas para os chaveamentos. No entanto, pode-se observar um nível de ruído maior nos sinais de chaveamento do circuito. Essas medições indicam que, embora o circuito opere corretamente sob maior tensão, a presença de ruído sugere a necessidade de ajustes finos no projeto, possivelmente na filtragem ou na configuração dos *gate-drivers*, para minimizar essas interferências e garantir uma operação mais estável e eficiente em condições de alta tensão.

Figura 45 – Tensão V_{CE} chave 1 com circuito alimentado por 60 V.



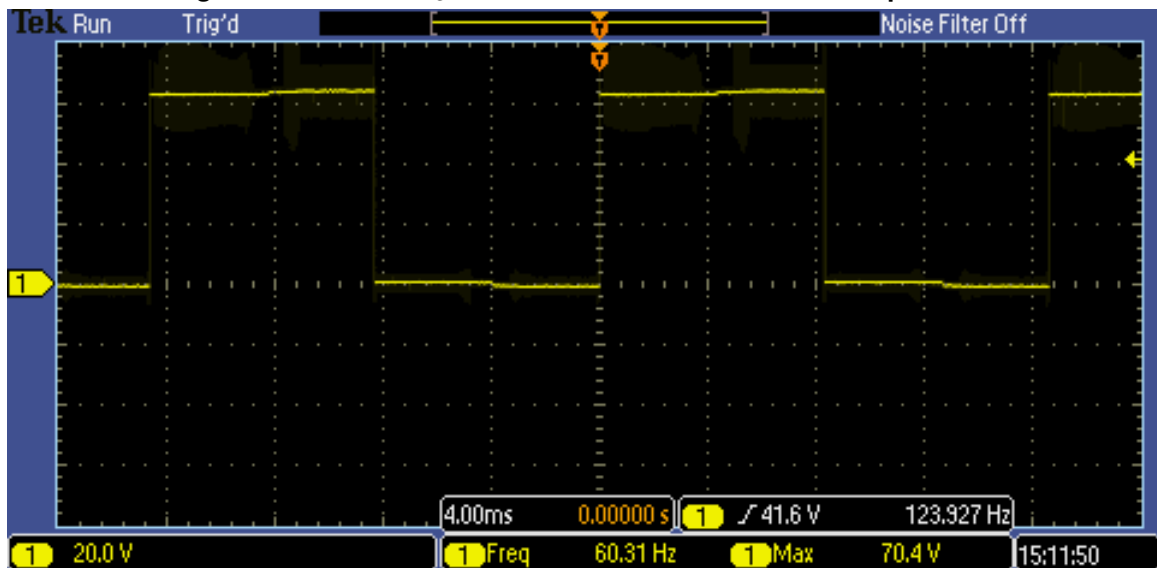
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 46 – Tensão V_{CE} chave 3 com circuito alimentado por 60 V.



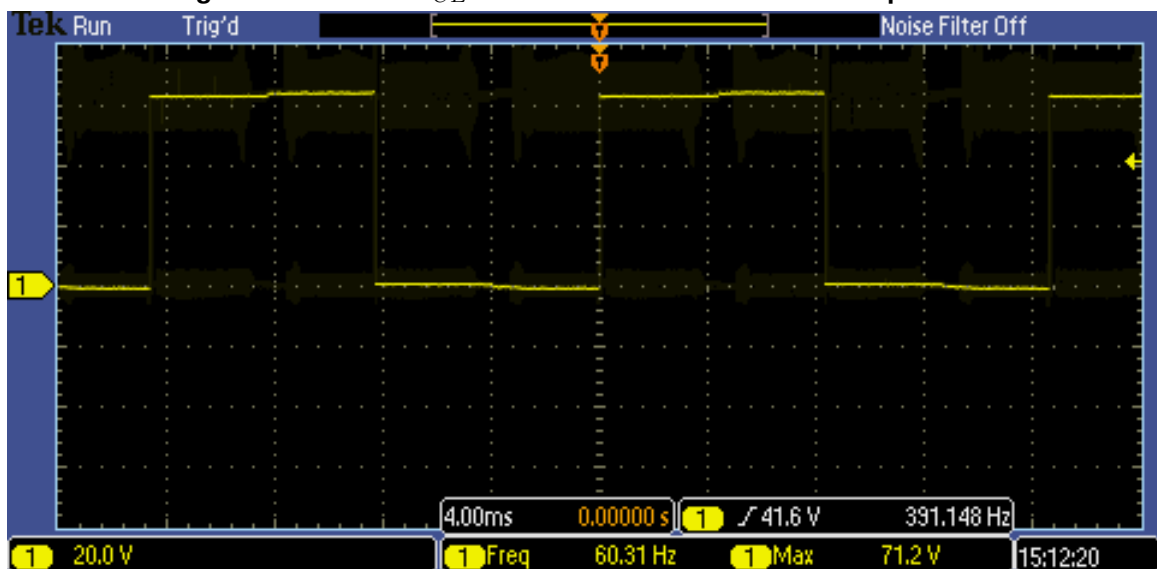
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 47 – Tensão V_{CE} chave 2 com circuito alimentado por 60 V.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 48 – Tensão V_{CE} chave 4 com circuito alimentado por 60 V.

