

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

BRUNO DA SILVA SOARES

**KIT DIDÁTICO INTERATIVO PARA ENSINO DE CONVERSORES CC-CC: uma
abordagem prática e visual das topologias buck, boost e buck-boost**

Leopoldina

2026

BRUNO DA SILVA SOARES

**KIT DIDÁTICO INTERATIVO PARA ENSINO DE CONVERSORES CC-CC: uma
abordagem prática e visual das topologias buck, boost e buck-boost**

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: Matusalém Martins Lanes
Coorientador: Rodolfo Lacerda Valle

Leopoldina

2026

Soares, Bruno da Silva.
S676k Kit didático interativo para ensino de conversores cc-cc: uma abordagem prática e visual das topologias buck, boost e buck-boost. / Bruno da Silva Soares. – 2026.
140 f. : il., gráfs.
Orientador: Matusalém Martins Lanes.
Coorientador: Rodolfo Lacerda Valle.
Bibliografia: f. 126-128.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, *Campus* Leopoldina, apresentada ao curso de Engenharia e Controle e Automação. Departamento de Eletroeletrônica, 2026.
1. Eletrônica de potência. 2. Conversores. 3. Material didático. 4. Circuitos eletrônicos. I. Lanes, Matusalém Martins. II. Valle, Rodolfo Lacerda. III. Título.

CDU: 621.382

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Luzia Adriana Damasceno,
CRB 6º - 2305 / CEFET-MG *campus* Leopoldina.



FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC N° 1/2026 - CECALP (11.51.20)

N° do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO

Leopoldina-MG, 16 de junho de 2026.

BRUNO DA SILVA SOARES

**KIT DIDÁTICO INTERATIVO PARA ENSINO DE CONVERSORES CC-CC: UMA
ABORDAGEM PRÁTICA E VISUAL DAS TOPOLOGIAS BUCK, BOOST E
BUCK-BOOST**

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 16 de junho de 2026.

Banca Examinadora:

Prof. D. Sc. Matusalém Martins Lanes (CEFET-MG) - Presidente
Prof. D. Eng. Prof. Rodolfo Lacerda Valle (CEFET-MG) - Coorientador
Prof. M. Eng. Josué Lima da Silva (CEFET-MG)
Prof. D. Eng. Andrei de Oliveira Almeida CEFET-MG)

**Leopoldina
2026**

(Assinado digitalmente em 17/06/2026 13:30)

ANDREI DE OLIVEIRA ALMEIDA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEELP (11.61.04)
Matrícula: ###255#1

(Assinado digitalmente em 18/06/2026 16:02)

JOSUE LIMA DA SILVA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEELP (11.61.04)
Matrícula: ###638#4

(Assinado digitalmente em 17/06/2026 13:29)

MATUSALEM MARTINS LANES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEELP (11.61.04)
Matrícula: ###943#7

(Assinado digitalmente em 24/06/2026 14:27)

RODOLFO LACERDA VALLE
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEELP (11.61.04)
Matrícula: ###471#2

Processo Associado: 23062.030911/2026-80

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **1**, ano: **2026**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão: **16/06/2026** e o código de verificação: **4304c4b904**

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder saúde, sabedoria e perseverança ao longo de toda essa jornada acadêmica, tornando possível a concretização deste trabalho.

A minha família, por todo apoio, incentivo e compreensão durante os momentos mais desafiadores, sendo base fundamental para que eu pudesse seguir firme em meus objetivos.

Ao meu orientador e coorientador, pela dedicação, paciência e pelos valiosos ensinamentos transmitidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho, contribuindo de forma significativa para meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos professores do curso, que ao longo da graduação compartilharam conhecimentos essenciais e despertaram o senso crítico e a busca constante por aprendizado.

Aos técnicos de laboratório, pelo suporte prestado durante as atividades práticas, pela disponibilidade em auxiliar na utilização dos equipamentos e pela contribuição direta na viabilização dos experimentos realizados, sendo peças fundamentais para a execução deste projeto.

Aos colegas e amigos, pelo companheirismo, apoio mútuo e pelas trocas de experiências que enriqueceram essa trajetória.

Por fim, agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho e para a minha formação como engenheiro.

RESUMO

O ensino de eletrônica de potência com recursos práticos permite ao estudante assimilar o conteúdo teórico aprendido em sala de aula. Neste trabalho é apresentado um kit didático interativo de conversores CC-CC, que permite a implementação das topologias Buck, Boost e Buck-boost. A proposta contempla o projeto e a construção de uma placa modular com serigrafia indicativa para o posicionamento dos componentes, permitindo a montagem manual dos circuitos pelos estudantes e favorecendo a compreensão da estrutura e do funcionamento de cada configuração do conversor. O kit possibilita a realização de medições elétricas, permitindo a análise de grandezas como tensão de entrada, tensão de saída e corrente no indutor. Por fim, com o intuito de complementar o caráter pedagógico da proposta, foi desenvolvido um aplicativo simples, capaz de exibir os dados obtidos por meio das medições. A integração entre *hardware* e *software* busca promover uma experiência de aprendizagem mais interativa e alinhada às metodologias ativas de ensino, contribuindo para o aprimoramento da formação acadêmica em eletrônica de potência.

Palavras-chave: Conversor CC-CC; Eletrônica de Potência; Kit didático; Buck; Boost; Buck-Boost.

ABSTRACT

Teaching power electronics with practical resources allows students to assimilate the theoretical content learned in the classroom. This work presents an interactive didactic kit of DC-DC converters, which allows the implementation of Buck, Boost, and Buck-boost topologies. The proposal includes the design and construction of a modular board with indicative silkscreen for component placement, allowing students to manually assemble the circuits and promoting understanding of the structure and operation of each converter configuration. The kit enables electrical measurements, allowing the analysis of quantities such as input voltage, output voltage, and inductor current. Finally, to complement the pedagogical nature of the proposal, a simple application was developed to display the data obtained through the measurements. The integration between hardware and software seeks to promote a more interactive learning experience aligned with active teaching methodologies, contributing to the improvement of academic training in power electronics.

Keywords: DC-DC Converter; Power Electronics; Didactic Kit; Buck; Boost; Buck-Boost.



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 130/2026 - CECALP (11.51.20)

Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO

Leopoldina-MG, 16 de junho de 2026.

Eu, **BRUNO DA SILVA SOARES**, matrícula **20203010269**, discente do Curso de Engenharia de Controle e Automação, declaro para os devidos fins, que o presente Trabalho de Conclusão de Curso, de título **KIT DIDÁTICO INTERATIVO PARA ENSINO DE CONVERSORES CC-CC: UMA ABORDAGEM PRÁTICA E VISUAL DAS TOPOLOGIAS BUCK, BOOST E BUCK-BOOST**, 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) **Prof. D. Sc. Matusalém Martins Lanes** (CEFET-MG) (orientador), o (a) professor(a) **Prof. D. Eng. Prof. Rodolfo Lacerda Valle** (coorientador), os membros da banca examinadora e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Leopoldina, de qualquer responsabilidade.

(Assinado digitalmente em 16/06/2026 17:51)

Bruno da Silva Soares

DISCENTE

Matrícula: 2020#####9

Processo Associado: 23062.030911/2026-80

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **130**, ano: **2026**, tipo: **TERMO DE RESPONSABILIDADE**, data de emissão: **16/06/2026** e o código de verificação: **bdbaa32af**

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura Geral do Kit Didático	17
Figura 2 - Gráfico da corrente no indutor em <i>CCM</i>	25
Figura 3 - Gráfico da corrente no indutor em <i>DCM</i>	26
Figura 4 - Demonstrativo do sinal de onda de um <i>PWM</i>	27
Figura 5 - Topologia do Conversor Buck.	28
Figura 6 - Topologia do Conversor Boost	31
Figura 7 - Topologia do Conversor Buck-Boost.	34
Figura 8 - Placa de desenvolvimento com STM32F411.	37
Figura 9 - Especificações do Microcontrolador.	37
Figura 10 - ST-LINK.	38
Figura 11 - Módulo USB-SERIAL – FTDI.	39
Figura 12 - Módulo <i>Bluetooth</i> – HC-05.	40
Figura 13 - Sensor de corrente ACS712.	42
Figura 14 - Circuito de leitura pelo ACS.	43
Figura 15 - Circuito de condicionamento da corrente.	43
Figura 16 - Simulação do circuito de condicionamento.	44
Figura 17 - Tensão ajustada na saída do condicionamento do Buck-Boost.	45
Figura 18 - Circuito de Condicionamento da Tensão de Saída do Conversor Buck-Boost.	45
Figura 19 - Comparação entre a tensão ajustada negativa e a tensão retificada.	46
Figura 20 - Comparação entre a tensão ajustada positiva e a tensão retificada.	47
Figura 21 - Circuito de identificação dos componentes por meio de resistores.	48
Figura 22 - Circuito de identificação do capacitor na configuração AB.	49
Figura 23 - Circuito de identificação do capacitor na configuração BA.	49
Figura 24 - Montagem experimental do circuito de identificação.	50
Figura 25 - Interface do Proteus V08.	57
Figura 26 - Modelo 3D da placa móvel do capacitor: a) vista superior e b) vista inferior.	59
Figura 27 - Circuito da placa móvel do capacitor.	60
Figura 28 - Modelo 3D da placa móvel do indutor: a) vista superior e b) vista inferior.	61
Figura 29 - Circuito da placa móvel do indutor.	62

Figura 30 - Modelo 3D da placa móvel do diodo: a) vista superior e b) vista inferior.	63
Figura 31 - Circuito da placa móvel do diodo.	63
Figura 32 - Modelo 3D da placa móvel do diodo: a) vista superior e b) vista inferior.	64
Figura 33 - Circuito da placa móvel do MOSFET.	65
Figura 34 - Circuito de potência - Parte 1.	66
Figura 35 - Circuito de potência - Parte 2.	67
Figura 36 - Modelo 3D da placa de potência – Vista Superior.	68
Figura 37 - Circuito de Controle - Parte 1.	69
Figura 38 - Circuito de Controle - Parte 2.	70
Figura 39 - Circuito de Controle - Parte 3.	71
Figura 40 - Circuito de Controle - Parte 4.	71
Figura 41 - Modelo 3D da placa de controle – Vista Superior.	72
Figura 42 - <i>Visual Studio Code</i>	75
Figura 43 - Platform IO.	76
Figura 44 - MIT App Inventor.	91
Figura 45 - Bloco de Código do Aplicativo.	91
Figura 46 - Bloco de código responsável pela Comunicação Bluetooth.	93
Figura 47 - Bloco de código responsável pela Conexão Bluetooth.	93
Figura 48 - Bloco de código responsável pela temporização e exibição dos dados.	94
Figura 49 - Bloco responsável pelo envio dos parâmetros via Bluetooth.	95
Figura 50 - Interface do aplicativo: a) tela inicial e b) painel de monitoramento.	96
Figura 51 - Placa de Potência do Conversor CC-CC.	99
Figura 52 - Placa de Controle do Conversor CC-CC.	100
Figura 53 - Placas Móveis conectadas na Placa de Potência.	101
Figura 54 - Formas de onda do conversor Buck operando em modo CCM.	102
Figura 55 - Corrente no indutor do Buck em modo CCM: valores simulados e medidos.	103
Figura 56 - Tensão de saída do Buck em modo CCM: valores simulados e medidos.	104
Figura 57 - Formas de onda do conversor Buck operando em modo DCM.	105
Figura 58 - Corrente no indutor do Buck em modo DCM: valores simulados e medidos.	105
Figura 59 - Tensão de saída do Buck em modo DCM: valores simulados e medidos.	106
Figura 60 - Formas de onda do conversor Boost operando em modo CCM.	107
Figura 61 - Corrente no indutor do Boost em modo CCM: valores simulados e medidos.	108
Figura 62 - Tensão de saída do Boost em modo CCM: valores simulados e medidos.	108
Figura 63 - Formas de onda do conversor Buck-Boost operando em modo abaixador.	110

Figura 64 - Corrente no indutor do Buck-Boost abaixador: simulação e medição	110
Figura 65 - Tensão de saída do Buck-Boost abaixador: simulação e medição.	111
Figura 66 - Formas de onda do conversor Buck-Boost operando em modo elevador	113
Figura 67 - Corrente no indutor do Buck-Boost elevador: simulação e medição	113
Figura 68 - Tensão de saída do Buck-Boost elevador: simulação e medição.	114
Figura 69 - Forma de onda experimentais utilizadas na validação do funcionamento.....	116
Figura 70 - Painel de monitoramento do aplicativo durante o funcionamento do conversor.	116
Figura 71 - Indicação visual de funcionamento correto da topologia implementada.....	117
Figura 72 - Indicação visual de erro de montagem no kit didático	118
Figura 73 - Exibição da falha de montagem no aplicativo de monitoramento.....	118
Figura 74 - Indicação da falta de alimentação no kit didático.....	119
Figura 75 - Exibição da falha de alimentação no aplicativo de monitoramento	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pinos do ST-LINK V2.....	38
Tabela 2 - Pinos do Módulo FTDI.	39
Tabela 3 - Pinos do Módulo Bluetooth HC-05.....	41
Tabela 4 - Relação dos valores de resistências e das tensões simuladas aplicadas à identificação de capacitores.	51
Tabela 5 - Relação dos valores de resistências e das tensões medidas aplicadas à identificação de capacitores.	51
Tabela 6 - Relação dos valores de resistências e das tensões simuladas aplicadas à identificação dos indutores.....	52
Tabela 7 - Relação dos valores de resistências e das tensões medidas aplicadas à identificação dos indutores.....	52
Tabela 8 - Relação dos valores de resistências e das tensões simuladas aplicadas à identificação de diodos.....	53
Tabela 9 - Relação dos valores de resistências e das tensões medidas aplicadas à identificação de diodos.....	53
Tabela 10 - Relação dos valores de resistências e das tensões simuladas aplicadas à identificação de MOSFETs.	54
Tabela 11 - Relação dos valores de resistências e das tensões simuladas aplicadas à identificação de MOSFETs.	54
Tabela 12 - Relações das posições dos componentes no conversor.	82
Tabela 13 - Valores de tensão e corrente média no Buck: medição versus calculado.	104
Tabela 14 - Valores de tensão e corrente média no Boost: medição versus calculado	109
Tabela 15 - Valores de tensão e corrente média no Buck-Boost abaixador: medição versus calculado.....	112
Tabela 16 - Valores de tensão e corrente média no Buck-Boost elevador: medição versus calculado.....	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Conversor Analógico-Digital, em inglês, <i>Analog to Digital Converter</i>
CC	Corrente Contínua
CCM	Modo de Condução Contínua, em inglês, <i>Continuous Conduction Mode</i>
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
DCM	Modo de Condução Descontínua, em inglês, <i>Discontinuous Conduction Mode</i>
EDR	<i>Enhanced Data Rate</i>
EN	<i>Enable</i>
EOC	<i>End of Conversion</i>
FTDI	Interface conversora <i>USB</i> -Serial baseada em FTDI
GND	Terra, em inglês, <i>Ground</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IO	Entrada e saída, em inglês, <i>Input and output</i>
LED	Diodo emissor de luz, em inglês, <i>Light Emitting Diode</i>
MOSFET	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i>
MSPS	<i>Mega Samples Per Second</i>
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PWM	Modulação por Largura de Pulso, em inglês, <i>Pulse Width Modulation</i>
RGB	Vermelho, Verde e Azul, em inglês, <i>Red, Green and Blue</i>
RXD	Recepção de dados, do inglês, <i>Receive Data</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
TXD	Transmissão de Dados, em inglês, <i>Transmit Data</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VCC	Tensão de alimentação positiva

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Unidade de corrente elétrica
C	Capacitância
D	Ciclo de trabalho
F	Unidade de capacitância Farad
f	Frequência
f_s	Frequência de chaveamento
H	Unidade de indutância Henry
Hz	Unidade de frequência elétrica
I_{acs}	Corrente medida pelo sensor ACS
I_{in}	Corrente de entrada
I_L	Corrente no indutor
I_{out}	Corrente de saída
L	Indutância
L_{min}	Indutância mínima
P	Potência elétrica
R	Resistência elétrica
s	Unidade de tempo (segundo)
T	Período do sinal
t_{off}	Tempo em que a chave permanece desligada
t_{on}	Tempo em que a chave permanece ligada
V	Unidade de tensão elétrica
V_{adc}	Tensão lida pelo conversor ADC
V_{in}	Tensão de entrada do conversor
V_{out}	Tensão de saída do conversor
V_{ref}	Tensão de referência
V_L	Tensão no indutor
V_C	Tensão no capacitor
W	Unidade de potência elétrica
Δ	Variação ou diferença entre grandezas

ΔI_L

Variação da corrente no indutor (ondulação, em inglês, *ripple*)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Problema.....	18
1.2 Justificativa.....	18
1.3 Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivo Geral	19
1.3.2 Objetivos Específicos	19
1.4 Estrutura do texto	20
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Desenvolvimento de Recursos Didáticos para Apoio ao Ensino	22
2.2 Modo de Condução Contínuo e Descontínuo nos Conversores	25
2.3 Geração do Sinal de PWM	26
2.4 Conversores CC-CC	27
2.5 Conversores Buck.....	28
2.6 Conversor Boost	31
2.7 Conversor Buck-Boost	33
2.8 Microcontrolador STM32F411 WeAct <i>BlackPill</i>	36
2.9 Comunicação USB-SERIAL	38
2.10 Comunicação <i>Bluetooth</i>	40
2.11 Condicionamento do Sinal do Sensor ACS712 para Medição da Corrente no Indutor ...	41
2.12 Condicionamento da Tensão de Saída do Conversor Buck-Boost	44
2.13 Identificação dos Componentes por Meio de Resistores e Proteção contra Conexões Incorretas	47
2.13.1 Definição das faixas de identificação dos componentes por resistores	50
2.13.1.1 Identificação dos Capacitores	50
2.13.1.2 Identificação dos Indutores.....	51
2.13.1.3 Identificação dos Diodos	52
2.13.1.4 Identificação dos MOSFETs	53
2.13.2 Análise Geral dos Resultados de Identificação	54

2.14 Considerações Parciais	55
3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE <i>HARDWARE</i> DESENVOLVIDO	56
3.1 <i>Software</i> PROTEUS V08	56
3.2 Visão Geral do Sistema de <i>Hardware</i>	57
3.2.1 Placas Móveis de Componentes	58
3.2.1.1 Placa do Capacitor	58
3.2.1.2 Placa do Indutor	60
3.2.1.3 Placa do Diodo	62
3.2.1.4 Placa do MOSFET	64
3.2.2 Placa de Potência	65
3.2.3 Placa de Controle	68
3.3 Considerações Parciais	73
4 ALGORITMO DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS DO SISTEMA.....	74
4.1 Ambiente de Desenvolvimento e Programação	74
4.2 Estrutura Geral do Código e Fluxograma de Funcionamento	76
4.2.1 Inicialização do Sistema	77
4.2.2 Leitura e Condicionamento do <i>ADC</i>	78
4.2.3 Identificação de Componentes por Faixa de Tensão	79
4.2.4 Detecção do Tipo de Conversor	81
4.2.5 Indicação Visual por <i>LEDs RGB</i>	83
4.2.6 Acionamento por <i>PWM</i>	85
4.2.7 Comunicação Serial USB	87
4.2.8 Comunicação <i>Bluetooth</i>	87
4.3 Considerações Parciais	89
5 APLICATIVO DE MONITORAMENTO	90
5.1 Ambiente de Desenvolvimento e Ferramentas Utilizadas	90
5.2 Estrutura Geral do Código-Fonte	92
5.2.1 Implementação da Comunicação <i>Bluetooth</i> e Estabelecimento da Conexão	92
5.2.2 Recepção de Dados e Exibição das Medições	93
5.2.3 Envio de dados via <i>Bluetooth</i>	94
5.3 Design da Interface	96
5.4 Considerações Parciais	96
6 RESULTADOS	98
6.1 Validação Geral do Kit Didático	98

6.1.1 Placa de Potência	98
6.1.2 Placa de Controle.....	100
6.1.3 Placas Móveis	101
6.2 Resultados do Conversor Buck	101
6.3 Resultados do Conversor Boost.....	107
6.4 Resultados do Conversor Buck-Boost.....	109
6.5 Integração e Validação do Aplicativo com o Kit Didático.....	115
6.6 Considerações Parciais	120
7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	122
7.1 Conclusões.....	122
7.2 Trabalhos Futuros	124
■ REFERÊNCIAS.....	126
APÊNDICE A – CÓDIGO DO <i>FIRMWARE</i> DESENVOLVIDO PARA O KIT.....	129
APÊNDICE B – CÓDIGO PARA CALCULAR PARÂMETROS DO CONVERSOR	138

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a eletrônica de potência tornou-se uma área de grande importância na tecnologia, podendo ser utilizada nas mais diversas aplicações, como controle de motores, fontes de energia, transporte elétrico, entre outras. A nível nacional, é uma disciplina presente em diversos cursos de engenharia, como Engenharia Elétrica, Mecatrônica, Eletrônica, Controle e Automação, entre outros, e envolve diferentes áreas da eletricidade, como circuitos elétricos, processamento de sinais, eletromagnetismo, como exemplos. A tentativa de integrar o conhecimento dessas distintas áreas torna o ensino de eletrônica de potência ainda mais desafiador, tanto para professores quanto para alunos (Dupczak, 2022).

Os conversores de corrente contínua para corrente contínua (CC-CC) são circuitos eletrônicos que convertem uma tensão CC para diferentes níveis de tensão CC fornecendo sempre uma saída regulada. Esses circuitos descritos são classificados como conversores CC-CC de modo chaveador, também chamados de fontes chaveadas (Hart, 2008). Eles utilizam elementos de comutação e filtros compostos por indutores e capacitores para realizar a conversão e o condicionamento da energia elétrica (Bottarelli, 2006). Neste trabalho serão abordados os tipos:

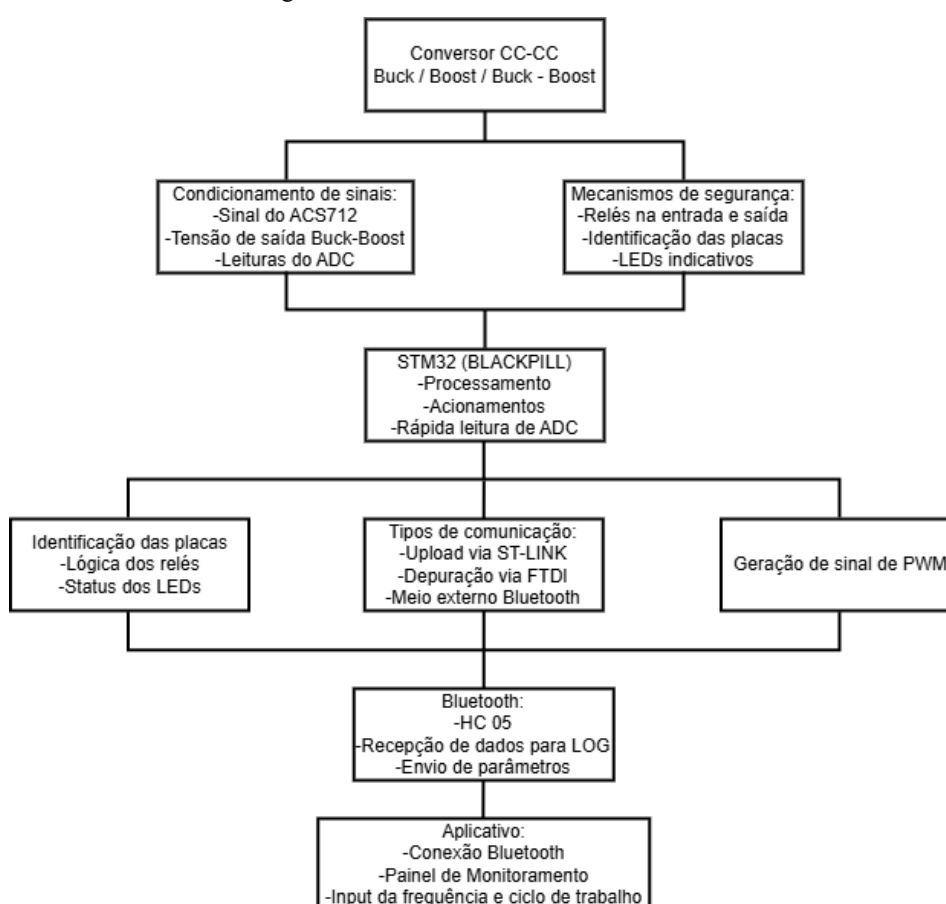
1. Conversor Buck, ou Abaixador;
2. Conversor Boost, ou Elevador;
3. Conversor Buck-Boost Clássico, ou Abaixador-Elevador;

O conversor Buck reduz a tensão na saída em relação a tensão de entrada, de modo que a tensão média fornecida à carga seja inferior à tensão média de entrada. Como consequência da conservação de energia, a corrente média de entrada do conversor Buck será menor que a corrente média fornecida à carga (Leão, 2016). Já o conversor na configuração Boost promove uma elevação da tensão de saída, ou seja, a tensão média na carga é maior que a alimentação do sistema, sendo que a tensão mínima na carga corresponde à tensão de entrada. Por fim, o conversor Buck-Boost permite operar em ambas as configurações (aumento ou redução da tensão de saída em relação a tensão de entrada), porém resultando sempre em uma tensão negativa na saída do conversor (Rashid, 2015). Para elaboração desses conversores utiliza-se

alguns componentes como chaves eletrônicas (MOSFETs e IGBTs), indutores, capacitores e diodos.

A proposta deste trabalho consiste na construção dos conversores mencionados aqui e ao longo do texto, com o objetivo de utilizá-los como ferramentas didáticas para o ensino de Eletrônica de Potência no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Campus Leopoldina (CEFET-MG), atendendo aos estudantes dos cursos técnicos e da graduação. Uma visão geral do kit desenvolvido é mostrada em Figura 1.

Figura 1 – Estrutura Geral do Kit Didático



Fonte: do autor.

Considerando que, no cenário atual da instituição, é difícil disponibilizar material prático para todas as disciplinas, a elaboração de kits didáticos acessíveis, utilizando componentes de baixo custo, contribui para reduzir essa defasagem e ampliar as oportunidades de aprendizado experimental.

1.1 Problema

O ensino nos cursos de Engenharia fundamenta-se na integração entre teoria e prática, sendo essencial que o estudante tenha acesso a recursos que possibilitem a aplicação dos conceitos estudados (Fonseca, N. R.; Carvalho; Guerra, 2020). No CEFET-MG – Campus Leopoldina, a disciplina de Eletrônica de Potência está presente tanto no curso técnico em Eletrotécnica quanto na graduação em Engenharia de Controle e Automação, havendo historicamente a necessidade de maior disponibilidade de recursos experimentais para apoio às atividades práticas.

Com a reestruturação da grade curricular da Engenharia (CEFET-LP, 2022), a disciplina passou a contar com um laboratório específico, e alguns equipamentos foram adquiridos. Entretanto, a infraestrutura ainda se mostra limitada frente à demanda das atividades práticas previstas.

1.2 Justificativa

É reconhecido que atividades práticas desempenham papel fundamental no processo de aprendizagem em cursos de Engenharia, pois permitem consolidar os conceitos teóricos e identificar falhas de compreensão (Fonseca, A. B. A., 2019). Entretanto, equipamentos destinados ao ensino de Eletrônica de Potência geralmente apresentam elevado custo de aquisição, o que limita sua disponibilidade em instituições de ensino com restrições orçamentárias, como o CEFET-MG – Campus Leopoldina.

Além disso, embora ferramentas de simulação auxiliem na análise e compreensão de circuitos, elas não reproduzem integralmente as condições reais de operação dos sistemas (Ferreira *et al.*, 2006). Nesse contexto, o desenvolvimento de kits didáticos surge como uma alternativa para ampliar o acesso às atividades experimentais e fortalecer o processo de ensino-aprendizagem na disciplina (Souza, E. S. N.; Demetino, 2019).

1.3 Objetivos

Nas seções a seguir serão abordados os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um kit didático interativo para o ensino de conversores CC-CC, contemplando as topologias Buck, Boost e Buck-Boost, por meio de uma abordagem prática e visual que favoreça a compreensão dos conceitos teóricos e o desenvolvimento de atividades experimentais em Eletrônica de Potência. Dessa forma, busca-se contribuir para o processo de ensino-aprendizagem na instituição, promovendo uma experiência educacional mais dinâmica, intuitiva e alinhada às necessidades da formação acadêmica dos estudantes.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para a elaboração desse trabalho será desenvolvido um conjunto de placas de circuito impresso que compõem o kit didático, tornando possível comutar as diferentes topologias mencionadas de conversores CC-CC.

Com isso, os objetivos específicos são apresentados a seguir:

- i) Realizar uma revisão bibliográfica sobre conversores CC-CC;
- ii) Desenvolver as placas de potência, controle e módulos móveis do kit didático proposto;
- iii) Fabricar placas com serigrafia indicativa para montagem manual dos componentes pelos estudantes;
- iv) Desenvolver um sistema de *LEDs* indicativos para auxiliar o posicionamento dos componentes no kit didático;
- v) Possibilitar a realização de medições elétricas no kit, incluindo tensão de entrada, tensão de saída e corrente no indutor;

- vi) Elaborar o código de controle responsável pela operação dos conversores e pela interação entre as placas;
- vii) Verificar as respostas esperadas dos conversores por meio de simulações computacionais, avaliando desempenho e comportamento dinâmico;
- viii) Avaliar o comportamento dos conversores com carga resistiva;
- ix) Verificar o comportamento dos circuitos de condicionamento de sinais e os sistemas de identificação das placas por meio de simulações e
- x) Implementar uma interface de interação com o usuário para facilitar a operação do kit e a visualização dos resultados.

1.4 Estrutura do texto

O presente trabalho está estruturado em sete capítulos, organizados de forma a apresentar os fundamentos teóricos, o desenvolvimento do sistema proposto e os resultados obtidos.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do projeto, contemplando os conceitos relacionados aos conversores CC-CC Buck, Boost e Buck-Boost, os modos de condução contínuo e descontínuo, além dos circuitos de condicionamento de sinais, identificação de componentes, comunicação *Bluetooth* e geração do sinal *PWM*.

O Capítulo 3 descreve o sistema de *hardware* desenvolvido, abordando as etapas de modelagem e implementação das placas que compõem o kit didático, incluindo as placas móveis de componentes, a placa de potência e a placa de controle.

O Capítulo 4 apresenta o algoritmo de controle e aquisição de dados do sistema, descrevendo a estrutura do código implementado no microcontrolador, os métodos de identificação dos componentes, o acionamento *PWM*, a comunicação serial e *Bluetooth*, além dos mecanismos de indicação visual por *LEDs*.

O Capítulo 5 aborda o desenvolvimento do aplicativo de monitoramento utilizado na

interação com o kit didático, incluindo a arquitetura do código-fonte, a implementação da comunicação *Bluetooth*, a recepção e envio de dados e o desenvolvimento da interface gráfica.

O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos durante a validação do sistema desenvolvido, incluindo testes realizados nas placas do kit didático, análises dos conversores Buck, Boost e Buck-Boost, além da integração e validação do aplicativo de monitoramento.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho, destacando as principais contribuições do kit didático desenvolvido, bem como os resultados alcançados no contexto do ensino de Eletrônica de Potência e as propostas de trabalhos futuros, sugerindo possíveis melhorias e expansões para o sistema desenvolvido.

Complementando o conteúdo apresentado ao longo do texto, os apêndices reúnem materiais elaborados pelo autor que servem de suporte ao desenvolvimento do projeto. O Apêndice A apresenta o código-fonte do *firmware* implementado no microcontrolador do kit didático, enquanto o Apêndice B contém o código desenvolvido para o cálculo dos parâmetros dos conversores CC-CC utilizados na Seção 6, auxiliando no dimensionamento e na análise das topologias estudadas.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica e tecnológica necessária para o desenvolvimento do kit didático interativo de conversores CC-CC proposto neste trabalho. Inicialmente, são apresentados os recursos didáticos desenvolvidos em diferentes instituições de ensino, evidenciando sua importância como ferramenta de apoio ao processo de ensino-aprendizagem e contextualizando a proposta deste trabalho. Em seguida, são abordados os modos de condução contínuo e descontínuo, bem como os princípios da modulação por largura de pulso (*PWM*), técnica amplamente utilizada no controle de conversores eletrônicos de potência.

Na sequência, são apresentados os conceitos fundamentais dos conversores CC-CC, com ênfase nas topologias Buck, Boost e Buck-Boost, destacando seus princípios de funcionamento, características operacionais e principais equacionamentos utilizados no dimensionamento dos componentes.

Posteriormente, são descritos os recursos tecnológicos empregados no desenvolvimento do sistema, incluindo a plataforma de controle baseada no microcontrolador STM32F411 WeAct Black Pill, os mecanismos de comunicação USB-Serial e Bluetooth, além dos circuitos utilizados para aquisição e condicionamento dos sinais elétricos monitorados.

Por fim, são apresentados os conceitos relacionados à identificação dos componentes por meio de resistores e aos mecanismos de proteção contra conexões incorretas, recursos desenvolvidos para aumentar a segurança, a confiabilidade e o caráter didático do kit proposto.

Dessa forma, os conceitos, dispositivos e técnicas apresentados neste capítulo constituem a base necessária para a compreensão das soluções implementadas, as quais serão detalhadas nos capítulos subsequentes.

2.1 Desenvolvimento de Recursos Didáticos para Apoio ao Ensino

Diversas instituições de ensino têm desenvolvido plataformas experimentais e kits didáticos buscando ampliar as possibilidades de aprendizagem, reduzir custos de infraestrutura laboratorial e proporcionar maior autonomia aos estudantes durante a realização de

experimentos.

Nesse cenário, (Leão, 2016) desenvolveu três kits didáticos destinados ao estudo das principais topologias de conversores CC-CC não isolados (Buck, Boost e Buck-Boost). Os protótipos foram concebidos para utilização em aulas práticas da disciplina de Eletrônica de Potência, permitindo aos estudantes analisar o comportamento dos conversores em diferentes condições de operação.

Posteriormente, (Fonseca, A. B. A., 2019) desenvolveu um kit instrucional baseado na topologia Boost com controle por microcontrolador e operação em malha aberta e malha fechada. O sistema foi projetado para servir como ferramenta de ensino e pesquisa, oferecendo aos estudantes uma plataforma flexível para realização de experimentos envolvendo controle de conversores CC-CC.

Mais recentemente, (Pinto, 2025) desenvolveu um kit didático para o estudo de inversores monofásicos de ponte completa empregando modulação PWM bipolar e unipolar. O trabalho compreendeu todas as etapas de desenvolvimento do equipamento, incluindo projeto elétrico, simulação computacional, implementação do firmware em Arduino, desenvolvimento da placa de circuito impresso e validação experimental do protótipo. Além da construção do kit, a autora destaca que a proposta busca suprir a necessidade de recursos didáticos de menor custo para laboratórios de ensino.

