

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

JULIA CARNEIRO DE OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL PARA UM
INVERSOR TIPO FONTE DE TENSÃO TRIFÁSICO

Leopoldina

2026

JULIA CARNEIRO DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL PARA UM
INVERSOR TIPO FONTE DE TENSÃO TRIFÁSICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Leopoldina, como parte do requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Andrei de Oliveira Almeida

Coorientador: Maico da Silva Lima

Leopoldina

2026

Oliveira, Julia Carneiro de.
O48d Desenvolvimento de uma plataforma experimental para um inversor
tipo fonte de tensão trifásico / Julia Carneiro de Oliveira – 2026.
49 f. : il., ft.

Orientador: Andrei de Oliveira Almeida
Coorientador: Maico da Silva Lima
Bibliografia.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais. *Campus* Leopoldina. Engenharia
de Controle e Automação, Departamento de Eletroeletrônica, 2026.

1. Conversores elétricos. 2. Eletrônica de potência. 3. Sensores eletromecânicos. 4. Redes
elétricas. I. Almeida, Andrei de Oliveira. II. Lima, Maico da Silva. III. Título.

CDU: 681.5

Elaboração da ficha catalográfica pelo bibliotecário Gabriel Jorge Rodrigues Oliveira
CRB 6º 4392 / CEFET-MG *campus* Leopoldina.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS
GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO - LP



FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 4 / 2026 - CECALP (11.51.20)

Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO

Leopoldina-MG, 16 de junho de 2026.

JULIA CARNEIRO DE OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL PARA UM
INVERSOR TIPO FONTE DE TENSÃO TRIFÁSICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Leopoldina, como parte do requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em 17 de junho de 2025.

Banca Examinadora:

Prof. D. Eng. Andrei de Oliveira Almeida (CEFET-MG) - Presidente
T.A M. Eng. Maico da Silva Lima (CEFET-MG)
Prof. D. Sc. Matusalém Martins Lanes (CEFET-MG)
Prof. M. Eng. Josué Lima da Silva (CEFET-MG)

Leopoldina
2026

(Assinado digitalmente em 19/06/2026 11:44)
ANDREI DE OLIVEIRA ALMEIDA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

(Assinado digitalmente em 18/06/2026 16:02)
JOSUE LIMA DA SILVA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

DEELP (11.61.04)
Matrícula: 3125541

DEELP (11.61.04)
Matrícula: 3063834

(Assinado digitalmente em 18/06/2026 12:55)

MAICO DA SILVA LIMA
TECNICO DE LABORATORIO AREA
DEELP (11.61.04)
Matrícula: 2193484

(Assinado digitalmente em 18/06/2026 14:29)

MATUSALEM MARTINS LANES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEELP (11.61.04)
Matrícula: 1094357

Processo Associado: 23062.030946/2026-19

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: **4**, ano: **2026**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão:
16/06/2026 e o código de verificação: **ecc2a74caf**

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho representa a conclusão de uma importante etapa da minha trajetória acadêmica e profissional, tornando indispensável expressar minha gratidão a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para esta conquista.

A Deus, agradeço pela força, sabedoria e perseverança concedidas ao longo desta trajetória. Nos momentos de dificuldade, foi a fé que me sustentou e me permitiu continuar em busca dos meus objetivos. Sou grata pelas oportunidades, pelos aprendizados e por todas as pessoas colocadas em meu caminho durante essa caminhada.

À minha família, especialmente aos meus pais, expresso minha gratidão pelo amor, incentivo, apoio incondicional e por todos os esforços realizados ao longo da minha vida para que eu pudesse alcançar meus objetivos. O carinho, a compreensão e o suporte recebidos durante toda esta jornada foram fundamentais para que eu mantivesse a motivação, a confiança e a determinação necessárias para concluir esta etapa. Esta conquista também pertence a vocês.

Ao meu namorado, agradeço pelo companheirismo, paciência, incentivo e apoio ao longo desta caminhada. Obrigada por estar presente nos momentos mais difíceis, compreender minhas ausências, compartilhar minhas preocupações e celebrar cada conquista ao meu lado. Seu apoio, carinho e incentivo foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Aos meus amigos, agradeço pela amizade, companheirismo e pelos momentos de apoio e descontração, que tornaram esta jornada mais leve e especial. Cada palavra de incentivo e cada momento compartilhado contribuíram para tornar este caminho mais agradável.

Aos amigos que fiz no CEFET-MG, deixo meu sincero agradecimento pela convivência, troca de conhecimentos, parceria e auxílio ao longo da graduação. As experiências compartilhadas, os desafios enfrentados em conjunto e o apoio mútuo contribuíram significativamente para meu crescimento acadêmico, profissional e pessoal.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte desta trajetória e contribuíram para a concretização deste sonho. Cada palavra de incentivo, gesto de apoio e contribuição recebida foi fundamental para tornar possível a conclusão desta importante etapa da minha vida.

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.”

Leonardo da Vinci

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma plataforma experimental para um inversor trifásico do tipo fonte de tensão (Conversor Tipo Fonte de Tensão (*Voltage Source Converter*) (VSC)), com foco na operação como formador de rede. Inicialmente, foi realizada a modelagem matemática do sistema e o desenvolvimento das estratégias de controle no sistema de coordenadas síncronas, utilizando controladores proporcional-integral e técnicas de modulação por largura de pulso. Para validação preliminar, foram realizadas simulações no software PLECS, permitindo verificar o comportamento dinâmico do inversor e as estratégias de controle implementadas. A plataforma experimental foi desenvolvida utilizando o módulo inversor BOOSTXL-3PhGaNInv, baseado na tecnologia de nitreto de gálio (GaN), em conjunto com o Processador Digital de Sinais (*Digital Signal Processor*) (DSP) LAUNCHXL-F28379D. Além disso, foram projetados circuitos de condicionamento e sensores de tensão e corrente para aquisição dos sinais de realimentação. Os algoritmos de controle foram implementados em tempo real no DSP, possibilitando a validação experimental da plataforma. Os resultados demonstraram o funcionamento adequado do inversor trifásico, com tensões equilibradas, formas de onda predominantemente senoidais e resposta dinâmica satisfatória, comprovando a eficiência da plataforma para aplicações em eletrônica de potência e estudos relacionados a microrredes.

Palavras-chave: inversor trifásico; formador de rede; sistema de coordenadas síncronas; modulação por largura de pulso; eletrônica de potência.

ABSTRACT

This work presents the development of an experimental platform for a three-phase voltage source converter (VSC), with a focus on grid-forming operation. Initially, the mathematical modeling of the system was carried out, followed by the development of control strategies in the synchronous reference frame, using proportional-integral controllers and pulse-width modulation techniques. For preliminary validation, simulations were performed in PLECS, enabling the assessment of the converter's dynamic behavior and the verification of the implemented control strategies. The experimental platform was built using the BOOSTXL-3PhGaNInv inverter module, based on gallium nitride (GaN), integrated with the DSP LAUNCHXL-F28379D. In addition, signal conditioning circuits and voltage and current sensors were designed to acquire the necessary feedback signals. The control algorithms were implemented in real time on the DSP, enabling experimental validation of the proposed platform. The results demonstrated proper operation of the three-phase inverter, with balanced voltages, predominantly sinusoidal waveforms, and satisfactory dynamic response, confirming the effectiveness of the platform for power electronics applications and studies related to microgrid systems.

Keywords: three-phase inverter; grid-forming; synchronous reference frame; pulse width modulation; power electronics.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO - LP



TERMO DE RESPONSABILIDADE Nº 133/2026 - CECALP (11.51.20)

Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO

Leopoldina-MG, 16 de junho de 2026.

Eu, **JULIA CARNEIRO DE OLIVEIRA**, matrícula **20203004029**, discente do Curso de Engenharia de Controle e Automação, declaro para os devidos fins, que o presente Trabalho de Conclusão de Curso, de título **DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL PARA UM INVERSOR TIPO FONTE DE TENSÃO TRIFÁSICO** é de minha autoria e que estou ciente dos:

- Artigos 297 a 299 do Código Penal;
- Decreto-Lei n.º 2.848 de 7 de dezembro de 1940;
- Lei n.º 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, sobre os Direitos Autorais;
- Regulamento Disciplinar Discente do CEFET-MG;
- E que plágio consiste na reprodução de obra alheia e submissão dela como trabalho próprio ou na inclusão, em trabalho próprio, de ideias, textos, tabelas ou ilustrações (quadros, figuras, gráficos, fotografias, retratos, lâminas, desenhos, organogramas, fluxogramas, plantas, mapas e outros) transcritos de obras de terceiros sem a devida e correta citação da referência.

Por ser verdade, e por ter ciência do referido artigo, firmo a presente declaração, isentando o (a) professor(a) **D. Eng. Andrei de Oliveira Almeida** (orientador), o (a) Técnico Administrativo Educacional **M. Eng. Maico da Silva Lima** (coorientador), os membros da banca examinadora e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Leopoldina, de qualquer responsabilidade.

(Assinado digitalmente em 18/06/2026 09:40)

JULIA CARNEIRO DE OLIVEIRA

DISCENTE

Matrícula: 2020#####9

Processo Associado: 23062.030946/2026-19

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **133**, ano: **2026**, tipo: **TERMO DE RESPONSABILIDADE**, data de emissão: **16/06/2026** e o código de verificação: **cc21650676**

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Circuito de um VSI trifásico com IGBT.	17
Figura 1.2 – Módulo de inversor trifásico da Texas Instruments	18
Figura 1.3 – Placa de microcontrolador da Texas Instruments.	19
Figura 1.4 – Sensor de condicionamento.	20
Figura 2.1 – Diagrama de blocos do controle em cascata no referencial dq , com malhas de tensão e corrente.	28
Figura 3.1 – Imagem do projeto de sensores de tensão isolados pelo <i>software</i> Proteus. . .	30
Figura 3.2 – Estrutura geral da plataforma experimental desenvolvida.	31
Figura 3.3 – Sensor LEM - LV 25-P.	33
Figura 3.4 – Projeto da placa de medição de tensão	34
Figura 3.5 – Simplificação da lógica implementada no PLECS.	35
Figura 3.6 – Estrutura no PLECS para geração de PWM	36
Figura 4.1 – Bancada experimental para calibragem do sensor de tensão.	38
Figura 4.2 – Saída do sensor de tensão mostrada pelo osciloscópio.	39
Figura 4.3 – Resposta experimental do sensor de tensão.	40
Figura 4.4 – Lógica PLECS para simulação do inversor trifásico.	42
Figura 4.5 – Circuito do inversor trifásico com a lógica de controle aplicada.	43
Figura 4.6 – Resposta experimental do inversor trifásico para variação de referência. . . .	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC Conversores Analógico-Digitais (*Analog-to-Digital Converters*)

CA Corrente Alternada

CC Corrente Contínua

CSI Inversor Tipo Fonte de Corrente (*Current Source Inverter*)

DSP Processador Digital de Sinais (*Digital Signal Processor*)

HVDC Corrente Contínua em Alta Tensão (*High Voltage Direct Current*)

IGBT Transistor Bipolar de Porta Isolada (*Insulated Gate Bipolar Transistor*)

PCB Placa de Circuito Impresso (*Printed Circuit Board*)

PI Proporcional-Integral

PLL Malha de Captura de Fase (*Phase-Locked Loop*)

PWM Modulação por Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation*)

SRF Sistema de Coordenadas Síncronas (*Synchronous Reference Frame*)

VSC Conversor Tipo Fonte de Tensão (*Voltage Source Converter*)

VSI Inversor Tipo Fonte de Tensão (*Voltage Source Inverter*)