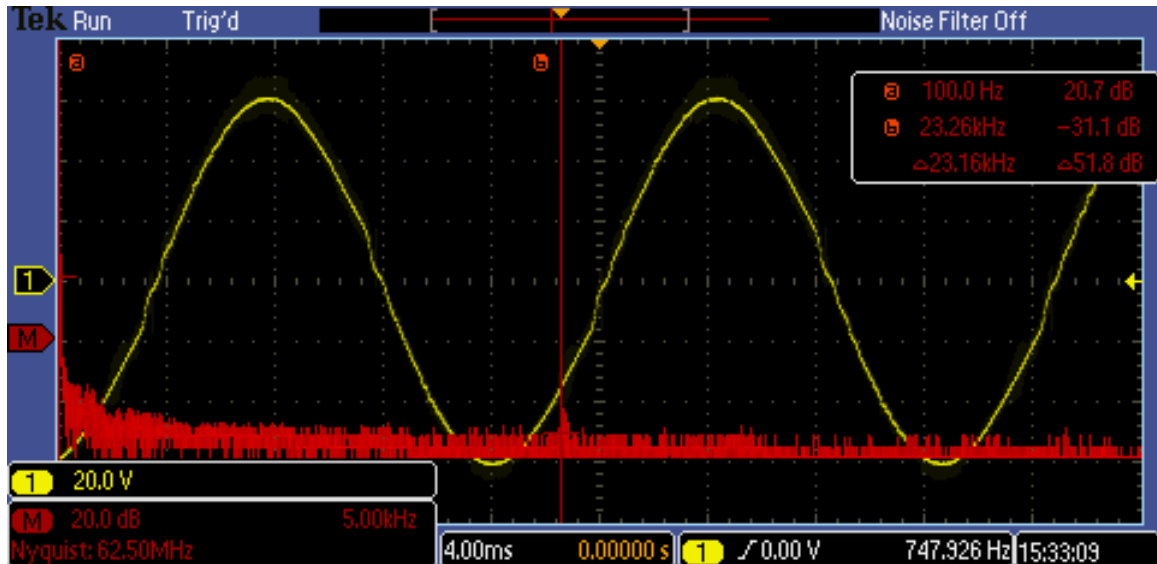


Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 49 mostra a *Fast Fourier Transform* (FFT) da saída do circuito no canal matemático, enquanto o sinal de saída pode ser observado no canal 1. O teste foi realizado com o inversor alimentado por 60 V e com uma carga de 2300 Ω na saída. É possível observar que o sinal de saída do circuito após o filtro segue a forma senoidal desejada. Na FFT, há um grande pico em 60 Hz (indicado pelo cursor a), que corresponde à frequência de saída principal, e um pequeno pico em 23,4 kHz (indicado pelo cursor b), que é devido à frequência de modulação utilizada. Os valores da FFT expressos em decibéis nesses pontos são exibidos pelos cursores. Devido à limitação de escala, o cursor 'a' apresenta a legenda em 100 Hz e o cursor 'b' em 23,26 kHz. Esses resultados confirmam que a filtragem do circuito está efetiva, permitindo que a onda

senoidal predominante de 60 Hz seja clara, enquanto as componentes de alta frequência estão significativamente atenuadas.

Figura 49 – FFT da saída do circuito quando alimentado por 60 V com carga de 2300 Ω .

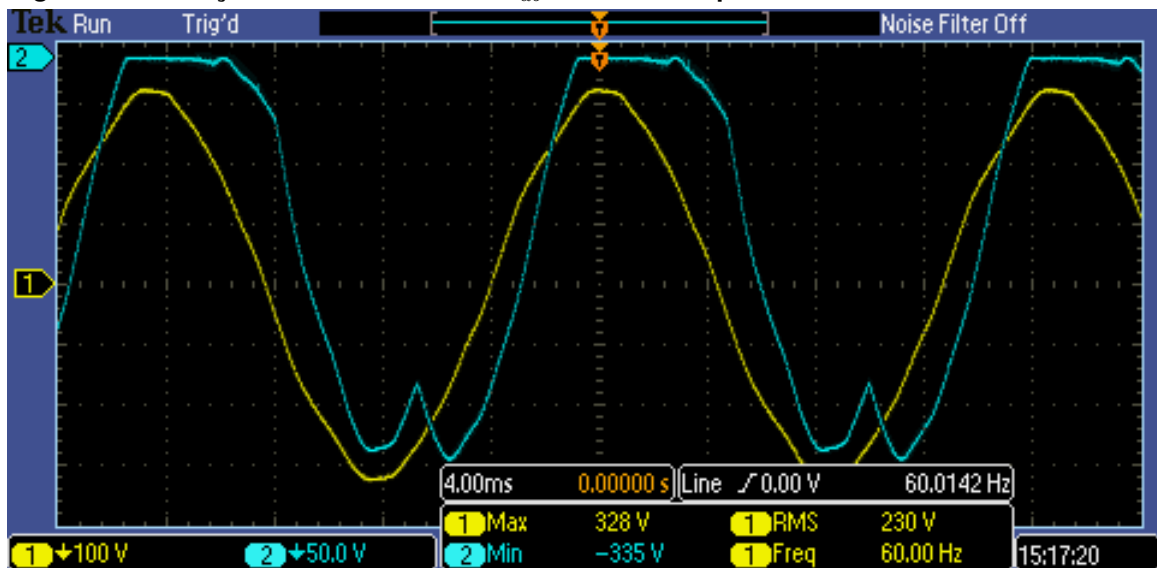


Fonte: Aatoria própria (2024).