Os trabalhos apresentados demonstram que o desenvolvimento de kits e plataformas didáticas constitui uma estratégia amplamente adotada por instituições de ensino superior para fortalecer o processo de ensino-aprendizagem. Além de favorecer a integração entre teoria e prática, esses recursos contribuem para a formação de profissionais mais preparados para atuar em aplicações industriais e de pesquisa.

Seguindo essa mesma perspectiva, o CEFET-MG – Campus Leopoldina também realiza desenvolvimento de plataformas e módulos didáticos destinados ao apoio às atividades de ensino.

Um dos primeiros trabalhos com foco em Eletrônica de Potência foi desenvolvido por (Campos, 2010), que propôs um módulo didático destinado ao estudo de conversores CC-CC nas topologias Buck, Boost e Buck-Boost. A principal contribuição do projeto consistiu na possibilidade de reconfiguração física dos elementos do circuito, permitindo a investigação de

diferentes topologias e condições de operação em uma mesma plataforma experimental.

Posteriormente, (Resende, 2015) desenvolveu estudos relacionados à modelagem matemática e à identificação dinâmica de conversores CC-CC. Embora o foco principal estivesse na obtenção de modelos e estratégias de controle, o trabalho contribuiu para a consolidação de conhecimentos necessários ao desenvolvimento de plataformas experimentais.

Ainda nessa linha, (Barbosa; Gregório, 2015) desenvolveram um sistema flexível para controle e monitoramento de tensão e corrente utilizando o processador digital de sinais TMS320F28335. O projeto contemplou placas dedicadas para aquisição e condicionamento de sinais, acionamento e monitoramento de sistemas eletrônicos, constituindo uma importante infraestrutura para atividades experimentais e educacionais.

Dando continuidade a essas pesquisas, (Barbosa, 2016) desenvolveu uma plataforma flexível para controle e monitoramento de conversores CC-CC, incorporando recursos de aquisição de dados, sensoramento de grandezas elétricas e processamento digital. O sistema ampliou as possibilidades de validação experimental de estratégias de controle e de utilização em atividades laboratoriais.

Expandindo o conceito de recursos didáticos para outras áreas da automação industrial, (Lopes, 2018) desenvolveu um módulo didático para emulação de processos industriais destinado ao ensino de sistemas de automação. A plataforma foi concebida para permitir que os estudantes implementassem estratégias de controle em equipamentos amplamente utilizados na indústria e observassem, em tempo real, o comportamento de processos industriais emulados por meio de uma interface de supervisão.

Mais recentemente, (Souza, L. F. S. de, 2023) desenvolveu um gêmeo digital para uma planta didática de manufatura presente no CEFET-MG Campus Leopoldina. O trabalho integrou modelagem tridimensional, comunicação OPC UA e sistemas de automação industrial, possibilitando a interação entre um modelo virtual e um sistema de controle industrial. A proposta contribuiu para a modernização das ferramentas de ensino e para a inserção de conceitos associados à Indústria 4.0 no ambiente acadêmico.

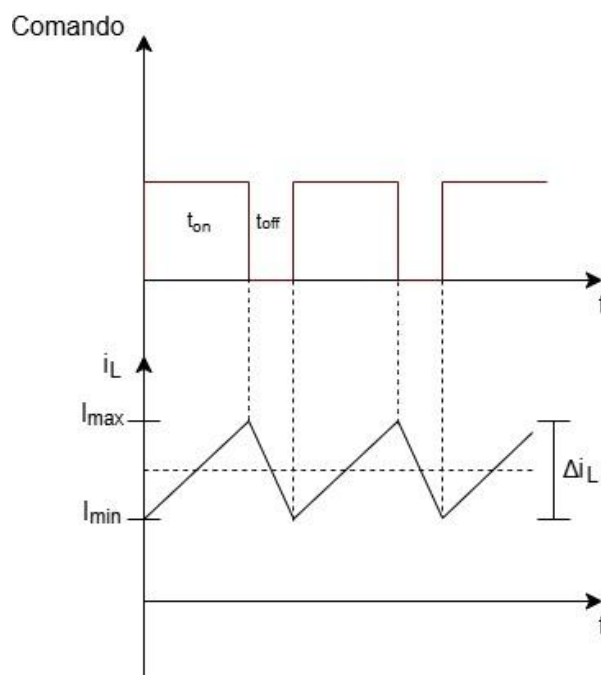
Observa-se, portanto, que o desenvolvimento de recursos didáticos tem sido amplamente adotado por instituições de ensino, incluindo o CEFET-MG – Campus Leopoldina, como estratégia para aproximar a teoria da prática. Nesse contexto, o presente trabalho dá

continuidade a essa linha de pesquisa ao propor o desenvolvimento de um kit didático configurável para o estudo de conversores CC-CC.

2.2 Modo de Condução Contínuo e Descontínuo nos Conversores

A análise do funcionamento dos conversores CC-CC parte da ideia de que durante o intervalo em que a chave permanece aberta, o diodo encontra-se polarizado diretamente, provocando condução de corrente no indutor. Essa condição implica que a corrente no indutor se mantém sempre positiva e não se anula em nenhum intervalo de tempo durante o período de chaveamento (Hart, 2008). No modo condução contínua, o indutor nunca descarrega sua energia por completo durante um período de chaveamento, garantindo que a corrente mínima fique sempre maior que zero. Satisfeita essas condições, pode-se afirmar que o conversor opera em modo de condução contínua (Oliveira, 2014). A Figura 2 mostra o comportamento da corrente no indutor no modo de condução contínuo.

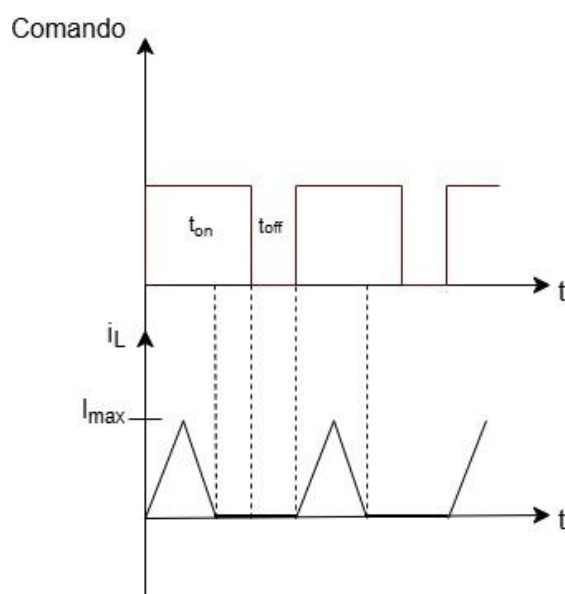
Figura 2 - Gráfico da corrente no indutor em CCM.



Fonte: do autor.

No modo de condução descontínuo, fatores como a razão cíclica, a frequência de comutação ou o valor do indutor podem fazer com que o indutor descarregue completamente sua energia antes do término do período de chaveamento. Nessas condições, a corrente no indutor atinge o valor zero durante parte do ciclo, caracterizando a operação em condução descontínua (Hart, 2008). A Figura 3 representa o comportamento no modo descontínuo.

Figura 3 - Gráfico da corrente no indutor em *DCM*.



Fonte: do autor.

Portanto, a principal diferença entre os modos *CCM* e *DCM* está no comportamento da corrente no indutor: no *CCM*, ela nunca zera, enquanto no *DCM* atinge zero durante parte do ciclo, indicando descarga completa da energia armazenada (Rashid, 2015).

2.3 Geração do Sinal de PWM

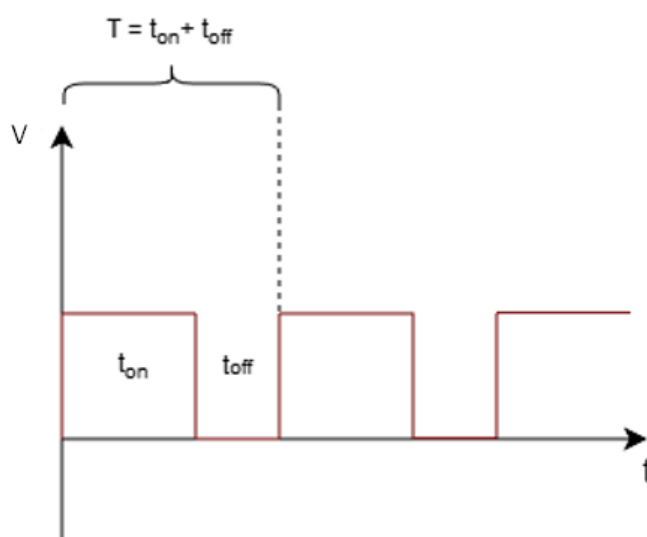
Para o acionamento do MOSFET em conversores CC-CC, é amplamente empregada a técnica de modulação por largura de pulso. Essa técnica consiste no controle da largura dos pulsos de uma forma de onda retangular, com o objetivo de obter uma tensão ou corrente de saída adequada (Silva, 2023). O *PWM* é largamente utilizado em sistemas de eletrônica de potência devido à sua elevada eficiência e facilidade de implementação, sendo especialmente adequado para aplicações que envolvem comutação em alta frequência (Rashid, 2015).

A principal variável de controle do *PWM* é a razão cíclica, definido como a razão entre o tempo em que o sinal permanece em nível alto (t_{on}) e o seu período total (T). O período do sinal *PWM* é dado pela soma dos intervalos de condução e bloqueio, conforme a Equação (1)

$$T = t_{on} + t_{off} \quad (1)$$

A variação do ciclo de trabalho permite ajustar o valor médio da tensão aplicada ao estágio de potência, influenciando diretamente a tensão ou a corrente de saída do conversor CC-CC. A Figura 4 ilustra a forma de onda característica do sinal *PWM*.

Figura 4 - Demonstrativo do sinal de onda de um *PWM*



Fonte: do autor.

Em sistemas embarcados, a geração do sinal *PWM* é frequentemente realizada por microcontroladores, permitindo elevado controle sobre a razão cíclica, precisão temporal e facilidade de integração com algoritmos de monitoramento e controle.

2.4 Conversores CC-CC

Atualmente, os conversores CC-CC desempenham um papel fundamental nos sistemas

eletrônicos modernos, permitindo ajustar os níveis de tensão contínua para atender diferentes cargas e aplicações (Fonseca, A. B. A., 2019). Essa tecnologia é utilizada em fontes de alimentação, sistemas embarcados, veículos elétricos, entre diversas outras aplicações que exigem o controle preciso de uma tensão de entrada.

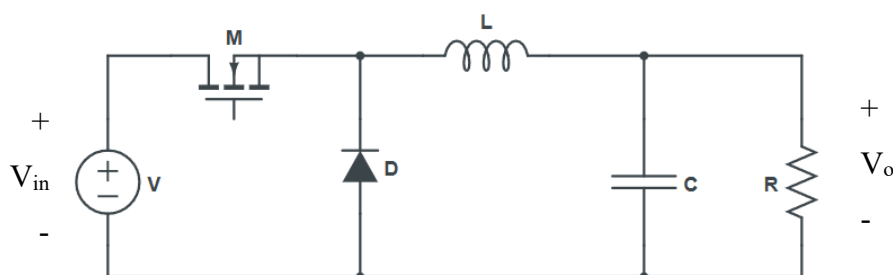
O princípio de funcionamento dos conversores CC-CC baseia-se na combinação de diferentes elementos eletrônicos, possibilitando a elevação, a redução ou até mesmo a inversão da tensão de entrada. A partir dessas combinações, surgem diversas topologias, como Buck, Boost, Buck-Boost, entre outras.

Além disso, para se obter um maior refinamento nos valores da saída do conversor, podem ser ajustados parâmetros como o ciclo de trabalho (D), que consiste na relação entre o tempo que o dispositivo de comutação permanece ligado e o período total do chaveamento e a frequência de chaveamento que influencia diretamente os componentes passivos (Vilela, 2021).

2.5 Conversores Buck

O Conversor Buck, apresentado na Figura 5, também chamado de conversor abaixador, tem como principal característica a capacidade de reduzir a tensão média de saída para um valor inferior ao da entrada (Hart, 2008).

Figura 5 - Topologia do Conversor Buck.



Fonte: do autor.

Esse processo é realizado por meio da comutação controlada de um dispositivo semicondutor, como os MOSFETs ou IGBTs, que liga e desliga a tensão contínua de entrada

conforme a frequência de chaveamento escolhida, devido a essa comutação, obtém-se uma tensão média inferior à tensão de entrada (Vilela, 2021).

Considerando o conversor Buck operando em regime permanente e no modo de condução contínua, a tensão média de saída pode ser determinada em função da razão cíclica do sinal *PWM* aplicada à chave semicondutora. Essa relação nesse conversor é apresentada em (2),

$$V_o = D \cdot V_{in}. \quad (2)$$

Observa-se que a tensão de saída é diretamente proporcional ao ciclo de trabalho da *PWM*. Dessa forma, ao variar o ciclo de trabalho, torna-se possível controlar o valor médio da tensão aplicada à carga.

A razão cíclica do sinal *PWM* é definida pela relação entre o tempo em que a chave permanece em condução e o período total de chaveamento, conforme apresentada em (3),

$$D = \frac{T_{on}}{T}. \quad (3)$$

Assim, quanto maior o tempo de condução da chave, maior será a tensão média aplicada à carga.

A corrente no indutor apresenta uma ondulação devido ao processo de armazenamento e transferência de energia durante o chaveamento do conversor. A variação dessa corrente é expressa por (4),

$$\Delta i_L = \frac{(1 - D) \cdot V_o}{f_s \cdot L}. \quad (4)$$

Através de (4) é demonstrado que a ondulação de corrente no indutor é influenciada pela frequência de chaveamento, pelo valor da indutância e pela razão cíclica do conversor. Dessa forma, maiores valores de indutância e frequência tendem a reduzir a variação de corrente no indutor.

A partir da expressão da ondulação de corrente, é possível determinar o valor da indutância necessária para o funcionamento desejado do conversor, conforme mostrado em (5),

$$L = \frac{(1 - D) \cdot V_o}{f_s \cdot \Delta i_L}. \quad (5)$$

Essa equação é utilizada no dimensionamento do indutor do conversor Buck, permitindo definir um valor adequado de indutância em função da ondulação de corrente especificada em projeto.

Além do dimensionamento do indutor em função da ondulação de corrente, é importante verificar a condição de operação do conversor quanto ao modo de condução. A fronteira entre os modos de condução contínua e descontínua pode ser determinada pela indutância mínima, apresentada em (6),

$$L_{min} = \frac{(1 - D) \cdot R}{2 \cdot f_s}. \quad (6)$$

Para assegurar a operação em modo CCM, deve-se adotar uma indutância maior que o valor mínimo calculado L_{min} .

O capacitor de saída é responsável por reduzir as ondulações de tensão presentes na carga. A ondulação de tensão pode ser determinada por (7),

$$\Delta V_o = \frac{(1 - D) \cdot V_o}{8 \cdot L \cdot C \cdot f_s^2}. \quad (7)$$

Em (7) é mostrado que a ondulação da tensão de saída é inversamente proporcional à capacitância e à frequência de chaveamento. Dessa forma, valores maiores de capacitância contribuem para uma tensão de saída com menor ondulação.

Rearranjando (7), obtém-se a capacitância necessária para uma determinada ondulação de tensão desejada, conforme apresentado em (8),

$$C = \frac{(1 - D)}{8 \cdot L \cdot \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) \cdot f_s^2}. \quad (8)$$

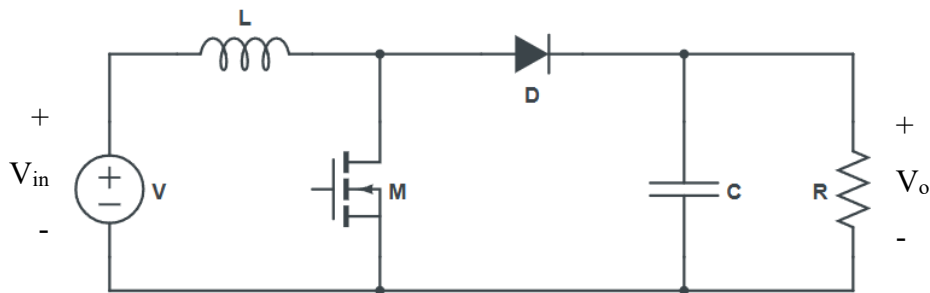
Essa expressão é utilizada para o dimensionamento do capacitor de saída, permitindo selecionar um valor adequado de capacitância para atender aos requisitos de *ripple* de tensão do conversor.

Com base nas Equações (2) a (7), torna-se possível analisar o comportamento do conversor Buck e realizar o dimensionamento dos principais componentes do circuito, conforme a metodologia apresentada por (Hart, 2008).

2.6 Conversor Boost

O Conversor Boost ou elevador, representado na Figura 6, tem como função fazer com que a tensão média de saída seja maior que a de entrada (Hart, 2008).

Figura 6 - Topologia do Conversor Boost



Fonte: do autor.

Nessa topologia a tensão de entrada encontra-se em série com o indutor, o qual armazena energia durante o intervalo em que a chave eletrônica está em condução e a transfere para a carga quando a chave é desligada. Esse processo resulta na soma da tensão do indutor com a tensão de entrada, permitindo a elevação do nível de tensão na saída do conversor (Vilela, 2021).

As equações matemáticas deste conversor consideram o modo de condução contínua,

conforme descrito na Seção 2.2, caso contrário, operará no modo de condução descontínua.

Em regime permanente e considerando componentes ideais, a tensão média de saída do conversor Boost pode ser determinada em (9),

$$V_o = \frac{V_{in}}{1 - D}. \quad (9)$$

Essa equação mostra que a tensão de saída aumenta à medida que a razão cíclica do sinal *PWM* se aproxima da unidade. Dessa forma, o controle da razão de trabalho permite ajustar o ganho estático do conversor e, conseqüentemente, o valor da tensão entregue à carga.

A razão cíclica da *PWM* tem a mesma relação descrita na Seção 2.5.

Durante a operação do conversor, a corrente no indutor sofre uma variação periódica devido aos processos de carga e descarga de energia. Essa ondulação pode ser calculada pela em (10),

$$\Delta i_L = \left(\frac{V_{in}}{L \cdot f_s} \right) \cdot D. \quad (10)$$

Observa-se que a ondulação de corrente é diretamente proporcional à tensão de entrada e à razão cíclica, enquanto valores maiores de frequência de chaveamento e indutância contribuem para reduzir a variação da corrente no indutor.

A partir da Equação (10), pode-se obter a expressão utilizada para determinar o valor da indutância necessária para o projeto do conversor, conforme apresentado em (11),

$$L = \left(\frac{V_{in}}{\Delta i_L \cdot f_s} \right) \cdot D. \quad (11)$$

Essa equação permite dimensionar o indutor de forma que a ondulação de corrente permaneça dentro dos limites especificados para o funcionamento adequado do circuito.

Como apresentado para o conversor Buck, o conversor Boost também possui uma indutância mínima que define a fronteira entre os modos de condução contínua e descontínua.

Essa indutância é dada por (12),

$$L_{min} = \frac{D \cdot (1 - D)^2 \cdot R}{2 \cdot f_s}. \quad (12)$$

Assim, para que o conversor opere em modo CCM, deve-se empregar uma indutância maior que a indutância mínima L_{min} .

O capacitor de saída nessa topologia, também possui a funcionalidade de estabilizar a tensão de saída. A ondulação de tensão na saída pode ser determinada em (13),

$$\Delta V_o = \frac{D \cdot V_o}{R \cdot C \cdot f_s}. \quad (13)$$

Em (13) é evidenciado que a ondulação da tensão de saída diminui com o aumento da capacitância e da frequência de chaveamento, favorecendo uma tensão de saída com menor ondulação.

Reorganizando a Equação (13), obtém-se a expressão para o cálculo da capacitância necessária em função da ondulação de tensão desejada, conforme indicado em (14),

$$C = \frac{D}{R \cdot \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) \cdot f_s}. \quad (14)$$

Essa expressão é empregada no dimensionamento do capacitor de saída, permitindo selecionar um valor adequado para atender aos requisitos de *ripple* de tensão do conversor.

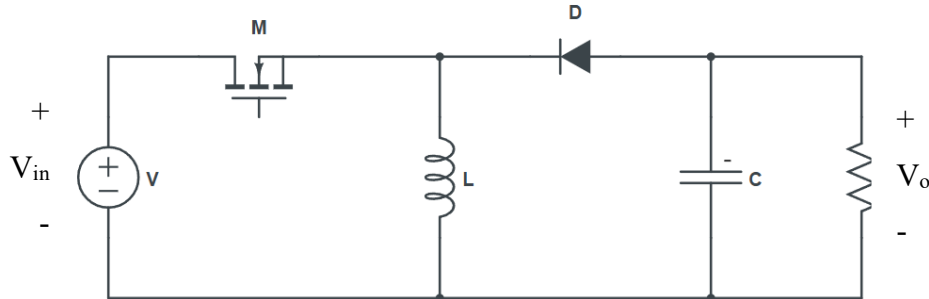
A partir das relações matemáticas apresentadas, é possível caracterizar o comportamento do conversor Boost e realizar o projeto dos principais componentes do circuito (Hart, 2008).

2.7 Conversor Buck-Boost

O conversor Buck-Boost caracteriza-se pela capacidade de operar tanto na redução quanto na elevação da tensão, conforme o valor da razão cíclica (D) do sinal de comutação

(Rashid, 2015). A topologia consta na Figura 7.

Figura 7 - Topologia do Conversor Buck-Boost.



Fonte: do autor.

A tensão na saída pode assumir magnitude inferior ou superior à tensão da fonte, dependendo da taxa de trabalho da chave. Deve-se analisar as condições para definir o modo de operação:

- a) Se $D > 0,5$, a tensão na saída é maior que a entrada;
- b) Se $D = 0,5$, a tensão na saída é igual a entrada;
- c) Se $D < 0,5$, a tensão na saída é menor que a entrada

Embora essa topologia apresente essa flexibilidade operacional, ela possui como limitação a inversão da polaridade da tensão de saída em relação à entrada, resultando em uma tensão negativa na carga em relação a tensão de entrada (Hart, 2008).

Considerando a operação em regime permanente e no modo de condução contínua, a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada pode ser expressa em (15),

$$V_o = -V_{in} \cdot \left(\frac{D}{1-D} \right). \quad (15)$$

Verifica-se, por meio da equação, que o ganho estático do conversor depende da razão cíclica aplicada ao circuito. O sinal negativo presente na expressão indica a inversão da polaridade da tensão de saída em relação à fonte de alimentação.

A razão cíclica do sinal *PWM* mantém a relação observada nos conversores Buck e

Boost.

Devido ao funcionamento chaveado do conversor, a corrente no indutor apresenta uma ondulação periódica. Essa variação pode ser determinada em (16),

$$\Delta i_L = \frac{D \cdot V_{in}}{f_s \cdot L}. \quad (16)$$

Observa-se que o aumento da frequência de chaveamento e do valor da indutância contribui para a redução da ondulação de corrente.

A partir da ondulação de corrente especificada em projeto, pode-se calcular a indutância necessária para o circuito por meio de (17),

$$L = \frac{D \cdot V_{in}}{f_s \cdot \Delta i_L}. \quad (17)$$

Essa relação é utilizada no dimensionamento do indutor, permitindo limitar adequadamente a variação de corrente durante a operação do conversor.

De forma semelhante ao que foi apresentado para os conversores Buck e Boost, o conversor Buck-Boost também possui uma relação para a determinação da indutância mínima necessária para operação em modo de condução contínua. Essa indutância é apresentada em (18),

$$L_{min} = \frac{(1 - D)^2 \cdot R}{2 \cdot f_s}. \quad (18)$$

Para garantir a operação em modo CCM, a indutância utilizada deve ser superior ao valor mínimo L_{min} estabelecido para a respectiva topologia.

A tensão de saída também apresenta ondulações decorrentes do chaveamento do circuito. A amplitude dessa variação pode ser obtida em (19),

$$\Delta V_o = \frac{D \cdot V_o}{R \cdot C \cdot f_s}. \quad (19)$$

Através da equação é mostrado que o aumento da capacitância e da frequência de chaveamento reduz as oscilações presentes na saída do conversor.

Rearranjando a Equação (19), obtém-se a expressão utilizada para determinar a capacitância necessária para uma ondulação de tensão desejada, conforme apresentado na em (20),

$$C = \frac{D}{R \cdot \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) \cdot f_s}. \quad (20)$$

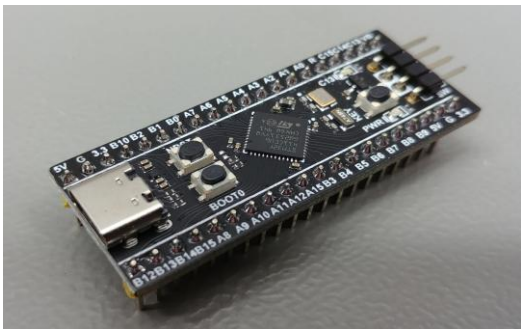
Essa expressão permite selecionar um capacitor adequado para garantir níveis reduzidos de *ripple* de tensão durante o funcionamento do conversor Buck-Boost.

Com base nos equacionamentos apresentados e fundamentados por (Hart, 2008), é possível compreender o funcionamento do conversor Buck-Boost,

2.8 Microcontrolador STM32F411 WeAct *BlackPill*

Para este projeto, foi utilizada a placa de desenvolvimento da WeAct baseada no microcontrolador STM32F411 mostrado na Figura 8, pertencente à família STM32 da STMicroelectronics. Trata-se de um microcontrolador de alto desempenho, fundamentado no núcleo ARM Cortex-M4, que integra eficiência energética e elevado poder de processamento. Essa família é direcionada a aplicações que demandam maior capacidade computacional, como sistemas de aquisição e processamento de dados.

Figura 8 - Placa de desenvolvimento com STM32F411.



Fonte: (STMicroelectronics, 2025)

A escolha dessa placa deve-se ao fato de que o projeto demanda uma elevada velocidade de leitura do conversor analógico-digital. O microcontrolador presente na *Black Pill* apresenta taxa máxima de conversão de até 2,4 MSPS, em resolução de 12 bits, conforme especificado pelo fabricante (STMicroelectronics, 2025) na Figura 9. Esse valor corresponde à condição limite de operação, alcançada com o tempo mínimo de amostragem e o *clock* máximo do *ADC*. Entretanto, em aplicações práticas, a taxa de amostragem raramente chega nessa condição de limite de operação.

Figura 9 - Especificações do Microcontrolador.

System		
Power supply	1.2V internal regulator	POR/PDR/PVD/BOR
Xtal oscillators	32 kHz + 4 ~26 MHz	
Internal RC oscillators	32 kHz + 16 MHz	
PLL		
Clock control		
RTC/AWU		
2x watchdogs (independent + window)		
36/50/81 I/Os		
Cyclic redundancy check (CRC)		
96-bit unique ID		
Voltage scaling		
ART Accelerator™		
Arm® Cortex®-M4 CPU 100 MHz		
Floating point unit (FPU)		
Nested vector interrupt controller (NVIC)		
JTAG/SW debug		
Embedded trace macrocell (ETM)		
Memory protection unit (MPU)		
AHB-Lite bus matrix		
APB bus		
16-channel DMA with Batch acquisition mode (BAM)		
512-Kbyte Flash memory		
128-Kbyte SRAM		
80-byte backup data		
Connectivity		
3x I²C		
3x USART LIN, smartcard, IrDA, Modem control		
5x SPI or 5x I²S (2x I²S with full duplex)		
SDIO		
USB 2.0 OTG FS		
Analog		
1x 12-bit ADC 2.4 MSPS 16 channels / 0.41 µs		
Temperature sensor		
Control		
5x 16-bit timers		
1x 16-bit motor control PWM synchronized AC timer		
2x 32-bit timer		

Fonte: (STMicroelectronics, 2025)

Apesar das vantagens relacionadas ao desempenho do *ADC*, a placa apresenta como desvantagem a ausência de conectividade sem fio nativa, como *Wi-Fi* ou *Bluetooth*. Dessa forma, torna-se necessária a utilização de módulos externos para viabilizar esse tipo de comunicação, caso seja requerida. Esse é o cenário adotado no presente projeto, no qual a comunicação sem fio é necessária para a transmissão externa dos dados adquiridos.

2.9 Comunicação USB-SERIAL

A gravação do *firmware*¹ é realizada através do ST-Link, mostrado na Figura 10.

Figura 10 - ST-LINK.



Fonte: do autor

O ST-LINK/V2 é utilizado para realizar a gravação do *firmware* no microcontrolador. A descrição de seus pinos e respectivas funções é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Pinos do ST-LINK V2.

Pino	Função
RST	Reinicia o microcontrolador durante a programação ou depuração.
SWIM	Interface de programação e depuração utilizada em microcontroladores STM8

¹ *Firmware*: conjunto de instruções gravadas responsável pelo controle de *hardware* em sistemas embarcados.

Pino	Função
GND	Referência de terra (0 V) comum entre o programador e o microcontrolador.
3.3V	Alimentação ou referência de tensão de 3,3 V.
SWCLK	Sinal de <i>clock</i> da interface SWD
SWDIO	Linha de dados da interface SWD

Fonte: do autor.

Entretanto, como essa interface não permite a comunicação serial direta com o computador durante a execução do sistema, foi utilizado um conversor USB-Serial (FTDI), vide Figura 11.

Figura 11 - Módulo USB-SERIAL – FTDI.



Fonte: (CurtoCircuito, 2025)

O conversor USB-Serial FTDI permite a comunicação entre um computador e microcontroladores por meio da porta USB, convertendo os sinais USB em TTL (Moura *et al.*, 2024). O módulo possui 6 pinos, sendo esses dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Pinos do Módulo FTDI.

Pino	Função
VCC	Alimentação positiva de 3.3V ou 5V
GND	Terra

Pino	Função
RXD	Recepção de dados
TXD	Transmissão de dados
DTR	Sinal de controle para comunicação ou reset
EN	Indica que o módulo está pronto para receber dados

Fonte: do autor.

A comunicação serial estabelecida por meio do módulo FTDI é utilizada durante as etapas de desenvolvimento e validação do sistema, permitindo o envio e a recepção de dados entre o microcontrolador e o computador em tempo real. Essa interface possibilita o monitoramento das variáveis do sistema, a verificação do funcionamento do *firmware* e a realização de testes relacionados à aquisição e transmissão de dados.

2.10 Comunicação *Bluetooth*

Devido à ausência de conectividade sem fio nativa no microcontrolador, optou-se pela utilização do módulo *Bluetooth* HC-05 e pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 - Módulo *Bluetooth* – HC-05.



Fonte: (Curtocircuito, 2025)

O Módulo *Bluetooth* HC-05 é um módulo para comunicação sem fio com alcance de

até 10 metros e pode trabalhar tanto como mestre quanto como escravo. Ele utiliza o protocolo *Bluetooth* v2.0+ EDR na frequência de 2.4Ghz (Queiroz, 2023). Consegue alcançar velocidade assíncrona de 2.1Mbps/160Kbps e velocidade síncrona de 1Mbps. O módulo possui 6 pinos, sendo esses dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Pinos do Módulo *Bluetooth* HC-05.

Pino	Função
VCC	Alimentação positiva de 3,3V ou 5V
GND	Terra
RXD	Recepção de dados do módulo e opera com 3,3V
TXD	Transmissão de dados do módulo e opera com 3,3V
STATE	Indica o estado da conexão <i>Bluetooth</i>
EN	Permite colocar o módulo em modo configuração ou comando

Fonte: do autor.

Essa interface é adequada para o envio de dados em tempo real, permitindo o acompanhamento das variáveis do sistema e auxiliando na validação do funcionamento do *firmware* desenvolvido. Além disso, a utilização da comunicação sem fio contribuiu para aumentar a flexibilidade e a mobilidade do sistema, tornando o kit mais interativo e adequado para aplicações didáticas e demonstrações práticas. A utilização do módulo *Bluetooth* também possibilita a integração do kit didático com aplicativos dedicados, permitindo o monitoramento e a visualização dos dados de forma remota.

2.11 Condicionamento do Sinal do Sensor ACS712 para Medição da Corrente no Indutor

Para a medição da corrente no indutor, foi empregado o sensor de corrente, ACS712,

como consta na Figura 13, cujo princípio de funcionamento baseia-se no efeito Hall² (Martins; Sobrinho, 2019). Esse sensor detecta o campo magnético gerado pela corrente elétrica e converte em uma tensão analógica proporcional à corrente medida, mantendo isolamento elétrico entre o circuito de potência e o circuito de controle.

Figura 13 - Sensor de corrente ACS712.

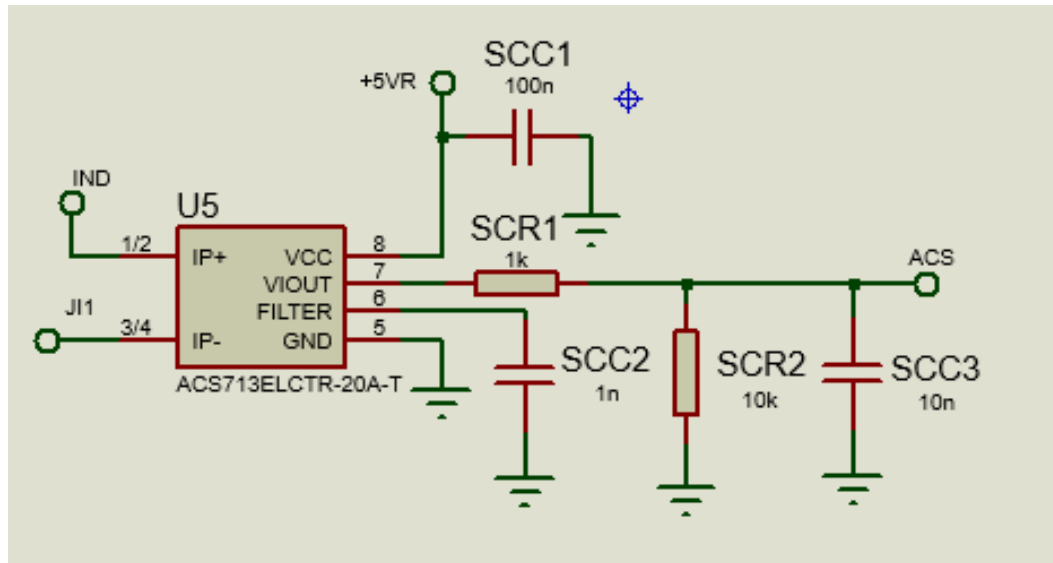


Fonte: (Allegro Microsystems, 2026)

Para que esse sinal possa ser lido corretamente pelo microcontrolador através do circuito presente na Figura 14, torna-se necessário o uso de um circuito de condicionamento, uma vez que a saída do sensor apresenta ruídos e um nível de *offset*, além de não estar diretamente compatível com a faixa de operação do conversor analógico-digital, que varia de 0 a 3,3 V.

² Efeito Hall: fenômeno físico utilizado para medição de corrente e campo magnético.