LISTA DE SÍMBOLOS

abc	Coordenadas naturais do sistema trifásico
α, β	Eixos do referencial estacionário obtido pela transformação de Clarke
dq	Referencial síncrono obtido pela transformação de Park
S_a, S_b, S_c	Funções de chaveamento das fases a, b e c
v_{a0}, v_{b0}, v_{c0}	Tensões dos braços do inversor em relação ao barramento contínuo (V)
v_{an}, v_{bn}, v_{cn}	Tensões de fase em relação ao neutro virtual (V)
V_{dc}	Tensão do barramento em corrente contínua (V)
d	Ciclo de trabalho (<i>duty cycle</i>) aplicado ao módulo PWM
d_a, d_b, d_c	Ciclos de trabalho das fases a, b e c
T_s	Período de chaveamento (s)
t	Tempo (s)
τ	Variável de integração temporal (s)
m_a, m_b, m_c	Sinais modulantes trifásicos
m_f	Índice de modulação em frequência
M_a	Índice de modulação em amplitude
V_{ref}	Amplitude do sinal de referência da modulação (V)
V_{tri}	Amplitude da portadora triangular (V)
f_{tri}	Frequência da portadora triangular (Hz)
f_{ref}	Frequência do sinal de referência (Hz)
v_a^*	Sinal de referência da tensão da fase a (V)
v_a, v_b, v_c	Tensões trifásicas de saída do inversor (V)
i_a, i_b, i_c	Correntes trifásicas das fases a, b e c (A)
v_{ga}, v_{gb}, v_{gc}	Tensões trifásicas no ponto de conexão com a rede ou carga (V)
i_α, i_β	Componentes das correntes no referencial estacionário $\alpha\beta$ (A)
v_α, v_β	Componentes das tensões no referencial estacionário $\alpha\beta$ (V)
i_d, i_q	Componentes das correntes no referencial síncrono dq (A)
v_d, v_q	Componentes das tensões no referencial síncrono dq (V)
v_{gd}, v_{gq}	Componentes das tensões da rede nos eixos d e q (V)
i_d^*, i_q^*	Referências de corrente nos eixos d e q (A)
v_d^*, v_q^*	Referências de tensão nos eixos d e q (V)
e_d, e_q	Erros de tensão nos eixos d e q (V)
L	Indutância do filtro (H)

R	Resistência equivalente do filtro (Ω)
C	Capacitância do filtro (F)
ω	Velocidade angular elétrica do referencial síncrono (rad/s)
θ	Ângulo elétrico do referencial síncrono (rad)
K_p	Ganho proporcional do controlador PI de corrente
K_i	Ganho integral do controlador PI de corrente
K_{pv}	Ganho proporcional do controlador PI da malha de tensão
K_{iv}	Ganho integral do controlador PI da malha de tensão
P	Potência ativa (W)
Q	Potência reativa (var)
v_{inv}	Tensão de saída do inversor (V)
v_{cond}	Tensão condicionada na saída do circuito de processamento (V)
v_{sens}	Tensão proveniente do sensor isolado (V)
G	Ganho do circuito de condicionamento ajustado pelos potenciômetros
V_{offset}	Tensão de offset contínuo aplicada ao sinal (V)
f_c	Frequência de corte do filtro passa-baixa (Hz)
$\in$	Operador "pertence a"

SUMÁRIO

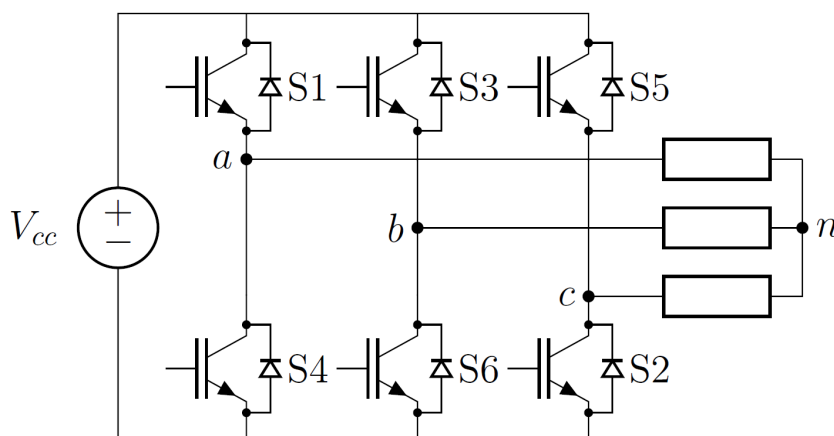
1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	21
2	Modelagem e Controle do VSI Trifásico	22
2.1	Modulação por Largura de Pulso	22
2.2	Modelagem e Controle das Correntes Trifásicas	24
2.3	Modelagem e Controle das Tensões Trifásicas	26
3	Desenvolvimento da Plataforma Experimental	29
3.1	Estrutura Geral do Kit Didático	29
3.2	Projeto dos Sensores de Tensão Isolados	32
3.3	Programação do DSP no PLECS	34
3.4	Considerações Parciais	36
4	Resultados Experimentais	37
4.1	Calibração dos Sensores de Tensão	37
4.2	Variação de Referência no Inversor Trifásico	40
5	Conclusões	46
5.1	Trabalhos Futuros	47
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as redes elétricas vêm passando por uma constante modernização, o que se deve principalmente ao desenvolvimento de novas tecnologias relacionadas a eletrônica de potência, sistemas de controle e sistemas de comunicação (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003). Os conversores estáticos de potência desempenham papel fundamental nos modernos sistemas elétricos de energia, sendo amplamente utilizados em aplicações relacionadas ao acionamento de máquinas elétricas, integração de fontes renováveis, sistemas de armazenamento de energia, transmissão Corrente Contínua em Alta Tensão (*High Voltage Direct Current*) (HVDC) e qualidade da energia elétrica (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2001). Esses conversores possibilitam maior eficiência energética, flexibilidade operacional e melhor desempenho dinâmico em sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Dentre os diferentes tipos de conversores estáticos, os inversores são dispositivos que realizam a conversão de energia elétrica em Corrente Contínua (CC) para Corrente Alternada (CA). Os inversores são usados na conexão de painéis fotovoltaicos e baterias à rede elétrica, compensadores estáticos, filtros ativos de potência, sistemas de transmissão em corrente contínua, entre outras aplicações (RASHID, 2015).

Os inversores podem ser classificados em dois tipos básicos: Inversor Tipo Fonte de Corrente (*Current Source Inverter*) (CSI) e os Inversor Tipo Fonte de Tensão (*Voltage Source Inverter*) (VSI). Os VSI, também chamados de VSC, representam atualmente a topologia mais utilizada em aplicações industriais e sistemas conectados à rede, devido à sua elevada capacidade de controle das variáveis elétricas, facilidade de implementação digital e elevada flexibilidade operacional (YAZDANI; IRAVANI, 2010). Esses conversores podem operar tanto no modo formador de rede (*grid-forming*), quanto no modo seguidor de rede (*grid-following*), dependendo da estratégia de controle empregada. Na Figura 1.1 é mostrado o diagrama esquemático de um inversor trifásico com interruptores do tipo Transistor Bipolar de Porta Isolada (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) (IGBT), com diodos em antiparalelo, e alimentando uma carga CA isolada a partir de uma fonte CC.

Figura 1.1 – Circuito de um VSI trifásico com IGBT.



Fonte: (ALMEIDA, 2024)

Um inversor trifásico pode ser empregado em diversas aplicações, como no acionamento e controle de velocidade de motores elétricos, em sistemas fotovoltaicos e eólicos (TEODORESCU; LISERRE; RODRIGUEZ, 2011), em sistemas de armazenamento de energia em baterias e em microrredes (GUERRERO; KANDARI, 2021), entre outras. Independentemente da aplicação, o sistema de controle do inversor permanece como um importante objeto de pesquisa, uma vez que o desenvolvimento de novas estratégias pode proporcionar melhorias significativas no desempenho dinâmico, na eficiência e na qualidade da energia fornecida.

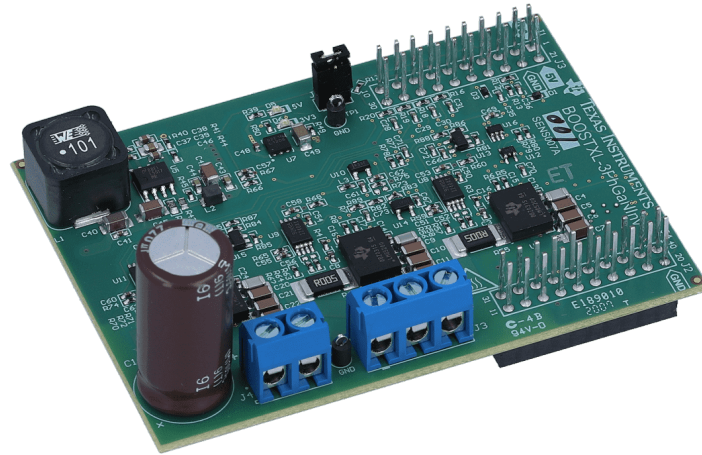
Para o controle das correntes trifásicas sintetizadas pelo inversor e, conseqüentemente, da potência processada, diversas técnicas podem ser empregadas. Dentre elas, destaca-se o uso de controladores Proporcional-Integral (PI) no referencial Sistema de Coordenadas Síncronas (*Synchronous Reference Frame*) (SRF), abordagem adotada neste trabalho. Alternativamente, podem ser utilizados controladores ressonantes nos sistemas de coordenadas naturais abc ou estacionárias $\alpha\beta$ (YAZDANI; IRAVANI, 2010), bem como estratégias baseadas em espaço de estados (OGATA, 2010), controle preditivo, controle por modos deslizantes, entre outras técnicas avançadas.

Quando uma nova estratégia de controle é proposta, sua validação é necessária. Nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma plataforma experimental para um inversor trifásico do tipo fonte de tensão VSC, com o objetivo de operar no modo formador de rede. A implementação é realizada por meio do módulo conversor trifásico BOOSTXL-3PhGaNInv, controlado pelo DSP LAUNCHXL-F28379D, ambos fabricados pela *Texas Instruments*.

A estrutura do sistema compreende três elementos principais: o estágio de potência do inversor, o sistema de processamento e controle digital e os circuitos de medição. O

módulo BOOSTXL-3PhGaNInv, apresentado na Figura 1.2, constitui o estágio de potência do sistema. Ele é responsável pela conversão da energia proveniente do barramento CC em tensões trifásicas CA, necessárias para a operação do inversor. Além disso, o módulo integra circuitos de acionamento dos semicondutores e condicionamento dos sinais de medição, permitindo sua utilização em aplicações de controle digital e eletrônica de potência

Figura 1.2 – Módulo de inversor trifásico da Texas Instruments



Fonte: (RS Components, 2026)

Tabela 1.1 – Principais especificações do módulo conversor trifásico BOOSTXL-3PhGaNInv.

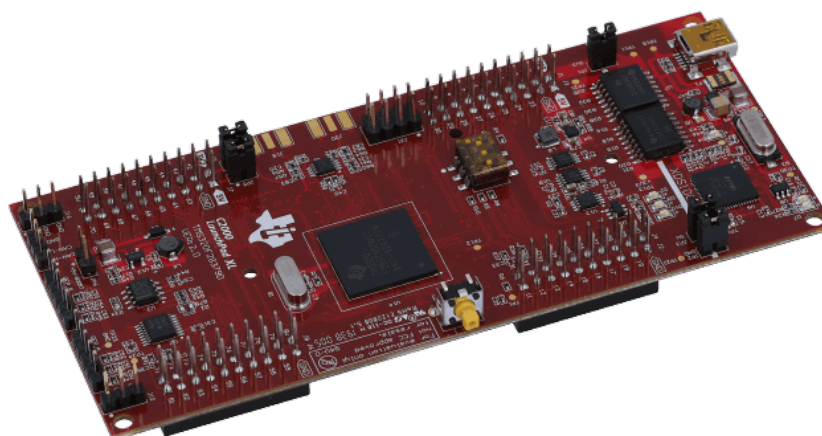
Parâmetro	Especificação
Fabricante	Texas Instruments
Topologia	Inversor trifásico fonte de tensão (VSI)
Tecnologia de potência	GaN (Nitreto de Gálio)
Tensão de entrada CC	12 V a 60 V
Tensão nominal do barramento CC	48 V
Corrente de saída	7 Arms por fase
Corrente de pico	10 A
Número de fases	3
Dispositivos de potência	3 × LMG5200
Sensoriamento de corrente	Shunt em linha
Amplificadores de corrente	3 × INA240
Interface de controle	BoosterPack™
Compatibilidade	LAUNCHXL-F28379D e outros C2000

Fonte: (Texas Instruments, 2018).

A Figura 1.2 apresenta o módulo BOOSTXL-3PhGaNInv utilizado na implementação experimental do conversor trifásico desenvolvido neste trabalho. As principais especificações da plataforma são apresentadas na Tabela 1.1.

O processamento e controle do sistema são realizados pelo DSP LAUNCHXL-F28379D, apresentado na Figura 1.3. Este dispositivo é responsável pela execução dos algoritmos de controle, aquisição das variáveis medidas e geração dos sinais PWM utilizados no acionamento do inversor. O DSP possui elevado poder computacional e periféricos dedicados ao controle de conversores eletrônicos, tornando-o adequado para aplicações em sistemas de potência e controle em tempo real.