5.5 Testes do retificador trifásico

Com o circuito do inversor validado em ambiente controlado, iniciaram-se os testes do circuito do retificador trifásico, que será utilizado posteriormente para a alimentação do inversor. O circuito da placa fonte foi montado e conectado à rede trifásica para a realização dos testes. A Figura 50 mostra a medição da tensão de linha V_{ab} no canal 1 e a queda de tensão em V_{D1} no canal 2. Devido à limitação de escala, o canal 2 foi deslocado para cima, mas é possível ver na figura que os níveis de tensão estão de acordo com o esperado e seguem o formato visto anteriormente na simulação. A tensão de V_{ab} mostra um sinal senoidal de 230 V de valor eficaz da rede, enquanto a tensão V_{D1} indica que o diodo conduz quando está diretamente polarizado e funciona como um circuito aberto quando está sendo polarizado inversamente. Esses resultados confirmam o funcionamento adequado do retificador trifásico, conforme projetado.

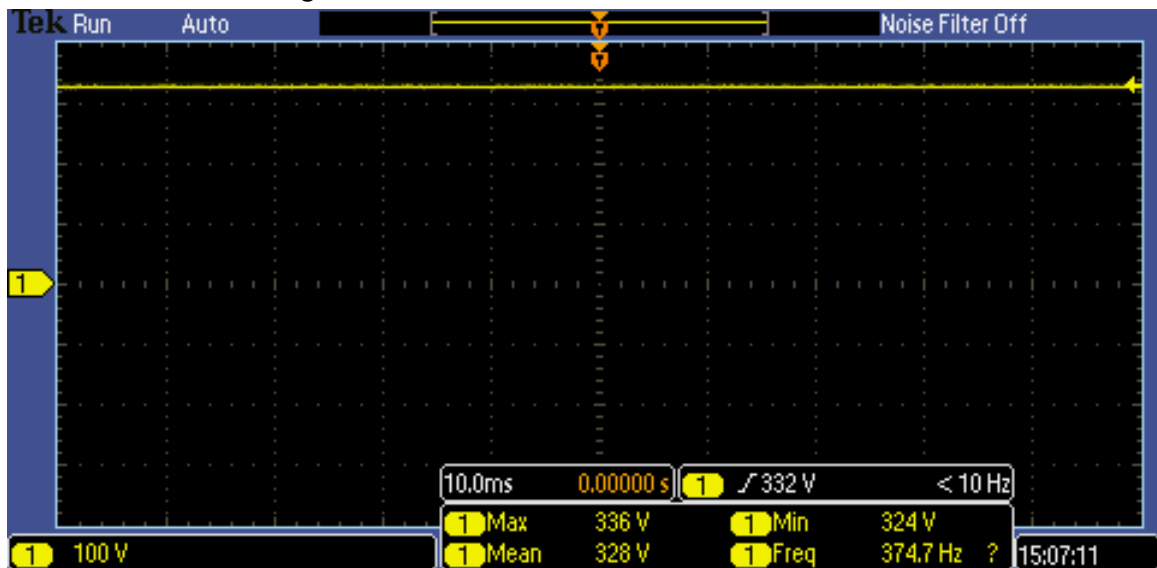
Figura 50 – Medição da tensão de linha V_{ab} no canal 1 e queda de tensão em V_{D1} no canal 2.



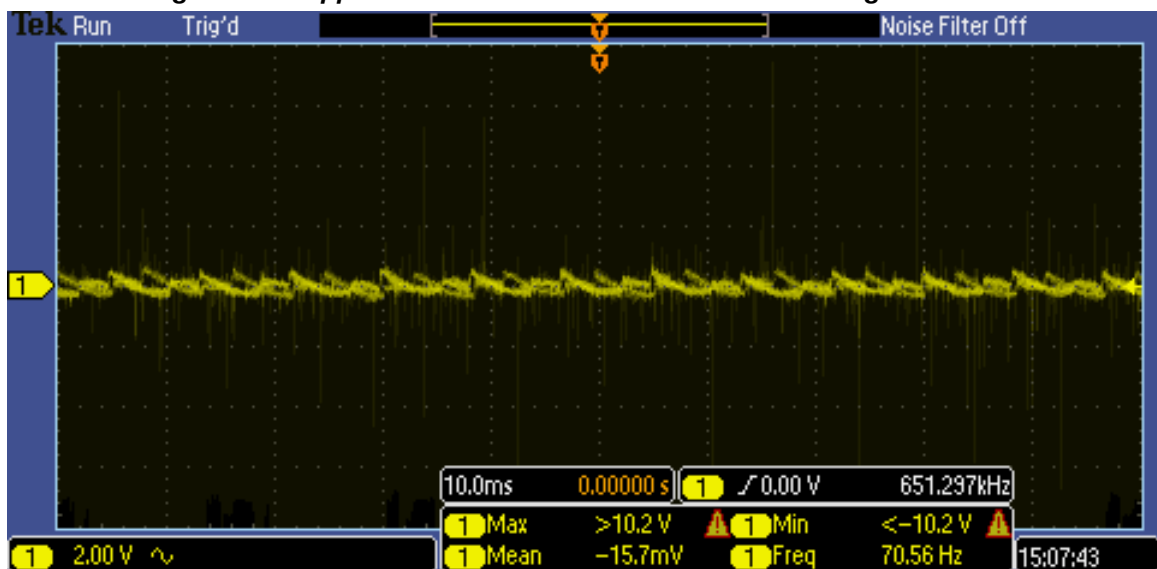
Fonte: Autoria própria (2024).