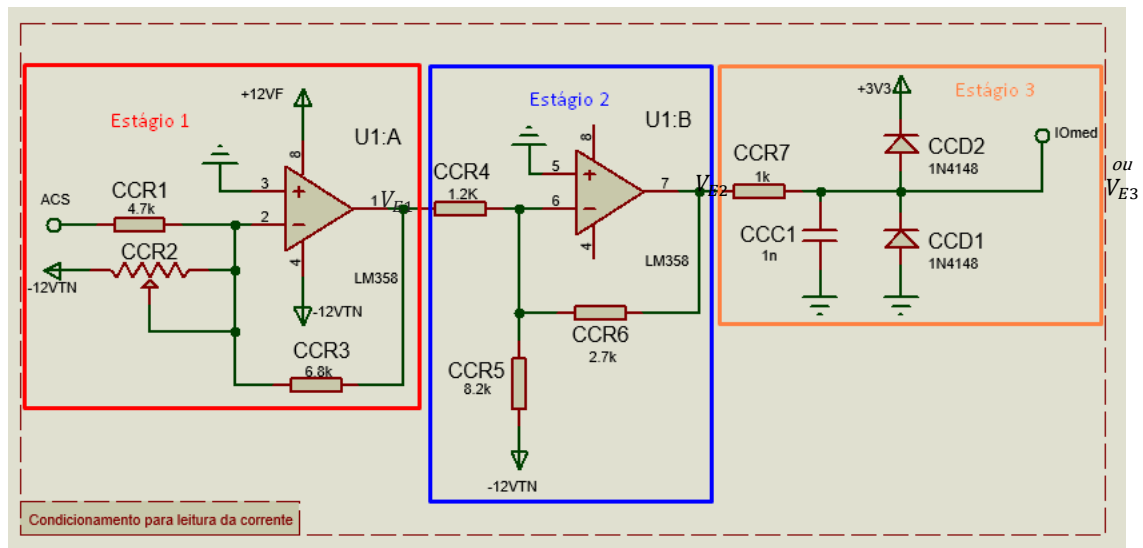
Figura 14 - Circuito de leitura pelo ACS.



Fonte: do autor.

Dessa forma, para adequar o sinal, foi utilizado o circuito da Figura 15 baseado em amplificadores operacionais do tipo LM358, responsável pelo ajuste do sinal.

Figura 15 - Circuito de condicionamento da corrente.

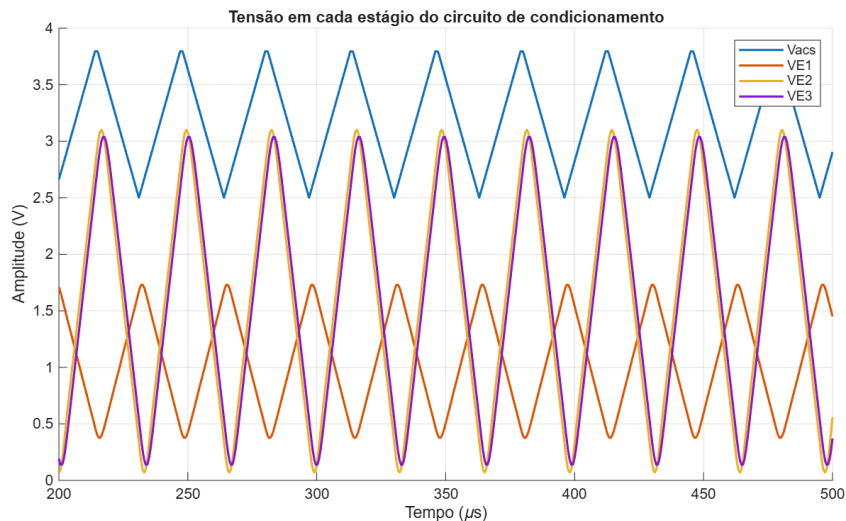


Fonte: do autor.

No primeiro estágio (V_{E1}), o amplificador operacional realiza a compensação do *offset* presente na saída do sensor, deslocando o nível de referência do sinal para próximo de 0 V. No segundo estágio (V_{E2}), é efetuado o ajuste do ganho, de modo que a tensão correspondente à

corrente máxima medida permaneça dentro da faixa de leitura do *ADC*. Por fim, o terceiro estágio (V_{E3}) consiste em um circuito de proteção da entrada analógica, cuja função é limitar a tensão aplicada ao microcontrolador, protegendo-o contra sobretensões, transientes e possíveis falhas no estágio de condicionamento. O comportamento descrito pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 - Simulação do circuito de condicionamento.



Fonte: do autor.

Como mostrado na Figura 16, a análise do circuito de condicionamento evidencia que a tensão de saída do ACS712 (V_{acs}), após passar pelos estágios de condicionamento (V_{E1} , V_{E2} e V_{E3}) em um sinal adequadamente ajustado para a leitura pelo conversor analógico-digital do microcontrolador.

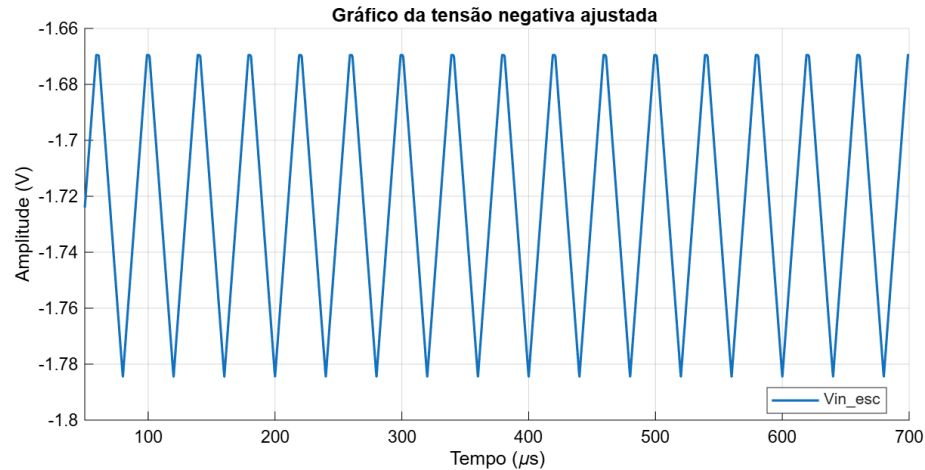
2.12 Condicionamento da Tensão de Saída do Conversor Buck-Boost

Com o objetivo de adequar a tensão de saída do conversor CC-CC para leitura pelo microcontrolador, foi utilizado um retificador de precisão, implementado com amplificadores operacionais do tipo LM358, uma vez que, quando o conversor opera na topologia Buck-Boost, a tensão de saída pode assumir valores negativos. A tensão de saída do conversor pode apresentar níveis tanto reduzidos, como 10 V, 12 V ou 24 V, quanto valores mais elevados, como 80 V, 100 V ou 120 V. Para que esses valores possam ser corretamente lidos pelo *ADC* do microcontrolador, torna-se necessário adequá-los à sua faixa de operação, compreendida entre 0 e 3,3 V.

Dessa forma, o sinal passa inicialmente por um estágio de ajuste de escala, responsável

por reduzir e adequar a tensão medida à faixa de leitura do *ADC*, garantindo maior precisão e confiabilidade no processo de medição e pode ser verificado na Figura 17.

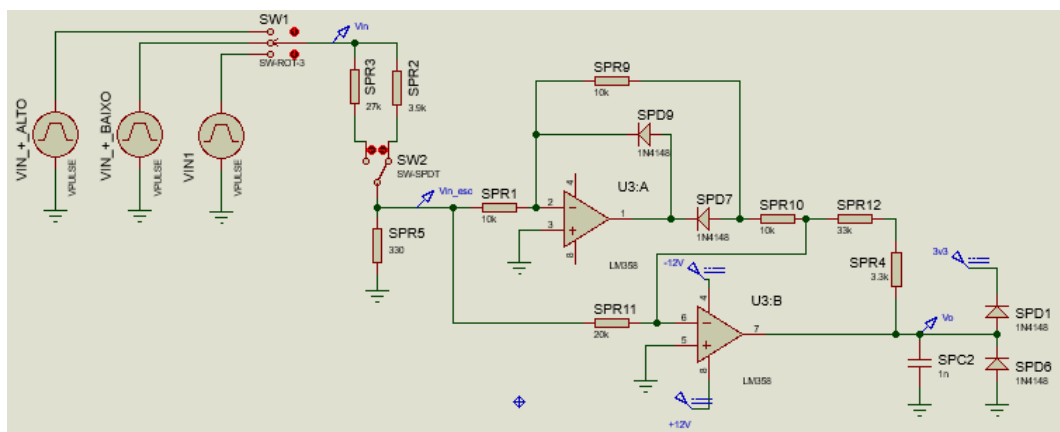
Figura 17 - Tensão ajustada na saída do condicionamento do Buck-Boost.



Fonte: do autor.

Na Figura 18 é apresentado o circuito utilizado para análise do comportamento do sistema de condicionamento, desenvolvido com o objetivo de verificar a adequação da tensão de saída do conversor Buck-Boost à faixa de operação do conversor analógico-digital do microcontrolador.

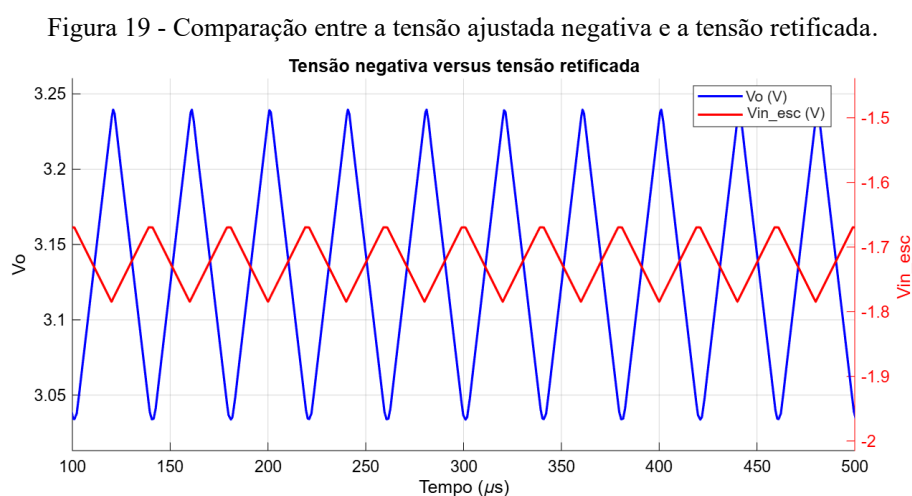
Figura 18 - Circuito de Condicionamento da Tensão de Saída do Conversor Buck-Boost.



Fonte: do autor.

Após o ajuste de escala, o sinal é aplicado ao retificador de precisão, cujo funcionamento baseia-se no uso de amplificadores operacionais. Diferentemente dos retificadores

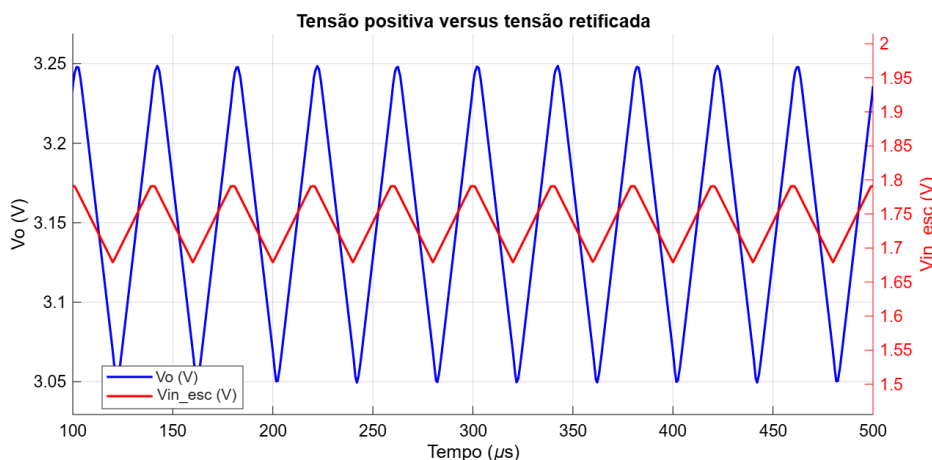
convencionais a diodos, essa topologia permite a retificação de sinais de baixa amplitude, minimizando os erros associados à queda de tensão direta dos diodos, característica que inviabiliza a retificação precisa de sinais pequenos. O circuito tem como função principal eliminar a componente negativa do sinal, garantindo que a tensão aplicada à entrada analógica do conversor analógico-digital permaneça restrita a níveis positivos, além de assegurar que o nível e o ganho do sinal estejam adequados à faixa de leitura do *ADC* (Sedra e Smith, 2004) e foi ilustrado na Figura 19.



Fonte: do autor.

Analisando o gráfico apresentado, observa-se, na escala do eixo esquerdo, que, por se tratar de uma simulação representativa de um conversor Buck-Boost, a tensão de saída pode assumir valores negativos, mesmo após o ajuste de escala. Dessa forma, tornou-se necessária a utilização do retificador de precisão, responsável por eliminar a componente negativa do sinal e garantir que a tensão resultante permaneça dentro da faixa de operação do *ADC*, limitada a 3,3 V. A análise realizada também evidenciou o correto funcionamento do circuito para tensões positivas, demonstrando que o condicionamento do sinal permanece adequado em toda a faixa de operação analisada e pode ser verificado na Figura 20.

Figura 20 - Comparação entre a tensão ajustada positiva e a tensão retificada.



Fonte: do autor.

Portanto, a análise contempla tanto os níveis de tensão negativos quanto positivos, permitindo a avaliação completa do comportamento do circuito de condicionamento.

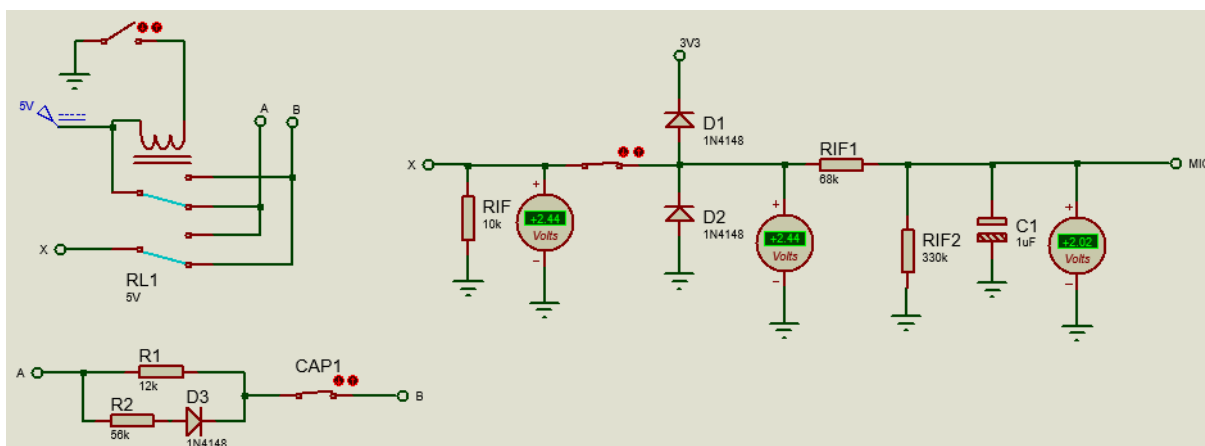
2.13 Identificação dos Componentes por Meio de Resistores e Proteção contra Conexões Incorretas

O conversor CC-CC desenvolvido possui placas móveis que representam diferentes componentes de potência, tais como diodos, indutores, capacitores e MOSFETs. Para possibilitar a correta identificação de cada uma dessas placas, foi utilizado um conjunto de resistores, configurado de modo a permitir o reconhecimento do componente conectado por meio do circuito de controle, a partir de um algoritmo implementado no microcontrolador *Black Pill*.

Além da função de identificação, esse conjunto de resistores atua em conjunto com um sistema de relés responsável pela proteção do kit didático, impedindo o funcionamento do sistema caso uma placa seja conectada em posição indevida ou incompatível. Nessas condições, os relés desabilitam a alimentação de entrada do conversor, evitando possíveis danos aos componentes e ao circuito. Dessa forma, garante-se tanto a correta identificação dos componentes quanto a proteção do sistema contra conexões incorretas.

Para realizar essa identificação, foi necessário alocar faixas distintas de tensão para cada

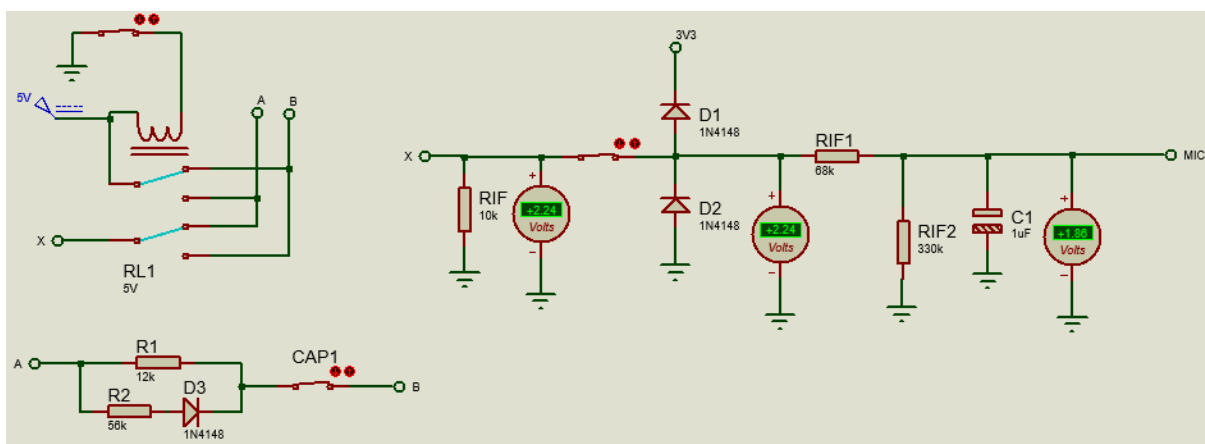
Figura 22 - Circuito de identificação do capacitor na configuração AB.



Fonte: do autor.

Já na Figura 23 é ilustrado a variação da tensão de saída para quando o componente é inserido na posição BA.

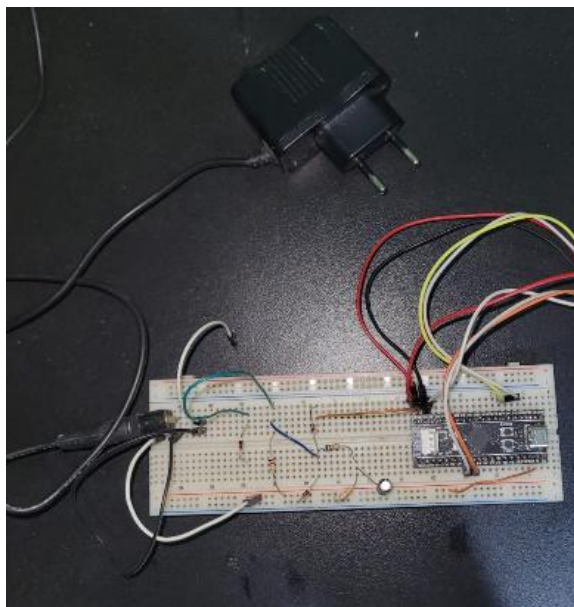
Figura 23 - Circuito de identificação do capacitor na configuração BA.



Fonte: do autor.

Com base nos valores obtidos durante a análise do circuito, também foi realizada a montagem física do circuito, apresentada na Figura 24, com o objetivo de verificar se os mesmos valores seriam observados na prática.

Figura 24 - Montagem experimental do circuito de identificação.



Fonte: do autor.

Na próxima subseção será abordado sobre os valores obtidos para a identificação das placas móveis.

2.13.1 Definição das faixas de identificação dos componentes por resistores

Os valores de resistência e tensão utilizados para a identificação dos componentes foram obtidos tanto por meio de simulação quanto por medições práticas. Em todos os casos, são apresentados os valores correspondentes às conexões nas posições (AB) e (BA), permitindo avaliar o comportamento do circuito em ambas as orientações de conexão.

2.13.1.1 Identificação dos Capacitores

A Tabela 4 apresenta os valores simulados utilizados na identificação dos capacitores, considerando diferentes combinações de resistores. Cada linha da tabela corresponde a um modelo distinto de capacitor, permitindo a utilização de componentes com diferentes valores de capacitância nas placas móveis do conversor.

Tabela 4 - Relação dos valores de resistências e das tensões simuladas aplicadas à identificação de capacitores.

Capacitor	Resistência 1 (K Ω)	Resistência 2 (K Ω)	Tensão AB (V)	Tensão BA (V)
1	12	56	2,02	1,86
2	15	18	2,14	1,63
3	18	10	2,31	1,46

Fonte: do autor.

Observa-se que os valores de tensão se concentram em faixas relativamente próximas, o que exige um critério adequado para distinção entre os diferentes capacitores. Ainda assim, a separação entre os intervalos é suficiente para permitir sua identificação.

Já a Tabela 5 apresenta os valores obtidos por meio das medições práticas realizadas no protótipo desenvolvido.

Tabela 5 - Relação dos valores de resistências e das tensões medidas aplicadas à identificação de capacitores.

Capacitor	Resistência 1 (K Ω)	Resistência 2 (K Ω)	Tensão AB (V)	Tensão BA (V)
1	12	56	1,97	1,81
2	15	18	2,1	1,59
3	18	10	2,27	1,41

Fonte: do autor.

A comparação entre os valores simulados e experimentais demonstra a consistência da estratégia de identificação adotada, sendo as pequenas diferenças observadas atribuídas às tolerâncias dos componentes e às não idealidades presentes na implementação prática.

2.13.1.2 Identificação dos Indutores

De forma análoga a subseção 2.13.1.1, a Tabela 6 apresenta os valores simulados utilizados na identificação dos indutores, considerando diferentes combinações de resistores. Cada linha das tabelas corresponde a um modelo distinto de indutor que pode ser empregado

nas placas móveis do conversor.

Tabela 6 - Relação dos valores de resistências e das tensões simuladas aplicadas à identificação dos indutores

Indutor	Resistência 1 (K Ω)	Resistência 2 (K Ω)	Tensão AB (V)	Tensão BA (V)
1	22	6,8	2,46	1,27
2	27	5,6	2,52	1,1
3	33	4,7	2,61	0,95

Fonte: do autor.

Verifica-se que as tensões associadas aos indutores também se distribuem em intervalos próximos, porém com variações consistentes que permitem diferenciar os valores de indutância.

Já a Tabela 7 apresenta os valores obtidos experimentalmente durante a etapa de medição prática do sistema.

Tabela 7 - Relação dos valores de resistências e das tensões medidas aplicadas à identificação dos indutores.

Indutor	Resistência 1 (K Ω)	Resistência 2 (K Ω)	Tensão AB (V)	Tensão BA (V)
1	22	6,8	2,41	1,21
2	27	5,6	2,5	1,07
3	33	4,7	2,56	0,91

Fonte: do autor.

Observa-se boa correspondência entre os valores simulados e aqueles obtidos experimentalmente, indicando que as faixas de identificação definidas permanecem adequadas mesmo considerando os efeitos associados à implementação física do circuito.

2.13.1.3 Identificação dos Diodos

Seguindo a mesma abordagem adotada nas identificações anteriores, a Tabela 8 apresenta os valores simulados utilizados na identificação dos diodos para diferentes combinações de resistores. Cada linha da tabela corresponde a um modelo distinto de diodo,

TO-220 ou axial, que pode ser empregado nas placas móveis do conversor.

Tabela 8 - Relação dos valores de resistências e das tensões simuladas aplicadas à identificação de diodos.

Diodo	Resistência 1 (K Ω)	Resistência 2 (K Ω)	Tensão AB (V)	Tensão BA (V)
1	47	3,3	2,79	0,71
2	68	2,7	2,89	0,52

Fonte: do autor.

Já a Tabela 9 apresenta os resultados experimentais obtidos durante a etapa prática de identificação do sistema.

Tabela 9 - Relação dos valores de resistências e das tensões medidas aplicadas à identificação de diodos.

Diodo	Resistência 1 (K Ω)	Resistência 2 (K Ω)	Tensão AB (V)	Tensão BA (V)
1	47	3,3	2,75	0,69
2	68	2,7	2,86	0,5

Fonte: do autor.

Constata-se que, apesar da proximidade entre algumas faixas de tensão, as diferenças observadas entre as configurações AB e BA permanecem suficientes para permitir a identificação dos diodos. A comparação entre os valores simulados e experimentais evidencia boa concordância, sendo as discrepâncias observadas compatíveis com as características não ideais dos componentes e com as condições reais de medição.

2.13.1.4 Identificação dos MOSFETs

Mantendo a metodologia aplicada nas etapas anteriores de identificação, a Tabela 10 apresenta os valores simulados empregados na caracterização dos MOSFETs para diferentes combinações de resistores. Cada linha da tabela representa um modelo distinto de MOSFET que pode ser utilizado nas placas móveis do conversor.

Tabela 10 - Relação dos valores de resistências e das tensões simuladas aplicadas à identificação de MOSFETs.

MOSFET	Resistência 1 (K Ω)	Resistência 2 (K Ω)	Tensão AB (V)	Tensão BA (V)
1	120	2,2	2,99	0,32
2	330	1	3,3	0,12

Fonte: do autor.

Já a Tabela 10 apresenta os valores obtidos experimentalmente durante os ensaios realizados para identificação prática dos MOSFETs no sistema desenvolvido.

Tabela 11 - Relação dos valores de resistências e das tensões simuladas aplicadas à identificação de MOSFETs.

MOSFET	Resistência 1 (K Ω)	Resistência 2 (K Ω)	Tensão AB (V)	Tensão BA (V)
1	120	2,2	2,95	0,3
2	330	1	3,26	0,11

Fonte: do autor.

A comparação entre os resultados simulados e experimentais demonstra boa concordância entre os valores obtidos, indicando que a metodologia proposta foi capaz de representar adequadamente o comportamento esperado do circuito. As pequenas diferenças observadas podem ser atribuídas a fatores não ideais, como tolerâncias dos componentes e limitações dos instrumentos de medição.

2.13.2 Análise Geral dos Resultados de Identificação

A análise conjunta dos resultados evidencia que as faixas de tensão associadas a cada tipo de componente encontram-se bem distribuídas ao longo do intervalo analisado. Observa-se que, mesmo considerando as variações entre simulação e medições práticas, os valores obtidos permanecem suficientemente distintos entre os diferentes grupos, mantendo uma separação clara entre capacitores, indutores, diodos e MOSFETs.

Essa adequada dispersão dos níveis de tensão garante robustez ao método de

identificação proposto, reduzindo a probabilidade de ambiguidades mesmo diante de tolerâncias dos componentes, ruídos e incertezas de medição. Dessa forma, nota-se que o critério adotado é confiável, uma vez que as diferenças de potencial entre os tipos de componentes são suficientemente elevadas para assegurar uma distinção consistente em condições reais de operação.

Adicionalmente, a utilização de diferentes combinações de resistores no sistema de identificação foi proposta com o objetivo de facilitar a reconfiguração e substituição das placas móveis, conferindo maior modularidade ao kit. Essa abordagem evita a necessidade de processos repetitivos de soldagem e dessoldagem durante a realização de novas práticas experimentais, aumentando a praticidade e a flexibilidade de uso do sistema em ambiente didático.

2.14 Considerações Parciais

A fundamentação teórica apresentada neste capítulo permitiu estabelecer a base conceitual necessária para o desenvolvimento do kit didático interativo de conversores CC-CC proposto neste trabalho. Além disso, a apresentação de recursos didáticos desenvolvidos em diferentes instituições de ensino evidenciou a importância dessas plataformas como ferramentas de apoio ao processo de ensino-aprendizagem e contextualizou a proposta deste trabalho.

A análise das topologias Buck, Boost e Buck-Boost, juntamente com os modos de condução contínuo e descontínuo, possibilitou compreender o comportamento elétrico dos conversores e os principais parâmetros envolvidos em sua operação.

Os estudos relacionados ao microcontrolador STM32F411, aos módulos de comunicação serial e *Bluetooth* e à geração do sinal PWM forneceram os subsídios necessários para a implementação do sistema de controle e monitoramento do kit didático. Da mesma forma, os circuitos de condicionamento de sinais e os métodos de adequação das tensões à faixa de operação do *ADC* permitiram viabilizar a aquisição segura e confiável das variáveis elétricas do sistema.

Também foi apresentada a estratégia de identificação dos componentes por meio de resistores, juntamente com o sistema de proteção contra conexões incorretas, demonstrando a viabilidade da utilização de faixas de tensão distintas para o reconhecimento automático das placas móveis do kit didático.

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE *HARDWARE* DESENVOLVIDO

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do sistema de *hardware* do kit didático proposto neste trabalho, abordando as etapas de modelagem, projeto e implementação das placas que compõem o sistema. Inicialmente, é descrito o ambiente computacional utilizado para o desenvolvimento dos circuitos eletrônicos e das simulações realizadas durante o projeto.

Em seguida, é apresentada uma visão geral do *hardware* do kit didático, destacando a integração entre os módulos responsáveis pelo processamento, condicionamento de sinais, acionamento dos conversores e identificação dos componentes móveis. Posteriormente, são detalhadas as placas móveis utilizadas para representação dos componentes eletrônicos do conversor, incluindo capacitores, indutores, diodos e MOSFETs.

Também são descritas a placa de potência, responsável pela implementação das topologias CC-CC, e a placa de controle, destinada ao processamento das medições, geração do sinal PWM, comunicação com dispositivos externos e gerenciamento do sistema de identificação e proteção do kit didático.

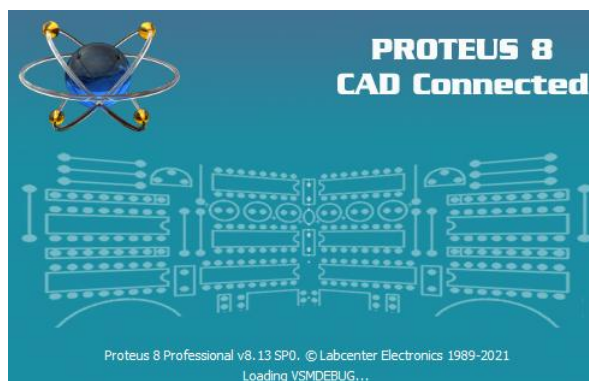
Além da descrição estrutural das placas desenvolvidas, o capítulo apresenta aspectos relacionados a organização física dos componentes e integração entre os diferentes módulos do sistema, evidenciando as decisões de projeto adotadas para garantir funcionalidade, modularidade, segurança e aplicabilidade didática ao kit desenvolvido.

Dessa forma, este capítulo fornece a base necessária para a compreensão da implementação física do sistema proposto, servindo de suporte para o desenvolvimento do algoritmo de controle e para a análise experimental apresentados nos capítulos seguintes.

3.1 *Software* PROTEUS V08

O CEFET-MG – Campus Leopoldina possui licença institucional do *software* Proteus V8, apresentado na Figura 25, motivo pelo qual essa ferramenta foi utilizada no desenvolvimento do *hardware* do projeto.

Figura 25 - Interface do Proteus V08.



Fonte: do autor.

O Proteus é um ambiente de desenvolvimento para projetos eletrônicos que integra recursos para elaboração de esquemáticos, simulação e projeto de placas de circuito impresso. Além disso, permite a geração de modelos tridimensionais das placas, facilitando a visualização física do projeto antes da fabricação.

O *software* também disponibiliza uma ampla biblioteca de componentes e possibilita a criação e edição de componentes personalizados, característica importante para a modelagem das placas móveis desenvolvidas neste trabalho.

Outro recurso relevante é a realização de simulações elétricas dos circuitos, permitindo validar previamente o funcionamento do sistema e identificar possíveis falhas antes da implementação física. Dessa forma, a utilização do Proteus V8 contribuiu para o desenvolvimento, validação e documentação do *hardware* proposto.

3.2 Visão Geral do Sistema de *Hardware*

O sistema de *hardware* desenvolvido neste trabalho foi projetado de forma modular, com o objetivo de facilitar a compreensão do funcionamento dos conversores CC-CC e permitir a montagem de diferentes topologias de maneira prática e intuitiva. O conjunto é composto por três blocos principais: placas móveis de componentes, placa de potência e placa de controle.

3.2.1 Placas Móveis de Componentes

As placas móveis correspondem aos componentes de potência utilizados nos conversores, sendo esses os capacitores, indutores, diodos e MOSFETs. Cada uma dessas placas foi projetada para acomodar individualmente um único componente, podendo ser conectada ao sistema por meio de conectores específicos presentes na placa de potência.

Essa abordagem modular proporciona maior flexibilidade ao sistema, permitindo a reorganização dos componentes de acordo com a topologia desejada. Dessa forma, torna-se possível implementar diferentes configurações de conversores CC-CC, como Buck, Boost e Buck-Boost, utilizando a mesma estrutura física do kit didático.

Nas subseções seguintes cada placa móvel será abordada com mais detalhes.

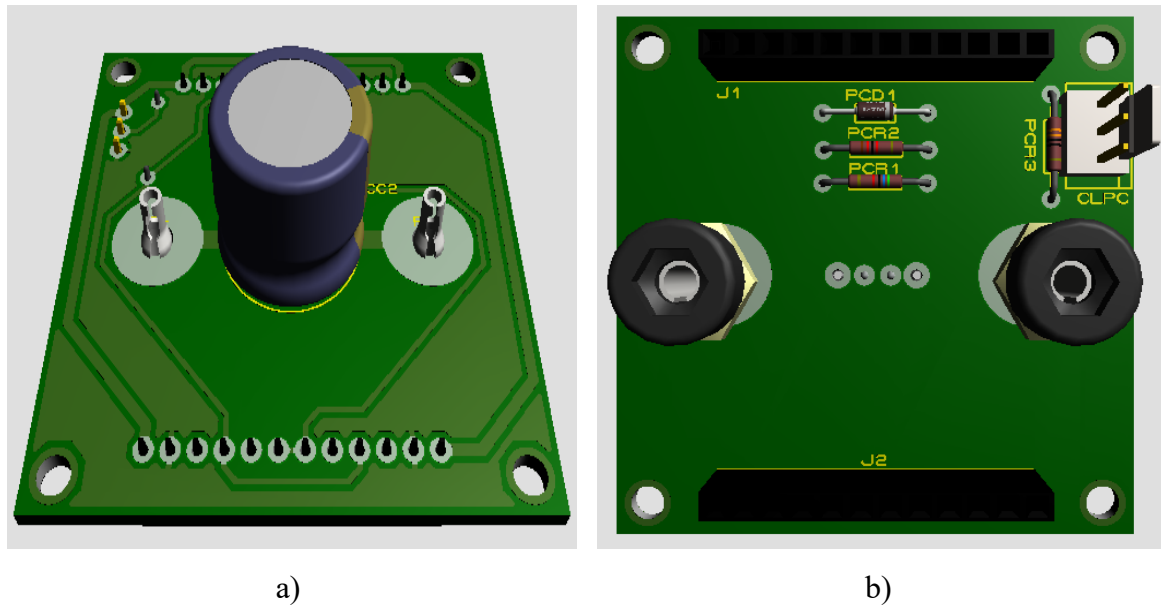
3.2.1.1 Placa do Capacitor

Nos conversores CC-CC, o capacitor atua no processo de filtragem e suavização da tensão de saída (Hart, 2008). Sua principal função é auxiliar na redução das ondulações de tensão (*ripple*) resultantes da comutação dos dispositivos semicondutores, como MOSFETs e IGBTs, armazenando energia nos intervalos em que a tensão tende a aumentar e fornecendo essa energia à carga quando a tensão diminui.