Figura 1.3 – Placa de microcontrolador da Texas Instruments.



Fonte: (Texas Instruments, 2026)

Tabela 1.2 – Principais especificações do DSP LAUNCHXL-F28379D.

Parâmetro	Especificação
Fabricante	Texas Instruments
Microcontrolador	TMS320F28379D
Arquitetura	C2000 Delfino
Frequência de operação	200 MHz
Núcleos	2 (Dual-Core)
Memória Flash	1 MB
Memória RAM	204 kB
Conversores A/D	4 módulos de 12 bits
Módulos PWM	24 canais ePWM
Unidade de ponto flutuante	Sim (FPU 32 bits)
Comunicação	CAN, SPI, I2C, SCI, USB

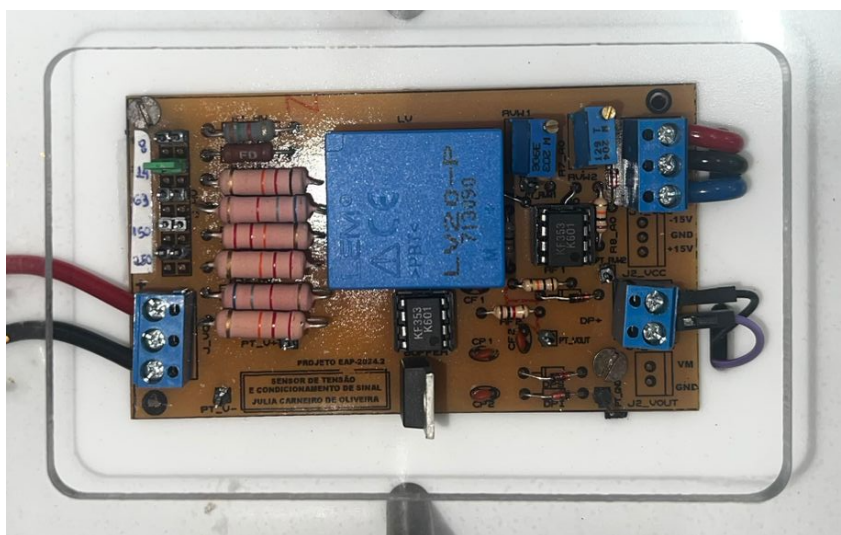
Fonte: (Texas Instruments, 2024).

O processamento e controle do sistema são realizados pelo DSP LAUNCHXL-F28379D, baseado no microcontrolador TMS320F28379D da Texas Instruments (Texas Instruments, 2024).

Por fim, a aquisição das variáveis de realimentação do sistema é realizada por meio de uma placa de condicionamento de sinais desenvolvida neste trabalho. Essa placa é responsável

pelo tratamento dos sinais de tensão provenientes do estágio de potência, realizando adequação de nível, filtragem e proteção antes do envio ao DSP. O objetivo deste circuito é garantir a integridade e a precisão das medições utilizadas pelos algoritmos de controle. A placa de condicionamento de sinais é apresentada na 1.4.

Figura 1.4 – Sensor de condicionamento.



Fonte: Desenvolvido pela aluna.

Nesse sentido, destaca-se que a utilização adequada dos sensores de tensão é fundamental para o desempenho da malha de controle, uma vez que esses dispositivos fornecem as medições necessárias para o cálculo das variáveis no referencial síncrono. A seleção, integração e o condicionamento desses sinais constituem uma etapa relevante do trabalho, pois impactam diretamente fatores como precisão, imunidade a ruído e atrasos na aquisição dos sinais. Assim, a instrumentação da plataforma experimental, incluindo os sensores e seus circuitos associados, configura-se como uma contribuição importante deste estudo.

Além disso, o desenvolvimento e a validação dessas estratégias não dependem exclusivamente de análises teóricas ou simulações computacionais. A implementação prática em uma plataforma experimental é fundamental para avaliar o comportamento real do sistema, considerando aspectos como limitações dos sensores, atrasos de processamento do DSP, efeitos de discretização e não idealidades dos dispositivos semicondutores. Dessa forma, a construção de uma plataforma experimental para inversores trifásicos constitui uma ferramenta essencial para a validação de estratégias de controle e para o avanço das pesquisas na área de eletrônica de potência.

Por fim, destaca-se que esse trabalho faz parte de um projeto maior, no qual foi desenvolvido um kit didático para práticas de eletrônica de potência, envolvendo inversores e

conversores CC-CC, juntamente com os discentes de mestrado Rodrigo Carvalho Lôbo e de graduação Gabriel Schwenck Alves Oliveira. Como contribuição desse trabalho, destaca-se o desenvolvimento do inversor trifásico para operação no modo formador de rede, incluindo os circuitos para medição isolada das tensões, estratégias de controle de corrente e tensão, implementação dos códigos no DSP e testes experimentais em bancada.

1.1 Objetivos

O principal objetivo desse trabalho é desenvolver uma plataforma experimental para um inversor trifásico, capaz de operar no modo formador de rede. A fim de alcançar o objetivo principal, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. Modelar matematicamente os principais componentes do sistema proposto, contemplando o inversor trifásico e os demais componentes associados à sua operação;
2. Projetar o sistema de controle responsável pela regulação das correntes e das tensões trifásicas sintetizadas pelo inversor.
3. Desenvolver e implementar o protótipo experimental do inversor trifásico em bancada, usando o módulo inversor, incluindo os circuitos necessários para medição e condicionamento dos sinais elétricos.
4. Implementar e programar as estratégias de controle no DSP, utilizado na plataforma experimental.
5. Realizar ensaios experimentais, a fim de analisar o comportamento e o desempenho da operação.

2 MODELAGEM E CONTROLE DO VSI TRIFÁSICO

A modelagem matemática de inversores trifásicos é uma etapa necessária para o desenvolvimento de estratégias de controle aplicadas a conversores eletrônicos de potência. A partir dos modelos dinâmicos do conversor e de seus elementos de conexão, torna-se possível analisar o comportamento do sistema, projetar controladores e avaliar o desempenho dinâmico do inversor em diferentes condições de operação (YAZDANI; IRAVANI, 2010; OGATA, 2010).

Nesse capítulo, são apresentados os principais conceitos relacionados à modelagem e ao controle do VSI trifásico investigado nesse trabalho, incluindo os conceitos da Modulação por Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation*) (PWM), as transformações de coordenadas e o controle das correntes e tensões no referencial síncrono dq .

2.1 Modulação por Largura de Pulso

A técnica PWM é amplamente empregada em conversores eletrônicos devido à sua capacidade de controlar a tensão média aplicada à carga por meio do chaveamento em alta frequência dos dispositivos semicondutores (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003). Além de permitir elevada eficiência energética, a PWM contribui para a redução das componentes harmônicas de baixa ordem e melhora a qualidade das formas de onda sintetizadas pelo inversor.

O VSI trifásico é composto por três braços, cada um contendo duas chaves acionadas de forma complementar, ou seja, quando uma chave conduz, a outra bloqueia. O estado de cada braço pode ser descrito pelas variáveis de comutação:

$$S_a, S_b, S_c \in \{0, 1\}, \quad (2.1)$$

onde $S_x = 1$ indica a condução da chave superior e $S_x = 0$ a condução da chave inferior. As tensões de saída em relação ao barramento contínuo são dadas por:

$$v_{a0} = S_a V_{dc}; \quad v_{b0} = S_b V_{dc}; \quad v_{c0} = S_c V_{dc}. \quad (2.2)$$

Considerando a ausência de neutro físico, define-se o ponto neutro virtual, resultando nas tensões de fase:

$$v_{an} = v_{a0} - \frac{v_{a0} + v_{b0} + v_{c0}}{3}. \quad (2.3)$$

Devido à alta frequência de chaveamento, a modelagem direta do sistema chaveado é pouco conveniente para o projeto de controladores. Assim, adota-se o modelo médio, no qual as funções de comutação são substituídas pelos seus valores médios ao longo de um período de chaveamento T_s (YAZDANI; IRAVANI, 2010). Define-se, então, o ciclo de trabalho:

$$d_a = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} S_a(\tau) d\tau, \quad (2.4)$$

com $0 \leq d_a \leq 1$. Dessa forma, as tensões médias tornam-se:

$$v_{a0} = d_a V_{dc}; \quad v_{b0} = d_b V_{dc}; \quad v_{c0} = d_c V_{dc}. \quad (2.5)$$

Substituindo na expressão do neutro, obtém-se a relação fundamental:

$$v_{an} = \left(d_a - \frac{d_a + d_b + d_c}{3} \right) V_{dc}. \quad (2.6)$$

Essa equação evidencia que o inversor pode ser interpretado, em média, como uma fonte de tensão controlada pelos ciclos de trabalho.

Na PWM senoidal, os sinais de referência trifásicos são comparados com uma portadora triangular de alta frequência. No modelo médio, essa relação pode ser aproximada por:

$$d_a = \frac{1}{2} + \frac{v_a^*}{2V_{dc}}, \quad (2.7)$$

onde v_a^* representa o sinal de referência. Nessa condição, na região linear de operação, a tensão de saída pode ser aproximada por:

$$v_{an} \approx v_a^*. \quad (2.8)$$

O índice de modulação em amplitude é definido como:

$$m_a = \frac{V_{ref}}{V_{tri}}, \quad (2.9)$$

e o índice de modulação de frequência como:

$$m_f = \frac{f_{tri}}{f_{ref}}. \quad (2.10)$$

A operação da PWM na região linear impõe limites aos sinais de referência. Para a PWM senoidal, tem-se:

$$|m_a| \leq 1. \quad (2.11)$$

Na implementação prática em sistemas digitais, como no DSP, existem efeitos como atrasos de processamento, inserção de tempo morto (*dead-time*), quantização dos sinais e não idealidades dos dispositivos semicondutores. Esses fatores podem influenciar a tensão efetiva aplicada ao sistema, ainda que sejam ignorados no projeto dos controladores.

A partir do modelo médio obtido, o inversor pode ser representado como uma fonte de tensão controlada. Essa representação será utilizada nas próximas seções para modelagem e controle das correntes e tensões trifásicas, estabelecendo a base para o desenvolvimento das estratégias de controle no referencial síncrono.

2.2 Modelagem e Controle das Correntes Trifásicas

A partir do modelo médio do inversor apresentado na seção anterior, o VSI trifásico pode ser representado como uma fonte de tensão controlada. Considerando a conexão do inversor a um filtro RL trifásico, a dinâmica das correntes no sistema em coordenadas naturais *abc* é descrita por:

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = v_{an} - Ri_a - v_{ga} \\ L \frac{di_b}{dt} = v_{bn} - Ri_b - v_{gb} \\ L \frac{di_c}{dt} = v_{cn} - Ri_c - v_{gc} \end{cases} \quad (2.12)$$

onde L representa a indutância do filtro, R a resistência equivalente e $v_{g,abc}$ as tensões trifásicas do ponto de conexão com a carga.

Para simplificar a análise e o projeto do sistema de controle, aplica-se inicialmente a transformação de Clarke, responsável por converter as variáveis trifásicas do sistema *abc* para o plano estacionário $\alpha\beta$:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Em seguida, aplica-se a transformação de Park, que realiza a rotação do referencial estacionário com velocidade angular ω :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Essa abordagem é amplamente utilizada em sistemas trifásicos conectados à rede, pois permite desacoplar dinamicamente as variáveis do sistema e simplificar significativamente o projeto das malhas de controle (YAZDANI; IRAVANI, 2010; TEODORESCU; LISERRE; RODRIGUEZ, 2011). Em regime permanente equilibrado, as variáveis no referencial síncrono tornam-se constantes, permitindo a utilização de controladores lineares, como controladores PI.

Aplicando as transformações às equações do sistema trifásico, obtém-se o modelo dinâmico das correntes no referencial dq :

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = v_d - Ri_d + \omega Li_q - v_{gd} \\ L \frac{di_q}{dt} = v_q - Ri_q - \omega Li_d - v_{gq} \end{cases} \quad (2.15)$$

Observa-se que as equações apresentam termos de acoplamento entre os eixos d e q , representados por ωLi_q e ωLi_d . Esses termos surgem devido à rotação do referencial síncrono e dificultam o controle independente das correntes.