Em seguida, o valor da saída do retificador, após o filtro capacitivo, foi medido. A Figura 51 mostra o valor da saída do circuito quando alimentado pela rede trifásica de 220 V, alimentando uma carga de $10\text{ k}\Omega$. Nesta figura, é possível ver que o sinal de saída possui amplitude razoavelmente constante em 328 V, próxima do valor de pico da rede, validando que o sinal está de acordo com o esperado. Na Figura 52, o sinal foi acoplado em CA e a escala vertical alterada para 2 V para que pudesse ser feita a medição da ondulação do sinal de saída do circuito. O sinal observado mostra que o filtro está funcionando de acordo com o projeto, apresentando uma ondulação percentual baixa. No entanto, é exibido um nível de ruído no sinal, o que pode ser decorrente da forma de medição, uma vez que foi utilizada uma ponteira com 100x de atenuação. Esses resultados confirmam que o retificador trifásico está operando corretamente, fornecendo uma saída contínua com mínima ondulação.

Figura 51 – Tensão de saída filtrada do retificado.



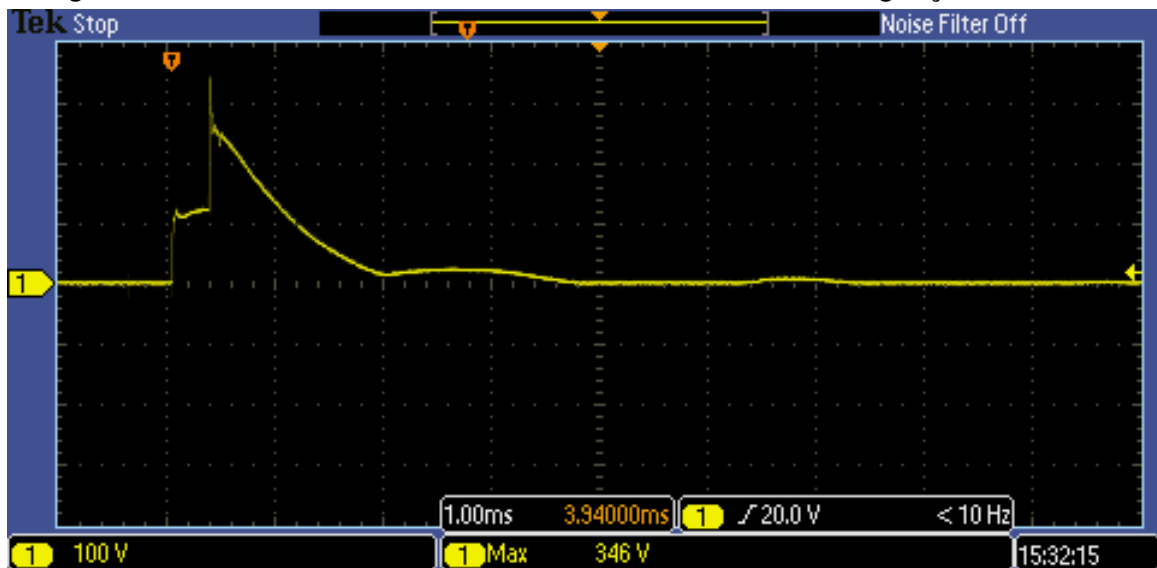
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 52 – *Ripple* na saída filtrada do retificador com carga de 10 k Ω .

Fonte: Autoria própria (2024).

Por fim, para validar completamente o circuito do retificador, foi realizada a medição da tensão sobre o NTC. O circuito foi desligado e o capacitor descarregado completamente. Em seguida, o osciloscópio foi configurado para realizar uma captura única quando o circuito fosse alimentado novamente. O resultado obtido, exibido na Figura 53, mostra a queda de tensão sobre o NTC, que possui uma resistência nominal de 25 Ω . A medição confirmou que o NTC protegeu os diodos da corrente alta no momento da partida do circuito, atuando como previsto. O pequeno degrau observado no início do sinal pode ser atribuído ao *bouncing* no momento do acionamento dos disjuntores utilizados para alimentar o circuito.

Figura 53 – Queda de tensão em cima do NTC no momento de energização do circuito.