Associado ao indutor, o capacitor atua como um elemento atenuador de sinal, formando um filtro passa-baixa que contribui para a obtenção de uma tensão de saída mais estável e próxima de um valor constante. Trata-se de um dos principais elementos no projeto do conversor, uma vez que o valor e o tipo de capacitor influenciam diretamente o nível de *ripple*.

No contexto do kit didático desenvolvido, o capacitor é implementado em uma placa móvel e as vistas superior e inferior podem ser observadas na Figura 26, permitindo sua substituição e rearranjo conforme a topologia do conversor adotada. Essa abordagem possibilita ao estudante visualizar e compreender, de forma prática, a influência do capacitor no funcionamento do conversor CC-CC, reforçando seu papel no condicionamento da tensão de saída.

Figura 26 - Modelo 3D da placa móvel do capacitor: a) vista superior e b) vista inferior.

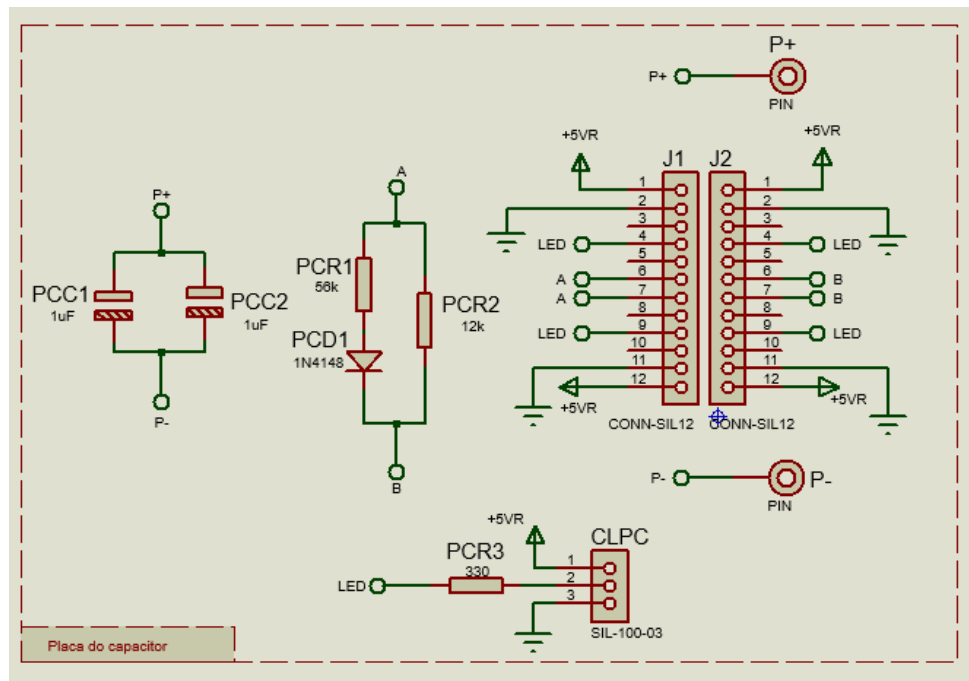


Fonte: do autor.

Como pode ser observado nos modelos tridimensionais (3D) e no esquemático da placa do capacitor que consta Figura 27, essa placa possui conectores destinados à troca de sinais entre a placa de controle e a placa de potência, bem como um conector para acionamento de um *LED* indicador. Além disso, a placa incorpora um conjunto de resistores responsável pela identificação do componente conectado e permite a inserção de diferentes valores de capacitores, em função da forma como o componente foi implementado no projeto.

Com o objetivo de complementar a análise construtiva da placa móvel do capacitor, a Figura 27 apresenta o esquemático elétrico utilizado em seu desenvolvimento, evidenciando as conexões entre os componentes, os conectores de interface com o sistema e o circuito responsável pela identificação do componente.

Figura 27 - Circuito da placa móvel do capacitor.



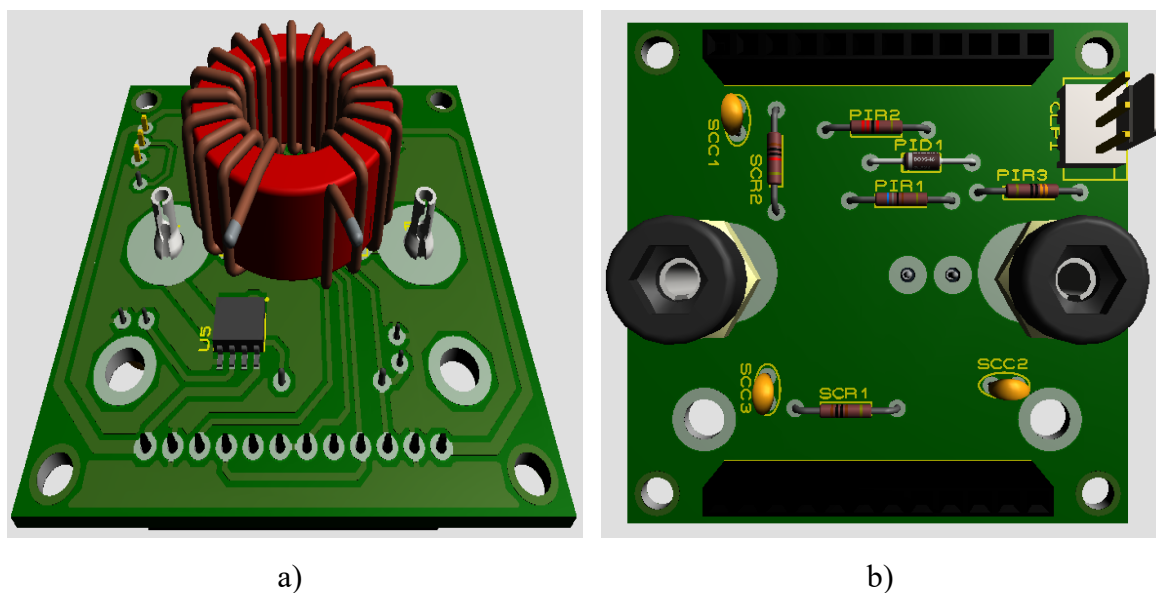
Fonte: do autor.

A comparação entre o modelo tridimensional e o esquemático permite compreender de forma mais clara a implementação física e elétrica da placa, auxiliando na visualização das interligações utilizadas no kit didático desenvolvido.

3.2.1.2 Placa do Indutor

Como parte da proposta didática do sistema, o indutor é implementado em uma placa móvel específica, conforme ilustrado na Figura 28, possibilitando sua substituição conforme a topologia do conversor utilizada.

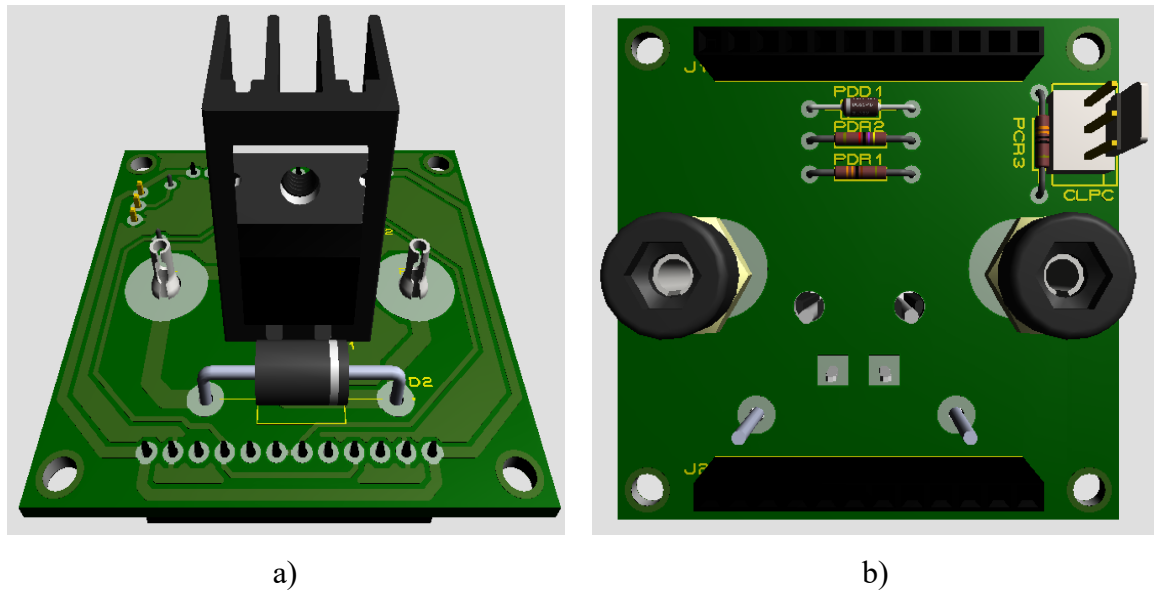
Figura 28 - Modelo 3D da placa móvel do indutor: a) vista superior e b) vista inferior.



Fonte: do autor.

Os modelos tridimensionais (3D) e o esquemático da placa do indutor mostrado na Figura 29, evidenciam que essa placa possui conectores destinados à troca de sinais entre a placa de controle e a placa de potência, além de um conector específico para o acionamento de um *LED* indicador. A placa incorpora um conjunto de resistores responsável pela identificação do componente conectado e permite a inserção de diferentes valores de indutores, em função da forma como o componente foi implementado no projeto.

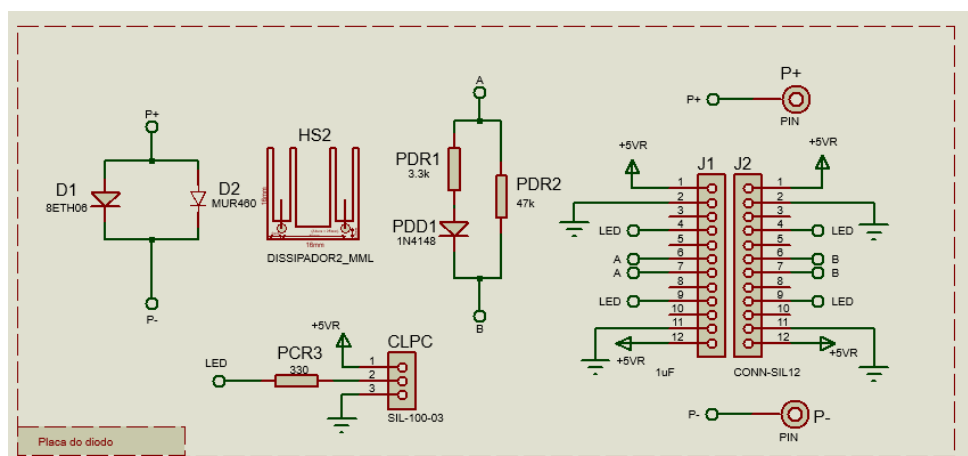
Figura 30 - Modelo 3D da placa móvel do diodo: a) vista superior e b) vista inferior.



Fonte: do autor.

Os modelos tridimensionais e o esquemático da placa do diodo na Figura 31, demonstram que essa placa dispõe de conectores destinados à comunicação com a placa de controle e com a placa de potência, além de um conector dedicado ao acionamento de um *LED* indicador. De maneira semelhante às demais placas móveis do sistema, foi implementado um arranjo de resistores responsável pela identificação do módulo conectado, permitindo que o sistema de controle reconheça automaticamente a placa inserida.

Figura 31 - Circuito da placa móvel do diodo.



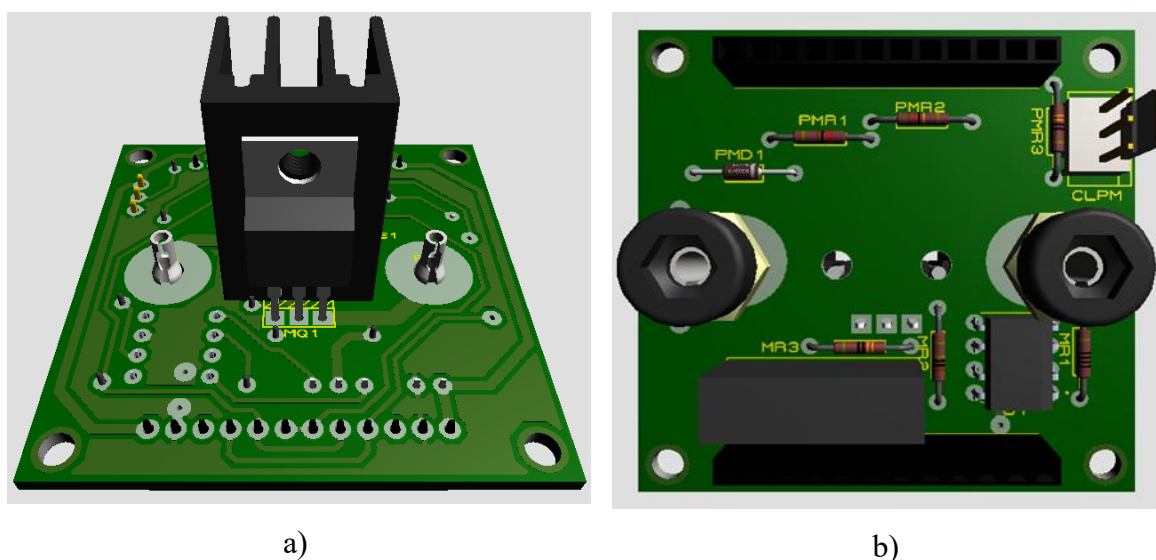
Fonte: do autor.

Além disso, a placa do diodo foi concebida de modo a possibilitar a substituição do dispositivo semicondutor sem a necessidade de modificações no restante do circuito. Essa característica favorece a realização de ensaios experimentais voltados à avaliação da influência do diodo no desempenho do conversor, incluindo aspectos como perdas por condução e aquecimento.

3.2.1.4 Placa do MOSFET

O MOSFET, apresentado na Figura 32, é o principal dispositivo de comutação do conversor CC-CC. A operação desse semicondutor é geralmente comandada por um sinal *PWM*, o qual permite regular a tensão e a corrente de saída do conversor por meio do controle do tempo de condução do dispositivo.

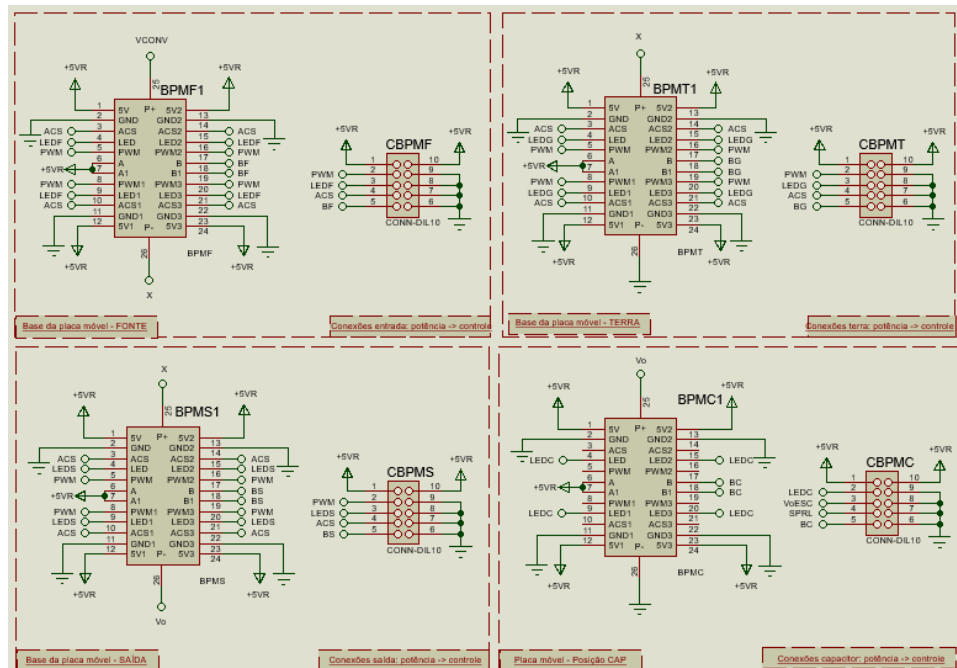
Figura 32 - Modelo 3D da placa móvel do diodo: a) vista superior e b) vista inferior.



Fonte: do autor.

Os modelos tridimensionais e o esquemático da placa do MOSFET visto na Figura 33, evidenciam que essa placa dispõe de conectores destinados à interligação com a placa de controle e com a placa de potência, além de um conector específico para o acionamento de um *LED* indicador. Assim como nas demais placas móveis do sistema, foi implementado um conjunto de resistores responsável pela identificação automática do módulo conectado, permitindo o reconhecimento da placa pelo sistema de controle.

Figura 35 - Circuito de potência - Parte 2.

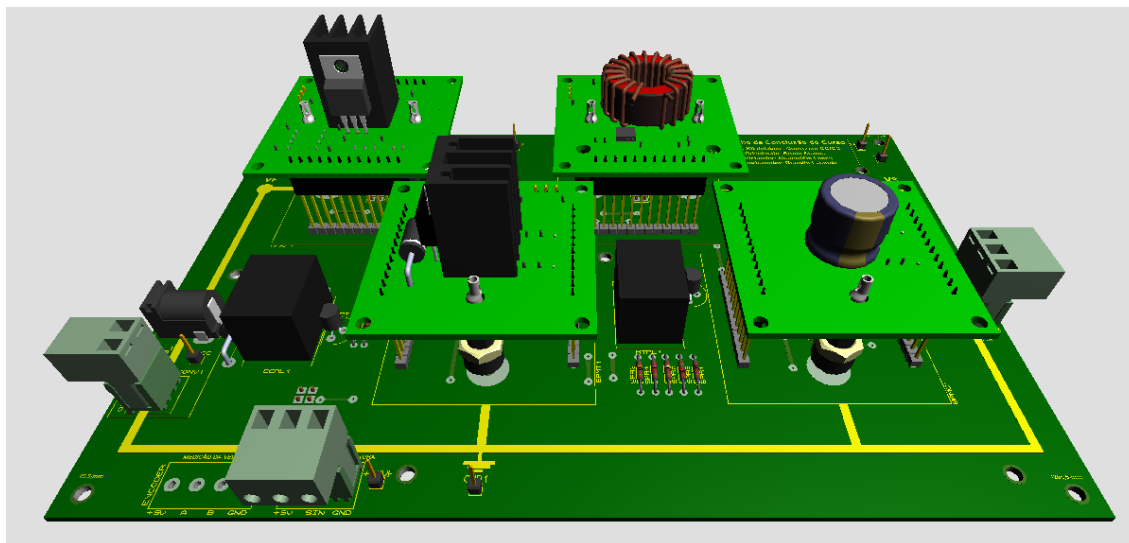


Fonte: do autor.

Na Figura 35 estão dispostos os conectores responsáveis pela conexão dos componentes, bem como as trilhas dimensionadas para condução das correntes envolvidas no processo de conversão. Por meio da disposição adequada das placas móveis, torna-se possível configurar as diferentes topologias de conversores, mantendo a flexibilidade e o caráter didático do sistema.

Por fim, a Figura 36 apresenta a implementação física da placa de potência desenvolvida, evidenciando a disposição dos componentes eletrônicos, das placas móveis conectadas ao sistema, dos conectores destinados ao encoder e ao sensor de temperatura, além dos pontos de interligação entre os diferentes módulos do kit didático.

Figura 36 - Modelo 3D da placa de potência – Vista Superior.



Fonte: do autor.

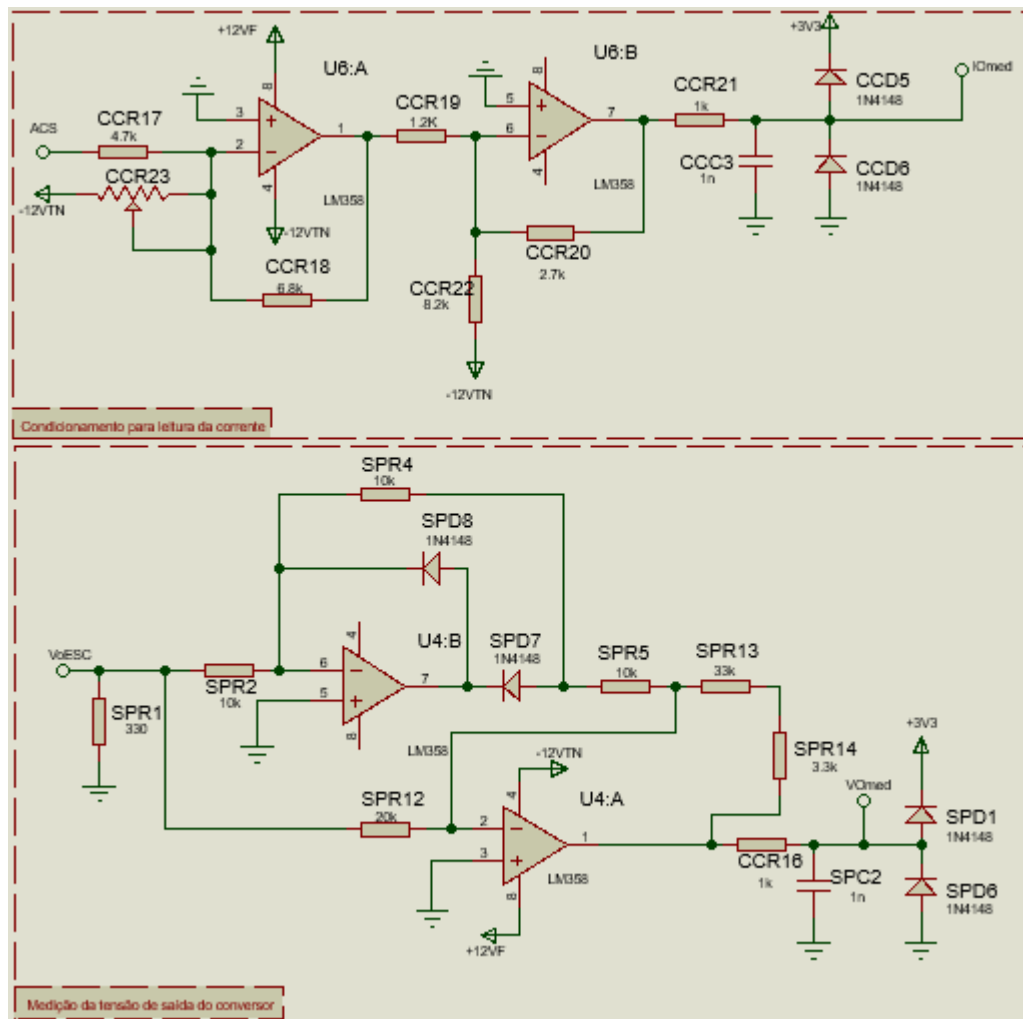
A visualização da placa montada permite compreender de forma mais clara a organização física do sistema e a integração entre os circuitos.

3.2.3 Placa de Controle

Nessa placa encontram-se o microcontrolador, os estágios de condicionamento de sinais, as conexões destinadas à placa de potência e as interfaces de comunicação utilizadas no sistema. Além disso, a placa de controle é responsável pela leitura das grandezas elétricas do conversor, como tensão e corrente, bem como pela geração dos sinais de acionamento necessários para o controle do MOSFET, garantindo o funcionamento adequado do sistema conforme a topologia configurada.

A Figura 37 apresenta os circuitos de condicionamento empregados na leitura da corrente por meio do sensor ACS712 e na adequação da tensão de saída do conversor Buck-Boost para leitura pelo *ADC* do microcontrolador.

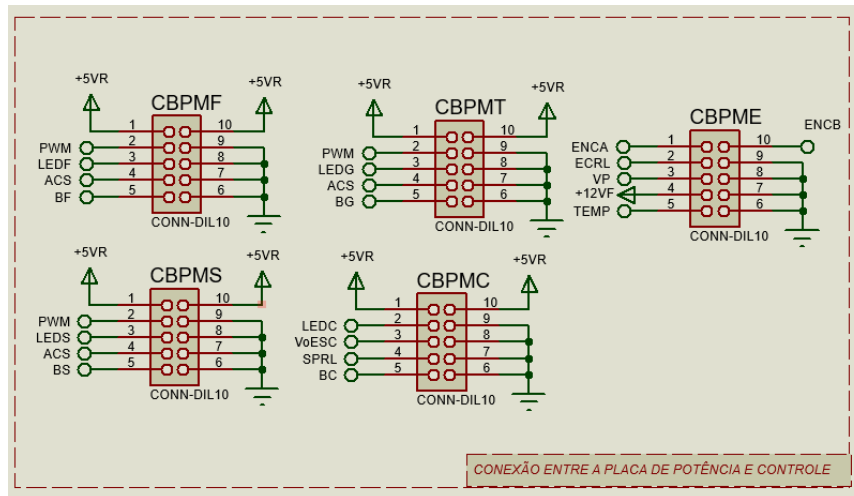
Figura 37 - Circuito de Controle - Parte 1.



Fonte: do autor.

Em sequência, a Figura 38 apresenta os conectores responsáveis pela interligação entre a placa de potência e a placa de controle, permitindo a troca de sinais de acionamento, alimentação e aquisição de dados entre os diferentes módulos do sistema.

Figura 38 - Circuito de Controle - Parte 2.

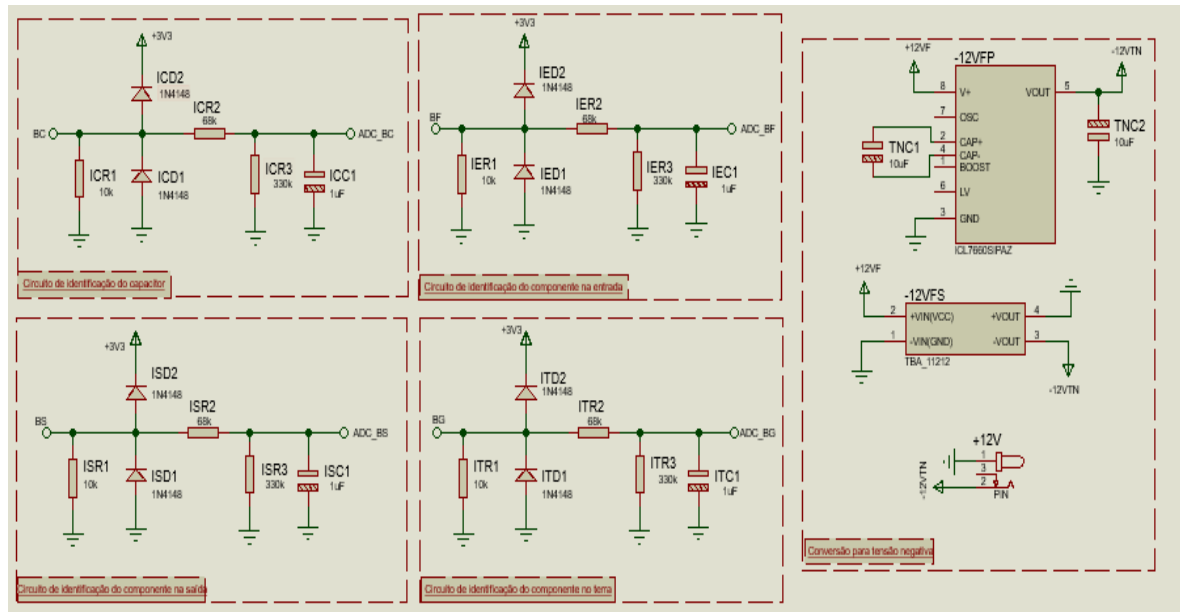


Fonte: do autor.

Dando continuidade a descrição, a Figura 39 apresenta o circuito de alimentação empregado no sistema, baseado em fontes simétricas de +12 V e -12 V, utilizadas principalmente para o funcionamento adequado dos circuitos analógicos de condicionamento de sinais, como amplificadores operacionais e retificadores de precisão. A partir da tensão de +12 V, é utilizado um regulador responsável pela redução e estabilização da tensão para 5 V, destinada à alimentação de módulos auxiliares e circuitos de comunicação.

Adicionalmente, nessa mesma etapa do circuito, encontram-se os circuitos de proteção e filtragem associados ao sistema de identificação das posições de encaixe das placas móveis. Esses circuitos têm como finalidade assegurar a integridade dos sinais e viabilizar a correta identificação dos componentes conectados, por meio da leitura das tensões pelo *ADC* do microcontrolador.

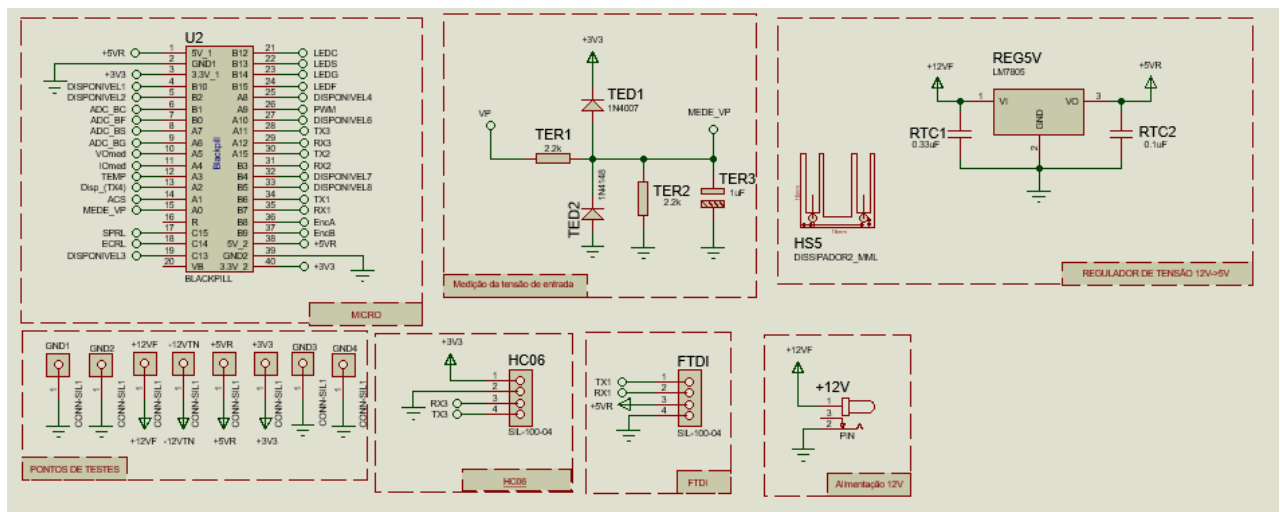
Figura 39 - Circuito de Controle - Parte 3.



Fonte: do autor

Por fim, a Figura 40 apresenta o sistema de comunicação da placa de controle, composto pelos módulos de comunicação serial e *Bluetooth*, responsáveis pela transmissão dos dados adquiridos para dispositivos externos, como computadores ou aplicações dedicadas. A comunicação serial é empregada principalmente em etapas de testes, depuração e monitoramento do sistema, enquanto o módulo *Bluetooth* possibilita a comunicação sem fio, ampliando a flexibilidade e o caráter didático do kit desenvolvido.

Figura 40 - Circuito de Controle - Parte 4.



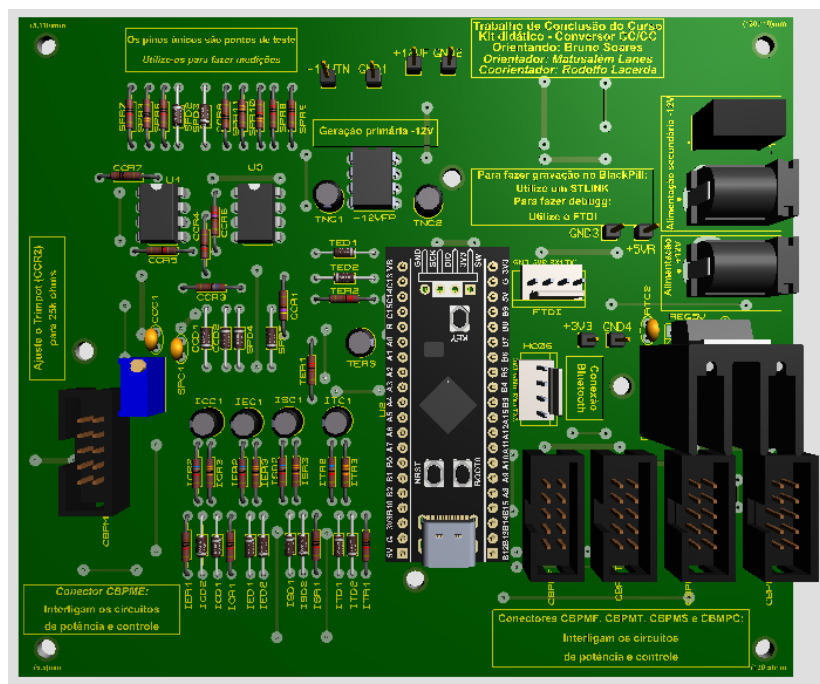
Fonte: do autor.

Além disso, a Figura 40 também evidencia a presença do microcontrolador, dos pontos de teste para validação dos sinais do sistema e da alimentação da placa de controle, elementos fundamentais para o funcionamento.

Dessa forma, a arquitetura modular adotada permite a separação clara entre potência e controle, além de favorecer a experimentação e o aprendizado, uma vez que o usuário pode visualizar e compreender a função de cada bloco do sistema na operação dos conversores CC-CC.

Por fim, a Figura 41 apresenta a implementação física da placa de controle desenvolvida.

Figura 41 - Modelo 3D da placa de controle – Vista Superior.



Fonte: do autor.

A visualização da placa de controle permite compreender de forma mais clara a organização interna do circuito, bem como a disposição dos principais blocos funcionais responsáveis pelo processamento, condicionamento de sinais e interfaces de comunicação.

3.3 Considerações Parciais

O desenvolvimento do sistema de *hardware* permitiu a implementação de uma arquitetura modular voltada ao ensino de conversores CC-CC, possibilitando a integração entre as placas de potência, controle e módulos móveis de componentes. A organização física adotada contribuiu para facilitar a montagem dos circuitos e a visualização das diferentes topologias pelos estudantes, tornando o kit mais adequado para aplicações didáticas.

As soluções implementadas na placa de controle possibilitaram a integração entre os circuitos de aquisição de dados, geração do sinal PWM, comunicação com dispositivos externos e identificação automática dos componentes conectados ao sistema. Já a placa de potência apresentou estrutura compatível com a operação das topologias Buck, Boost e Buck-Boost propostas neste trabalho.

Além disso, a utilização de placas móveis e mecanismos de identificação contribuiu para aumentar a flexibilidade do kit e reduzir a possibilidade de conexões incorretas durante sua utilização.

Dessa forma, o *hardware* desenvolvido atendeu aos requisitos propostos para o funcionamento do sistema, fornecendo a base necessária para a implementação do algoritmo de controle e para a realização dos testes experimentais apresentados nos capítulos seguintes.