Para realizar o desacoplamento dinâmico do sistema, os termos cruzados são compensados na lei de controle. Assim, as tensões de referência são definidas como:

$$v_d^* = v_{gd} + K_p(i_d^* - i_d) + K_i \int (i_d^* - i_d) dt - \omega Li_q; \quad (2.16)$$

e

$$v_q^* = v_{gq} + K_p(i_q^* - i_q) + K_i \int (i_q^* - i_q) dt + \omega Li_d, \quad (2.17)$$

onde K_p e K_i representam os ganhos proporcional e integral dos controladores PI, enquanto i_d^* e i_q^* correspondem às referências de corrente.

Essa estrutura permite o desacoplamento das correntes nos eixos síncronos e possibilita o controle independente da potência ativa e reativa em sistemas trifásicos equilibrados.

As potências ativa e reativa instantâneas no referencial síncrono são dadas por:

$$P = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q); \quad (2.18)$$

$$Q = \frac{3}{2}(v_q i_d - v_d i_q). \quad (2.19)$$

Em aplicações conectadas à rede, é comum alinhar o eixo d com o vetor de tensão da rede por meio de um sistema Malha de Captura de Fase (*Phase-Locked Loop*) (PLL) (*Phase-Locked Loop*). Nessa condição, obtém-se:

$$v_q = 0, \quad (2.20)$$

resultando em:

$$P = \frac{3}{2}v_d i_d; \quad (2.21)$$

$$Q = -\frac{3}{2}v_d i_q. \quad (2.22)$$

Dessa forma, verifica-se que a corrente no eixo d está diretamente associada ao controle da potência ativa, enquanto a corrente no eixo q está relacionada ao controle da potência reativa. Essa característica constitui uma das principais vantagens da modelagem no referencial síncrono, permitindo o desacoplamento do controle de potência em sistemas trifásicos.

As tensões de referência v_d^* e v_q^* obtidas pelos controladores são posteriormente convertidas para o sistema trifásico e aplicadas ao modulador PWM, responsável pela geração dos sinais de acionamento das chaves do inversor.

2.3 Modelagem e Controle das Tensões Trifásicas

Em aplicações no modo formador de rede, o inversor passa a ser responsável pelo estabelecimento das referências de tensão e frequência do sistema elétrico, desempenhando função análoga à de geradores síncronos convencionais (GUERRERO, 2011). Dessa forma, o controle de tensão torna-se essencial para garantir estabilidade, qualidade de energia e compartilhamento adequado de potência em sistemas isolados e microrredes.

A partir do modelo médio do inversor, pode-se considerar que a tensão de saída segue a referência imposta pela PWM:

$$v_{inv} \approx v^*. \quad (2.23)$$

No referencial síncrono, define-se o erro de tensão como:

$$e_d = v_d^* - v_d, \quad e_q = v_q^* - v_q. \quad (2.24)$$

Para o controle da tensão, utiliza-se uma malha externa baseada em controladores PI, responsável por gerar as referências de corrente:

$$i_d^* = K_{pv}(v_d^* - v_d) + K_{iv} \int (v_d^* - v_d) dt, \quad (2.25)$$

e

$$i_q^* = K_{pv}(v_q^* - v_q) + K_{iv} \int (v_q^* - v_q) dt. \quad (2.26)$$

Essas referências são então utilizadas na malha interna de corrente, estabelecendo uma estrutura de controle em cascata. A malha de corrente, por apresentar dinâmica mais rápida, garante o rastreamento das referências geradas pela malha de tensão.

Para aplicação no sistema físico, as tensões de referência no referencial síncrono são convertidas de volta para o sistema trifásico por meio das transformações inversas de Park e Clarke:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Os sinais trifásicos obtidos são então aplicados ao modulador PWM, que gera os sinais de acionamento das chaves do inversor, fechando o ciclo de controle.

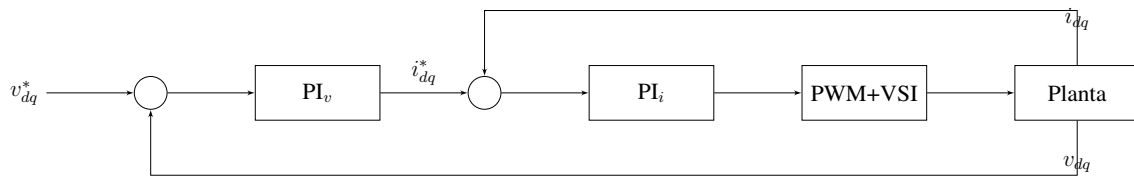
Essa estrutura de controle em cascata, composta por uma malha externa de tensão e uma malha interna de corrente, proporciona maior robustez e desempenho dinâmico ao sistema, uma vez que permite a atuação em diferentes níveis de controle. A malha externa é responsável

pela regulação da tensão, gerando as referências de corrente no referencial síncrono, enquanto a malha interna atua de forma mais rápida no controle das correntes, garantindo melhor resposta transitória e estabilidade do sistema.

Devido a essas características, essa estratégia de controle é amplamente empregada em inversores utilizados em microrredes e sistemas de geração distribuída, nos quais são requeridos elevado desempenho dinâmico e elevada qualidade da energia fornecida.

Dessa forma, a Figura 2.1 apresenta o diagrama de blocos do sistema de controle no referencial síncrono dq , evidenciando a estrutura em cascata adotada e a interação entre as malhas de tensão e corrente, conforme discutido anteriormente.

Figura 2.1 – Diagrama de blocos do controle em cascata no referencial dq , com malhas de tensão e corrente.



Fonte: Elaboração própria.

Ao longo deste capítulo, foram desenvolvidos os fundamentos teóricos relacionados à modelagem e ao controle do VSI, contemplando a técnica de PWM, a modelagem das correntes trifásicas e sua representação no referencial síncrono dq , bem como a modelagem e o controle das tensões por meio de uma estrutura em cascata com malhas de tensão e corrente.

Esse arcabouço teórico estabelece a base necessária para o desenvolvimento do sistema proposto, fornecendo subsídios para as etapas de simulação, implementação e análise dos resultados apresentados nos capítulos subsequentes.

3 DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Embora a modelagem matemática e as simulações computacionais sejam fundamentais para o desenvolvimento de estratégias de controle em eletrônica de potência, a validação experimental constitui uma etapa indispensável para avaliação do comportamento real do sistema (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003). Aspectos como atrasos computacionais, ruídos de medição, não idealidades dos dispositivos semicondutores e limitações físicas dos sensores somente podem ser adequadamente avaliados em ambiente experimental.

Dessa forma, neste capítulo são apresentados os principais aspectos relacionados ao desenvolvimento da plataforma experimental utilizada neste trabalho, incluindo a estrutura geral do kit didático, o projeto dos sensores de tensão isolados e a implementação do controle digital utilizando o DSP em conjunto com o ambiente PLECS.

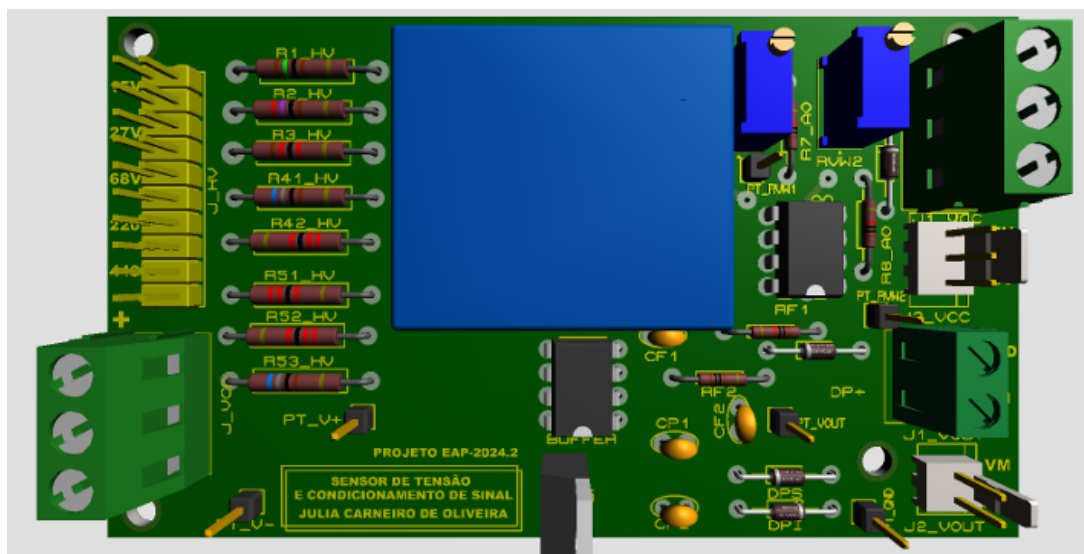
A plataforma experimental foi desenvolvida com base no módulo inversor BOOSTXL-3PhGaNInv, sendo projetada para operar como um VSI. Além do estágio de potência, o sistema inclui circuitos de condicionamento e aquisição de sinais, sensores de tensão isolados e a implementação digital das estratégias de controle desenvolvidas nos capítulos anteriores.

3.1 Estrutura Geral do Kit Didático

A plataforma experimental desenvolvida nesse trabalho tem como objetivo a implementação e validação das estratégias de controle aplicadas a um VSI. O sistema foi concebido de forma modular, permitindo flexibilidade para alterações futuras tanto na estrutura de potência quanto nos algoritmos de controle implementados.

Para a realização dessa validação, foi desenvolvido um circuito de sensores de tensão isolados, projetado com a finalidade de adequar os níveis de tensão para aquisição pelo DSP. O desenvolvimento da placa foi realizado utilizando o *software* Proteus, amplamente empregado no projeto de circuitos eletrônicos e Placa de Circuito Impresso (*Printed Circuit Board*) (PCB). Durante o processo de desenvolvimento, buscou-se otimizar o layout da placa, garantindo o atendimento aos requisitos elétricos e construtivos necessários para a correta operação do sistema. Na Figura 3.1, é apresentada a visualização da PCB desenvolvida no *software*, enquanto na Figura 1.4 é apresentada a implementação física da placa confeccionada.

Figura 3.1 – Imagem do projeto de sensores de tensão isolados pelo *software* Proteus.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 3.2 é apresentada a estrutura física da plataforma experimental desenvolvida. O sistema foi montado em uma bancada didática composta por módulos independentes e interconectáveis, permitindo diferentes configurações experimentais para testes e validação das estratégias de controle.

No lado esquerdo da plataforma encontra-se o sistema de controle e condicionamento de sinais. Nessa região estão localizados o DSP, responsável pela execução dos algoritmos de controle digital, o módulo inversor e os circuitos eletrônicos associados aos sensores de tensão.

O módulo inversor, apresentado na Figura 1.2, consiste em um inversor trifásico baseado em transistores GaN (Nitreto de Gálio), possibilitando operação em elevadas frequências de chaveamento e reduzidas perdas de comutação. O módulo é responsável pela conversão da tensão contínua em tensões trifásicas alternadas controladas.