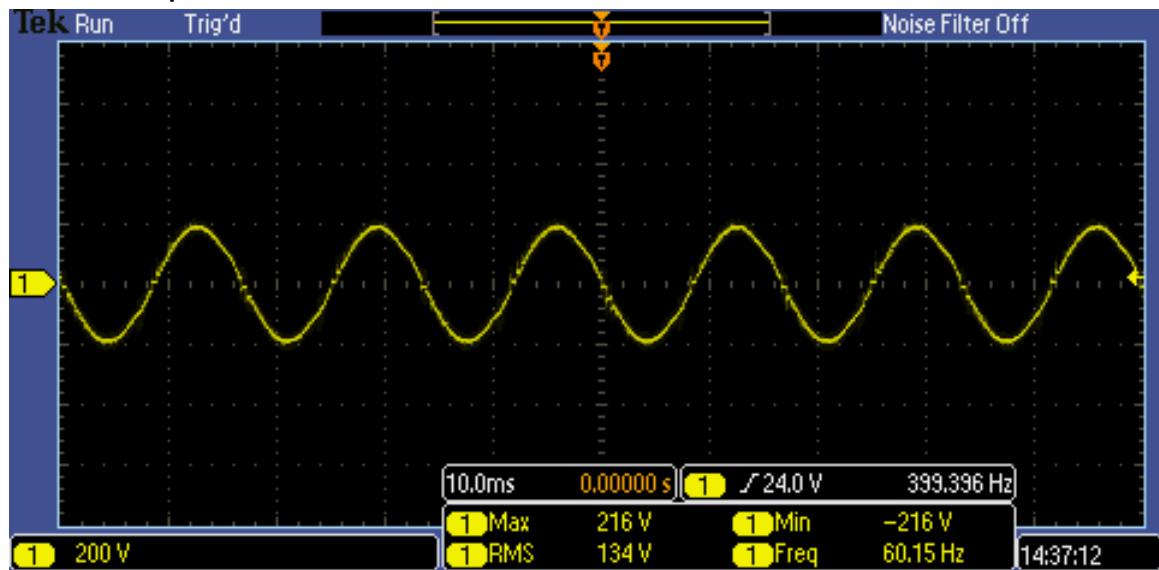
Fonte: Autoria própria (2024).

5.6 Testes do projeto completo

Com todas as partes do circuito validadas e funcionando separadamente, foi possível realizar o teste integrando todo o circuito do conversor CA-CA. O circuito da placa fonte foi alimentado com a tensão trifásica de 220 V, e seus níveis de tensão foram utilizados para alimentar a PCI principal. Na saída do circuito, uma lâmpada incandescente de 7 W foi conectada para servir como carga. A Figura 56 mostra o *setup* do teste. A Figura 54 mostra a tela do osciloscópio realizando a medição da tensão de saída do inversor nas condições do teste. É possível visualizar que a forma de onda do circuito continua senoidal, com a tensão de saída em 134 V eficaz e frequência de 60 Hz.

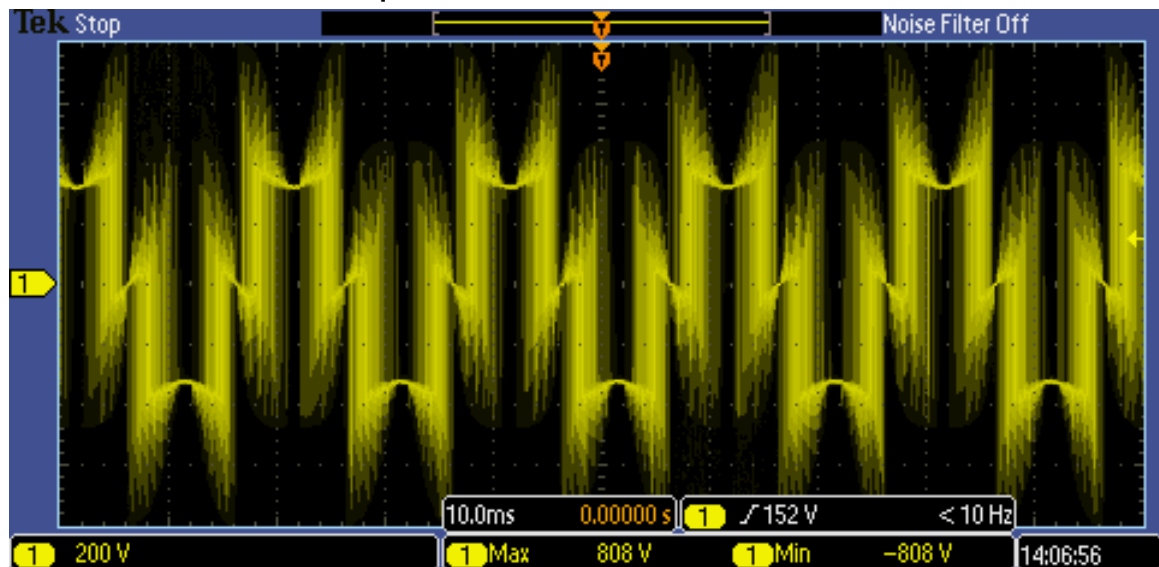
Foi medido o sinal de saída do inversor antes do filtro, conforme mostrado na Figura 55. É possível observar que há um nível de ruído ocorrendo nos momentos de chaveamento dos IGBTs. Apesar disto, foi possível validar o funcionamento do conversor CA-CA programável. Os testes indicaram que o conversor pode operar conforme projetado.

Figura 54 – Tensão de saída do conversor CA-CA operando em condições nominais de tensão e frequência.