4 ALGORITMO DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS DO SISTEMA

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do algoritmo de controle e aquisição de dados responsável pelo funcionamento do kit didático de conversores CC-CC proposto neste trabalho. São abordadas as principais rotinas implementadas no microcontrolador STM32F411 WeAct Black Pill, incluindo os processos de inicialização do sistema, leitura e tratamento dos sinais adquiridos, identificação automática dos componentes conectados e controle das topologias do conversor.

Inicialmente, é descrito o ambiente de desenvolvimento e programação utilizado para implementação do *firmware*. Em seguida, são apresentados a estrutura geral do código-fonte e o fluxograma de funcionamento do sistema, evidenciando a lógica empregada para gerenciamento das diferentes etapas de operação do kit didático.

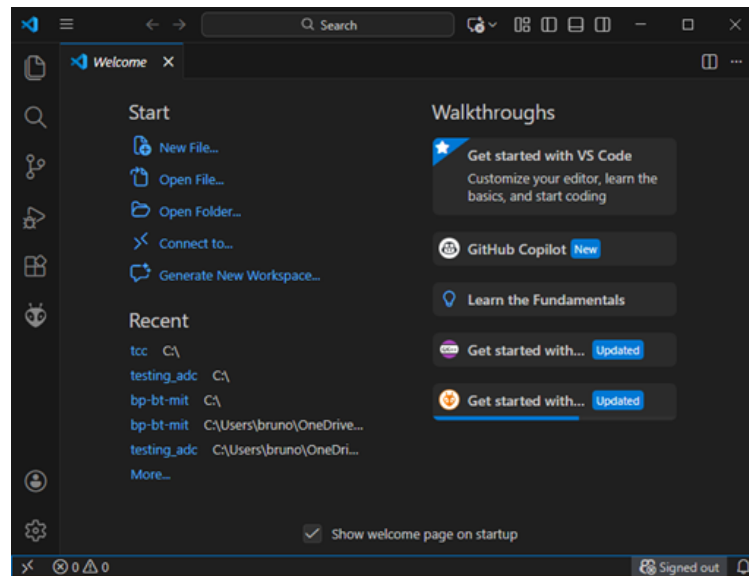
Posteriormente, são detalhadas as rotinas responsáveis pela leitura e condicionamento dos sinais provenientes do conversor analógico-digital, pela identificação dos componentes e topologias por meio das faixas de tensão previamente definidas e pelos mecanismos de indicação visual implementados através dos *LEDs RGB*. Também são discutidas as técnicas utilizadas para geração e controle do sinal *PWM* empregado no acionamento do *MOSFET*.

Além disso, o capítulo aborda os sistemas de comunicação serial *USB* e *Bluetooth* utilizados para transmissão e recepção de dados entre o kit didático e dispositivos externos, possibilitando o monitoramento das variáveis elétricas e o ajuste remoto dos parâmetros de operação do conversor.

4.1 Ambiente de Desenvolvimento e Programação

O ambiente de desenvolvimento utilizado foi o Visual Studio Code e pode ser visto na Figura 42. Essa é uma plataforma amplamente empregada tanto em ambientes acadêmicos quanto industriais. Esse ambiente oferece recursos como navegação eficiente entre arquivos, ferramentas de depuração, integração com sistemas de controle de versão e uma ampla variedade de extensões voltadas a diferentes linguagens de programação e aplicações, o que contribui para maior organização e produtividade no desenvolvimento de *software*.

Figura 42 - Visual Studio Code.



Fonte: do autor.

Integrada ao Visual Studio Code, foi utilizada a extensão PlatformIO que consta na Figura 43, uma ferramenta voltada especificamente para o desenvolvimento de sistemas embarcados, que oferece suporte a diversas arquiteturas de microcontroladores, incluindo a família STM32. O PlatformIO automatiza processos como compilação do código, gerenciamento de bibliotecas e *upload* do *firmware* para o microcontrolador, além de permitir a utilização de diferentes *frameworks*⁵ de desenvolvimento. Neste trabalho, foi adotado o Arduino Core para STM32, o qual se mostrou adequado às necessidades do projeto.

⁵ Frameworks: conjuntos de bibliotecas e ferramentas que fornecem uma base padronizada para o desenvolvimento de aplicações.

Figura 43 - Platform IO.



Fonte: do autor.

A utilização da biblioteca Arduino, por meio do arquivo `Arduino.h`, deve-se principalmente à redução da complexidade no desenvolvimento do *software*, tornando o código mais acessível e didático, especialmente em um contexto educacional.

Essa abordagem facilita a implementação de funcionalidades como temporizadores, interfaces de comunicação serial e conversores analógico-digital, sem comprometer a eficiência do sistema. Além disso, o uso do Arduino Core mantém a possibilidade de expansão do projeto e a integração com bibliotecas amplamente difundidas na comunidade de sistemas embarcados.

4.2 Estrutura Geral do Código e Fluxograma de Funcionamento

O *firmware* do sistema foi desenvolvido para a plataforma STM32 BlackPill utilizando o framework Arduino em conjunto com a extensão PlatformIO. O código foi estruturado em módulos funcionais responsáveis pela leitura analógica via *ADC*, identificação automática de componentes, geração de sinal *PWM*, comunicação serial USB, comunicação *Bluetooth* e acionamento dos *LEDs RGB* indicadores de *status*.

O funcionamento do sistema ocorre de forma sequencial dentro do laço principal “`loop()`”, realizando continuamente a leitura das variáveis elétricas, identificação dos componentes conectados, verificação da topologia do conversor e atualização das interfaces de comunicação e sinalização visual.

4.2.1 Inicialização do Sistema

A função “setup()” é responsável pela configuração inicial dos periféricos do microcontrolador, incluindo os pinos digitais de controle, interfaces seriais, *LEDs RGB*, *ADC* e geração do sinal *PWM*. O Código fonte 1 apresenta a rotina de inicialização utilizada no *firmware*.

Código fonte 1 - Setup do código.

```
void setup() {
  pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
  pinMode(SPRL, OUTPUT);
  pinMode(ECRL, OUTPUT);
  pinMode(PWM_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(LED_PIN, HIGH);
  digitalWrite(SPRL, LOW);
  digitalWrite(ECRL, LOW);

  ledF.begin(); ledF.show();
  ledG.begin(); ledG.show();
  ledS.begin(); ledS.show();
  ledC.begin(); ledC.show();
  apagarLEDs();

  Serial.setTx(PB6);
  Serial.setRx(PB7);
  Serial.begin(115200);

  SerialBT.setRx(PA12);
  SerialBT.setTx(PA11);
  SerialBT.begin(9600);

  uint32_t t = millis();
  while (!Serial && millis() - t < 3000);

  InicializaADC();
  Serial.println("ADC inicializado.");

  analogWriteFrequency(freqAtual);
  analogWrite(PWM_PIN, DutyParaAnalog(PWM_DUTY_PCT));
}
```

Fonte: do autor.

Inicialmente são configurados os pinos responsáveis pelo acionamento dos relés e geração do *PWM*. Em seguida, são inicializadas as interfaces de comunicação serial *USB* e *Bluetooth*, utilizadas para depuração e monitoramento remoto do sistema. Posteriormente, o *ADC* é configurado por meio da função “InicializaADC()”, permitindo a aquisição das

grandezas analógicas do conversor. Por fim, são definidos a frequência e a razão cíclica iniciais do sinal *PWM*.

4.2.2 Leitura e Condicionamento do *ADC*

A aquisição das variáveis analógicas do sistema é realizada utilizando o *ADC* interno do STM32 operando em modo de disparo por *software* (SWSTART), sem conversão contínua. Cada leitura é executada individualmente conforme a necessidade do *firmware*. O Código fonte 2 apresenta a função utilizada para leitura do *ADC*.

Código fonte 2 - Função para leitura de *ADC* baseado no STM32.

```
uint16_t LerADC(uint8_t pino) {
    uint32_t canal = PinoParaCanalADC(pino);
    ADC1->SQR3 = canal & 0x1F;
    ADC1->SR = 0;
    ADC1->CR2 |= ADC_CR2_SWSTART;
    while (!(ADC1->SR & ADC_SR_EOC));
    return ADC1->DR;
}
```

Fonte: do autor.

Inicialmente, a função converte o pino informado para o respectivo canal *ADC* através da função “PinoParaCanalADC()”. Em seguida, o canal é configurado no registrador SQR3 e a conversão é iniciada pelo bit *SWSTART*. O *firmware* aguarda o término da conversão verificando o bit EOC e, ao final, retorna o valor digital armazenado no registrador DR.

Para reduzir ruídos e oscilações nas leituras analógicas, foi implementada a função “LerTensaoADCMedia()”, apresentada no Código fonte 3.

Código fonte 3 - Função para realizar a média das tensões em uma amostra de 2 ms.

```
float LerTensaoADCMedia(uint8_t pino, uint8_t amostras = 5) {
    float soma = 0;
    for (uint8_t i = 0; i < amostras; i++) {
        soma += LerTensaoADC(pino);
        delay(2);
    }
    return soma / amostras;
}
```

Fonte: do autor.

A função realiza múltiplas leituras consecutivas do *ADC* e calcula a média aritmética das amostras obtidas. O intervalo de 2 ms entre as leituras foi definido experimentalmente para reduzir a influência de ruídos elétricos e oscilações no sinal analógico. Além disso, esse intervalo pode ser ajustado em função da frequência de chaveamento do *PWM*, permitindo sincronizar as amostragens com o funcionamento do conversor.

A tensão de entrada do sistema passa por um condicionamento adicional realizado pela função “LerTensaoEntrada()”, apresentada no Código fonte 4.

Código fonte 4 - Função para ajustar a escala tanto para a tensão quanto para a corrente de saída.

```
float LerTensaoEntrada() {
    float vBruto = LerTensaoADCMedia(PIN_ENTRADA);
    if (vBruto <= 2.7f)
        return vBruto * 2.16f;
    else
        return vBruto * (12.0f / 3.3f);
}
```

Fonte: do autor.

A função aplica diferentes fatores de escala conforme a faixa de tensão medida, permitindo a utilização de fontes de alimentação de 5 V ou 12 V. Esse ajuste compensa o divisor resistivo utilizado no condicionamento do sinal analógico, garantindo maior precisão nas leituras realizadas pelo *ADC*. Outra abordagem para viabilizar a leitura de diferentes faixas de tensão consiste na análise dos valores brutos fornecidos pelo *ADC*, realizando posteriormente a calibração e o ajuste de escala por *software*.

4.2.3 Identificação de Componentes por Faixa de Tensão

Cada posição do kit didático, representada pelas constantes POS_CBPMF, POS_CBPMT, POS_CBPMS e POS_CBPMC, possui um canal *ADC* dedicado para identificação automática do componente conectado. As leituras são realizadas respectivamente pelos pinos PB0, PA6, PA7 e PB1, definidos na função “verificarComponentes()”.

Cada componente do kit possui um resistor de identificação específico. Quando conectado ao soquete, esse resistor forma um divisor de tensão com um resistor fixo presente na placa, gerando uma tensão característica aplicada ao *ADC* do microcontrolador. Como a

polaridade de inserção altera a configuração do divisor resistivo, diferentes orientações do mesmo componente produzem tensões distintas, permitindo identificar simultaneamente o tipo do componente, sua numeração e sua polaridade.

A identificação é realizada utilizando a estrutura Intervalo, responsável por armazenar os limites de tensão e as informações associadas a cada componente. Todos os intervalos são agrupados no vetor constante” TABELA[]”, apresentado no Código fonte 5.

Código fonte 5 - Tabela relacionando a faixa de tensão, número e polaridade do componente.

```
const Intervalo TABELA[] = {
    {0.01f, 0.205f, COMP_MOSFET, 2, false},
    {0.205f, 0.31f, COMP_MOSFET, 1, false},
    {0.31f, 0.61f, COMP_DIODO, 2, false},
    {0.61f, 0.80f, COMP_DIODO, 1, false},
    {0.81f, 0.99f, COMP_INDUTOR, 3, false},
    {0.99f, 1.09f, COMP_INDUTOR, 2, false},
    {1.09f, 1.31f, COMP_INDUTOR, 1, false},
    {1.31f, 1.50f, COMP_CAPACITOR, 3, false},
    {1.50f, 1.70f, COMP_CAPACITOR, 2, false},
    {1.70f, 1.91f, COMP_CAPACITOR, 1, false},
    {1.91f, 2.035f, COMP_CAPACITOR, 1, true},
    {2.035f, 2.185f, COMP_CAPACITOR, 2, true},
    {2.185f, 2.355f, COMP_CAPACITOR, 3, true},
    {2.355f, 2.455f, COMP_INDUTOR, 1, true},
    {2.455f, 2.530f, COMP_INDUTOR, 2, true},
    {2.530f, 2.680f, COMP_INDUTOR, 3, true},
    {2.680f, 2.805f, COMP_DIODO, 1, true},
    {2.805f, 2.920f, COMP_DIODO, 2, true},
    {2.920f, 3.105f, COMP_MOSFET, 1, true},
    {3.105f, 3.36f, COMP_MOSFET, 2, true},
};
```

Fonte: do autor.

Os identificadores COMP_CAPACITOR, COMP_INDUTOR, COMP_DIODO e COMP_MOSFET representam os tipos de componentes reconhecidos pelo sistema. Já o parâmetro booleano polaridade indica a orientação do componente no soquete, em que o valor true representa a polaridade AB e false representa a polaridade BA. Caso a tensão medida não pertença a nenhum intervalo da tabela, o sistema retorna COMP_NENHUM, indicando ausência de componente.

A função responsável pela identificação é “identificarComponente()”, apresentada no Código fonte 6.

Código fonte 6 - Função para realizar a identificação do componente.

```
ComponenteID identificarComponente(float tensao) {
    ComponenteID res = {COMP_NENHUM, 0, true, false};
    for (int i = 0; i < TABELA_SIZE; i++) {
        if (tensao >= TABELA[i].vmin && tensao < TABELA[i].vmax) {
            res.tipo      = TABELA[i].tipo;
            res.numero    = TABELA[i].numero;
            res.polaridade = TABELA[i].polaridade;
            res.presente   = true;
            return res;
        }
    }
    return res;
}
```

Fonte: do autor.

A função percorre linearmente o vetor TABELA[], verificando se a tensão recebida está compreendida entre os limites vmin e vmax de cada intervalo. Quando uma correspondência é encontrada, os campos tipo, numero, polaridade e presente da estrutura res recebem os valores associados ao componente identificado, encerrando imediatamente a busca.

As tensões utilizadas na identificação são obtidas pela função “LerTensaoADCMedia()”, responsável por realizar múltiplas leituras consecutivas do *ADC* e calcular a média dos valores medidos, reduzindo a influência de ruídos elétricos e oscilações no sinal analógico.

Após a identificação, os resultados são armazenados no vetor global “compGlobal[]”, utilizado posteriormente pela função “detectarConversor()” para determinar automaticamente a topologia do conversor e realizar a sinalização visual através dos *LEDs RGB*.

4.2.4 Detecção do Tipo de Conversor

Após a identificação individual dos componentes, o *firmware* verifica automaticamente se a combinação obtida corresponde a uma topologia válida de conversor CC-CC. A Tabela 12 apresenta as combinações esperadas para os conversores BUCK, BOOST e BUCK-BOOST.

Tabela 12 - Relações das posições dos componentes no conversor.

Conversor	POSIÇÃO CBPMF	POSIÇÃO CBPMT	POSIÇÃO CBPMS	POSIÇÃO CBPMC
BUCK	MOSFET [AB]	Diodo [BA]	Indutor [AB]	Capacitor
BOOST	Indutor [AB]	MOSFET [AB]	Diodo [AB]	Capacitor
BUCK-BOOST	MOSFET [AB]	Indutor [AB]	Diodo [BA]	Capacitor

Fonte: do autor.

A verificação da topologia é realizada pela função “detectarConversor()”, apresentada no Código fonte 7.

Código fonte 7 - Função “detectarConversor()”.

```
int detectarConversor(ComponenteID comp[4]) {
    if (comp[POS_CBPMC].tipo != COMP_CAPACITOR) return CONV_DESCONHECIDO;

    if (comp[POS_CBPMF].tipo == COMP_MOSFET && comp[POS_CBPMF].polaridade
    == true &&
        comp[POS_CBPMT].tipo == COMP_DIODO && comp[POS_CBPMT].polaridade
    == false &&
        comp[POS_CBPMS].tipo == COMP_INDUTOR && comp[POS_CBPMS].polaridade
    == true)
        return CONV_BUCK;

    if (comp[POS_CBPMF].tipo == COMP_INDUTOR && comp[POS_CBPMF].polaridade
    == true &&
        comp[POS_CBPMT].tipo == COMP_MOSFET && comp[POS_CBPMT].polaridade
    == true &&
        comp[POS_CBPMS].tipo == COMP_DIODO && comp[POS_CBPMS].polaridade
    == true)
        return CONV_BOOST;

    if (comp[POS_CBPMF].tipo == COMP_MOSFET && comp[POS_CBPMF].polaridade
    == true &&
        comp[POS_CBPMT].tipo == COMP_INDUTOR && comp[POS_CBPMT].polaridade
    == true &&
        comp[POS_CBPMS].tipo == COMP_DIODO && comp[POS_CBPMS].polaridade
    == false)
        return CONV_BUCKBOOST;

    return CONV_DESCONHECIDO;
}
```

Fonte: do autor.

A função recebe como parâmetro o vetor “comp[]”, contendo os componentes previamente identificados em cada posição do kit. Inicialmente, o *firmware* verifica se existe

um capacitor conectado na posição CBPMC, condição obrigatória para o funcionamento das topologias implementadas.

Em seguida, são comparados os tipos e polaridades dos componentes armazenados no vetor “comp[]” com as combinações esperadas para cada topologia. Quando uma configuração válida é encontrada, a função retorna o identificador correspondente (CONV_BUCK, CONV_BOOST ou CONV_BUCKBOOST). Caso nenhuma combinação seja compatível, o sistema retorna CONV_DESCONHECIDO, bloqueando a operação do conversor.

4.2.5 Indicação Visual por *LEDs RGB*

O sistema utiliza quatro *LEDs RGB* NeoPixel para indicar visualmente se os componentes foram inseridos corretamente em cada posição do kit didático. Cada *LED* está associado a uma das posições do conversor (CBPMF, CBPMT, CBPMS e CBPMC) e é controlado após a identificação dos componentes e detecção da topologia do conversor.

A lógica de verificação é implementada na função “verificarComponentes()”, apresentada no Código fonte 8.

Código fonte 8 - Lógica de funcionamento dos LEDs.

```
bool verificarComponentes() {
    float tensoes[4] = {
        LerTensaoADCMedia(PB0),
        LerTensaoADCMedia(PA6),
        LerTensaoADCMedia(PA7),
        LerTensaoADCMedia(PB1)
    };

    for (int i = 0; i < 4; i++)
        compGlobal[i] = identificarComponente(tensoes[i]);

    const String posicoes[4] = {"CBPMF", "CBPMT", "CBPMS", "CBPMC"};

    Serial.println("=== IDENTIFICAÇÃO DE COMPONENTES ===");
    for (int i = 0; i < 4; i++) {
        Serial.print(posicoes[i]); Serial.print(": ");
        Serial.print(nomeComponente(compGlobal[i].tipo));
        if (compGlobal[i].presente) {
            Serial.print(" "); Serial.print(compGlobal[i].numero);
            Serial.print(compGlobal[i].polaridade ? " [AB]" : " [BA]");
        }
        Serial.print(" ("); Serial.print(tensoes[i], 3);
    }
    Serial.println("V");
}
```

```

}

tipoConversor = detectarConversor(compGlobal);

if (tipoConversor == CONV_DESCONHECIDO) {
    setLED(ledF, false);
    setLED(ledG, false);
    setLED(ledS, false);
    setLED(ledC, compGlobal[POS_CBPMC].tipo == COMP_CAPACITOR);
    Serial.println(">> ERRO: Configuração inválida ou componente
ausente/invertido!");
} else {
    const Regra* regras = nullptr;
    switch (tipoConversor) {
        case CONV_BUCK:      regras = REGRAS_BUCK;      Serial.println(">>
Conversor: BUCK [OK]");      break;
        case CONV_BOOST:     regras = REGRAS_BOOST;     Serial.println(">>
Conversor: BOOST [OK]");     break;
        case CONV_BUCKBOOST: regras = REGRAS_BUCKBOOST; Serial.println(">>
Conversor: BUCK-BOOST [OK]"); break;
    }
    setLED(ledF, compGlobal[POS_CBPMF].tipo == regras[POS_CBPMF].tipo &&
compGlobal[POS_CBPMF].polaridade == regras[POS_CBPMF].polaridade);
    setLED(ledG, compGlobal[POS_CBPMT].tipo == regras[POS_CBPMT].tipo &&
compGlobal[POS_CBPMT].polaridade == regras[POS_CBPMT].polaridade);
    setLED(ledS, compGlobal[POS_CBPMS].tipo == regras[POS_CBPMS].tipo &&
compGlobal[POS_CBPMS].polaridade == regras[POS_CBPMS].polaridade);
    setLED(ledC, compGlobal[POS_CBPMC].tipo == regras[POS_CBPMC].tipo);
}

Serial.println("=====");
return tipoConversor != CONV_DESCONHECIDO;
}

```

Fonte: do autor.

Inicialmente, a função realiza a leitura das tensões presentes em cada posição do kit e identifica os componentes através da função “identificarComponente()”. Os resultados obtidos são armazenados no vetor global “compGlobal[]”, posteriormente utilizado pela função “detectarConversor()”.

Caso a topologia identificada seja inválida (CONV_DESCONHECIDO), os *LEDs* das posições CBPMF, CBPMT e CBPMS permanecem vermelhos, indicando erro de montagem. O *LED* associado ao capacitor (CBPMC) permanece verde somente quando um capacitor válido é detectado na posição correta.

Quando uma topologia válida é identificada, o *firmware* compara os componentes detectados com as regras esperadas para o conversor selecionado. Nessa condição, cada *LED* é acionado na cor verde quando o componente e sua polaridade correspondem à configuração

esperada, ou vermelho em caso de erro.

Essa implementação permite ao usuário identificar rapidamente componentes ausentes, invertidos ou inseridos em posições incorretas. Essas condições podem ser vistas na seção 6.5.

4.2.6 Acionamento por *PWM*

O acionamento do conversor é realizado por meio de um sinal *PWM* gerado no pino PA9. Inicialmente, o *firmware* configura a frequência armazenada na variável `freqAtual` e o ciclo de trabalho definido em `PWM_DUTY_PCT`, utilizando as funções “`analogWriteFrequency()`” e “`analogWrite()`” durante a execução do “`setup()`”.

Para converter o valor percentual do ciclo de trabalho em um valor compatível com a resolução de 8 bits utilizada pela função “`analogWrite()`”, o sistema utiliza a função “`DutyParaAnalog()`”, apresentada no Código fonte 9.

Código fonte 9 - Função de conversão percentual para analógico.

```
uint8_t DutyParaAnalog(float pct) {
    if (pct < 0.0f)    pct = 0.0f;
    if (pct > 100.0f)  pct = 100.0f;
    return (uint8_t) (pct * 255.0f / 100.0f);
}
```

Fonte: do autor.

A função recebe como entrada o valor percentual do ciclo de trabalho através da variável `pct`. Inicialmente, são aplicados limites mínimo e máximo entre 0% e 100%, evitando valores inválidos. Em seguida, o valor percentual é convertido para a faixa de 0 a 255, correspondente à resolução PWM de 8 bits utilizada pelo microcontrolador.

Os parâmetros de frequência e ciclo de trabalho podem ser alterados em tempo real através da comunicação *Bluetooth*. O processamento desses comandos é realizado conforme apresentado no Código fonte 10.

Código fonte 10 - Lógica para receber a alteração da frequência e ciclo de trabalho via *Bluetooth*.

```
while (SerialBT.available()) {
    char c = SerialBT.read();
    if (c == '\n' || c == '\r' || bufferBT.length() >= 8) {
```

```

bufferBT.trim();
if (bufferBT.length() > 0) {
    char cmd = bufferBT.charAt(0);
    float valor = bufferBT.substring(1).toFloat();

    if (cmd == 'D' || cmd == 'd') {
        if (valor >= 0.0f && valor <= 100.0f) {
            PWM_DUTY_PCT = valor;
            analogWrite(PWM_PIN, DutyParaAnalog(PWM_DUTY_PCT));
            Serial.print("Duty atualizado: ");
            Serial.print(PWM_DUTY_PCT); Serial.println("%");
            SerialBT.print("Duty:"); SerialBT.print(PWM_DUTY_PCT, 1);
            SerialBT.print("\n");
        }
    }
    else if (cmd == 'F' || cmd == 'f') {
        if (valor >= 1.0f && valor <= 20000.0f) {
            freqAtual = (uint32_t)valor;
            analogWriteFrequency(freqAtual);
            analogWrite(PWM_PIN, DutyParaAnalog(PWM_DUTY_PCT));
            Serial.print("Freq atualizada: "); Serial.print(freqAtual);
            Serial.println(" Hz");
            SerialBT.print("Freq:"); SerialBT.print(freqAtual);
            SerialBT.print("\n");
        }
    }
}
bufferBT = "";
} else {
    bufferBT += c;
}
}
}

```

Fonte: do autor.

O *firmware* recebe os caracteres enviados pelo módulo *Bluetooth* através da interface SerialBT. Os comandos são armazenados na variável bufferBT até que seja detectado o caractere de finalização (\n ou \r).

O primeiro caractere recebido define o tipo de comando. Quando o caractere é D, o sistema interpreta o valor recebido como ciclo de trabalho e atualiza a variável PWM_DUTY_PCT. Quando o caractere é F, o valor recebido é interpretado como frequência de chaveamento e armazenado na variável freqAtual.

Após a atualização dos parâmetros, o *PWM* é reconfigurado automaticamente pelo *firmware*. Além disso, o sinal *PWM* somente permanece habilitado quando os componentes identificados e a tensão de entrada estão dentro das condições corretas de operação.

4.2.7 Comunicação Serial USB

A comunicação serial USB é utilizada para depuração e monitoramento local do sistema durante o desenvolvimento e os testes do conversor. A interface é configurada no “setup()” utilizando os pinos PB6 e PB7, operando com taxa de transmissão de 115200 bps.

Durante a execução do *firmware*, o sistema envia periodicamente informações relacionadas às medições realizadas e ao estado de funcionamento do conversor, conforme apresentado no Código fonte 11.

Código fonte 11 - Depuração de informações do conversor por meio de comunicação serial USB.

```
// Serial USB
Serial.println("Leituras:");
Serial.print("Vin: ");      Serial.print(tensaoEntrada, 3);
Serial.print(" V | ");
Serial.print("Vout: ");      Serial.print(tensaoSaida, 3);
Serial.print(" V | ");
Serial.print("Corrente: ");  Serial.print(corrente, 3);
Serial.print(" A | ");
Serial.print("PWM: ");      Serial.print(PWM_DUTY_PCT, 1);
Serial.print("% | ");
Serial.print("Freq: ");      Serial.print(freqAtual);
Serial.println(" Hz");
Serial.println("-----");
```

Fonte: do autor.

As variáveis *tensaoEntrada*, *tensaoSaida* e *corrente* armazenam respectivamente os valores medidos de tensão de entrada, tensão de saída e corrente do conversor. Já as variáveis *PWM_DUTY_PCT* e *freqAtual* representam o ciclo de trabalho e a frequência de chaveamento aplicados ao PWM.

As mensagens são exibidas em formato textual através do monitor serial, permitindo acompanhar em tempo real o comportamento do sistema, verificar as leituras obtidas pelo *ADC* e auxiliar na identificação de possíveis falhas de operação.

4.2.8 Comunicação Bluetooth

A comunicação *Bluetooth* foi configurada nos pinos PA11 (TX) e PA12 (RX), operando

com taxa de transmissão de 9600 bps. Essa interface permite a troca de informações entre o microcontrolador e o aplicativo desenvolvido no MIT App Inventor.

O sistema envia periodicamente dados de telemetria relacionados ao funcionamento do conversor, conforme apresentado no Código fonte 12.

Código fonte 12 - Depuração de informações do conversor com comunicação serial *Bluetooth*.

```
// Bluetooth - leituras
SerialBT.print("Vin: "); SerialBT.print(tensaoEntrada, 2);
SerialBT.print(" V\n");
SerialBT.print("Vout: "); SerialBT.print(tensaoSaida, 2);
SerialBT.print(" V\n");
SerialBT.print("Iout: "); SerialBT.print(corrente, 3);
SerialBT.print(" A\n");
SerialBT.print("Ciclo de trabalho:"); SerialBT.print(PWM_DUTY_PCT, 1);
SerialBT.print(" %\n");
SerialBT.print("Freq: "); SerialBT.print(freqAtual); SerialBT.print("
Hz\n");
// Bluetooth - identificação e status
enviarIdentificacaoBT();
SerialBT.print("Status:OK\n");
```

Fonte: do autor.

As variáveis *tensaoEntrada*, *tensaoSaida* e *corrente* correspondem às medições realizadas pelo sistema, enquanto *PWM_DUTY_PCT* e *freqAtual* representam os parâmetros atuais do sinal PWM.

Além dos dados de telemetria, a função *enviarIdentificacaoBT()* transmite ao aplicativo as informações referentes aos componentes identificados em cada posição do kit, juntamente com o tipo de conversor detectado. O *firmware* também envia mensagens de status indicando se o sistema está operando corretamente ou se existe alguma condição de erro.

A comunicação *Bluetooth* também permite alterar remotamente os valores de frequência e ciclo de trabalho do *PWM* através do aplicativo desenvolvido no MIT App Inventor, eliminando a necessidade de modificar diretamente o código-fonte do *firmware* durante as atividades práticas.

4.3 Considerações Parciais

O algoritmo de controle e aquisição de dados desenvolvido permitiu integrar as principais funcionalidades necessárias para o funcionamento do kit didático de conversores CC-CC. As rotinas implementadas no microcontrolador possibilitaram a leitura e o processamento das variáveis elétricas do sistema, a geração do sinal PWM para acionamento do MOSFET e a comunicação com dispositivos externos para monitoramento e ajuste dos parâmetros de operação.

Além disso, os métodos empregados para identificação automática das placas móveis e topologias contribuíram para tornar o sistema mais interativo e seguro, reduzindo a possibilidade de conexões incorretas durante a utilização do kit. Os mecanismos de proteção e validação implementados também auxiliaram na confiabilidade operacional do sistema, garantindo maior segurança durante os ensaios experimentais.

A integração entre aquisição de dados, controle, comunicação e identificação permitiu obter um sistema funcional e adequado à proposta didática do trabalho, facilitando a visualização do comportamento dos conversores e a interação dos estudantes com o kit didático através do aplicativo desenvolvido. Dessa forma, o algoritmo implementado forneceu a base necessária para a realização dos testes experimentais e validações apresentados no capítulo seguinte.

5 APLICATIVO DE MONITORAMENTO

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do aplicativo de monitoramento utilizado na interação com o kit didático proposto. O aplicativo foi desenvolvido com o objetivo de possibilitar a comunicação sem fio entre o usuário e o sistema, permitindo o monitoramento em tempo real das variáveis elétricas do conversor, bem como o ajuste remoto de parâmetros de operação, como frequência de chaveamento e ciclo de trabalho.

Inicialmente, são descritos o ambiente de desenvolvimento e as ferramentas utilizadas na implementação do aplicativo. Em seguida, é apresentada a estrutura geral do código-fonte, abordando a implementação da comunicação *Bluetooth*, os mecanismos de estabelecimento da conexão, a recepção e exibição das medições obtidas pelo sistema e o envio de parâmetros ao microcontrolador.

Além disso, são apresentados os mecanismos de validação implementados para garantir maior segurança operacional, evitando o envio de comandos inválidos e reduzindo a possibilidade de configurações incorretas que possam comprometer o funcionamento do kit didático. Por fim, é descrito o desenvolvimento da interface gráfica do aplicativo, destacando os recursos utilizados para facilitar a interação do usuário com o sistema e tornar sua utilização mais intuitiva em aplicações didáticas.

5.1 Ambiente de Desenvolvimento e Ferramentas Utilizadas

Para o desenvolvimento do aplicativo responsável pela visualização das medições realizadas pelo sistema, foi utilizada a plataforma MIT App Inventor, conforme Figura 44. Trata-se de um ambiente de desenvolvimento voltado à criação de aplicações para dispositivos móveis com sistema operacional Android, amplamente utilizado no meio acadêmico devido à sua simplicidade, acessibilidade e caráter didático.

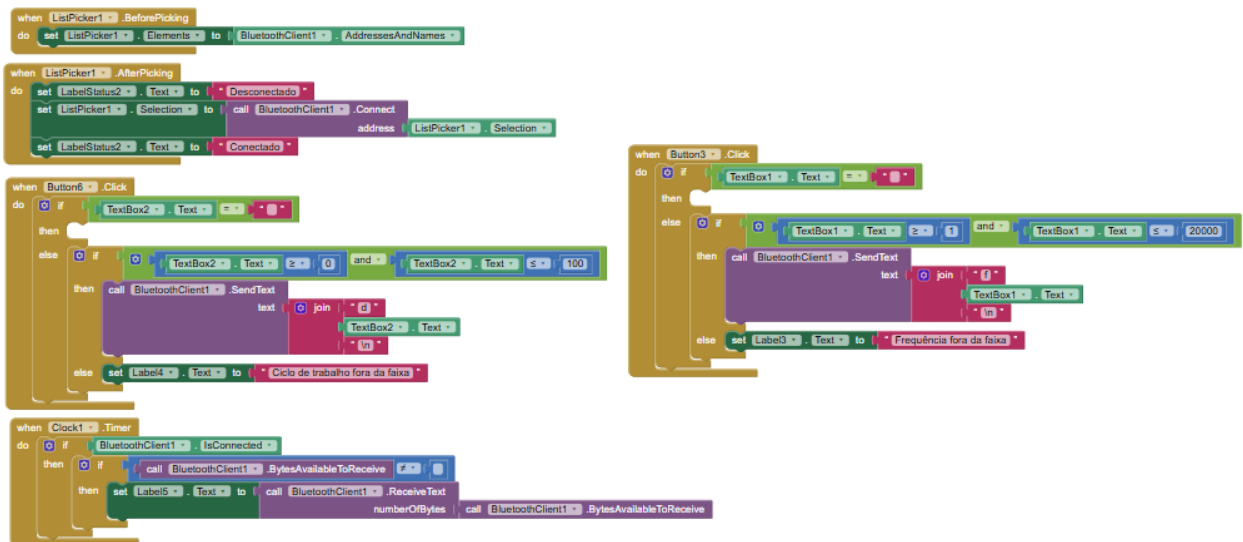
Figura 44 - MIT App Inventor.



Fonte: do autor.

O MIT App Inventor utiliza uma abordagem de programação visual baseada em blocos conforme ilustrado na Figura 45, classificada como programação “no-code”⁶, a qual permite a construção da lógica do aplicativo sem a necessidade de programação textual tradicional.

Figura 45 - Bloco de Código do Aplicativo.



Fonte: do autor.