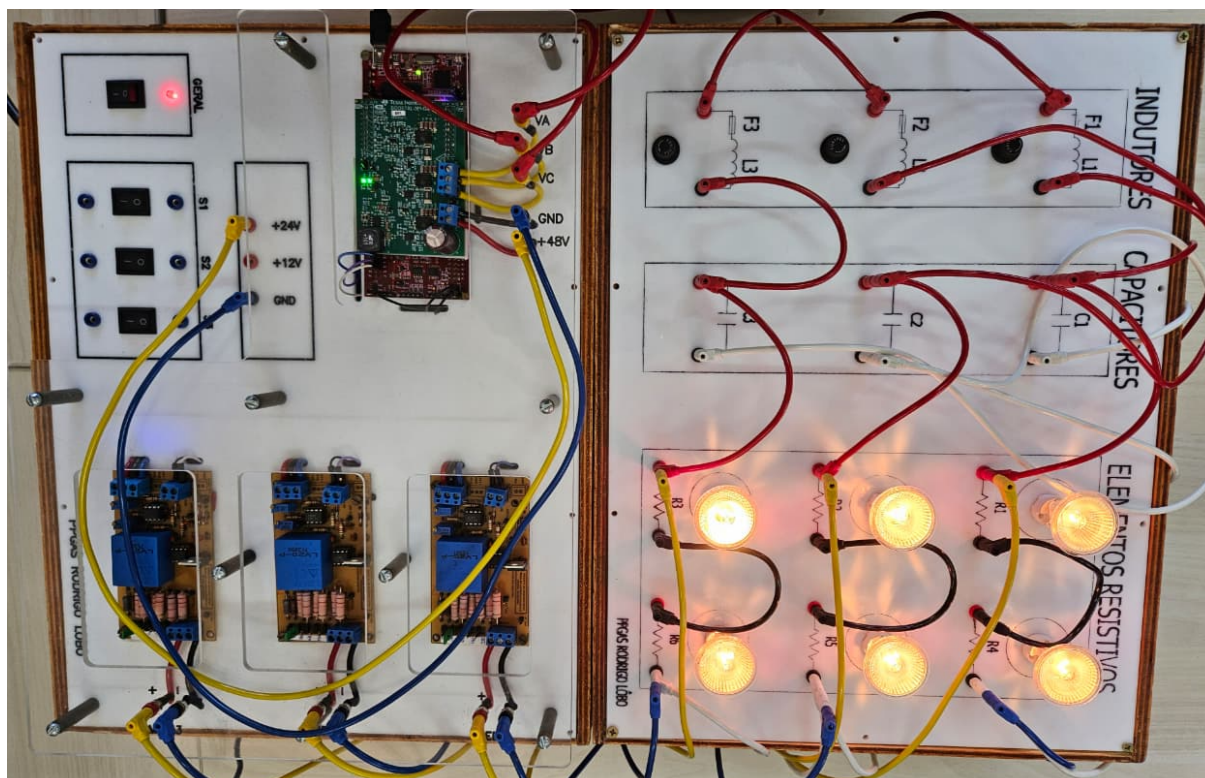
O controle digital do sistema é realizado pelo DSP, ilustrado na Figura 1.3. Esse processador pertence à família C2000 da Texas Instruments e possui periféricos dedicados ao controle de conversores eletrônicos, incluindo módulos PWM de alta resolução, Conversores Analógico-Digitais (*Analog-to-Digital Converters*) (ADC) e unidades de processamento em ponto flutuante.

Na parte inferior esquerda da bancada encontram-se os circuitos dos sensores de tensão isolados desenvolvidos neste trabalho. Esses circuitos são responsáveis pelo condicionamento e isolamento dos sinais medidos, adequando os níveis de tensão às faixas permitidas pelos ADC

do DSP e aumentando a segurança do sistema de controle.

O lado direito da plataforma experimental é destinado à configuração das cargas e filtros de saída do inversor. Nessa região encontram-se bancos de resistores, indutores e capacitores conectáveis por meio de terminais tipo banana, permitindo a implementação de diferentes configurações de carga trifásica e filtros RL ou RLC.

Figura 3.2 – Estrutura geral da plataforma experimental desenvolvida.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os elementos resistivos são implementados por meio de lâmpadas incandescentes, utilizadas como cargas trifásicas equilibradas. Já os indutores e capacitores permitem a montagem dos filtros necessários para o estudo da dinâmica do inversor e para a redução das componentes harmônicas provenientes da PWM.

A integração entre o estágio de potência, os sensores e o DSP é realizada de forma que os sinais de tensão medidos sejam enviados ao processador digital. No DSP são executadas as transformações matemáticas, os algoritmos de controle no referencial síncrono e a geração dos sinais PWM. Posteriormente, os sinais de acionamento produzidos pelo DSP são aplicados ao módulo inversor, fechando a malha de controle do sistema.

A estrutura modular desenvolvida permite não apenas a validação experimental das estratégias de controle propostas neste trabalho, mas também futuras expansões da plataforma

para aplicações relacionadas a microrredes, controle seguidor de rede e sistemas de geração distribuída.

3.2 Projeto dos Sensores de Tensão Isolados

Para a implementação das estratégias de controle no DSP, torna-se necessária a aquisição das tensões do sistema trifásico por meio dos ADC do processador. Entretanto, os níveis de tensão presentes no inversor são incompatíveis com os limites suportados pelo DSP, tornando indispensável o desenvolvimento de um circuito de condicionamento e isolamento dos sinais. Dessa forma, foi desenvolvido um circuito de sensor de tensão isolado, responsável pela adequação dos níveis de tensão, isolamento galvânico e proteção do sistema de controle.

A Figura 3.4 apresenta o esquemático elétrico desenvolvido no software Proteus para o circuito de condicionamento e isolamento dos sinais de tensão. Nessa etapa, foram definidos e interligados os componentes eletrônicos que compõem o sistema, servindo como base para o desenvolvimento da placa de circuito impresso e para a implementação da plataforma experimental.

O sinal de tensão é inicialmente aplicado à entrada localizada na região superior esquerda da placa. Nessa etapa, o sinal passa por um circuito resistivo responsável pela adequação da faixa de operação do sensor, reduzindo a amplitude da tensão de entrada para níveis compatíveis com o circuito de medição.

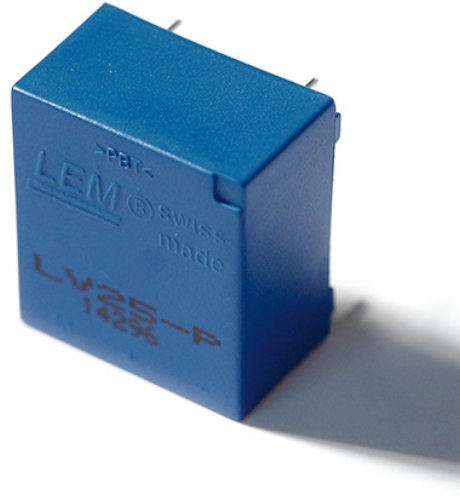
Após o condicionamento inicial, o sinal é aplicado ao sensor de efeito Hall LV 25-P, mostrado na Figura 3.3, responsável pelo isolamento galvânico entre o estágio de potência e o sistema de controle digital. O sensor fornece na saída um sinal analógico proporcional à tensão medida, preservando o isolamento elétrico entre os circuitos de potência e de controle.

A utilização do sensor isolado é fundamental para aumentar a segurança do sistema e proteger o DSP contra sobretensões, ruídos e transitórios provenientes do estágio de potência do inversor.

Após a saída do sensor LEM, o sinal passa por circuitos contendo amplificadores operacionais e potenciômetros ajustáveis, responsáveis pelo ajuste de ganho e pela adição de um nível de *offset*. Os potenciômetros permitem realizar:

- Ajuste da amplitude do sinal;
- Ajuste do nível de *offset* CC.

Figura 3.3 – Sensor LEM - LV 25-P.



Fonte: Site (LEM, 2026).

A relação entre o sinal proveniente do sensor e o sinal condicionado pode ser representada genericamente por:

$$v_{cond} = G \cdot v_{sens} + V_{offset} \quad (3.1)$$

onde G representa o ganho ajustado pelos potenciômetros e V_{offset} corresponde ao deslocamento contínuo aplicado ao sinal.

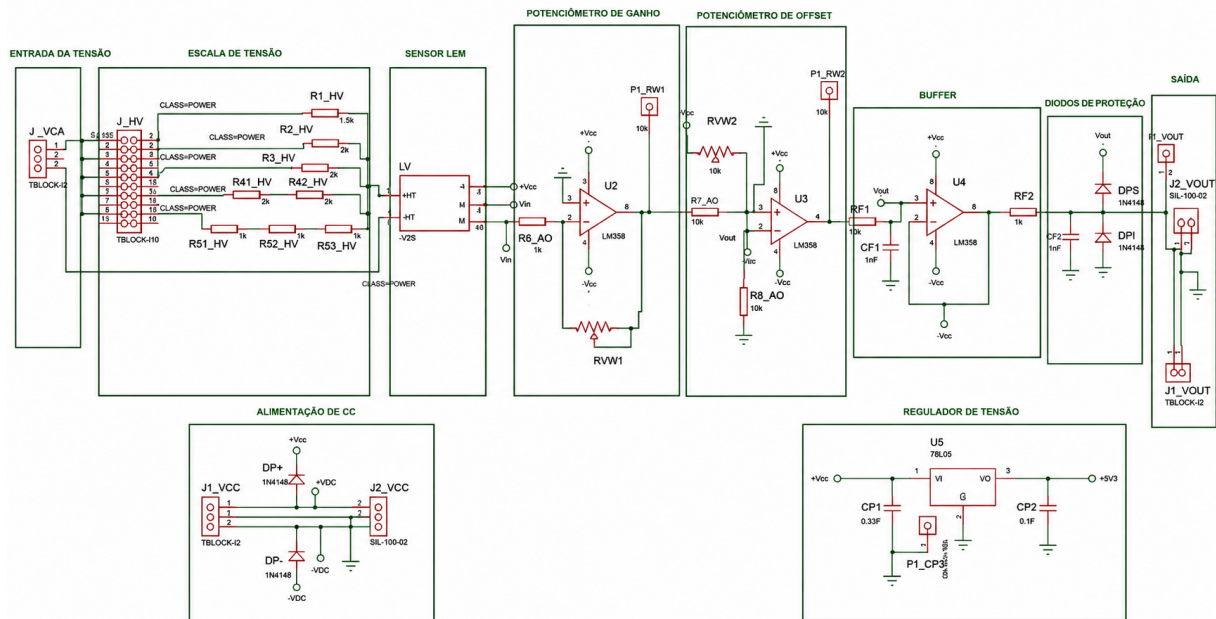
Além do condicionamento e isolamento, a placa também possui filtros passa-baixa implementados por meio de redes RC. Esses filtros têm como objetivo atenuar componentes de alta frequência provenientes do chaveamento PWM do inversor, reduzindo ruídos e protegendo tanto os circuitos eletrônicos da placa quanto os ADC do DSP. A frequência de corte do filtro passa-baixa é dada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.2)$$

onde R e C representam, respectivamente, os componentes resistivo e capacitivo do filtro.

A alimentação da placa é realizada por uma fonte CC simétrica, necessária para o correto funcionamento dos amplificadores operacionais e do sensor isolado. A utilização de alimentação simétrica permite o processamento adequado dos sinais provenientes do sensor antes da etapa de condicionamento final.

Figura 3.4 – Projeto da placa de circuito impresso para medição de tensão isolada e condicionamento de sinal.



Fonte: Elaborado pela autora.

Após o condicionamento, os sinais são enviados aos canais ADC do DSP, onde são utilizados nas malhas de controle implementadas no referencial síncrono. O desenvolvimento desse circuito contribui diretamente para a flexibilidade, segurança e confiabilidade da plataforma experimental, permitindo medições isoladas e compatíveis com os requisitos do sistema de controle digital.

3.3 Programação do DSP no PLECS

A implementação dos algoritmos de controle da plataforma experimental foi realizada utilizando o *software* PLECS, em conjunto com o DSP LAUNCHXL-F28379D. O ambiente PLECS foi utilizado tanto para a simulação do sistema quanto para a implementação prática das rotinas de controle digital executadas pelo processador.

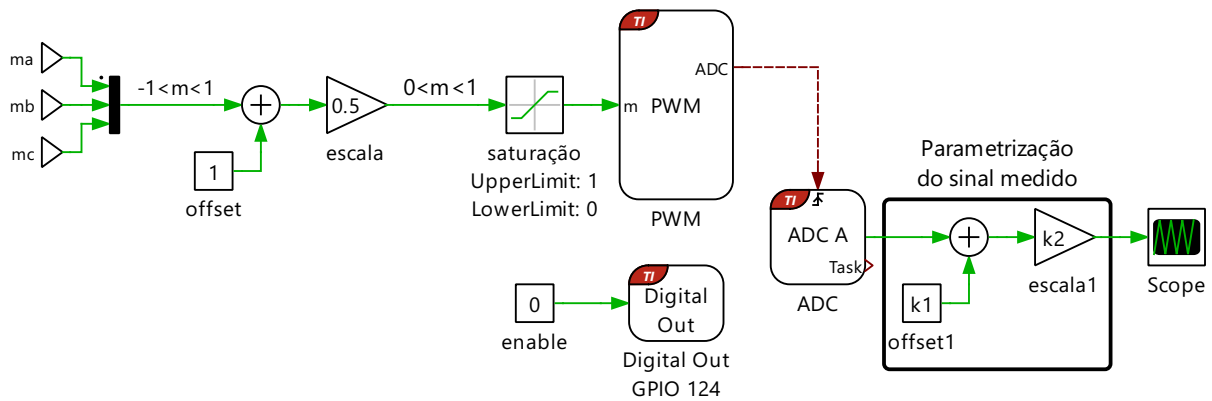
A programação do DSP foi desenvolvida utilizando os blocos específicos da biblioteca C2000 *Target Support Package*, permitindo a comunicação direta entre o modelo implementado no PLECS e os periféricos internos do DSP, como módulos PWM, ADC e portas digitais.