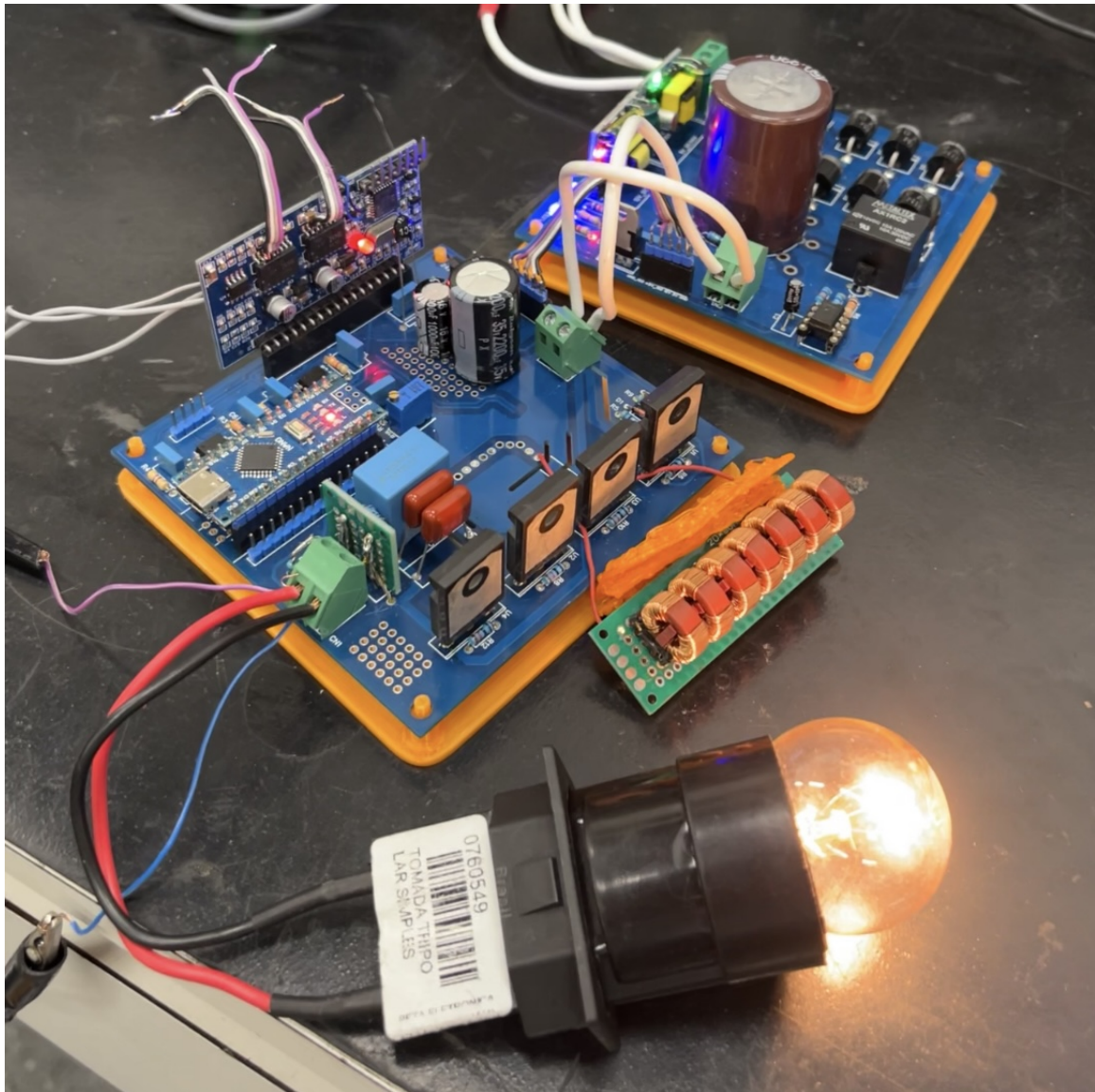
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 55 – Saída do inversor antes do filtro de saída, com circuito operando em condições nominais de tensão e frequência.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 56 – Teste acendendo uma lâmpada de 7 W com o projeto conversor CA-CC-CA.

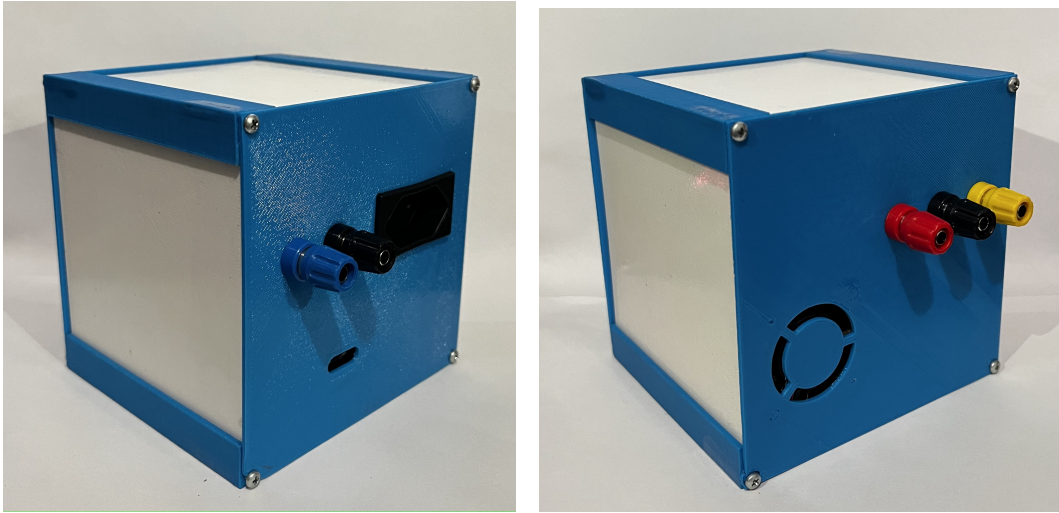


Fonte: Autoria própria (2024).