⁶ O termo no-code é utilizado para descrever plataformas de desenvolvimento que permitem a criação de aplicações por meio de interfaces visuais, reduzindo ou eliminando a necessidade de escrita de código.

Essa característica facilita o desenvolvimento e a compreensão do funcionamento do aplicativo, tornando-o adequado para aplicações educacionais e para a rápida prototipagem de interfaces.

A comunicação entre o aplicativo e o sistema de *hardware* é realizada por meio de uma interface *Bluetooth* presente no kit didático. O MIT App Inventor disponibiliza componentes nativos para comunicação *Bluetooth*, o que simplifica significativamente a implementação da troca de dados, além de garantir compatibilidade com a maioria dos dispositivos móveis. Essa integração permite a recepção e a exibição das grandezas elétricas medidas pelo sistema de forma prática e intuitiva, contribuindo para o caráter interativo da proposta.

5.2 Estrutura Geral do Código-Fonte

Para viabilizar a visualização das medições em tempo real, foi implementado no aplicativo móvel um sistema de comunicação via *Bluetooth* com a placa *Blackpill*. O funcionamento da interface foi estruturado em quatro etapas principais: listagem de dispositivos disponíveis, estabelecimento da conexão, recepção contínua dos dados transmitidos pelo sistema embarcado e exibição deles.

5.2.1 Implementação da Comunicação *Bluetooth* e Estabelecimento da Conexão

Na primeira etapa, o aplicativo realiza a busca pelos dispositivos previamente pareados com o *smartphone*.

Ao acionar o componente “ListPicker”⁷, o sistema executa a função responsável por obter os endereços e nomes dos dispositivos *Bluetooth* disponíveis, populando automaticamente a lista de seleção, como indicado na Figura 46. Esse procedimento garante que o usuário possa

⁷ O componente “ListPicker” do MIT App Inventor é utilizado para exibir ao usuário uma lista de opções selecionáveis, sendo empregado neste trabalho para listar e selecionar dispositivos Bluetooth disponíveis para conexão.

visualizar e selecionar corretamente o módulo *Bluetooth* conectado ao kit de medições.

Figura 46 - Bloco de código responsável pela Comunicação *Bluetooth*.

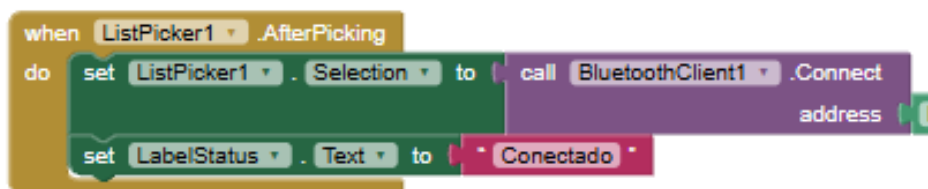


Fonte: do autor.

Após a seleção do dispositivo desejado, o aplicativo executa o comando de conexão utilizando o endereço escolhido.

Caso a conexão seja estabelecida com sucesso, a interface atualiza o indicador de *status* para informar que o dispositivo está conectado, garantindo ao usuário a confirmação visual da comunicação ativa conforme pode ser observado na Figura 47.

Figura 47 - Bloco de código responsável pela Conexão *Bluetooth*.



Fonte: do autor.

Essa etapa é fundamental para permitir o envio e recebimento de dados entre o aplicativo e a placa *Blackpill*.

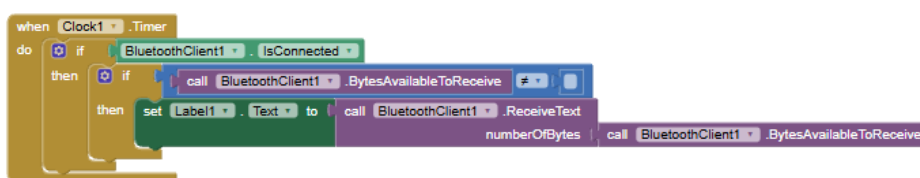
5.2.2 Recepção de Dados e Exibição das Medições

Para possibilitar a atualização contínua das medições na interface, foi utilizado um

componente do tipo “*Clock (Timer)*”⁸.

O temporizador executa verificações periódicas para: Confirmar se o dispositivo permanece conectado, verificar se existem bytes disponíveis para leitura, receber os dados enviados pela placa *Blackpill* e atualizar dinamicamente os valores exibidos na tela. Essa estratégia permite que as medições sejam exibidas em tempo real, garantindo sincronização entre o sistema embarcado e a interface móvel. O diagrama completo pode ser visto na Figura 48.

Figura 48 - Bloco de código responsável pela temporização e exibição dos dados



Fonte: do autor.

Na sequência, os dados recebidos via *Bluetooth* são convertidos para texto e atribuídos aos componentes visuais da aplicação (*Labels*), permitindo a visualização instantânea das grandezas medidas pelo kit. Esse processo ocorre automaticamente a cada ciclo do temporizador, proporcionando ao usuário acompanhamento contínuo do funcionamento do sistema.

5.2.3 Envio de dados via *Bluetooth*

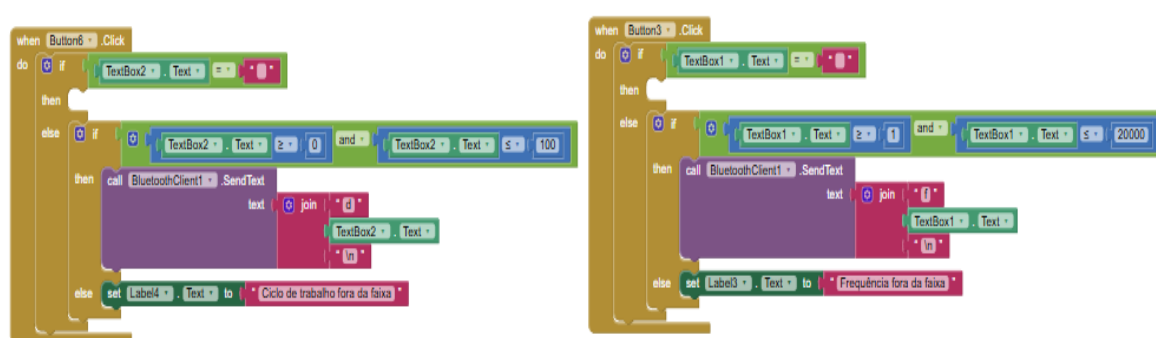
O aplicativo permite ao usuário ajustar em tempo real dois parâmetros do conversor: a frequência do *PWM* e o ciclo de trabalho. Ambos seguem a mesma lógica de validação e envio, diferindo apenas nos valores de faixa permitida e no caractere de comando enviado ao *firmware*.

Quando o usuário pressiona o botão de envio, o aplicativo primeiramente verifica se o

⁸ O componente Clock do MIT App Inventor é utilizado para controle e gerenciamento de funções relacionadas ao tempo, permitindo executar ações temporizadas, obter data e horário do sistema e realizar medições de intervalo de tempo dentro da aplicação.

campo de texto correspondente está vazio, caso esteja, nenhuma ação é executada, evitando o envio de comandos inválidos ao microcontrolador. Em seguida, o valor digitado é verificado contra os limites aceitáveis de cada parâmetro. Para a frequência, o valor deve estar entre 1 Hz e 20kHz. Para o ciclo de trabalho, deve estar entre 0% e 100%. Se o valor estiver dentro da faixa, o aplicativo monta e envia uma “string”⁹ via `BluetoothClient1.SendText` utilizando o bloco “Join”¹⁰, compondo o caractere de comando, o valor digitado e o terminador “\n”, ilustrado na Figura 49.

Figura 49 - Bloco responsável pelo envio dos parâmetros via *Bluetooth*.



Fonte: do autor.

A implementação dessa funcionalidade torna a utilização do kit didático mais simples e intuitiva para o aluno, uma vez que os parâmetros podem ser ajustados diretamente pelo aplicativo, sem a necessidade de interação direta com o código do microcontrolador. Além disso, essa abordagem reduz a possibilidade de alterações indevidas na programação do sistema, evitando configurações incorretas que possam comprometer o funcionamento ou até mesmo causar danos ao kit didático.

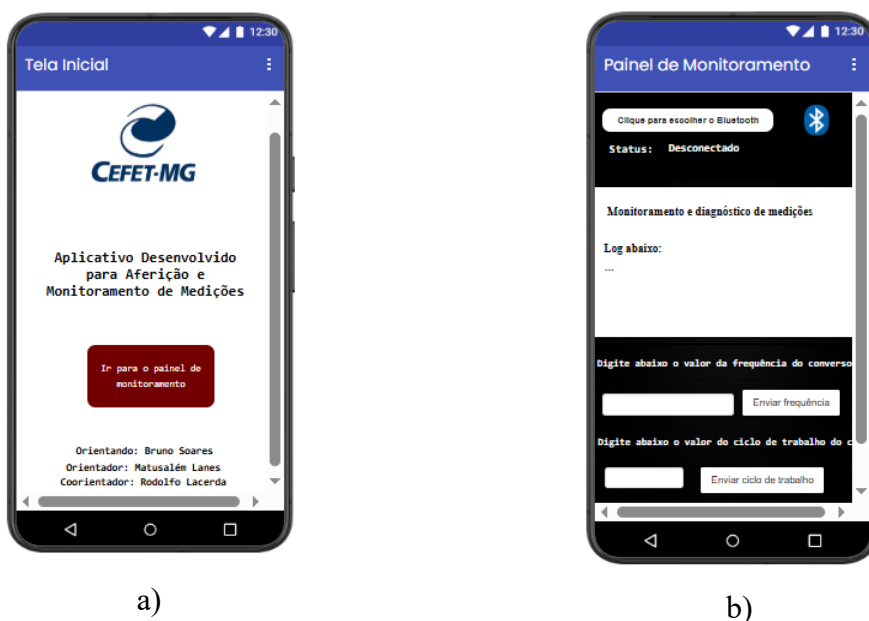
⁹ String é um tipo de dado utilizado para representar uma sequência de caracteres ou texto em aplicações computacionais.

¹⁰ O bloco Join do MIT App Inventor é utilizado para concatenar diferentes elementos, formando uma única sequência de texto para transmissão ou processamento.

5.3 Design da Interface

A interface gráfica do aplicativo móvel foi desenvolvida com o objetivo de proporcionar uma visualização clara, intuitiva e em tempo real das medições realizadas. O projeto da interface priorizou simplicidade operacional, organização visual das informações e fácil interpretação dos dados pelo usuário, as interfaces podem ser vistas na Figura 50.

Figura 50 - Interface do aplicativo: a) tela inicial e b) painel de monitoramento.



Fonte: do autor.

A disposição dos elementos na tela foi planejada para permitir acesso rápido às funcionalidades principais do sistema, incluindo conexão *Bluetooth*, indicação de status da comunicação e exibição das grandezas medidas.

5.4 Considerações Parciais

O desenvolvimento do aplicativo de monitoramento possibilitou a criação de uma interface de interação sem fio entre o usuário e o kit didático, permitindo tanto o acompanhamento em tempo real das variáveis elétricas quanto o envio de parâmetros de controle ao sistema. A utilização da comunicação *Bluetooth* contribuiu para aumentar a flexibilidade de operação do kit, tornando sua utilização mais prática e adequada ao contexto

didático proposto.

Além disso, a implementação de mecanismos de validação dos dados enviados permitiu aumentar a confiabilidade e a segurança operacional do sistema, reduzindo a possibilidade de envio de comandos inválidos ou configurações inadequadas ao microcontrolador. A interface gráfica desenvolvida também contribuiu para tornar a utilização do kit mais intuitiva, minimizando a necessidade de interação direta com o código-fonte embarcado e facilitando o uso por estudantes durante atividades práticas e experimentais.

Dessa forma, o aplicativo desenvolvido atendeu aos objetivos propostos de monitoramento, comunicação e interação com o kit didático, complementando o sistema de *hardware* e contribuindo para uma abordagem mais acessível e interativa no ensino de conversores CC-CC.

6 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir do desenvolvimento e validação experimental do kit didático interativo proposto neste trabalho. Inicialmente, são apresentados os módulos desenvolvidos para compor o sistema, incluindo a placa de potência, a placa de controle e as placas móveis utilizadas na implementação das diferentes topologias dos conversores CC-CC.

Em seguida, são apresentados os resultados experimentais referentes aos conversores Buck, Boost e Buck-Boost, contemplando análises das formas de onda, comparação entre resultados simulados e experimentais e avaliação do comportamento das principais grandezas elétricas envolvidas.

Por fim, são apresentados os resultados relacionados à integração do aplicativo desenvolvido com o kit

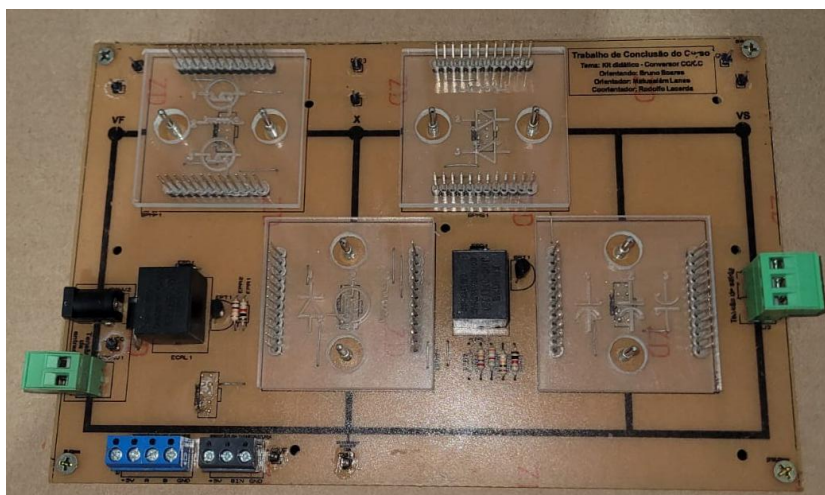
6.1 Validação Geral do Kit Didático

Após a etapa de desenvolvimento e integração das placas de potência, controle e módulos móveis, foram realizados testes experimentais com o objetivo de validar o funcionamento geral do kit didático interativo proposto neste trabalho. Os ensaios tiveram como finalidade verificar a operação do sistema completo, avaliar a integração entre *hardware* e *software* e confirmar a capacidade do kit em implementar diferentes topologias de conversores CC-CC de forma prática e visual.

6.1.1 Placa de Potência

A Figura 51 apresenta a placa de potência desenvolvida, responsável pela interligação dos módulos móveis e pela condução da energia entre os elementos do conversor CC-CC.

Figura 51 - Placa de Potência do Conversor CC-CC.



Fonte: do autor.

A placa de potência foi projetada de forma a permitir a conexão modular dos componentes de potência, possibilitando a implementação das diferentes topologias de conversores CC-CC abordadas neste trabalho. Além disso, a placa incorpora conectores para alimentação, saída do conversor, pontos de medição e interfaces auxiliares, favorecendo a realização de testes experimentais e atividades didáticas.

Adicionalmente, foram desenvolvidas placas de acrílico com o objetivo de auxiliar na montagem das diferentes topologias dos conversores, como é mostrado na Figura 51. Essas placas possuem indicações visuais referentes ao posicionamento correto de cada componente, além de uma numeração indicativa correspondente à topologia a ser implementada. A indicação 1 refere-se à configuração Buck, a indicação 2 à configuração Boost e a indicação 3 à configuração Buck-Boost.

Dessa forma, para a montagem correta do conversor desejado, todos os componentes devem ser posicionados na mesma numeração correspondente à respectiva topologia. Essa abordagem torna o processo de montagem mais intuitivo, reduz a probabilidade de conexões incorretas e reforça o caráter didático e visual do sistema desenvolvido.

6.1.2 Placa de Controle

A Figura 52 apresenta a placa de controle desenvolvida, responsável pelo gerenciamento e supervisão do sistema, realizando a geração do sinal *PWM*, aquisição das grandezas elétricas e comunicação entre o conversor e os dispositivos externos.

Figura 52 - Placa de Controle do Conversor CC-CC.



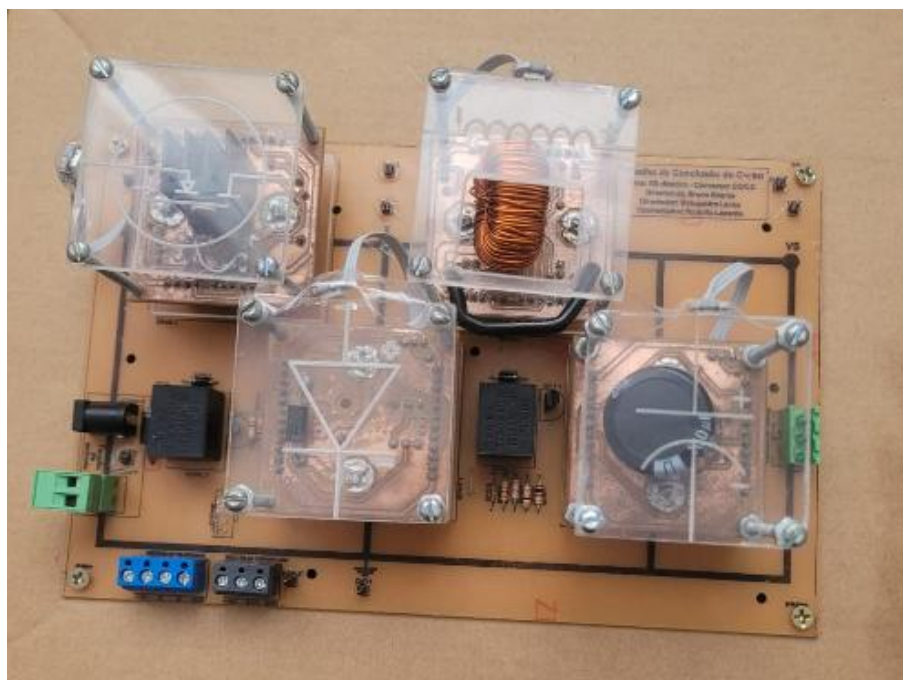
Fonte: do autor.

Nessa placa estão integrados o microcontrolador STM32F411, os circuitos de condicionamento de sinais, os módulos de comunicação serial e *Bluetooth*, além das conexões destinadas à interface com a placa de potência. A placa de controle possui papel fundamental no funcionamento do sistema, sendo responsável pela geração do sinal *PWM* utilizado no acionamento do conversor, pela realização do monitoramento e depuração das variáveis do sistema, pela comunicação *Bluetooth* para acompanhamento dos valores medidos no kit e pelo controle dos *LEDs* indicativos de erro presentes nas placas móveis, auxiliando na identificação de falhas de montagem e conexões incorretas.

6.1.3 Placas Móveis

Após a integração dos módulos desenvolvidos, obteve-se o conjunto completo do kit didático interativo, apresentado na Figura 53.

Figura 53 - Placas Móveis conectadas na Placa de Potência.



Fonte: do autor.

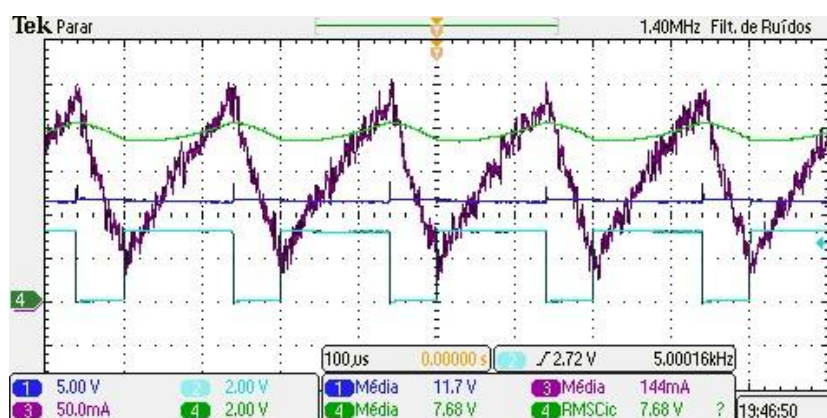
Observa-se que a arquitetura modular adotada permitiu a organização física do sistema de forma didática e intuitiva, favorecendo a visualização dos componentes e a compreensão do funcionamento dos conversores CC-CC. Além disso, foram adicionadas placas de acrílico sobre as placas móveis, contendo representações visuais dos componentes eletrônicos e indicações de polaridade, auxiliando na identificação correta da posição e orientação de cada elemento durante a montagem. Essa abordagem torna o processo mais intuitivo, facilita o entendimento das topologias implementadas e reduz a ocorrência de erros de conexão e posicionamento dos componentes.

6.2 Resultados do Conversor Buck

A Figura 54 apresenta as formas de onda obtidas durante o ensaio experimental do

conversor Buck desenvolvido. O canal 1, representado pela cor azul, corresponde à tensão de entrada; o canal 2, na cor ciano, representa o sinal PWM; o canal 3, na cor roxa, corresponde à corrente no indutor; e o canal 4, na cor verde, representa a tensão de saída do conversor. Para a realização deste ensaio, foram utilizados como parâmetros de operação uma tensão de entrada de 12 V, frequência de chaveamento de 5 kHz e ciclo de trabalho de 70%.

Figura 54 - Formas de onda do conversor Buck operando em modo *CCM*.

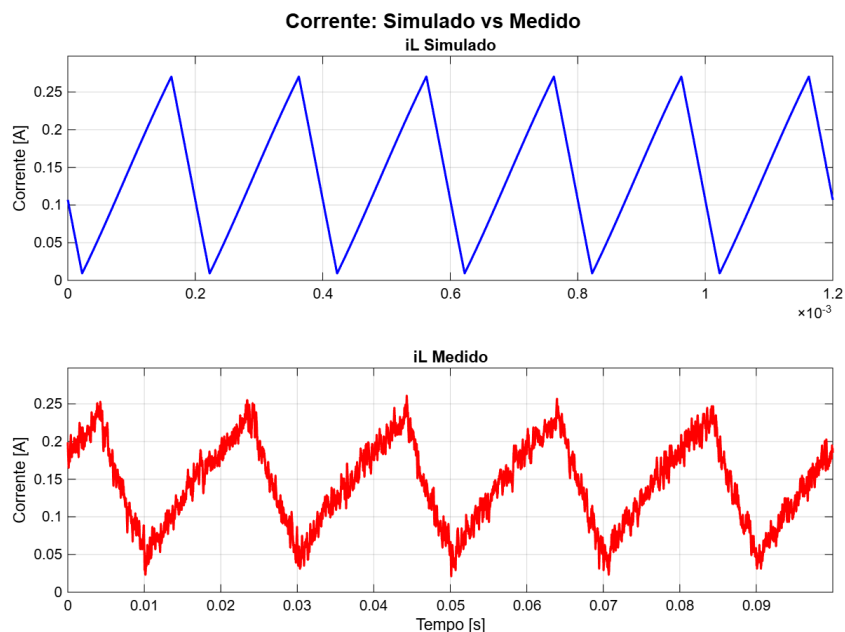


Fonte: do autor.

Observa-se que a tensão de saída apresentou comportamento compatível com o esperado teoricamente para essa topologia, permanecendo inferior à tensão de entrada devido ao ciclo de trabalho aplicado ao sinal *PWM*.

Para uma análise mais detalhada do comportamento da corrente no indutor, a Figura 55 apresenta a comparação entre os resultados simulados e experimentais do conversor Buck operando em modo CCM. Observa-se que a corrente apresentou comportamento compatível com o esperado teoricamente para essa topologia.

Figura 55 - Corrente no indutor do Buck em modo *CCM*: valores simulados e medidos.

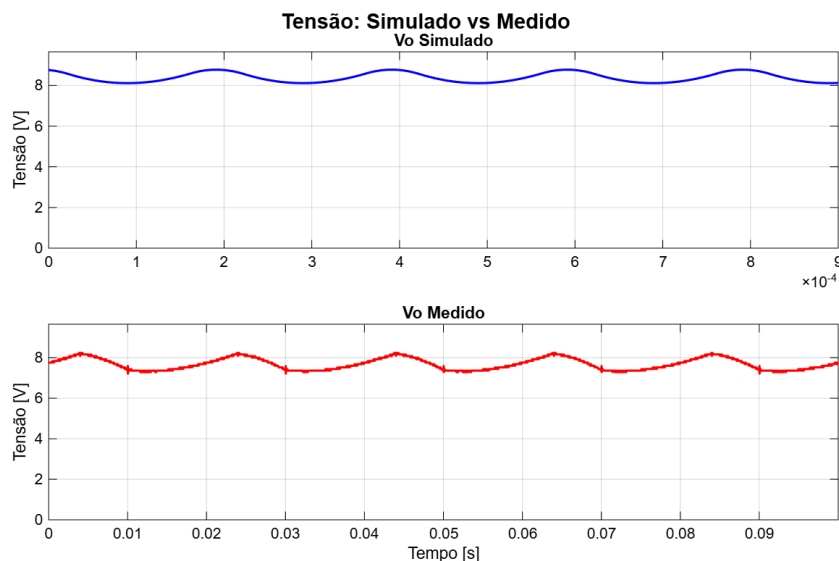


Fonte: do autor.

Além disso, é possível observar na Figura 55 que a corrente no indutor não atinge o valor zero em nenhum instante do período de chaveamento, permanecendo acima desse valor durante todo o intervalo de operação antes de voltar a variar. Esse comportamento caracteriza o modo de condução contínua.

Com os resultados apresentados na Figura 56, verificou-se que a tensão de saída do conversor Buck operando em modo CCM apresentou reduzido nível de *ripple* tanto na simulação quanto nos resultados experimentais.

Figura 56 - Tensão de saída do Buck em modo CCM: valores simulados e medidos.



Fonte: do autor.

Apesar da presença do *ripple* característico do processo de chaveamento, observa-se que o capacitor de saída foi capaz de atenuar significativamente a componente alternada presente na tensão de saída, contribuindo para a estabilidade do conversor e para a obtenção de uma tensão com baixo nível de ondulação.

Com o objetivo de comparar parâmetros relevantes do sistema como tensão média na carga (V_o) e corrente média indutor (I_L), elaborou-se a Tabela 13.

Tabela 13 - Valores de tensão e corrente média no Buck: medição versus calculado.

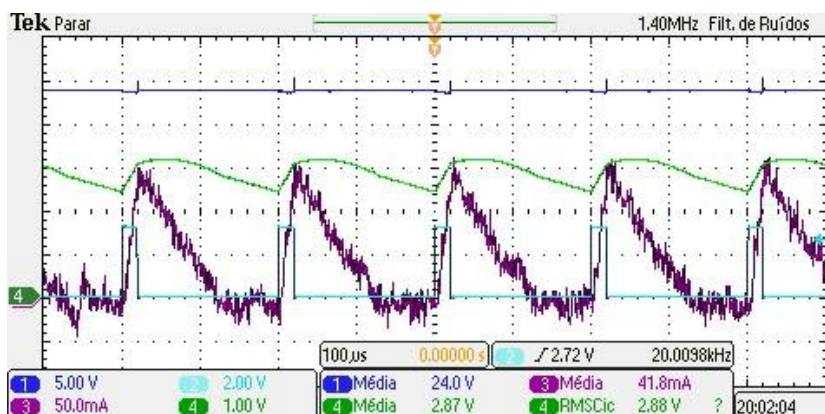
Tipo de valor	V_o (V)	I_L (mA)
Medido	7,68	140
Calculado	8,4	144

Fonte: do autor.

A comparação entre os valores simulados e experimentais resultou em erro aproximado de 8,57% para a tensão de saída e 2,76% para a corrente de saída, indicando boa concordância entre os resultados obtidos. As diferenças observadas podem estar associadas a fatores não ideais presentes no sistema real, como perdas nos componentes (por exemplo o diodo e MOSFET), tolerâncias dos dispositivos eletrônicos e limitações dos instrumentos de medição.

A Figura 57 apresenta outra resposta experimental do conversor Buck desenvolvido, porém em modo descontínuo agora.

Figura 57 - Formas de onda do conversor Buck operando em modo *DCM*.

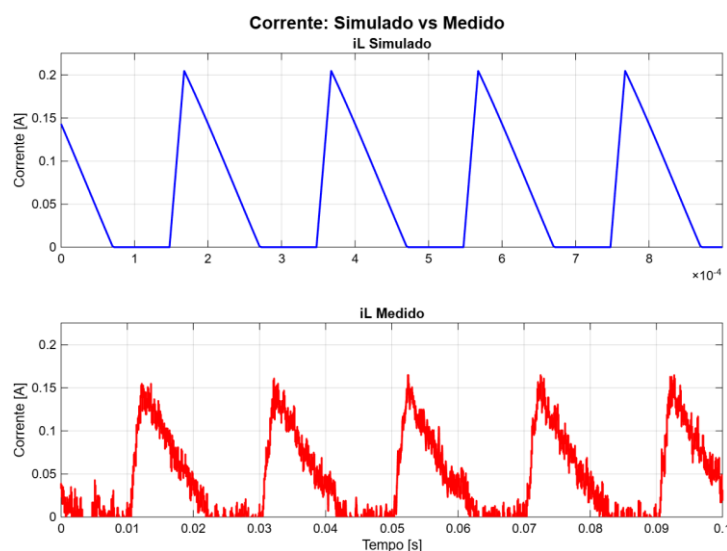


Fonte: do autor.

Observa-se que a tensão de saída apresentou comportamento característico da operação em modo de condução descontinua, sendo possível identificar maior oscilação na tensão de saída e uma forma de onda da corrente típica desse modo de operação.

Na Figura 58, observa-se tanto na simulação quanto na medição experimental o comportamento característico da corrente no modo de condução descontinua.

Figura 58 - Corrente no indutor do Buck em modo *DCM*: valores simulados e medidos.

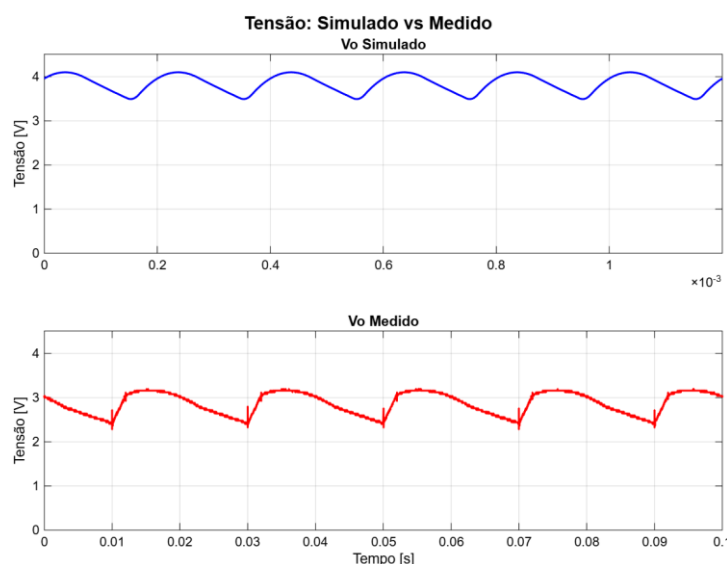


Fonte: do autor.

Nota-se na Figura 58 que a corrente atinge o valor zero, permanece nesse estado durante um intervalo de tempo e posteriormente volta a oscilar no próximo ciclo de chaveamento. Esse comportamento ocorre devido à descarga completa da energia armazenada no indutor antes do início do próximo período de chaveamento, caracterizando o modo de condução descontínua e validando o comportamento descrito anteriormente.

Na Figura 59 é apresentada a oscilação da tensão de saída obtida tanto na simulação quanto na medição experimental.

Figura 59 - Tensão de saída do Buck em modo DCM: valores simulados e medidos.



Fonte: do autor.

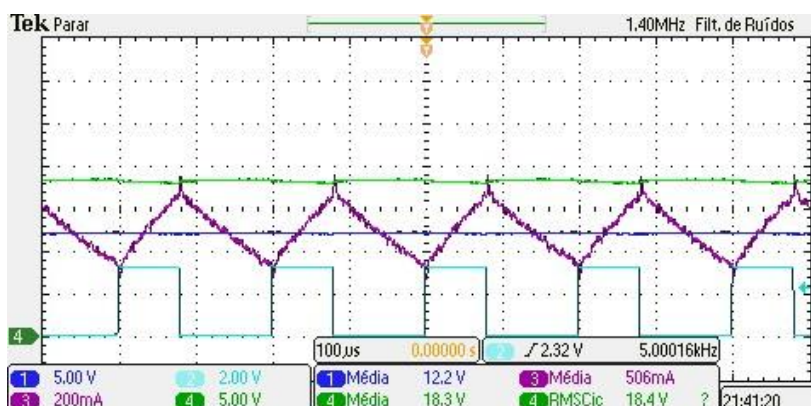
Observa-se que as formas de onda acima apresentam comportamento semelhante, evidenciando a presença do *ripple* característico do processo de chaveamento do conversor em modo descontínuo. Além disso, verifica-se que os resultados medidos se aproximam dos valores simulados, validando o funcionamento adequado do circuito implementado.

De maneira geral, os resultados obtidos para o conversor Buck demonstraram comportamento compatível com o esperado teoricamente, tanto em modo de condução contínua quanto descontínua. Além disso, os resultados simulados e experimentais validam o funcionamento adequado da topologia implementada.

6.3 Resultados do Conversor Boost

A Figura 60 apresenta os resultados experimentais obtidos para o conversor Boost implementado no kit didático, utilizando tensão de entrada de 12 V, frequência de chaveamento de 5 kHz e ciclo de trabalho de 40%.

Figura 60 - Formas de onda do conversor Boost operando em modo *CCM*.

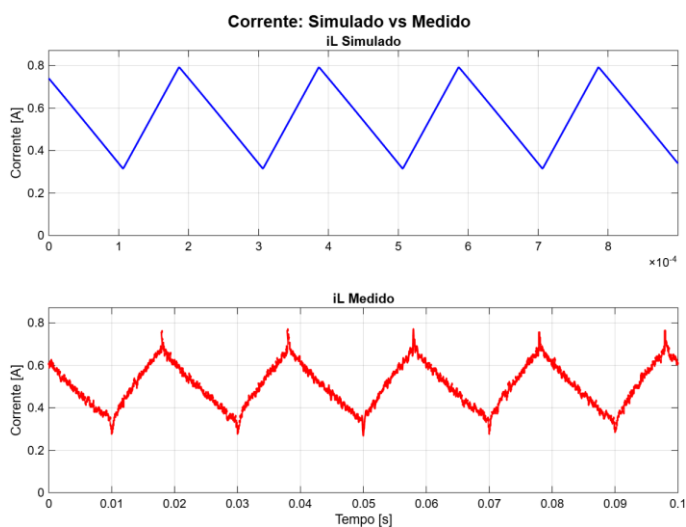


Fonte: do autor.

Por meio das formas de onda obtidas, é possível identificar o comportamento característico da topologia Boost, na qual a tensão de saída assume valores superiores à tensão de entrada. Esse comportamento ocorre em função do acionamento *PWM*, responsável pelo controle do armazenamento e transferência de energia no indutor durante o processo de chaveamento.

Com o objetivo de comparar os resultados simulados e experimentais referentes à corrente no indutor, a Figura 61 apresenta as formas de onda obtidas para o conversor operando em modo de condução contínua.

Figura 61 - Corrente no indutor do Boost em modo *CCM*: valores simulados e medidos.