A Figura 3.5 apresenta a estrutura implementada para a geração do sinal PWM utilizado no acionamento do inversor trifásico. Inicialmente, os sinais modulantes trifásicos, representados por m_a , m_b e m_c , são processados por um bloco de ganho responsável pelo ajuste da amplitude do sinal de modulação. Em seguida, é adicionado um valor de *offset* unitário ao sinal, deslocando

sua faixa de operação para valores positivos.

Posteriormente, o sinal é submetido a um ganho de escala igual a 0,5, adequando os valores à faixa de operação exigida pelo módulo PWM do DSP. Dessa forma, o sinal final permanece normalizado entre 0 e 1, conforme requerido pelo periférico de geração PWM.

Figura 3.5 – Simplificação da lógica implementada no PLECS.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 3.5 apresenta uma representação simplificada da estratégia implementada. Em contrapartida, a Figura 3.6 mostra a implementação completa da lógica desenvolvida no software PLECS, utilizada para a simulação e validação do sistema no kit didático.

Para garantir a integridade do sistema, foi utilizado um bloco de saturação, limitando o sinal de entrada do PWM entre os valores mínimo e máximo permitidos:

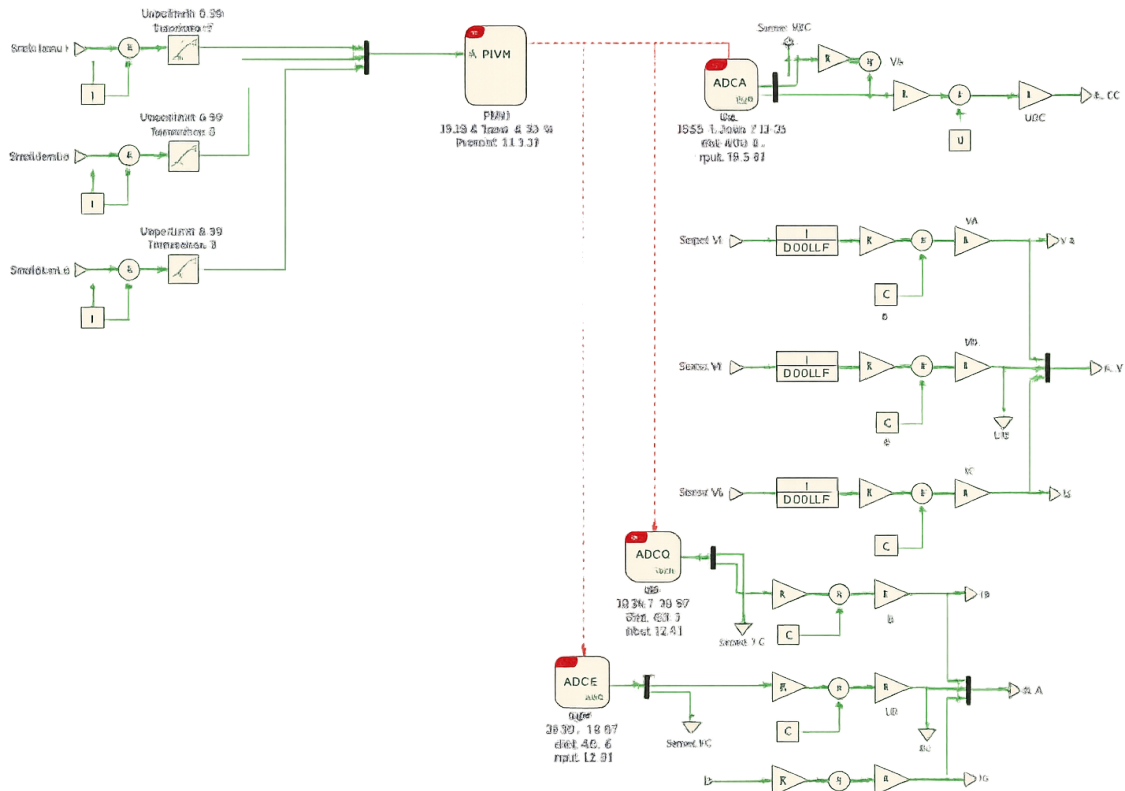
$$0 \leq d \leq 1 \quad (3.3)$$

onde d representa o *duty cycle* aplicado ao módulo PWM.

O bloco PWM do PLECS é responsável pela configuração dos módulos e PWM internos do DSP, realizando a geração dos sinais de acionamento das chaves semicondutoras do inversor trifásico.

Além da geração do PWM, o sistema implementado também realiza a aquisição dos sinais analógicos provenientes dos sensores de tensão. Para isso, utiliza-se o bloco ADC, responsável pela leitura dos conversores analógico-digitais internos do DSP. Os sinais adquiridos passam por uma etapa de parametrização, composta por blocos de *offset* e ganho, permitindo a remoção do nível CC introduzido pelos circuitos de condicionamento e o ajuste da escala dos sinais medidos. Essa etapa é fundamental para garantir que os sinais processados digitalmente representem corretamente as grandezas físicas do sistema.

Figura 3.6 – Estrutura implementada no PLECS para geração do sinal PWM e aquisição do sinal analógico.



Fonte: Elaborado pela autora.

A aquisição sincronizada dos sinais e a geração dos pulsos PWM permitem a implementação das malhas de controle em tempo real, incluindo as transformações de Clarke e Park, os controladores PI e os algoritmos de modulação apresentados no capítulo anterior. O uso do ambiente PLECS em conjunto com o DSP possibilita uma implementação mais rápida e intuitiva dos algoritmos de controle, reduzindo o tempo de desenvolvimento da plataforma experimental e facilitando futuras modificações no sistema.

3.4 Considerações Parciais

Este capítulo apresentou o desenvolvimento da plataforma experimental adotada neste trabalho, abrangendo os principais aspectos relacionados à sua concepção, implementação e integração. A estrutura desenvolvida constitui um ambiente adequado para a validação experimental dos modelos e das estratégias de controle propostas, possibilitando a realização de ensaios e a obtenção de resultados que fundamentam as análises apresentadas nos capítulos subsequentes.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Após o desenvolvimento da plataforma experimental e da implementação das estratégias de controle no DSP, foram realizados ensaios experimentais com o objetivo de validar o funcionamento do sistema proposto. Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos, incluindo a calibração dos sensores de tensão desenvolvidos e a análise do comportamento do inversor trifásico sob diferentes condições de referência.

Os ensaios experimentais foram realizados utilizando a plataforma descrita no Capítulo anterior, composta pelo módulo inversor, pelo DSP e pelos circuitos de condicionamento e aquisição de sinais desenvolvidos neste trabalho.

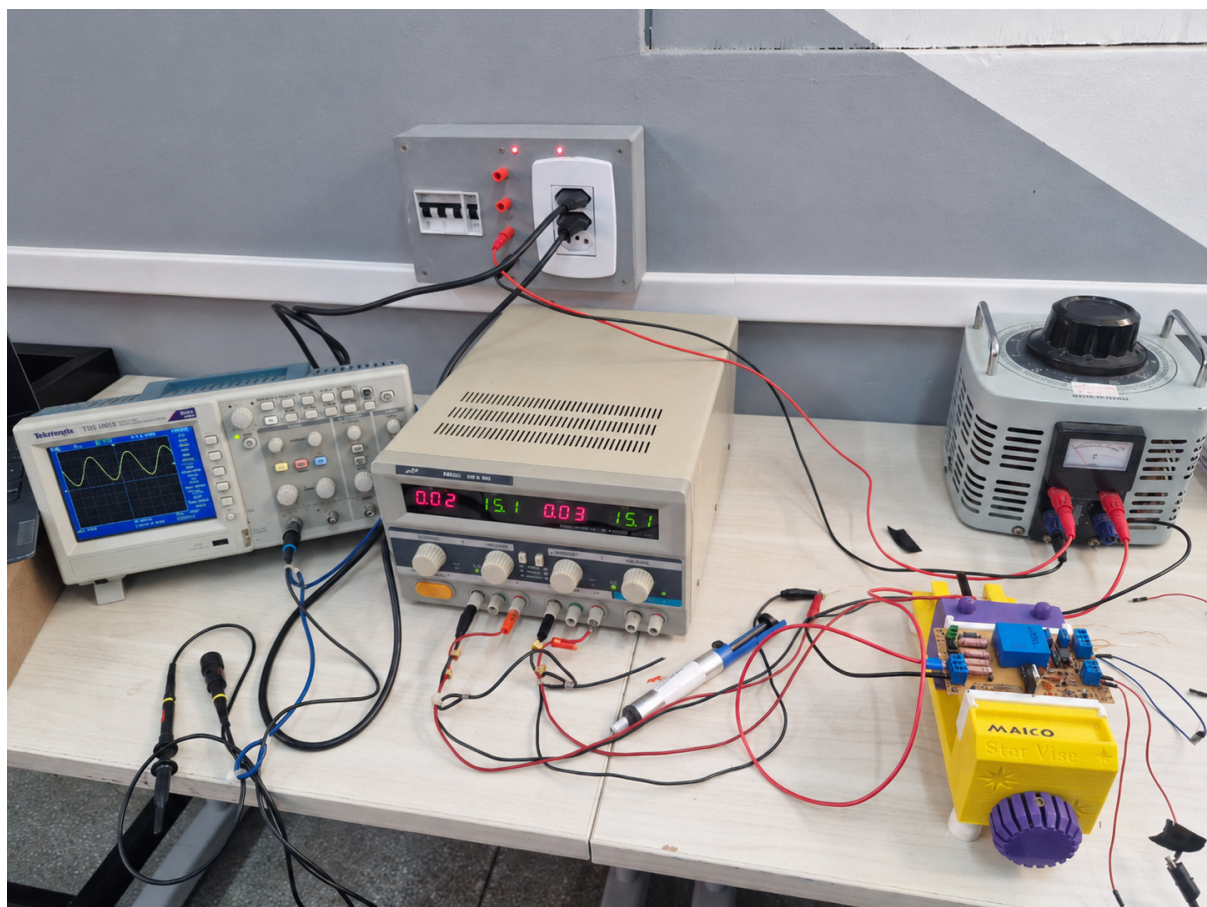
4.1 Calibração dos Sensores de Tensão

Após o desenvolvimento do circuito de condicionamento e isolamento dos sinais de tensão apresentado na Figura 1.4, foi realizada a etapa de calibração dos sensores, com o objetivo de garantir a compatibilidade entre os sinais medidos e a faixa de operação dos ADC do DSP. Os ADC presentes no DSP operam com tensão de entrada limitada ao intervalo entre 0 e 3,3 V. Dessa forma, qualquer valor fora dessa faixa pode ocasionar saturação da leitura ou até mesmo danos permanentes ao processador. Assim, tornou-se necessário ajustar adequadamente os sinais provenientes dos sensores de tensão isolados, de acordo com (3.1).

Inicialmente, o sensor de efeito Hall LV 25-P fornece um sinal analógico bipolar proporcional à tensão medida. Entretanto, como o DSP não é capaz de realizar leituras de tensões negativas, foi necessário implementar uma etapa de deslocamento de nível (*offset*) no circuito de condicionamento. A estratégia adotada consistiu em deslocar o sinal medido para o centro da faixa de operação do ADC, permitindo que tensões positivas e negativas do sistema trifásico fossem representadas dentro do intervalo permitido pelo DSP.

A calibração da placa do sensor de tensão foi realizada utilizando uma bancada experimental, conforme Figura 4.1, composta por fonte de alimentação de bancada, autotransformador variável, osciloscópio digital e a placa desenvolvida para condicionamento e medição de tensão. O autotransformador foi utilizado para variar gradualmente a tensão aplicada ao circuito, enquanto a fonte de alimentação forneceu as tensões necessárias para operação do sistema. O osciloscópio digital foi empregado para monitorar os sinais de saída do sensor, permitindo verificar amplitude, forma de onda e realizar ajustes de ganho e *offset* do circuito.