5.7 Protótipo final

A Figura 57 mostra o resultado estético do conversor, após a impressão 3D da estrutura mecânica e a devida acomodação dos componentes dentro da caixa. Na Figura 58, é apresentado o *setup* para testes com o protótipo em funcionamento, com uma lâmpada conectada como carga e um cabo USB para comunicação. O resultado do protótipo montado garante a operação segura do equipamento, evitando choques elétricos e curto-circuitos que poderiam ser ocasionados pelo manuseio indevido do circuito.

Figura 57 – Protótipo final do conversor CA-CA indireto. (a) Vista da frente. (b) Vista de trás.



(a) Parte da frente do protótipo

(b) Parte de trás do protótipo

Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 58 – Protótipo final com lâmpada e USB conectados.



Fonte: Autoria própria (2024).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este projeto é uma resposta direta à crescente demanda por soluções acessíveis e flexíveis para testes elétricos, que são cruciais para a validação e conformidade de produtos em diversas condições de rede elétrica. A capacidade de simular diferentes níveis de tensão e frequência permite que as empresas garantam a robustez e a confiabilidade de seus produtos em um mercado globalizado onde as normas elétricas variam consideravelmente.

A proposta de desenvolver um conversor CA-CA programável com base em componentes eletrônicos de baixo custo e uma abordagem eficiente de *design* oferece uma alternativa viável e econômica às opções comerciais existentes. Essa inovação não só reduz os custos operacionais para pequenas e médias empresas, mas também democratiza o acesso a ferramentas avançadas de teste, promovendo um ambiente de competitividade e inovação tecnológica. O projeto também contribui para a sustentabilidade ambiental ao possibilitar a detecção e correção de ineficiências energéticas nos produtos testados, promovendo um uso mais consciente e eficiente da energia, além de ajudar na detecção de fragilidades nos projetos, permitindo a correção dos problemas, reduzindo a quantidade de lixo eletrônico ocasionados por falhas na distribuição de energia elétrica.

Em suma, este projeto oferece uma plataforma para futuras inovações e melhorias. Através da combinação de economia, eficiência e conformidade normativa, o conversor proposto promete ser uma ferramenta essencial para empresas e instituições de pesquisa que buscam garantir a qualidade e a conformidade de seus produtos em um ambiente de rede elétrica cada vez mais complexo e diversificado.

Os testes funcionais do conversor mostraram que o projeto funciona conforme foi projetado. Foi possível validar o funcionamento conceitual do conversor CA-CA programável. Os resultados indicam que o dispositivo pode operar conforme projetado, deste o estágio da retificação da rede trifásica, até o resultado da tensão de saída senoidal do inversor. Além disto, a comunicação SCPI mostrou-se eficiente, possibilitando a automação de rotinas de testes através da comunicação com o conversor via USB. Por fim, o resultado da montagem mecânica, com a integração completa do sistema, garante a confiabilidade e manuseabilidade do equipamento, sem oferecer riscos de segurança ao usuário.

6.1 Trabalhos futuros

A partir dos resultados obtidos, alguns pontos de melhoria podem ser evidenciados para o equipamento. Primeiramente, a limitação de tensão de saída do conversor CA-CA, que atualmente não pode exceder a tensão de alimentação do equipamento. Para superar essa limitação, uma solução seria desenvolver uma fonte de alimentação que aceite uma entrada universal (de 95 a 250 V, 50 e 60 Hz) e entregue uma saída contínua de 400 V. Este projeto poderia ser desenvolvido utilizando a topologia *flyback*, que além de proporcionar a elevação da tensão, a

escolha desta topologia também garantiria o isolamento galvânico na saída, de grande importância para a realização das medições no equipamento sob teste de forma segura, uma vez que a saída não estaria mais sendo referenciada diretamente à rede elétrica. Além disso, o uso de uma fonte com maior capacidade de tensão permitiria a realização de testes em uma gama mais ampla de equipamentos eletroeletrônicos, ampliando a funcionalidade e a versatilidade do conversor CA-CA.

Apesar do módulo EGS002 ter sido essencial para o desenvolvimento do projeto, esta solução do controlador possui muitas limitações quando o intuito é possuir um equipamento mais versátil para testes. O ASIC EG8010 foi suficiente para validar o conceito de criar um conversor CA-CA programável, mas para obter melhores resultados, seria necessário o desenvolvimento de um sistema de controle mais avançado e preciso. Um sistema de controle aprimorado permitiria um controle mais preciso das chaves do inversor, de forma que o equipamento não apenas atendesse aos requisitos básicos de operação, mas também proporcionasse um ambiente de testes mais flexível e abrangente, capaz de simular uma variedade maior de condições de rede elétrica.

Outro ponto de melhoria para aumentar a versatilidade do projeto seria, ao invés de possuir apenas uma saída monofásica, projetar um conversor que tivesse uma saída trifásica. Nesse caso, cada fase poderia ser controlada individualmente, o que aumentaria significativamente os cenários a serem reproduzidos, incluindo a capacidade de simular desequilíbrios de fase, variações de fase e tensão nas fases, e condições de falha específicas, proporcionando um ambiente de teste mais completo e rigoroso para equipamentos trifásicos. Essa funcionalidade adicional tornaria o conversor CA-CA ainda mais útil para aplicações industriais, de pesquisa e desenvolvimento, e para laboratórios de testes de conformidade.