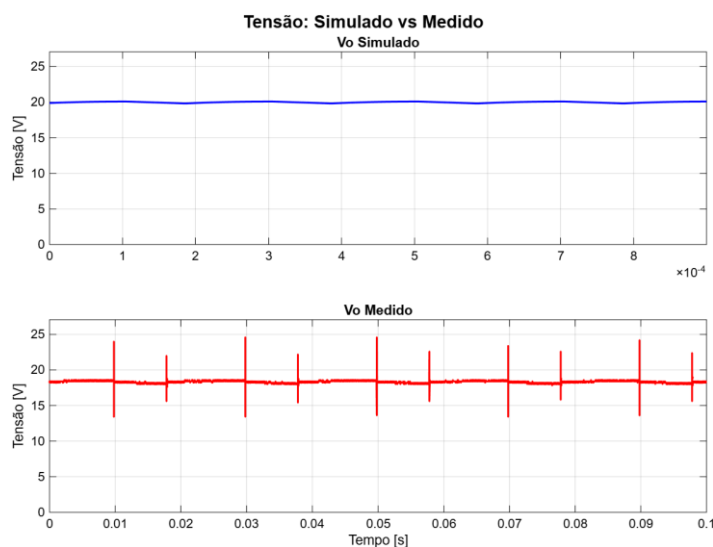


Fonte: do autor.

Analisando a Figura 61, observa-se que a corrente no indutor permaneceu contínua durante todo o período de operação, sem atingir o valor zero, caracterizando a operação em modo CCM. Além disso, verifica-se boa correspondência entre os resultados simulados e os experimentais.

A Figura 62 apresenta a comparação entre as tensões de saída obtidas na simulação e na implementação prática do circuito.

Figura 62 - Tensão de saída do Boost em modo *CCM*: valores simulados e medidos.



Fonte: do autor.

Verifica-se que as formas de onda apresentaram comportamento semelhante, demonstrando coerência entre os resultados teóricos e experimentais.

Com o objetivo de avaliar a relação entre os valores teóricos e experimentais do sistema, foram comparados os parâmetros V_o e I_L , conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 - Valores de tensão e corrente média no Boost: medição versus calculado

Tipo de valor	V_o (V)	I_L (mA)
Medido	18,3	506
Calculado	20	556

Fonte: do autor.

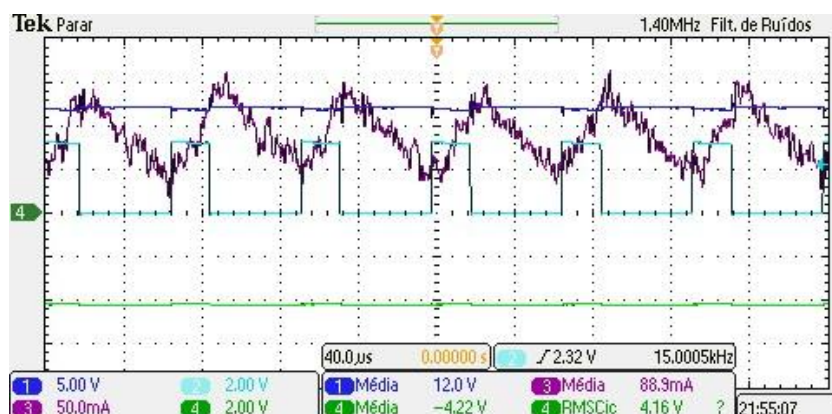
A partir dos resultados obtidos, verificou-se uma diferença aproximada de 8,5% para a tensão de saída e 8,99% para a corrente no indutor. Apesar dessas variações, os resultados experimentais apresentaram comportamento coerente com os valores previstos teoricamente, evidenciando o funcionamento adequado do conversor. As diferenças observadas podem ser justificadas conforme descrito na Seção 6.2

De forma geral, os testes realizados com o conversor Boost evidenciaram funcionamento adequado da topologia implementada, apresentando comportamento compatível com o previsto teoricamente e resultados experimentais próximos aos valores simulados.

6.4 Resultados do Conversor Buck-Boost

A Figura 63 apresenta os resultados experimentais obtidos para o conversor Buck-Boost operando em modo abaixador utilizando tensão de entrada de 12 V, frequência de chaveamento de 15 kHz e ciclo de trabalho de 30%, de modo a operar com tensão de saída inferior à tensão de entrada.

Figura 63 - Formas de onda do conversor Buck-Boost operando em modo abaixador

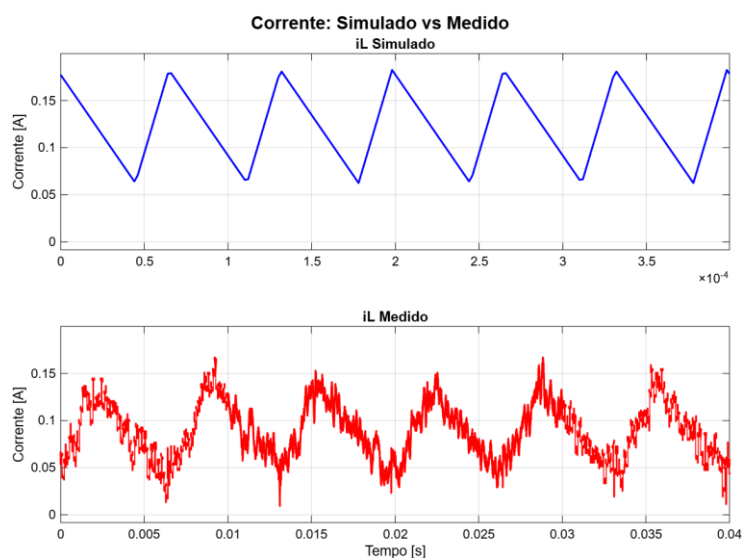


Fonte: do autor.

A partir das formas de onda obtidas, verifica-se que o conversor apresentou comportamento compatível com a operação em modo abaixador, fornecendo tensão de saída com magnitude inferior à tensão de entrada. Além disso, observa-se a inversão de polaridade característica da topologia Buck-Boost, evidenciada pelo comportamento da tensão de saída durante os ensaios experimentais.

Com o objetivo de comparar os resultados simulados e experimentais referentes à corrente no indutor, a Figura 64 apresenta as formas de onda obtidas durante a operação do conversor.

Figura 64 - Corrente no indutor do Buck-Boost abaixador: simulação e medição

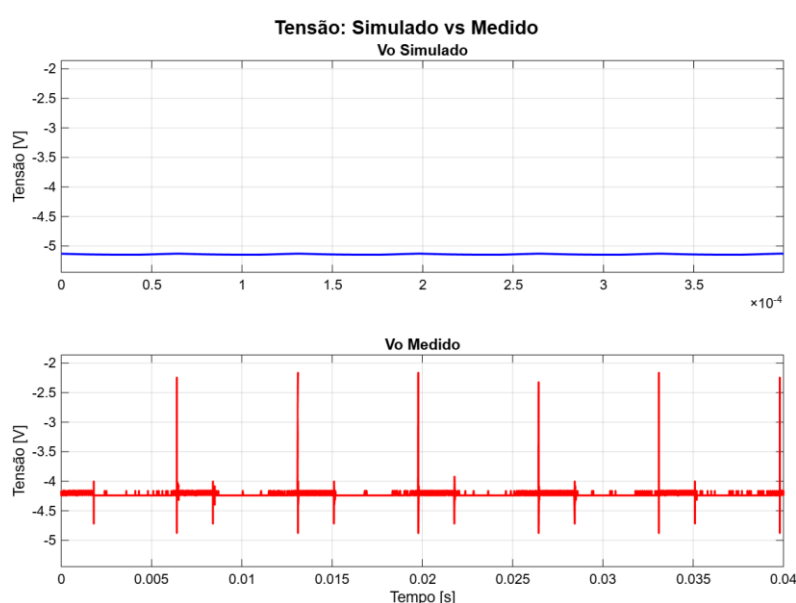


Fonte: do autor.

Analisando a Figura 64, percebe-se que a corrente no indutor apresentou comportamento semelhante entre a simulação e as medições realizadas no protótipo, embora sejam observados ruídos nas medições experimentais, os resultados obtidos permitem validar o funcionamento do circuito implementado.

A Figura 65 apresenta a comparação entre as tensões de saída simuladas e medidas experimentalmente para o conversor Buck-Boost operando em modo abaixador.

Figura 65 - Tensão de saída do Buck-Boost abaixador: simulação e medição.



Fonte: do autor.

Observa-se que os resultados obtidos experimentalmente apresentaram comportamento semelhante aos resultados simulados. Embora sejam observados ruídos nas medições experimentais, os resultados obtidos apresentam coerência com o modelo teórico e com a implementação prática do sistema.

Com o objetivo de avaliar a relação entre os valores teóricos e experimentais do sistema, foram comparados os parâmetros V_o e I_L , em módulo por conta dos valores negativos, conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Valores de tensão e corrente média no Buck-Boost abaixador: medição versus calculado.

Tipo de valor	V_o (V)	I_L (mA)
Medido	4,22	88,9
Calculado	5,12	122

Fonte: do autor.

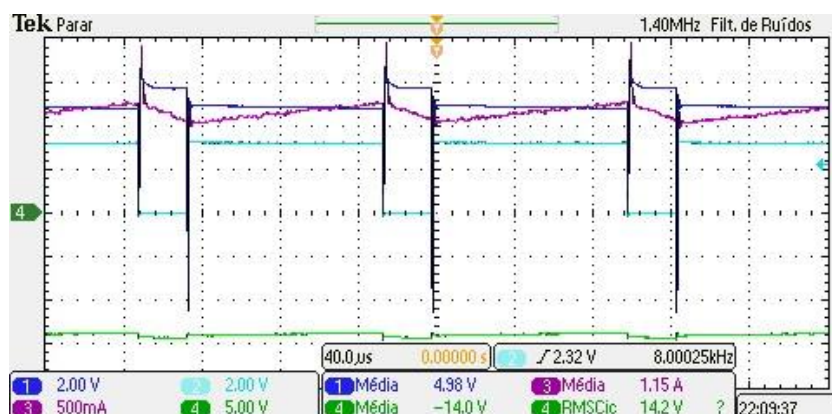
A comparação entre os valores teóricos e experimentais resultou em erro aproximado de 17,58% para a tensão de saída e 27,13% para a corrente no indutor. Apesar das diferenças observadas, os resultados experimentais apresentaram comportamento coerente com o funcionamento esperado do conversor Buck-Boost.

Os desvios observados podem estar associados às não idealidades presentes no circuito real, como a queda de tensão direta no diodo, queda de tensão na chave semicondutora, resistência série do indutor, perdas por chaveamento, entre outras possibilidades. Além disso, a topologia Buck-Boost apresenta maior sensibilidade às perdas e às oscilações decorrentes do processo de comutação, o que pode contribuir para diferenças mais significativas entre os resultados teóricos e experimentais.

Outro fator que pode ter influenciado os resultados é a possível limitação de corrente da fonte de alimentação utilizada nos ensaios, especialmente durante os instantes de comutação e variações transitórias da corrente no indutor, afetando diretamente o comportamento real do conversor em relação ao modelo teórico idealizado.

A Figura 66 apresenta os resultados experimentais obtidos para o conversor Buck-Boost operando em modo abaixador, utilizando tensão de entrada de 5 V, frequência de chaveamento de 8 kHz e ciclo de trabalho de 80% para operação com tensão de saída superior à tensão de entrada.

Figura 66 - Formas de onda do conversor Buck-Boost operando em modo elevador

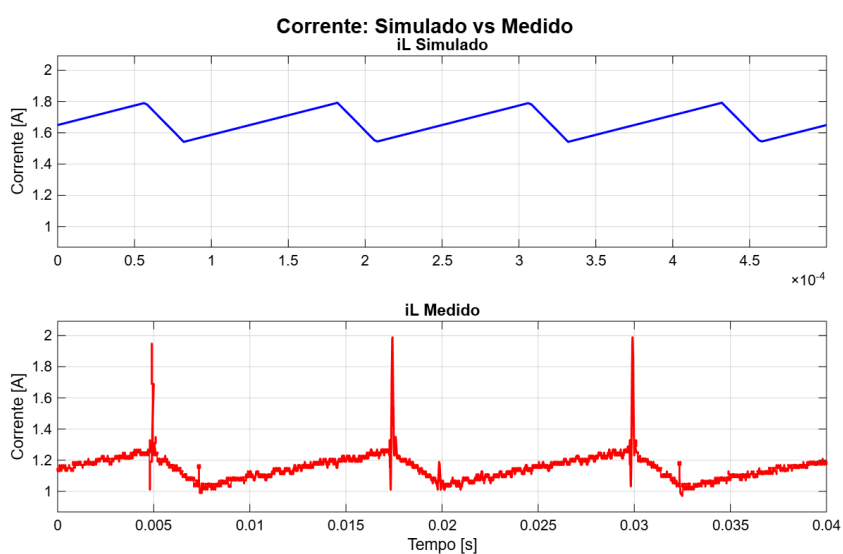


Fonte: do autor.

Por meio das formas de onda apresentadas, nota-se que o conversor operou adequadamente em modo elevador, fornecendo tensão de saída com magnitude superior à tensão de entrada e polaridade invertida, comportamento característico dessa topologia.

Para análise da corrente no indutor, a Figura 67 apresenta a comparação entre os resultados simulados e experimentais obtidos durante a operação do conversor em modo elevador.

Figura 67 - Corrente no indutor do Buck-Boost elevador: simulação e medição

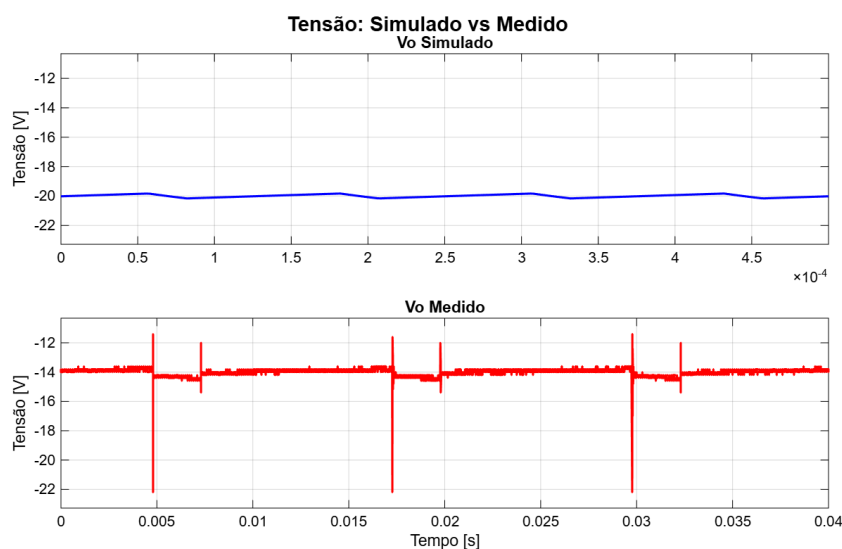


Fonte: do autor.

Percebe-se que os resultados experimentais apresentam ruídos nas medições experimentais, porém mantêm comportamento próximo aos resultados simulados, demonstrando o correto funcionamento do circuito implementado. Além disso, observa-se que a corrente permaneceu acima do valor zero durante o período de operação, caracterizando o funcionamento em modo de condução contínua.

Na Figura 68 é apresentada a comparação entre as tensões de saída simuladas e medidas experimentalmente para o conversor Buck-Boost operando em modo elevador.

Figura 68 - Tensão de saída do Buck-Boost elevador: simulação e medição.



Fonte: do autor.

Verifica-se que as formas de onda obtidas experimentalmente apresentaram comportamento semelhante às formas simuladas apesar da presença de ruídos nas medições experimentais.

Com a finalidade de analisar a proximidade entre os resultados teóricos e experimentais do conversor Buck-Boost, foram comparados os valores de V_o e I_L . Para essa análise, foram considerados os valores em módulo, devido à inversão de polaridade característica dessa topologia, conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores de tensão e corrente média no Buck-Boost elevador: medição versus calculado

Tipo de valor	V_o (V)	I_L (A)
Medido	14	1,15
Calculado	20	1,67

Fonte: do autor.

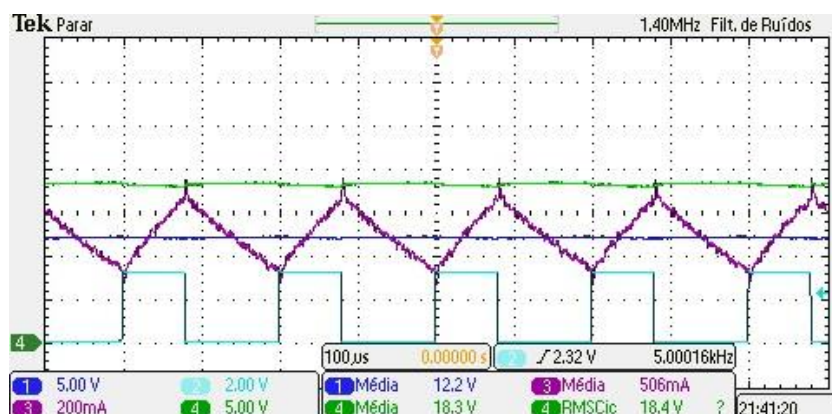
A comparação entre os valores teóricos e experimentais resultou em erro aproximado de 30% para a tensão de saída e 31,14% para a corrente no indutor. Apesar das diferenças observadas, já discutidas anteriormente na análise do conversor Buck-Boost abaixador, os resultados experimentais mantiveram comportamento compatível com o esperado teoricamente para a topologia desenvolvida, evidenciando o funcionamento adequado do conversor durante os ensaios realizados.

6.5 Integração e Validação do Aplicativo com o Kit Didático

Com o objetivo de validar o funcionamento do aplicativo desenvolvido em conjunto com o kit didático, foram realizados ensaios experimentais comparando as formas de onda obtidas no osciloscópio com os valores exibidos no sistema de monitoramento via *Bluetooth*. Além disso, também foi analisado o comportamento dos *LEDs* indicativos presentes nas placas móveis, responsáveis pela verificação da montagem correta da topologia selecionada.

Inicialmente, a Figura 69 são apresentadas as formas de onda obtidas experimentalmente durante o funcionamento de um conversor Boost, permitindo a análise das grandezas elétricas monitoradas pelo sistema.

Figura 69 - Forma de onda experimentais utilizadas na validação do funcionamento



Fonte: do autor.

Na sequência, a Figura 70 apresenta os valores exibidos no aplicativo durante o mesmo ensaio experimental realizado no osciloscópio.

Figura 70 - Painel de monitoramento do aplicativo durante o funcionamento do conversor



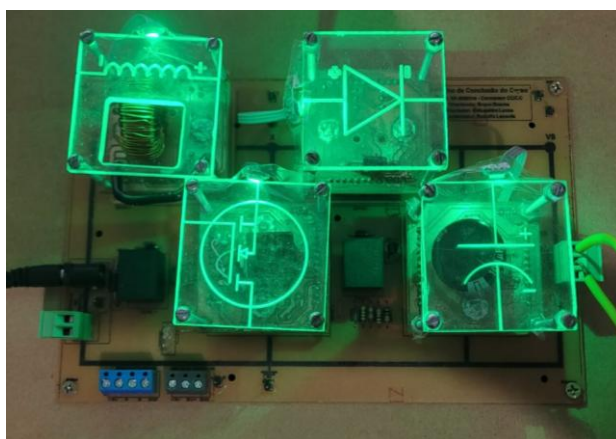
Fonte: do autor.

Observa-se que os valores apresentados no aplicativo demonstraram coerência com as medições realizadas experimentalmente, validando o funcionamento adequado do sistema de

aquisição de dados, comunicação *Bluetooth* e processamento das informações enviadas pelo microcontrolador. Entretanto, verificou-se que a medição da corrente apresentou valores inconsistentes durante os ensaios realizados. Dessa forma, a investigação detalhada dessa limitação será abordada em trabalhos futuros, com o objetivo de identificar se a origem do problema está relacionada ao *hardware* de aquisição ou ao processamento realizado via *software*.

Por fim, a Figura 71 apresenta os *LEDs* indicativos presentes no kit didático durante a montagem correta da topologia do conversor.

Figura 71 - Indicação visual de funcionamento correto da topologia implementada

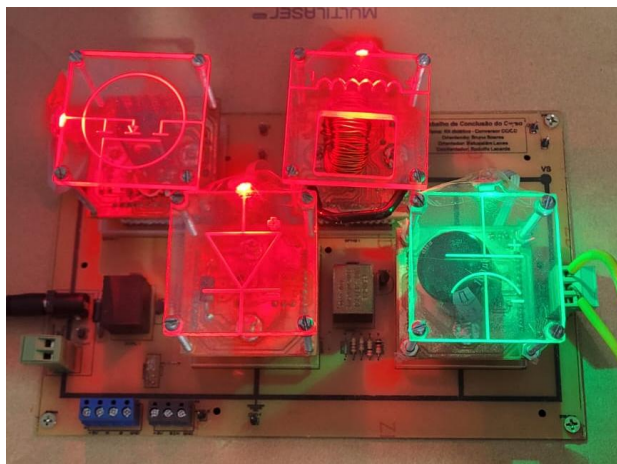


Fonte: do autor.

Assim valida-se que quando a montagem da topologia é realizada corretamente, o sistema habilita o funcionamento do conversor e os *LEDs* indicativos sinalizam a condição adequada de operação.

Por outro lado, caso algum componente seja inserido em posição incorreta ou em uma numeração incompatível com a topologia selecionada, como exemplificado na Figura 72, o sistema identifica automaticamente a inconsistência e aciona o *LED* vermelho indicativo de erro, impedindo o funcionamento do kit até que a montagem seja corrigida.

Figura 72 - Indicação visual de erro de montagem no kit didático



Fonte: do autor.

Além da sinalização visual presente no *hardware*, o sistema também exibe a falha correspondente no aplicativo, conforme apresentado na Figura 73. Essa funcionalidade auxilia o usuário na identificação do componente conectado incorretamente, tornando o processo de diagnóstico e correção intuitivos.

Figura 73 - Exibição da falha de montagem no aplicativo de monitoramento

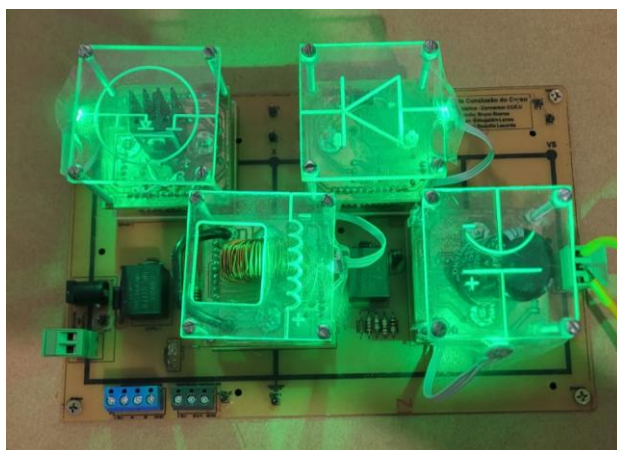


Fonte: do autor.

Esse mecanismo foi desenvolvido com o objetivo de aumentar a segurança do sistema, evitar conexões incorretas entre os componentes e auxiliar o usuário durante o processo de montagem das diferentes topologias dos conversores CC-CC. Além disso, o *LED* associado ao capacitor permanece na cor verde, indicando que a saída do sistema está em condição adequada de operação. Essa abordagem auxilia o aluno na identificação do componente responsável pela inconsistência da montagem, facilitando o processo de diagnóstico e correção do erro apresentado.

Por fim, o sistema também é capaz de identificar condições de alimentação fora da faixa de operação previamente estabelecida, ilustrado na Figura 74.

Figura 74 - Indicação da falta de alimentação no kit didático



Fonte: do autor.

Nessas situações, embora a topologia do conversor seja reconhecida corretamente, o funcionamento do kit é bloqueado de forma automática, impedindo o acionamento do sistema até que a tensão de entrada seja ajustada para valores adequados.

Além da sinalização visual presente no *hardware*, essa condição também é exibida no aplicativo de monitoramento, conforme apresentado na Figura 90, informando ao usuário que a alimentação aplicada se encontra fora da faixa permitida para a operação do sistema.

Figura 75 - Exibição da falha de alimentação no aplicativo de monitoramento



Fonte: do autor.

Essa funcionalidade foi implementada com o objetivo de aumentar a segurança do kit didático e proteger os componentes eletrônicos contra possíveis condições inadequadas de operação.

6.6 Considerações Parciais

Os resultados obtidos ao longo deste capítulo permitiram validar o funcionamento geral do kit didático interativo desenvolvido para o estudo de conversores CC-CC. Os ensaios experimentais realizados demonstraram a correta operação das topologias Buck, Boost e Buck-Boost, evidenciando a capacidade do sistema em realizar tanto a redução quanto a elevação e inversão da tensão de saída, conforme previsto teoricamente.

As formas de onda analisadas experimentalmente apresentaram comportamento compatível com os princípios de funcionamento discutidos na fundamentação teórica, especialmente em relação ao chaveamento PWM, ao comportamento da corrente no indutor e à estabilização da tensão de saída proporcionada pelos elementos passivos do circuito. Além disso, os ensaios permitiram identificar adequadamente os modos de condução contínuo e descontinuo dos conversores, evidenciando a coerência entre os resultados simulados e

experimentais.

Os testes realizados também demonstraram a funcionalidade dos circuitos de condicionamento de sinais desenvolvidos para adequação das medições de tensão e corrente à faixa de operação do microcontrolador STM32F411. Da mesma forma, o sistema de identificação das placas móveis por meio de resistores apresentou funcionamento satisfatório, permitindo distinguir corretamente os diferentes componentes conectados ao kit, além de contribuir para a proteção contra conexões incorretas.

A integração entre *hardware* e *software* mostrou-se eficiente durante os ensaios realizados. O *firmware* implementado foi capaz de gerar os sinais PWM necessários ao acionamento dos conversores, realizar a aquisição das variáveis elétricas e estabelecer comunicação com o aplicativo de monitoramento por meio do módulo *Bluetooth* HC-05. O aplicativo desenvolvido possibilitou o acompanhamento em tempo real das variáveis do sistema, tornando a interação com o kit mais intuitiva e adequada ao contexto didático proposto.

Embora tenham sido observadas diferenças entre os valores teóricos e experimentais em algumas condições de operação, especialmente na topologia Buck-Boost, os resultados permaneceram coerentes com o comportamento esperado dos conversores. Essas diferenças podem ser atribuídas às não idealidades dos componentes eletrônicos, perdas associadas ao chaveamento, efeitos parasitas, limitações dos instrumentos de medição e possíveis restrições impostas pela fonte de alimentação utilizada durante os ensaios.

Além disso, durante os testes relacionados à leitura da corrente por meio do sensor ACS712, observou-se a necessidade de investigações adicionais para determinar se as divergências identificadas estão associadas ao circuito de *hardware* desenvolvido ou ao processamento realizado pelo *software* de aquisição. Apesar disso, o kit didático permite a realização da medição da corrente diretamente no circuito por meio de ponteira de corrente conectada ao osciloscópio, possibilitando a análise experimental do comportamento da corrente no indutor mesmo diante de possíveis limitações no sistema de aquisição embarcado.

Dessa forma, os resultados apresentados demonstram que os objetivos propostos para o desenvolvimento do kit didático foram atingidos, validando tanto a estrutura física quanto os sistemas de controle, monitoramento, proteção e identificação implementados no projeto.

7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir do desenvolvimento e validação do kit didático interativo para o ensino de conversores CC-CC, bem como as principais contribuições alcançadas ao longo deste trabalho. São discutidos os resultados relacionados ao desenvolvimento das placas de potência e controle, ao sistema de identificação dos componentes, aos circuitos de condicionamento de sinais, à comunicação *Bluetooth* e ao aplicativo de monitoramento desenvolvido para interação com o usuário.

Além disso, são analisados os resultados experimentais obtidos durante os testes realizados com as topologias Buck, Boost e Buck-Boost, avaliando o funcionamento do sistema proposto e sua aplicação no contexto didático do ensino de Eletrônica de Potência.

Por fim, são apresentadas sugestões de trabalhos futuros e possíveis melhorias para o kit desenvolvido, visando ampliar suas funcionalidades, aumentar sua robustez e expandir suas aplicações em atividades laboratoriais e acadêmicas.

7.1 Conclusões

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de um kit didático interativo voltado ao estudo de conversores CC-CC, contemplando as topologias Buck, Boost e Buck-Boost. O projeto foi desenvolvido com o objetivo de proporcionar uma ferramenta de apoio ao ensino de eletrônica de potência, integrando conceitos teóricos, circuitos de potência, sistemas de aquisição de sinais, controle embarcado e monitoramento em tempo real.

Inicialmente, foram abordados os fundamentos teóricos relacionados ao funcionamento dos conversores CC-CC, incluindo os princípios de operação das topologias Buck, Boost e Buck-Boost, além da análise dos modos de condução contínuo e descontínuo. Também foram apresentados os equacionamentos utilizados para o dimensionamento dos componentes principais dos conversores, como indutores e capacitores, permitindo estabelecer uma base teórica consistente para o desenvolvimento do sistema proposto.

No desenvolvimento do *hardware*, foram implementados os circuitos de potência e os sistemas auxiliares necessários para o funcionamento do kit didático. Entre esses sistemas, destacam-se os circuitos de condicionamento de sinais para leitura de corrente e tensão,

desenvolvidos com amplificadores operacionais LM358, possibilitando a adequação dos sinais à faixa de operação do conversor analógico-digital do microcontrolador STM32F411. Para a medição da corrente no indutor, foi utilizado o sensor ACS712 associado a estágios de compensação de offset, ajuste de ganho e proteção da entrada analógica. Já para a leitura da tensão na topologia Buck-Boost, foi desenvolvido um circuito baseado em retificador de precisão, permitindo a leitura adequada de tensões negativas pelo microcontrolador.

Outro aspecto relevante do projeto foi o desenvolvimento do sistema de identificação automática das placas móveis por meio de resistores. Essa abordagem permitiu que o microcontrolador reconhecesse corretamente os diferentes componentes conectados ao kit, como capacitores, indutores, diodos e MOSFETs. Além da identificação, o sistema também incorporou mecanismos de proteção contra conexões incorretas, utilizando relés para bloquear a alimentação do conversor em situações inadequadas, contribuindo para a segurança do equipamento e dos usuários.

O sistema embarcado desenvolvido demonstrou capacidade de gerar sinais PWM para acionamento dos conversores, realizar aquisição de dados e transmitir informações em tempo real por meio do módulo *Bluetooth* HC-05. A utilização da placa STM32F411 mostrou-se adequada devido à elevada velocidade de conversão do *ADC*, permitindo maior capacidade de processamento e aquisição das variáveis elétricas do sistema. Além disso, o aplicativo de monitoramento desenvolvido tornou o kit mais interativo e apropriado para aplicações didáticas, permitindo a visualização remota das variáveis do conversor.

Os resultados experimentais obtidos validaram o funcionamento das topologias desenvolvidas. As formas de onda analisadas apresentaram comportamento compatível com os princípios teóricos dos conversores CC-CC, incluindo a observação dos modos de condução contínuo e descontínuo. Também foi possível verificar o funcionamento adequado do chaveamento PWM, da transferência de energia nos indutores e da atuação dos capacitores na redução do *ripple* de tensão.

As comparações entre os resultados teóricos e experimentais demonstraram concordância para grande parte dos ensaios realizados.

Durante os testes relacionados à leitura da corrente por meio do sensor ACS712, também foram identificadas divergências que ainda necessitam de investigação mais aprofundada para determinar se sua origem está associada ao *hardware* desenvolvido ou ao

processamento realizado pelo *software* de aquisição. Apesar disso, o kit permite a medição direta da corrente por meio de ponteira de corrente conectada fisicamente ao circuito, possibilitando a análise experimental do comportamento da corrente no indutor mesmo diante de possíveis limitações do sistema de aquisição embarcado.

Dessa forma, conclui-se que os objetivos propostos neste trabalho foram atingidos, uma vez que o kit didático desenvolvido foi capaz de integrar conceitos teóricos e práticos de eletrônica de potência em uma plataforma funcional, interativa e adequada ao contexto educacional. O sistema desenvolvido demonstrou potencial para utilização em atividades de ensino, demonstrações experimentais e apoio ao aprendizado de conversores CC-CC, contribuindo para a compreensão prática dos fenômenos envolvidos no funcionamento dessas topologias.

7.2 Trabalhos Futuros

Como proposta de continuidade deste trabalho, podem ser realizadas melhorias tanto no *hardware* quanto no *software* do kit didático, com o objetivo de ampliar suas funcionalidades, robustez e potencial de aplicação em atividades acadêmicas e laboratoriais.

Uma das principais possibilidades de expansão do projeto consiste na implementação de estratégias de controle em malha fechada para os conversores CC-CC. Atualmente, o sistema opera predominantemente em malha aberta, permitindo o ajuste manual do ciclo de trabalho do sinal PWM. Dessa forma, trabalhos futuros podem contemplar o desenvolvimento de controladores capazes de regular automaticamente variáveis como tensão e corrente de saída, utilizando técnicas clássicas, como controladores PI e PID, ou métodos mais avançados de controle digital. A utilização do microcontrolador STM32F411 fornece capacidade computacional suficiente para implementação dessas estratégias, permitindo explorar conceitos relacionados à teoria de controle aplicada à eletrônica de potência.

Outra possibilidade de aprimoramento está relacionada à expansão dos recursos didáticos do kit por meio da integração de diferentes cargas e sensores. O sistema desenvolvido permite a realização de práticas experimentais utilizando lâmpadas incandescentes como carga, possibilitando a visualização prática do comportamento dos conversores em aplicações reais de iluminação e variação de potência.

Além disso, o kit também possui potencial para integração com sensores e dispositivos externos já previstos na estrutura física do projeto, como encoder e sensor de temperatura. A utilização de encoders possibilita a realização de atividades relacionadas ao controle e monitoramento de velocidade e posição angular, ampliando a aplicação do sistema em estudos de acionamento e automação. Já a integração com sensores de temperatura permite explorar práticas envolvendo aquisição de dados, monitoramento térmico e sistemas de proteção, contribuindo para aplicações interdisciplinares nas áreas de eletrônica, instrumentação e controle.

Também podem ser desenvolvidas melhorias no sistema de aquisição de sinais, especialmente na leitura da corrente por meio do sensor ACS712, visando investigar e reduzir as diferenças observadas experimentalmente. Nesse contexto, futuras pesquisas podem avaliar modificações no circuito de condicionamento analógico, aplicação de filtros digitais, técnicas de calibração e estratégias de processamento dos sinais adquiridos pelo *ADC* do microcontrolador.

Outra possibilidade de continuidade consiste no desenvolvimento de novas placas móveis para o kit didático, permitindo a inclusão de outras topologias de conversores estáticos, diferentes modelos de semicondutores e componentes adicionais. Essa expansão pode tornar o sistema ainda mais flexível e abrangente para utilização em disciplinas relacionadas à eletrônica de potência.