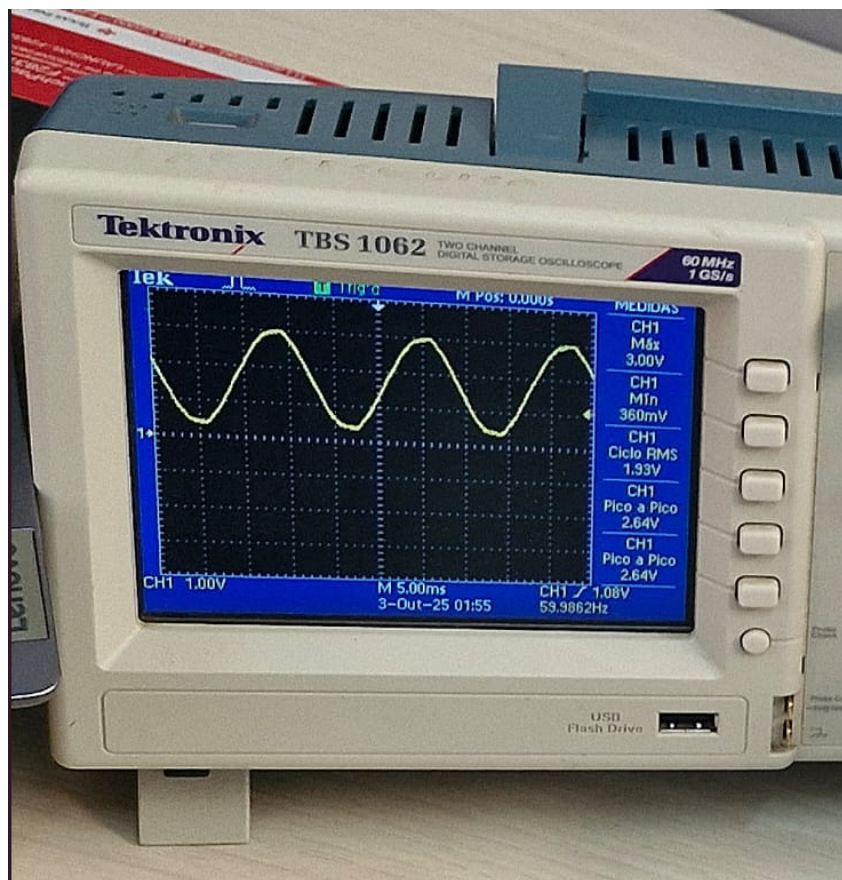
Figura 4.1 – Bancada experimental para calibragem do sensor de tensão.



Fonte: Elaborado pela autora.

Durante os ensaios experimentais, buscou-se adequar a faixa de saída do sensor à faixa operacional do ADC do DSP, limitada entre 0 V e 3,3 V, de acordo com a Figura 4.2 garantindo aquisição segura e confiável dos sinais medidos. Para isso, foram realizados ajustes nos potenciômetros presentes na placa, responsáveis pela regulação do ganho e do *offset*, possibilitando calibrar a amplitude do sinal de saída e centralizá-lo adequadamente dentro da faixa permitida pelo ADC. Essa etapa foi essencial para compensar pequenas variações decorrentes dos componentes eletrônicos do circuito, tais como tolerâncias resistivas, *offset* dos amplificadores operacionais e diferenças na sensibilidade do sensor LEM.

Figura 4.2 – Saída do sensor de tensão mostrada pelo osciloscópio.



Fonte: Elaborado pela autora.

Após os ajustes, foram realizadas medições experimentais utilizando o ADC do DSP, o osciloscópio digital e instrumentos de bancada, permitindo verificar a proporcionalidade entre a tensão aplicada na entrada do sensor e o sinal digitalizado pelo microcontrolador.

A Figura 4.3 apresenta o ensaio realizado para outra faixa de tensão de entrada, de até 48 V, com o objetivo de verificar a resposta do sensor sob diferentes condições operacionais. Durante o teste, foi aplicada ao sensor uma tensão de aproximadamente 36 V, conforme indicado pelo multímetro. A resposta observada no osciloscópio evidenciou uma tensão máxima de saída de aproximadamente 3,10 V, demonstrando que o circuito de condicionamento mantém o sinal dentro da faixa admissível de entrada dos ADC do DSP.

Figura 4.3 – Resposta experimental do sensor de tensão.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados obtidos demonstraram o correto funcionamento do circuito de condicionamento e isolamento desenvolvido, garantindo a compatibilidade entre os sinais analógicos do sistema de potência e os níveis exigidos pelo DSP. Dessa forma, os sensores calibrados puderam ser utilizados de maneira segura e confiável nas malhas de controle implementadas na plataforma experimental.

4.2 Variação de Referência no Inversor Trifásico

Com o objetivo de validar experimentalmente o funcionamento da estratégia de controle implementada, foram realizados ensaios de variação de referência no inversor trifásico utilizando a plataforma experimental desenvolvida neste trabalho. Os testes foram conduzidos utilizando o módulo inversor controlado pelo DSP, empregando as malhas de controle implementadas no referencial síncrono dq e a modulação PWM descrita nos capítulos anteriores.

Para a realização da simulação, foram declarados os valores dos componentes presentes no kit didático, de modo a garantir que a implementação reflita fielmente as condições reais do sistema, conforme apresentado na Tabela 4.1.

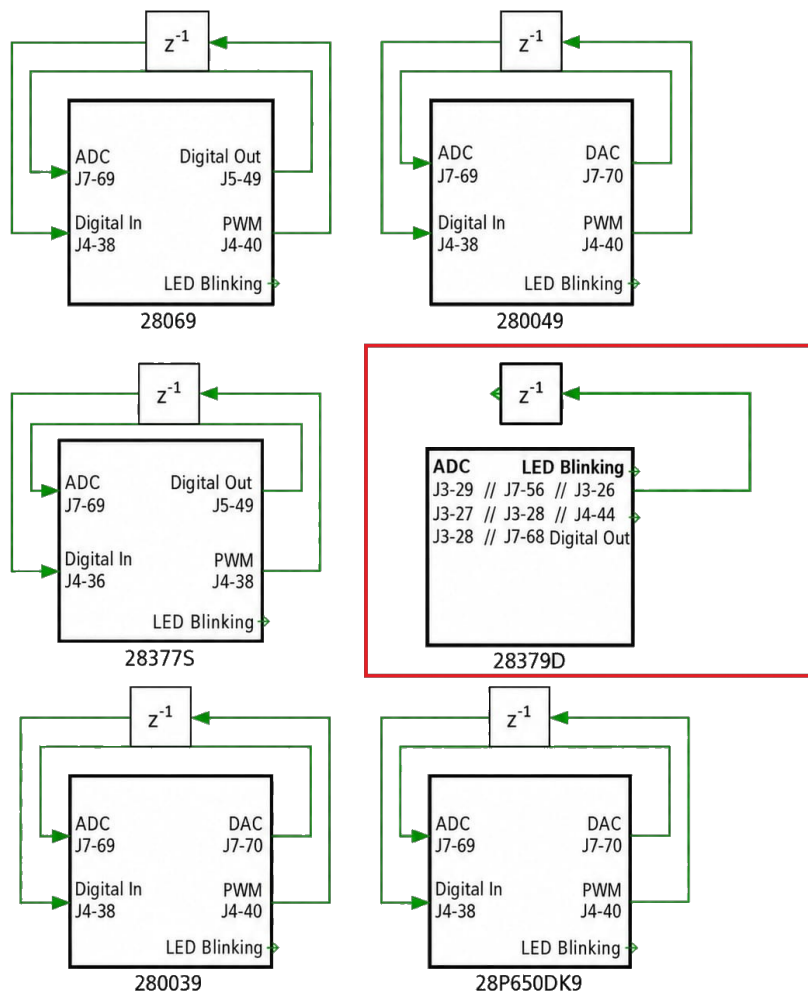
Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados na simulação do sistema.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Período de amostragem	T_s	$100 \mu s (1 \times 10^{-4} s)$
Frequência fundamental	f	60 Hz
Frequência da triangular	t_{tri}	20 kHz
Resistência do filtro RL	R_L	1,3 Ω
Indutância do filtro RL	L	5,3 mH
Capacitância do barramento CC	C	220 μF
Constante de tempo desejada	τ	2,5 ms
Ganho proporcional	k_p	$\frac{L}{\tau} = 2,12$
Ganho integral	k_i	$R_L/\tau = 520$
Valor de π	π	3,1415926536

A Figura 4.4 apresenta a lógica de controle implementada no software PLECS, desenvolvida com o objetivo de realizar o controle e a adequada operação do sistema em estudo. Essa implementação foi estruturada de forma a representar o comportamento dinâmico do conversor. Ao analisar o bloco destacado na referida figura, é possível observar com maior nível de detalhamento toda a arquitetura de implementação referente ao inversor trifásico, incluindo suas etapas de processamento e sinais de controle. Essa modelagem mais interna é apresentada de forma expandida na Figura 4.5, onde se evidencia a organização completa da lógica utilizada para a simulação do inversor no ambiente PLECS.

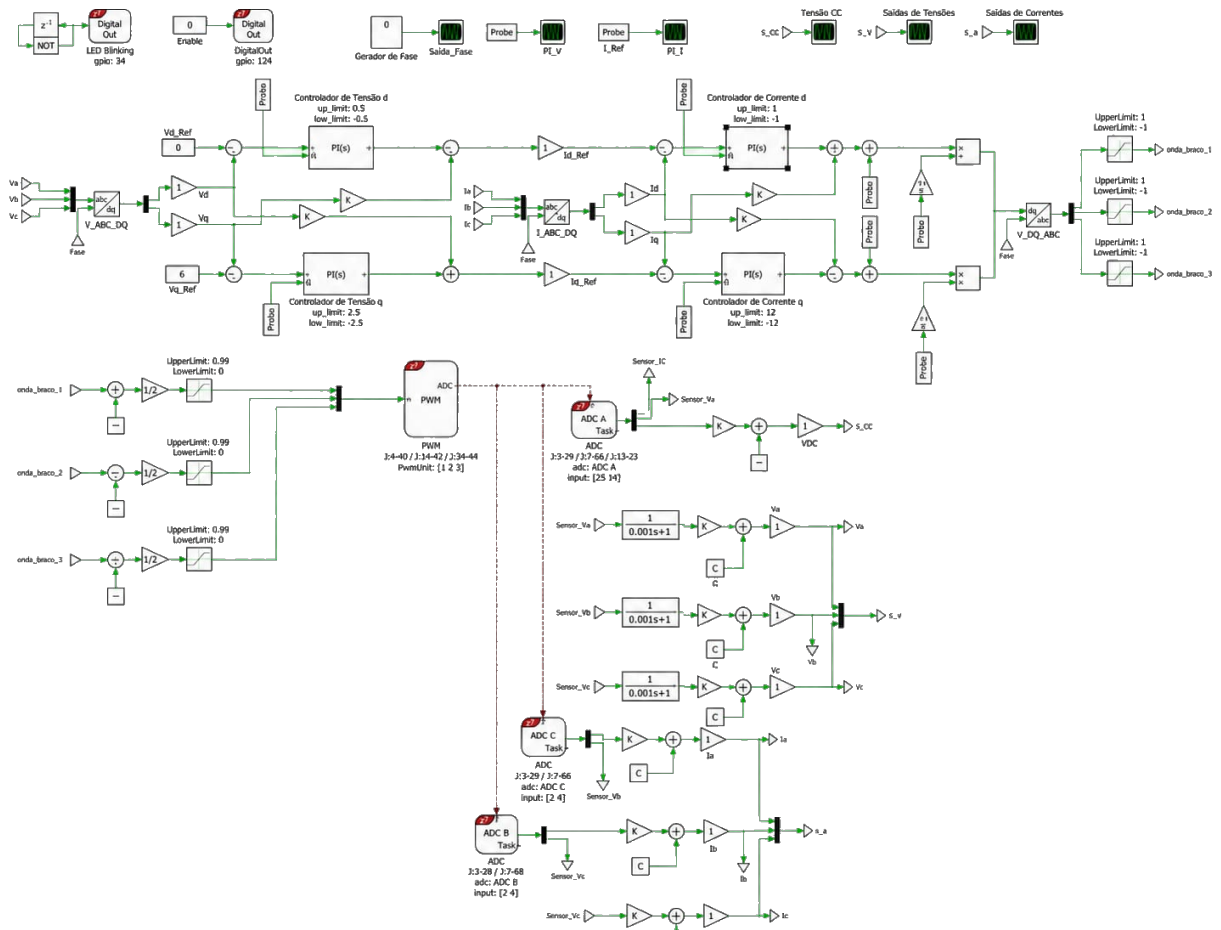
Figura 4.4 – Lógica PLECS para simulação do inversor trifásico.

Simple model with six distinct subsystems
Each subsystem can be independently deployed to the
corresponding TT C2000 LaunchPad target



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 4.5 – Circuito do inversor trifásico com a lógica de controle aplicada.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 4.6 são apresentadas as formas de onda experimentais obtidas durante a aplicação de uma variação na referência do sistema. São apresentadas as tensões trifásicas de saída do inversor, representadas por v_a , v_b e v_c , juntamente com a corrente da fase a , representada por i_a .