Finalmente, poderia ser realizado um estudo de viabilidade de mercado para identificar a possibilidade de comercialização deste equipamento como um produto. Esse estudo teria como objetivo pesquisar as necessidades e exigências de um produto utilizado comercialmente para a validação de produtos e equipamentos eletroeletrônicos. A partir dos resultados desse estudo, modificações poderiam ser realizadas no projeto para adaptar o conversor CA-CA de forma a torná-lo viável como um produto comercial. Isso poderia incluir ajustes no design para melhorar a usabilidade, aprimoramentos na robustez e na durabilidade do equipamento, e adição de funcionalidades para atender a demandas específicas do mercado.

REFERÊNCIAS

- ANNOWSKY, R.; THIEDE, A. **Dispositivo para testes de alta tensão de equipamentos de tecnologia de alta tensão**. [S.l.]: Depositante: Maschinenfabrik Reinhausen GMBH; PCS Power Control Solutions Verwaltungs AG. PI1012627-9 A2. Depósito: 21 abr. 2010. Concessão: 26 maio. 2020, 2020.
- BARBI, I. *Eletrônica de potência*. Ed. do Autor, 2006.
- CHANDRAMOHAN, J. *et al.* Intelligent smart home automation and security system using arduino and wi-fi. **International Journal of Engineering And Computer Science (IJECS)**, v. 6, n. 3, p. 20694–20698, 2017.
- DIAS, A. L. A. Modelagem, projeto e implementação de um inversor monofásico para sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. **Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade**, p. 118, 2019.
- DULAU, L. *et al.* A new gate driver integrated circuit for igbt devices with advanced protections. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 21, n. 1, p. 38–44, 2006.
- ERICKSON, R. W. **Fundamentals of Power Electronics**. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1997.
- GONÇALVES, J. T. *et al.* Hybrid three-phase rectifiers with active power factor correction: A systematic review. **Electronics**, v. 10, n. 13, 2021. ISSN 2079-9292. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/13/1520>.
- GUILI, L.; QUANCUN, K. Design of virtual oscilloscope based on gpib interface and scpi. *In*: IEEE. **2013 IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments**. [S.l.], 2013. v. 1, p. 294–298.
- HANNON, C.; YAN, J.; JIN, D. Dssnet: A smart grid modeling platform combining electrical power distribution system simulation and software defined networking emulation. *In*: **Proceedings of the 2016 ACM SIGSIM conference on principles of advanced discrete simulation**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 131–142.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60969: Self-ballasted lamps for general lighting services - Performance requirements**. 2001.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000-4-11: Testing and measurement techniques - Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests**. 2004.
- JAMIL, M.; SHARMA, S. K.; SINGH, R. Fault detection and classification in electrical power transmission system using artificial neural network. **SpringerPlus**, Springer, v. 4, p. 1–13, 2015.
- JANSEN, D. *et al.* **The electronic design automation handbook**. [S.l.]: Springer, 2003.
- LI, M.-C. **Programmable AC power supply unit**. [S.l.]: Depositante: Chyng Hong Electronic Co Ltd. DE102017008759B4. Depósito: 21 mar. 2019. Concessão: 11 jul.2019, 2019.
- MA, K. *et al.* AC Grid Emulations for Advanced Testing og Grid-Connected Converters - An Overview. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 36, n. 2, p. 1626–1654, fev. 2021.

MAKONIN, S.; WANG, Z. J.; TUMPACH, C. Rae: The rainforest automation energy dataset for smart grid meter data analysis. **Data**, v. 3, n. 1, 2018. ISSN 2306-5729. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2306-5729/3/1/8>.

MAMUN, A. *et al.* Design and implementation of single phase inverter. **International Journal of Science and Research (IJSR)**, Citeseer, v. 2, n. 2, p. 163–167, 2013.

MEZAROBA, M. *et al.* Fonte de alimentação ca monofásica com adição de harmônicos. **Eletrônica de Potência**, v. 12, n. 2, p. 121–128, 2007.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. **Power Electronics: Converters, Applications, and Design**. [S.l.]: Wiley, 2002.

NATIVIDADE, I. A. Desenvolvimento de um conversor cc-ca monofásico para aplicação em geração distribuída. **Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade**, p. 57, 2019.

NURHAIDA, A. S. *et al.* Design and development of three-phase voltage source inverter for variable frequency drive. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, IOP Publishing, v. 705, n. 1, p. 012016, nov 2019. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/705/1/012016>.

ONO, A. **Power delivery device, AC adapter, AC charger, electronic apparatus and power delivery system**. [S.l.]: Depositante: Rohm Co Ltd. US10333412B2. Depósito: 23 ago. 2017. Concessão: 25 jun. 2019, 2019.

RASHID, M. H. **Power Electronics: Circuits, Devices Applications**. [S.l.]: Pearson, 2014. 1026 p.

STOLOJESCU-CRISAN, C.; CRISAN, C.; BUTUNOI, B.-P. An iot-based smart home automation system. **Sensors**, v. 21, n. 11, 2021. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/11/3784>.

WU, J.-C.; CHOU, C.-W. A solar power generation system with a seven-level inverter. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 29, n. 7, 2014.

YARAMASU, V. *et al.* High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies. **Proceedings of the IEEE**, v. 103, n. 5, p. 740–788, 2015.