Por fim, trabalhos futuros também podem explorar melhorias na interface de monitoramento, incluindo novas funcionalidades no aplicativo desenvolvido, armazenamento de dados experimentais, geração automática de gráficos e integração com plataformas IoT, ampliando as possibilidades de análise, monitoramento remoto e utilização do kit em ambientes educacionais modernos.

|REFERÊNCIAS

ALLEGRO MICROSYSTEMS. Galvanically Isolated Linear Current Sensor IC with High Accuracy and 2.4kVRMS Isolation - ACS712| Allegro MicroSystems. 2026. Disponível em: <https://www.allegromicro.com/en/products/sense/current-sensor-ics/integrated-current-sensors/acs712>. Acesso em: 6 maio 2026.

BARBOSA, P. S. S. **SISTEMA FLEXÍVEL DE CONTROLE PARA AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE CONVERSORES ESTÁTICOS DE POTÊNCIA APLICADO A CONVERSORES CC/CC**. 2016. CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS Unidade Leopoldina, 2016. .

BARBOSA, P. S. S.; GREGÓRIO, J. B. **SISTEMA DE CONTROLE FLÉXIVEL COM MONITORAMENTO DE TENSÃO E CORRENTE**. COGENGE, 2015.

BOTTARELLI, M. G. **Conversores CC-CC Básicos Não Isolados Quadráticos de Três Níveis**. 2006. Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/88494>.

CAMPOS, J. M. L. **Proposta de um Módulo Didático para estudo de conversores cc-cc**. 2010. CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS Campus III - Leopoldina, 2010. .

CEFET-LP. Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia de Controle e Automação - Campus Leopoldina. 2022. Disponível em: https://www.eng-controleautomacao.leopoldina.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/196/2026/05/PPC_ENCAUT.pdf.

CURTOCIRCUITO. FT232R1 - FTDI. 2025. Disponível em: <https://curtocircuito.com.br/conversor-usb-serial-ft232rl-ftdi.html>. Acesso em: 17 dez. 2025.

CURTOCIRCUITO. Módulo Bluetooth Master - HC05. 2025. Disponível em: <https://curtocircuito.com.br/modulo-bluetooth-master-hc05.html>. Acesso em: 17 dez. 2025.

DUPCZAK, B. S. Protótipos Didáticos para o Ensino Dos Conversores CC-CC. Instituto Federal de Santa Catarina, v. 27, n. 3, p. 244–253, 26 set. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.18618/REP.2022.3.0033>.

FERREIRA, A. L. S.; ALVES, A. S. C.; MARTINS, C. H. N.; MUNIZ, C. A.; FARIA, P. V. A.; CÉSAR, T. C.; GOMES, F. J. O Problema da Defasagem entre a Teoria e a Prática: Proposta de uma Solução de Compromisso Para Um Problema Clássico de Controle. COBENGE, 2006.

FONSECA, A. B. A. **Desenvolvimento de Kit Instrucional de Conversor CC-CC com Topologia Boost**. 2019. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019. Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/15805/1/TD_COELE_2019_1_087.pdf.

FONSECA, N. R.; CARVALHO, C. E. R. de; GUERRA, F. F. Integração de Aulas Teóricas e Práticas como Recurso Didático no Ensino Técnico. Instituto Federal De Minas Gerais, v. 24, n. 2, p. 120–126, 1 set. 2020. Disponível em:

<https://doi.org/10.4025/arqmudi.v24i2.54462>.

HART, D. W. **Electrónica de potencia**. Última reimp. Madrid: Pearson educación, 2008.

LEÃO, A. R. **Desenvolvimento de Kits Didáticos para Aulas Práticas de Eletrônica de Potência: Conversores Buck, Boost e Buck/Boost**. 2016. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016. Disponível em:
http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/bitstream/1/6073/3/CM_COELE_2016_1_01.pdf.

LOPES, B. M. **MÓDULO DIDÁTICO PARA EMULAÇÃO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS**. 2018. CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS - UNIDADE LEOPOLDINA, 2018. .

MARTINS, M. S.; SOBRINHO, F. M. M. **Testes de Bancada para a Obtenção do Consumo de Corrente e Determinação dos Torques dos Servomotores em uma Aeronave Rádio Controlada Não Tripulada**. 2019. UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO, 2019. Disponível em:
https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/4449/2/MateusSM_ART.pdf.

MOURA, D. H. de; SILVA, P. R. S. B. da; FELICÍSSIMO, V. H. P.; NEVES, V. F. C. S. B. **Sistema de Verificação para Áreas Confinadas**. 2024. Sorocaba, 2024. Disponível em:
https://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/27679/1/mtecautoma%C3%A7aoindustrial_2024_2_davihenriquedemoura_sistemadeverificacaoparaareasconfinadas.pdf.

OLIVEIRA, J. H. D. **Projeto e Desenvolvimento de um Carregador de Bateria Através do Controle de um Conversor Buck**. 2014. Universidade Federal de Viçosa, 2014. Disponível em: <https://gesep.ufv.br/wp-content/uploads/2017/04/joao-2014.pdf>.

PINTO, E. C. **Desenvolvimento de um kit didático para o estudo de inversores de frequência**. 2025. Universidade Federal de Ouro Preto, 2025. Disponível em:
<http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/7821>.

QUEIROZ, I. S. de. **Diário de Saúde: Sistema de Registro de Evoluções Diárias Com Comunicação Bluetooth**. 2023. Universidade Federal do Amazonas, 2023. Disponível em:
https://riu.ufam.edu.br/bitstream/prefix/6725/8/TCC_IsadoraQueiroz.pdf.

RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência Dispositivos, circuitos e aplicações**. Florida: PEARSON, 2015.

RESENDE, M. L. **Modelagem e identificação de conversores CC-CC Buck, Boost e Buck-Boost**. 2015. CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO DE MINAS GERAIS Campus Leopoldina, 2015. .

SEDRA E SMITH. **MICROELECTRONIC CIRCUITS**. 5ª edição. New York Oxford: Adel S. Sedra, 2004.

SILVA. **Projeto de uma Fonte Chaveada baseada no Conversor Buck Síncrono**. 2023. 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/253977>.

SOUZA, L. F. S. de. **PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM GÊMEO VIRTUAL 3D APLICADO À AUTOMAÇÃO**. 2023. CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO DE MINAS GERAIS Campus Leopoldina, 2023. .

SOUZA, E. S. N.; DEMETINO, G. G. Desenvolvimento de um kit didático para experimentos de fundamentos de eletricidade. Bahia, 2019. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/erbase/article/view/8959/8860>. Acesso em: 28 maio 2026.

STMICROELECTRONICS. STM32F411CE. 2025. Disponível em: https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f411ce.html#st_description_sec-nav-tab. Acesso em: 17 dez. 2025.

VILELA, A. O. R. **Projeto e Construção de um Conversor Boost Controlado em Modo de Tensão**. 2021. Universidade Federal de Viçosa, 2021. Disponível em: <https://gesep.ufv.br/wp-content/uploads/2017/04/afranio.pdf>.

APÊNDICE A – CÓDIGO DO *FIRMWARE* DESENVOLVIDO PARA O KIT

Este apêndice apresenta o código-fonte completo do firmware desenvolvido para o microcontrolador STM32F411 utilizado no kit didático. O firmware é responsável pela identificação dos componentes conectados, geração do sinal PWM, aquisição das variáveis elétricas por meio do conversor analógico-digital, comunicação serial e Bluetooth, além do gerenciamento dos mecanismos de proteção e sinalização visual implementados no sistema.

```
#include <Arduino.h>
#include <Adafruit_NeoPixel.h>

/* ===== DEFINES ===== */
#define VREF          3.3f
#define PWM_PIN       PA9
#define PWM_FREQ      15000
#define SPRL          PC15
#define ECRL          PC14
#define LED_PIN       PC13
#define PIN_ENTRADA   PA0
#define PIN_SAIDA     PA5
#define PIN_CORRENTE  PA4
#define VOUT_DESEJADO 6.0f
#define FATOR_CORRENTE 0.042f

/* ===== LEDS RGB ===== */
#define LED_CBPMF_PIN PB15
#define LED_CBPMT_PIN PB14
#define LED_CBPMS_PIN PB13
#define LED_CBPMC_PIN PB12
#define NUM_LEDS 1

Adafruit_NeoPixel ledF(NUM_LEDS, LED_CBPMF_PIN, NEO_GRB + NEO_KHZ800);
Adafruit_NeoPixel ledG(NUM_LEDS, LED_CBPMT_PIN, NEO_GRB + NEO_KHZ800);
Adafruit_NeoPixel ledS(NUM_LEDS, LED_CBPMS_PIN, NEO_GRB + NEO_KHZ800);
Adafruit_NeoPixel ledC(NUM_LEDS, LED_CBPMC_PIN, NEO_GRB + NEO_KHZ800);

void setLED(Adafruit_NeoPixel &led, bool ok) {
    if (ok)
        led.setPixelColor(0, led.Color(0, 255, 0));
    else
        led.setPixelColor(0, led.Color(255, 0, 0));
    led.show();
}

void apagarLEDs() {
    ledF.setPixelColor(0, ledF.Color(0, 0, 0));
    ledG.setPixelColor(0, ledG.Color(0, 0, 0));
    ledS.setPixelColor(0, ledS.Color(0, 0, 0));
}
```

```

ledC.setPixelColor(0, ledC.Color(0, 0, 0));
ledF.show(); ledG.show(); ledS.show(); ledC.show();
}

/* ===== IDENTIFICAÇÃO ===== */
#define COMP_NENHUM 0
#define COMP_CAPACITOR 1
#define COMP_INDUTOR 2
#define COMP_DIODO 3
#define COMP_MOSFET 4

#define CONV_DESCONHECIDO 0
#define CONV_BUCK 1
#define CONV_BOOST 2
#define CONV_BUCKBOOST 3

#define POS_CBPMF 0
#define POS_CBPMT 1
#define POS_CBPMS 2
#define POS_CBPMS 3

struct ComponenteID {
    int tipo;
    int numero;
    bool polaridade;
    bool presente;
};

struct Intervalo {
    float vmin;
    float vmax;
    int tipo;
    int numero;
    bool polaridade;
};

const Intervalo TABELA[] = {
    {0.01f, 0.205f, COMP_MOSFET, 2, false},
    {0.205f, 0.31f, COMP_MOSFET, 1, false},
    {0.31f, 0.61f, COMP_DIODO, 2, false},
    {0.61f, 0.80f, COMP_DIODO, 1, false},
    {0.81f, 0.99f, COMP_INDUTOR, 3, false},
    {0.99f, 1.09f, COMP_INDUTOR, 2, false},
    {1.09f, 1.31f, COMP_INDUTOR, 1, false},
    {1.31f, 1.50f, COMP_CAPACITOR, 3, false},
    {1.50f, 1.70f, COMP_CAPACITOR, 2, false},
    {1.70f, 1.91f, COMP_CAPACITOR, 1, false},
    {1.91f, 2.035f, COMP_CAPACITOR, 1, true},
    {2.035f, 2.185f, COMP_CAPACITOR, 2, true},
    {2.185f, 2.355f, COMP_CAPACITOR, 3, true},
    {2.355f, 2.455f, COMP_INDUTOR, 1, true},
    {2.455f, 2.530f, COMP_INDUTOR, 2, true},
    {2.530f, 2.680f, COMP_INDUTOR, 3, true},
    {2.680f, 2.805f, COMP_DIODO, 1, true},
    {2.805f, 2.920f, COMP_DIODO, 2, true},
    {2.920f, 3.105f, COMP_MOSFET, 1, true},
    {3.105f, 3.36f, COMP_MOSFET, 2, true},

```

```

};

const int TABELA_SIZE = sizeof(TABELA) / sizeof(TABELA[0]);
int tipoConversor = CONV_DESCONHECIDO;

// Guarda identificação dos componentes globalmente para enviar pelo BT
ComponenteID compGlobal[4];

HardwareSerial SerialBT(6);
const int ledPin = PC13;
String bufferBT = "";
uint32_t freqAtual = PWM_FREQ;

uint16_t LerADC(uint8_t pino);
float LerTensaoADC(uint8_t pino);
float LerTensaoADCMedia(uint8_t pino, uint8_t amostras);
uint32_t PinoParaCanalADC(uint8_t pino);
void InicializaADC(void);
bool verificarComponentes(void);

float PWM_DUTY_PCT = 30.0f;

uint8_t DutyParaAnalog(float pct) {
    if (pct < 0.0f)    pct = 0.0f;
    if (pct > 100.0f) pct = 100.0f;
    return (uint8_t)(pct * 255.0f / 100.0f);
}

float LerTensaoADCMedia(uint8_t pino, uint8_t amostras = 5) {
    float soma = 0;
    for (uint8_t i = 0; i < amostras; i++) {
        soma += LerTensaoADC(pino);
        delay(2);
    }
    return soma / amostras;
}

float LerTensaoEntrada() {
    float vBruto = LerTensaoADCMedia(PIN_ENTRADA);
    if (vBruto <= 2.7f)
        return vBruto * 2.16f;
    else
        return vBruto * (12.0f / 3.3f);
}

ComponenteID identificarComponente(float tensao) {
    ComponenteID res = {COMP_NENHUM, 0, true, false};
    for (int i = 0; i < TABELA_SIZE; i++) {
        if (tensao >= TABELA[i].vmin && tensao < TABELA[i].vmax) {
            res.tipo      = TABELA[i].tipo;
            res.numero    = TABELA[i].numero;
            res.polaridade = TABELA[i].polaridade;
            res.presente   = true;
            return res;
        }
    }
    return res;
}

```

```

}

String nomeComponente(int tipo) {
    switch (tipo) {
        case COMP_CAPACITOR: return "Capacitor";
        case COMP_INDUTOR:   return "Indutor";
        case COMP_DIODO:     return "Diodo";
        case COMP_MOSFET:    return "MOSFET";
        default:             return "Ausente";
    }
}

int detectarConversor(ComponenteID comp[4]) {
    if (comp[POS_CBPMC].tipo != COMP_CAPACITOR) return CONV_DESCONHECIDO;

    if (comp[POS_CBPMF].tipo == COMP_MOSFET && comp[POS_CBPMF].polaridade
== true &&
        comp[POS_CBPMT].tipo == COMP_DIODO && comp[POS_CBPMT].polaridade
== false &&
        comp[POS_CBPMS].tipo == COMP_INDUTOR && comp[POS_CBPMS].polaridade
== true)
        return CONV_BUCK;

    if (comp[POS_CBPMF].tipo == COMP_INDUTOR && comp[POS_CBPMF].polaridade
== true &&
        comp[POS_CBPMT].tipo == COMP_MOSFET && comp[POS_CBPMT].polaridade
== true &&
        comp[POS_CBPMS].tipo == COMP_DIODO && comp[POS_CBPMS].polaridade
== true)
        return CONV_BOOST;

    if (comp[POS_CBPMF].tipo == COMP_MOSFET && comp[POS_CBPMF].polaridade
== true &&
        comp[POS_CBPMT].tipo == COMP_INDUTOR && comp[POS_CBPMT].polaridade
== true &&
        comp[POS_CBPMS].tipo == COMP_DIODO && comp[POS_CBPMS].polaridade
== false)
        return CONV_BUCKBOOST;

    return CONV_DESCONHECIDO;
}

struct Regra { int tipo; bool polaridade; };

const Regra REGRAS_BUCK[4] = {{COMP_MOSFET, true}, {COMP_DIODO,
false}, {COMP_INDUTOR, true}, {COMP_CAPACITOR, true}};
const Regra REGRAS_BOOST[4] = {{COMP_INDUTOR, true}, {COMP_MOSFET,
true}, {COMP_DIODO, true}, {COMP_CAPACITOR, true}};
const Regra REGRAS_BUCKBOOST[4] = {{COMP_MOSFET, true}, {COMP_INDUTOR,
true}, {COMP_DIODO, false}, {COMP_CAPACITOR, false}};

bool verificarComponentes() {
    float tensoes[4] = {
        LerTensaoADCMedia(PB0),
        LerTensaoADCMedia(PA6),
        LerTensaoADCMedia(PA7),
        LerTensaoADCMedia(PB1)
    }
}

```

```

};

for (int i = 0; i < 4; i++)
    compGlobal[i] = identificarComponente(tensoes[i]);

const String posicoes[4] = {"CBPMF", "CBPMT", "CBPMS", "CBPMC"};

Serial.println("=== IDENTIFICAÇÃO DE COMPONENTES ===");
for (int i = 0; i < 4; i++) {
    Serial.print(posicoes[i]); Serial.print(": ");
    Serial.print(nomeComponente(compGlobal[i].tipo));
    if (compGlobal[i].presente) {
        Serial.print(" "); Serial.print(compGlobal[i].numero);
        Serial.print(compGlobal[i].polaridade ? " [AB]" : " [BA]");
    }
    Serial.print(" "); Serial.print(tensoes[i], 3);
    Serial.println("V");
}

tipoConversor = detectarConversor(compGlobal);

if (tipoConversor == CONV_DESCONHECIDO) {
    setLED(ledF, false);
    setLED(ledG, false);
    setLED(ledS, false);
    setLED(ledC, compGlobal[POS_CBPMC].tipo == COMP_CAPACITOR);
    Serial.println(">> ERRO: Configuração inválida ou componente
ausente/invertido!");
} else {
    const Regra* regras = nullptr;
    switch (tipoConversor) {
        case CONV_BUCK:      regras = REGRAS_BUCK;      Serial.println(">>
Conversor: BUCK [OK]");      break;
        case CONV_BOOST:     regras = REGRAS_BOOST;     Serial.println(">>
Conversor: BOOST [OK]");     break;
        case CONV_BUCKBOOST: regras = REGRAS_BUCKBOOST; Serial.println(">>
Conversor: BUCK-BOOST [OK]"); break;
    }
    setLED(ledF, compGlobal[POS_CBPMF].tipo == regras[POS_CBPMF].tipo &&
compGlobal[POS_CBPMF].polaridade == regras[POS_CBPMF].polaridade);
    setLED(ledG, compGlobal[POS_CBPMT].tipo == regras[POS_CBPMT].tipo &&
compGlobal[POS_CBPMT].polaridade == regras[POS_CBPMT].polaridade);
    setLED(ledS, compGlobal[POS_CBPMS].tipo == regras[POS_CBPMS].tipo &&
compGlobal[POS_CBPMS].polaridade == regras[POS_CBPMS].polaridade);
    setLED(ledC, compGlobal[POS_CBPMC].tipo == regras[POS_CBPMC].tipo);
}

Serial.println("=====");
return tipoConversor != CONV_DESCONHECIDO;
}

void enviarIdentificacaoBT() {
    // Envia identificação de cada posição
    const String posicoes[4] = {"FONTE", "TERRA", "SAÍDA", "CAPACITOR"};
    for (int i = 0; i < 4; i++) {
        SerialBT.print("SLOT_");
        SerialBT.print(posicoes[i]);
    }
}

```

```

    SerialBT.print(":");
    SerialBT.print(nomeComponente(compGlobal[i].tipo));
    if (compGlobal[i].presente) {
        SerialBT.print(" ");
        SerialBT.print(compGlobal[i].numero);
    }
    SerialBT.print("\n");
}

// Envia tipo de conversor
switch (tipoConversor) {
    case CONV_BUCK:      SerialBT.print("Conversor: BUCK\n");
break;
    case CONV_BOOST:     SerialBT.print("Conversor: BOOST\n");
break;
    case CONV_BUCKBOOST: SerialBT.print("Conversor: BUCK-BOOST\n");
break;
    default:             SerialBT.print("Conversor: DESCONHECIDO\n");
break;
}
}

void setup() {
    pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
    pinMode(SPRL, OUTPUT);
    pinMode(ECRL, OUTPUT);
    pinMode(PWM_PIN, OUTPUT);
    digitalWrite(LED_PIN, HIGH);
    digitalWrite(SPRL, LOW);
    digitalWrite(ECRL, LOW);

    ledF.begin(); ledF.show();
    ledG.begin(); ledG.show();
    ledS.begin(); ledS.show();
    ledC.begin(); ledC.show();
    apagarLEDs();

    Serial.setTx(PB6);
    Serial.setRx(PB7);
    Serial.begin(115200);

    SerialBT.setRx(PA12);
    SerialBT.setTx(PA11);
    SerialBT.begin(9600);

    uint32_t t = millis();
    while (!Serial && millis() - t < 3000);

    InicializaADC();
    Serial.println("ADC inicializado.");

    analogWriteFrequency(freqAtual);
    analogWrite(PWM_PIN, DutyParaAnalog(PWM_DUTY_PCT));
}

void loop() {
    bool componentesOk = verificarComponentes();

```

```

float tensaoEntrada = LerTensaoEntrada();
float tensaoSaida   = LerTensaoADCMedia(PIN_SAIDA) * 43.93f;
float corrente      = LerTensaoADCMedia(PIN_CORRENTE) * FATOR_CORRENTE;

bool tensaoOk = (tensaoEntrada >= 4.5f && tensaoEntrada <= 6.0f) ||
                (tensaoEntrada >= 10.0f && tensaoEntrada <= 13.0f);

if (componentesOk && tensaoOk) {
    Serial.println("Sistema OK - Conversor operando!");
    digitalWrite(SPRL, HIGH);
    digitalWrite(ECRL, HIGH);
    analogWrite(PWM_PIN, DutyParaAnalog(PWM_DUTY_PCT));

    // Serial USB
    Serial.println("Leituras:");
    Serial.print("Vin: ");      Serial.print(tensaoEntrada, 3);
Serial.print(" V | ");
    Serial.print("Vout: ");     Serial.print(tensaoSaida, 3);
Serial.print(" V | ");
    Serial.print("Corrente: "); Serial.print(corrente, 3);
Serial.print(" A | ");
    Serial.print("PWM: ");      Serial.print(PWM_DUTY_PCT, 1);
Serial.print("% | ");
    Serial.print("Freq: ");     Serial.print(freqAtual);
Serial.println(" Hz");
    Serial.println("-----");

    // Bluetooth - leituras
    SerialBT.print("Vin: ");   SerialBT.print(tensaoEntrada, 2);
SerialBT.print(" V\n");
    SerialBT.print("Vout: ");  SerialBT.print(tensaoSaida, 2);
SerialBT.print(" V\n");
    SerialBT.print("Iout: ");   SerialBT.print(corrente, 3);
SerialBT.print(" A\n");
    SerialBT.print("Ciclo de trabalho:"); SerialBT.print(PWM_DUTY_PCT,
1); SerialBT.print(" %\n");
    SerialBT.print("Freq: ");   SerialBT.print(freqAtual);
SerialBT.print(" Hz\n");

    // Bluetooth - identificação e status
    enviarIdentificacaoBT();
    SerialBT.print("Status:OK\n");

    delay(2700);

} else {
    digitalWrite(SPRL, LOW);
    digitalWrite(ECRL, LOW);
    analogWrite(PWM_PIN, 0);

    // Bluetooth - identificação e status de erro
    enviarIdentificacaoBT();
    SerialBT.print("Status:ERRO\n");

    if (!componentesOk) {

```

```

    Serial.println("ERRO: Componente incorreto ou ausente!");
    Serial.println(">> Desligue o sistema e corrija os componentes.");
    SerialBT.print("Msg:Componente incorreto!\n");
}
if (!tensaoOk) {
    Serial.println("ERRO: Tensão de entrada fora do range!");
    Serial.println(">> Verifique a fonte de alimentação (5V ou 12V).");
    SerialBT.print("Msg:Tensao incorreta!\n");
}
Serial.println("-----");
delay(5000);
}

// Recebe comandos do Bluetooth
while (SerialBT.available()) {
    char c = SerialBT.read();
    if (c == '\n' || c == '\r' || bufferBT.length() >= 8) {
        bufferBT.trim();
        if (bufferBT.length() > 0) {
            char cmd = bufferBT.charAt(0);
            float valor = bufferBT.substring(1).toFloat();

            if (cmd == 'D' || cmd == 'd') {
                if (valor >= 0.0f && valor <= 100.0f) {
                    PWM_DUTY_PCT = valor;
                    analogWrite(PWM_PIN, DutyParaAnalog(PWM_DUTY_PCT));
                    Serial.print("Duty atualizado: ");
                    Serial.print(PWM_DUTY_PCT); Serial.println("%");
                    SerialBT.print("Duty:"); SerialBT.print(PWM_DUTY_PCT, 1);
                    SerialBT.print("\n");
                }
            }
            else if (cmd == 'F' || cmd == 'f') {
                if (valor >= 1.0f && valor <= 20000.0f) {
                    freqAtual = (uint32_t)valor;
                    analogWriteFrequency(freqAtual);
                    analogWrite(PWM_PIN, DutyParaAnalog(PWM_DUTY_PCT));
                    Serial.print("Freq atualizada: "); Serial.print(freqAtual);
                    Serial.println(" Hz");
                    SerialBT.print("Freq:"); SerialBT.print(freqAtual);
                    SerialBT.print("\n");
                }
            }
            else if (cmd == '1') digitalWrite(ledPin, LOW);
            else if (cmd == '0') digitalWrite(ledPin, HIGH);
        }
        bufferBT = "";
    } else {
        bufferBT += c;
    }
}

if (Serial.available()) {
    char c = Serial.read();
    SerialBT.print(c);
}
}

```

```

/* ===== */

uint16_t LerADC(uint8_t pino) {
    uint32_t canal = PinoParaCanalADC(pino);
    ADC1->SQR3 = canal & 0x1F;
    ADC1->SR = 0;
    ADC1->CR2 |= ADC_CR2_SWSTART;
    while (!(ADC1->SR & ADC_SR_EOC));
    return ADC1->DR;
}

float LerTensaoADC(uint8_t pino) {
    uint16_t adc = LerADC(pino);
    return (adc * VREF) / 4095.0f;
}

uint32_t PinoParaCanalADC(uint8_t pino) {
    if (pino == PA0) return 0;
    if (pino == PA1) return 1;
    if (pino == PA2) return 2;
    if (pino == PA3) return 3;
    if (pino == PA4) return 4;
    if (pino == PA5) return 5;
    if (pino == PA6) return 6;
    if (pino == PA7) return 7;
    if (pino == PB0) return 8;
    if (pino == PB1) return 9;
    return 0;
}

void InicializaADC(void) {
    RCC->AHB1ENR |= RCC_AHB1ENR_GPIOAEN | RCC_AHB1ENR_GPIOBEN;
    GPIOA->MODER |= 0xFFFF;
    GPIOB->MODER |= (3 << (0 * 2)) | (3 << (1 * 2));
    RCC->APB2ENR |= RCC_APB2ENR_ADC1EN;
    ADC->CCR &= ~ADC_CCR_ADCPRE;
    ADC->CCR |= ADC_CCR_ADCPRE_0;
    ADC1->CR1 = 0;
    ADC1->CR2 = 0;
    ADC1->SQR1 = 0;
    ADC1->SQR2 = 0;
    ADC1->SQR3 = 0;
    for (int ch = 0; ch <= 9; ch++)
        ADC1->SMPR2 |= (4 << (3 * ch));
    ADC1->CR2 &= ~ADC_CR2_CONT;
    ADC1->CR2 |= ADC_CR2_ADON;
    delay(1);
}

```

APÊNDICE B – CÓDIGO PARA CALCULAR PARÂMETROS DO CONVERSOR

Este apêndice apresenta o código desenvolvido para o cálculo dos principais parâmetros de projeto dos conversores CC-CC estudados neste trabalho no Matlab. A ferramenta permite determinar valores de componentes como indutores e capacitores, além de estimar grandezas elétricas relevantes para as topologias Buck, Boost e Buck-Boost, servindo como apoio ao dimensionamento e à análise dos conversores utilizados no kit didático.

```

clc
clear all

%% =====
%   PARÂMETROS DE ENTRADA
%   (única seção que precisa ser editada)
%% =====
Vin = 5;      % Tensão de entrada (V)
D   = 0.8;    % Ciclo de trabalho (adimensional, 0 < D < 1)
Fs  = 8000;   % Frequência de chaveamento (Hz)
L   = 2e-3;   % Indutância (H)
C   = 100e-6; % Capacitância (F)
R   = 60;     % Resistência de carga ( $\Omega$ )

Ts = 1 / Fs;  % Período de chaveamento (s)

fprintf('===== \n');
fprintf('          RESULTADOS DOS CONVERSORES CC-CC          \n');
fprintf('   Unidade 08 - Eletronica de Potencia (CEFET-MG)        \n');
fprintf('===== \n');
fprintf('Parametros de entrada:\n');
fprintf('  Vin = %.2f V | D = %.4f | Fs = %.0f Hz\n', Vin, D, Fs);
fprintf('  L   = %.2e H | C = %.2e F | R = %.1f ohm\n', L, C, R);
fprintf('===== \n\n');

%% =====
%   CONVERSOR BUCK
%% =====
fprintf('===== \n');
fprintf('          CONVERSOR BUCK          \n');
fprintf('===== \n');

Vo_buck   = D * Vin;
IL_buck   = Vo_buck / R;
Io_buck   = Vo_buck / R;
Is_buck   = D * IL_buck;
diL_buck  = (Vin - Vo_buck) * D / (Fs * L);
iLmax_buck = Vo_buck * (1/R + (1-D)/(2*L*Fs));
iLmin_buck = Vo_buck * (1/R - (1-D)/(2*L*Fs));
Lmin_buck = (1-D) * R / (2*Fs);
dVo_buck  = Ts * diL_buck / (8*C);

% Ripple percentual

```

```

perc_dVo_buck = (dVo_buck / Vo_buck) * 100;
perc_diL_buck = (diL_buck / IL_buck) * 100;

if L >= Lmin_buck
    ccm_buck = 'SIM (CCM)';
else
    ccm_buck = 'NAO (DCM)';
end

fprintf('Tensao de saida          Vo      = %.4f V\n',    Vo_buck);
fprintf('Corrente media na carga  Io      = %.4f A\n',    Io_buck);
fprintf('Corrente media no indutor  IL      = %.4f A\n',    IL_buck);
fprintf('Corrente media na fonte    Is      = %.4f A\n',    Is_buck);
fprintf('Ripple de corrente          DiL     = %.4f A\n',    diL_buck);
fprintf('Ripple percentual corrente    = %.2f %%\n', perc_diL_buck);
fprintf('Corrente maxima no indutor iLmax = %.4f A\n',    iLmax_buck);
fprintf('Corrente minima no indutor iLmin = %.4f A\n',    iLmin_buck);
fprintf('L fornecido                  = %.2e H\n',    L);
fprintf('Lmin (CCM)                   = %.2e H\n',    Lmin_buck);
fprintf('Opera em CCM?                 = %s\n',    ccm_buck);
fprintf('Ondulacao de tensao de saida DVo = %.4f V\n',    dVo_buck);
fprintf('Ripple percentual tensao       = %.2f %%\n', perc_dVo_buck);

%% =====
%  CONVERSOR BOOST
%% =====

fprintf('\n===== \n');
fprintf('          CONVERSOR BOOST          \n');
fprintf('===== \n');

Vo_boost      = Vin / (1-D);
IL_boost      = Vin / ((1-D)^2 * R);
Io_boost      = Vo_boost / R;
diL_boost     = D * Vin / (Fs * L);
iLmax_boost   = Vin * (1/((1-D)^2 * R) + D/(2*L*Fs));
iLmin_boost   = Vin * (1/((1-D)^2 * R) - D/(2*L*Fs));
Lmin_boost    = D * (1-D)^2 * R / (2*Fs);
dVo_boost     = Vo_boost * D / (R*C*Fs);

% Ripple percentual
perc_dVo_boost = (dVo_boost / Vo_boost) * 100;
perc_diL_boost = (diL_boost / IL_boost) * 100;

if L >= Lmin_boost
    ccm_boost = 'SIM (CCM)';
else
    ccm_boost = 'NAO (DCM)';
end

fprintf('Tensao de saida          Vo      = %.4f V\n',    Vo_boost);
fprintf('Corrente media na carga  Io      = %.4f A\n',    Io_boost);
fprintf('Corrente media no indutor IL      = %.4f A\n',    IL_boost);
fprintf('Ripple de corrente          DiL     = %.4f A\n',    diL_boost);
fprintf('Ripple percentual corrente    = %.2f %%\n', perc_diL_boost);
fprintf('Corrente maxima no indutor iLmax = %.4f A\n',    iLmax_boost);
fprintf('Corrente minima no indutor iLmin = %.4f A\n',    iLmin_boost);

```

```

fprintf('L fornecido                      = %.2e H\n',    L);
fprintf('Lmin (CCM)                      = %.2e H\n',    Lmin_boost);
fprintf('Opera em CCM?                      = %s\n',        ccm_boost);
fprintf('Ondulacao de tensao de saida DVo = %.4f V\n',    dVo_boost);
fprintf('Ripple percentual tensao           = %.2f %%\n',    perc_dVo_boost);

%% =====
%  CONVERSOR BUCK-BOOST
%% =====
fprintf('\n===== \n');
fprintf('                      CONVERSOR BUCK-BOOST          \n');
fprintf('===== \n');

Vo_bb      = -(D * Vin) / (1-D);
IL_bb      = Vin * D / ((1-D)^2 * R);
Io_bb      = abs(Vo_bb) / R;
diL_bb     = Vin * D / (Fs * L);
iLmax_bb   = D * Vin * (1/((1-D)^2 * R) + 1/(2*L*Fs));
iLmin_bb   = D * Vin * (1/((1-D)^2 * R) - 1/(2*L*Fs));
Lmin_bb    = (1-D)^2 * R / (2*Fs);
dVo_bb     = abs(Vo_bb) * D / (R*C*Fs);

% Ripple percentual
perc_dVo_bb = (dVo_bb / abs(Vo_bb)) * 100;
perc_diL_bb = (diL_bb / IL_bb) * 100;

if L >= Lmin_bb
    ccm_bb = 'SIM (CCM)';
else
    ccm_bb = 'NAO (DCM)';
end

fprintf('Tensao de saida          Vo      = %.4f V (polaridade
invertida)\n', Vo_bb);
fprintf('Corrente media na carga  Io      = %.4f A\n',    Io_bb);
fprintf('Corrente media no indutor IL     = %.4f A\n',    IL_bb);
fprintf('Ripple de corrente       DiL     = %.4f A\n',    diL_bb);
fprintf('Ripple percentual corrente = %.2f %%\n',    perc_diL_bb);
fprintf('Corrente maxima no indutor iLmax = %.4f A\n',    iLmax_bb);
fprintf('Corrente minima no indutor iLmin = %.4f A\n',    iLmin_bb);
fprintf('L fornecido              = %.2e H\n',    L);
fprintf('Lmin (CCM)              = %.2e H\n',    Lmin_bb);
fprintf('Opera em CCM?           = %s\n',        ccm_bb);
fprintf('Ondulacao de tensao de saida DVo = %.4f V\n',    dVo_bb);
fprintf('Ripple percentual tensao = %.2f %%\n',    perc_dVo_bb);

fprintf('\n===== \n');
fprintf('NOTAS:\n');
fprintf('  CCM = Modo de Conducao Continua (L >= Lmin)\n');
fprintf('  Vo do Buck-Boost e negativo (inversao de polaridade)\n');
fprintf('  Formulas conforme Unidade 08 (Prof. Rodolfo Lacerda)\n');
fprintf('  R = %.1f ohm\n', R);
fprintf('===== \n');

```