Durante o ensaio, foi aplicada uma variação na referência de tensão do inversor, de 2 V para 8 V, resultando em uma alteração da amplitude das tensões sintetizadas pelo sistema. Observa-se que o inversor respondeu de maneira estável à mudança de referência, sem a ocorrência de instabilidades ou oscilações significativas.

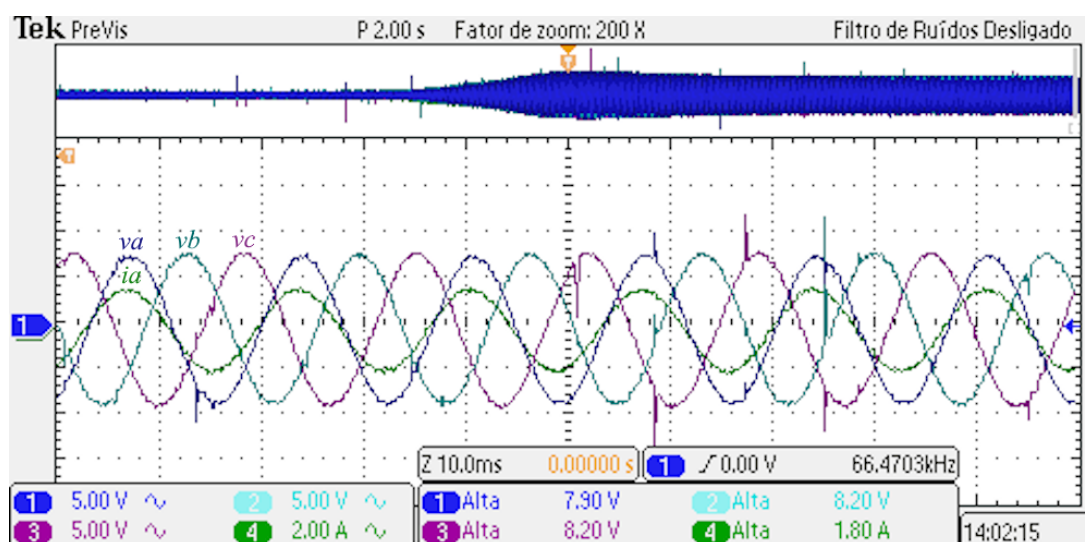
As tensões trifásicas permaneceram equilibradas ao longo do ensaio, mantendo defasagem aproximada de 120° entre as fases, característica esperada de sistemas trifásicos balanceados. Além disso, as formas de onda apresentaram comportamento predominantemente senoidal, evidenciando o correto funcionamento da estratégia de modulação PWM implementada no DSP.

A corrente de saída acompanhou adequadamente a dinâmica das tensões aplicadas,

demonstrando a correta atuação das malhas de controle implementadas no referencial síncrono. O comportamento observado indica que o sistema foi capaz de rastrear a nova referência de maneira satisfatória, apresentando resposta dinâmica compatível com o esperado para o modelo desenvolvido.

Também é possível observar pequenas componentes de alta frequência superpostas aos sinais, associadas ao chaveamento PWM do inversor. Tais componentes são inerentes à operação de conversores eletrônicos chaveados e permaneceram dentro do comportamento esperado para a frequência de chaveamento utilizada.

Figura 4.6 – Resposta experimental do inversor trifásico para variação de referência.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados experimentais obtidos demonstram a efetividade da plataforma experimental desenvolvida, validando tanto os circuitos de condicionamento de sinais quanto a implementação digital das estratégias de controle embarcadas no DSP. A plataforma apresentou funcionamento estável durante os ensaios realizados, permitindo a correta aquisição e processamento das variáveis elétricas necessárias para a execução dos algoritmos de controle do inversor trifásico.

Além disso, verificou-se que o sistema respondeu de maneira satisfatória apresentando comportamento dinâmico coerente com o esperado teoricamente e observado nas simulações computacionais realizadas previamente no *software* PLECS. As formas de onda de tensão obtidas experimentalmente apresentaram características predominantemente senoidais e equilibradas entre as fases, evidenciando a correta atuação das técnicas de modulação e controle implementadas.

Adicionalmente, a integração entre hardware e software mostrou-se eficiente e robusta, possibilitando a execução em tempo real dos algoritmos de controle implementados sem

comprometer a estabilidade e o desempenho dinâmico do sistema. Essa integração adequada entre as etapas de simulação e implementação prática contribuiu para a validação do modelo desenvolvido, evidenciando coerência entre os resultados obtidos experimentalmente e aqueles observados em ambiente de simulação.

Dessa forma, os resultados experimentais confirmam a viabilidade da plataforma proposta para aplicações envolvendo inversores trifásicos do tipo VSC, especialmente em estudos relacionados a estratégias avançadas de operação, como o modo formador de rede (grid-forming). Além disso, a resposta dinâmica observada demonstra a capacidade do sistema em manter a regulação adequada das variáveis de interesse, mesmo diante de perturbações e variações operacionais.

Por fim, a plataforma desenvolvida também se mostra adequada e promissora para futuras pesquisas, testes experimentais e implementação de novas técnicas de controle aplicadas a sistemas eletrônicos de potência, servindo como base para o desenvolvimento e validação de soluções mais complexas e de maior desempenho em aplicações reais.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma plataforma experimental aplicada ao controle de um VSI, utilizando o módulo inversor em conjunto com o processador digital de sinais. O principal objetivo do trabalho foi desenvolver uma estrutura experimental capaz de permitir a implementação, validação e análise de estratégias de controle aplicadas a conversores eletrônicos trifásicos.

Inicialmente, foi realizada uma revisão dos principais conceitos relacionados à modelagem e ao controle de inversores trifásicos, abordando a modulação por largura de pulso, a modelagem matemática do inversor e o controle das correntes e tensões no referencial síncrono dq . A utilização das transformações de Clarke e Park permitiu simplificar a modelagem do sistema trifásico, possibilitando o desacoplamento das variáveis de controle e a implementação de controladores PI para regulação das correntes e tensões do inversor.

Na etapa de desenvolvimento experimental, foi projetada uma plataforma modular composta pelo inversor trifásico, DSP, sensores de tensão, circuitos de condicionamento de sinais e banco de cargas. A utilização do módulo inversor possibilitou a implementação prática do estágio de potência, enquanto o DSP permitiu a execução em tempo real dos algoritmos de controle e da modulação PWM.

Um dos principais pontos abordados neste trabalho foi o desenvolvimento dos sensores de tensão isolados. O circuito desenvolvido permitiu realizar o isolamento galvânico entre o estágio de potência e o sistema de controle, além do condicionamento adequado dos sinais para leitura pelos conversores ADC do DSP. A implementação dos estágios de ganho, *offset* e filtragem passa-baixa garantiu a compatibilidade entre os sinais medidos e a faixa de operação do processador, contribuindo diretamente para a segurança e confiabilidade da plataforma experimental.

Além disso, foi realizada a implementação do controle digital utilizando o ambiente PLECS integrado ao DSP. A utilização dessa ferramenta possibilitou maior facilidade na programação dos algoritmos de controle, na geração dos sinais PWM e na aquisição dos sinais provenientes dos sensores, reduzindo o tempo de desenvolvimento da plataforma e facilitando futuras modificações no sistema.

Os resultados experimentais obtidos demonstraram o correto funcionamento da plataforma desenvolvida. A etapa de calibração dos sensores confirmou a adequação dos sinais condicionados

para leitura pelo DSP, enquanto os ensaios de variação de referência evidenciaram a capacidade do inversor trifásico em operar de forma estável diante de mudanças nas condições de operação.

As formas de onda experimentais apresentaram comportamento coerente com o esperado para sistemas trifásicos equilibrados, mantendo defasagem de aproximadamente 120° entre as fases e comportamento predominantemente senoidal das tensões sintetizadas pelo inversor. Também foi possível verificar o correto rastreamento das referências pelas malhas de controle implementadas, demonstrando a efetividade do controle no referencial síncrono.

Os resultados obtidos validam tanto a modelagem matemática desenvolvida quanto a implementação prática realizada na plataforma experimental. Dessa forma, conclui-se que os objetivos propostos neste trabalho foram atingidos, resultando em uma plataforma experimental funcional, segura, modular e adequada para estudos relacionados ao controle de inversores trifásicos.

Além da contribuição acadêmica, a plataforma desenvolvida apresenta potencial para utilização em atividades de pesquisa, ensino e desenvolvimento de novas estratégias de controle em eletrônica de potência, especialmente em aplicações envolvendo microrredes, integração de fontes renováveis e sistemas de geração distribuída. A plataforma experimental apresenta ainda potencial para utilização em atividades laboratoriais e acadêmicas, contribuindo para o ensino de eletrônica de potência, sistemas de controle e conversores estáticos em cursos de engenharia elétrica, eletrônica e controle e automação.

5.1 Trabalhos Futuros

Como continuidade deste trabalho, diversas melhorias e expansões podem ser realizadas tanto na plataforma experimental quanto nas estratégias de controle implementadas. Uma das principais possibilidades consiste na implementação de técnicas de controle mais avançadas, controle repetitivo, controle adaptativo e estratégias robustas aplicadas a inversores trifásicos. Essas técnicas podem proporcionar melhor desempenho dinâmico, maior rejeição a perturbações e redução da distorção harmônica nas variáveis controladas.

Outra possibilidade envolve o aprofundamento dos estudos relacionados aos modos de operação do inversor trifásico. Neste trabalho, a plataforma foi desenvolvida e validada operando no modo formador de rede. Como continuação, pretende-se implementar estratégias de controle para operação no modo seguidor de rede, permitindo análises comparativas entre as diferentes

abordagens de controle e ampliando as possibilidades de aplicação da plataforma experimental.

No contexto da instrumentação, futuras melhorias podem incluir o desenvolvimento de circuitos de condicionamento com maior precisão, maior imunidade a ruídos eletromagnéticos e sistemas de proteção contra sobretensão, sobrecorrente e falhas no estágio de potência.

Outra possibilidade de continuidade consiste na implementação de sistemas de aquisição e monitoramento em tempo real, permitindo supervisão remota da plataforma e registro contínuo das variáveis elétricas do sistema.

Por fim, a plataforma desenvolvida pode ser expandida para aplicações envolvendo sistemas de armazenamento de energia, integração de fontes renováveis, acionamento de máquinas elétricas e estudos relacionados à qualidade da energia elétrica.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. d. O. **Notas de aula da disciplina Eletrônica de Potência**. Cataguases: [s.n.], 2024. Material didático.
- ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. **Fundamentals of Power Electronics**. [S.l.]: Springer, 2001.
- GUERRERO, J. M.; KANDARI, R. **Microgrids: Modeling, control, and applications**. [S.l.]: Academic Press, 2021.
- GUERRERO, J. M. e. a. Hierarchical control of droop-controlled ac and dc microgrids. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 58, n. 1, p. 158–172, 2011.
- LEM. **LV 25-P Voltage Transducer**. 2026. <<https://www.lem.com/en/product-list/lv-25p>>. Accessed: 14 May 2026.
- MOHAN, N.; UNDELAND, T.; ROBBINS, W. **Power electronics: converters, applications and design**. 3. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2003.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. [S.l.]: Pearson, 2010.
- RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência: dispositivos, circuitos e aplicações**. 4. ed. [S.l.]: Pearson, 2015.
- RS Components. **Texas Instruments LAUNCHXL-F28379D Development Board**. 2026. <<https://za.rs-online.com/web/p/power-motor-robotics-development-tools/2355113>>. Accessed: 14 May 2026.
- TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRIGUEZ, P. **Grid converters for photovoltaic and wind power systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- Texas Instruments. **BOOSTXL-3PhGaNInv Evaluation Module User's Guide**. Dallas, Texas, 2018. Acesso em: 24 jun. 2026. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ug/sluubp1a/sluubp1a.pdf>>.
- Texas Instruments. **TMS320F28379D Microcontroller Data Manual**. [S.l.], 2024. Acesso em: 24 jun. 2026. Disponível em: <<https://www.ti.com/product/TMS320F28379D>>.
- Texas Instruments. **LAUNCHXL-F28379D Development Kit**. 2026. <<https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28379D>>. Accessed: 14 May 2026.
- YAZDANI, A.; IRAVANI, R. **Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.