

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

THEO VIEIRA PIRES

RETROFITTING ELETRÔNICO DE EQUIPAMENTO DIDÁTICO MECATRÔNICO

FLORIANÓPOLIS, 2026.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

THEO VIEIRA PIRES

RETROFITTING ELETRÔNICO DE EQUIPAMENTO DIDÁTICO MECATRÔNICO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Mecatrônico.

Orientador:
Prof. Valdir Noll, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2026.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Pires, Theo

RETROFITTING ELETRÔNICO DE EQUIPAMENTO DIDÁTICO MECATRÔNICO
/ Theo Pires; orientação de Valdir Noll. - Florianópolis,
SC, 2026.
83 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Mecatrônica. Departamento
Acadêmico de Metal Mecânica.
Inclui Referências.

1. Retrofitting eletrônico. 2. Equipamento didático.
3. Sistemas embarcados. 4. RS-485. 5. Engenharia Mecatrônica
I. Noll, Valdir. II. Instituto Federal de Santa
Catarina. III. RETROFITTING ELETRÔNICO DE EQUIPAMENTO
DIDÁTICO MECATRÔNICO.

RETROFITTING ELETRÔNICO DE EQUIPAMENTO DIDÁTICO MECATRÔNICO

THEO VIEIRA PIRES

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro em Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 09 de julho, 2026.

Banca Examinadora:

Valdir Noll, Dr. Eng.

Adriano Regis, Dr. Eng.

Alexandre Leizor Szczupak, Dr. Eng.

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresenta o *retrofitting* eletrônico de uma esteira transportadora seletora por cor previamente desenvolvida como protótipo acadêmico, com o objetivo de qualificá-la para uso didático contínuo em laboratório de Engenharia Mecatrônica. O trabalho partiu do diagnóstico da eletrônica original, montada de forma experimental, e propôs sua substituição por uma solução mais organizada, documentada e adaptável a diferentes níveis de ensino. O desenvolvimento envolveu o levantamento do equipamento existente, a definição de requisitos, o projeto e a verificação dos circuitos, a elaboração das placas de circuito impresso (PCIs), a fabricação, a montagem e a realização de ensaios elétricos e funcionais. Foram projetadas e fabricadas placas dedicadas ao controle e à interface com o usuário, com suporte aos microcontroladores Arduino Nano e ESP32-S3, além de infraestrutura física no padrão *Recommended Standard 485* (RS-485) para viabilizar futuras aplicações com Modbus *Remote Terminal Unit* (RTU). Os resultados obtidos foram positivos e demonstraram o funcionamento da solução desenvolvida, sua integração à esteira e o atendimento aos requisitos estabelecidos para o escopo do trabalho. Conclui-se que o *retrofitting* eletrônico atingiu os objetivos propostos e qualificou o equipamento como uma plataforma didática mais flexível e adequada ao ensino de sistemas embarcados, automação e comunicação industrial.

Palavras-chave: *Retrofitting* eletrônico. Equipamento didático. Sistemas embarcados. RS-485. Engenharia Mecatrônica.

ABSTRACT

This Undergraduate Thesis presents the electronic retrofitting of a color-sorting conveyor belt previously developed as an academic prototype, aiming to qualify it for continuous educational use in a Mechatronics Engineering laboratory. The work began with the diagnosis of the original experimentally assembled electronics, proposing their replacement with a more organized, documented solution adaptable to different educational levels. The development involved the assessment of the existing equipment, requirement definition, circuit design and verification, printed circuit board (PCB) design, manufacturing, assembly, and the execution of electrical and functional tests. Dedicated control and user interface boards were designed and manufactured, supporting Arduino Nano and ESP32-S3 microcontrollers, in addition to a physical *Recommended Standard 485* (RS-485) infrastructure to enable future applications using Modbus *Remote Terminal Unit* (RTU). The obtained results were positive, demonstrating the operation of the developed solution, its integration with the conveyor belt, and the fulfillment of the requirements established within the scope of this work. It is concluded that the electronic retrofitting achieved the proposed objectives, qualifying the equipment as a more flexible and suitable educational platform for teaching embedded systems, automation, and industrial communication.

Keywords: Electronic retrofitting. Educational equipment. Embedded systems. RS-485. Mechatronics Engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Conceitos de distribuição de terra em placas de circuito impresso . . .	27
Figura 2 – Funções dos capacitores de reserva e de desacoplamento local . . .	28
Figura 3 – Grandezas geométricas empregadas no dimensionamento de uma trilha	29
Figura 4 – Visão geral da esteira seletora	31
Figura 5 – Controladora empregada na versão anterior do equipamento	32
Figura 6 – Diagrama de blocos da arquitetura eletrônica anterior	33
Figura 7 – Diagrama elétrico geral da arquitetura eletrônica anterior	33
Figura 8 – Circuitos de alimentação da placa controladora	44
Figura 9 – Versão consolidada da interface do Arduino Nano	45
Figura 10 – Versão consolidada da interface do ESP32-S3	46
Figura 11 – Seleção da plataforma e multiplexação dos sinais da UART	47
Figura 12 – Versão consolidada do setor de comunicação RS-485	48
Figura 13 – Interface principal da placa IHM	49
Figura 14 – Recursos opcionais previstos para a placa IHM	50
Figura 15 – Versão consolidada do circuito de acionamento do motor CC	51
Figura 16 – Expansor de entradas e saídas, indicadores e seleção de endereço	52
Figura 17 – Topologias representativas dos canais do módulo GPIO	52
Figura 18 – Simulação dos limites de operação da entrada GPIO	53
Figura 19 – Simulação dos estados de operação da saída GPIO	54
Figura 20 – Placas controladora e IHM recebidas para montagem	59
Figura 21 – Correções realizadas antes da energização da placa	60
Figura 22 – Placa controladora montada e energizada em bancada	61
Figura 23 – Pacotes I ² C observados durante a validação da IHM	62
Figura 24 – Comparação entre sinais diferenciais observados no ensaio RS-485	63
Figura 25 – Conjunto eletrônico instalado na esteira durante o comissionamento	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Panorama comparativo de kits didáticos relacionados ao trabalho .	19
Quadro 2 – Características desejáveis em equipamentos didáticos de automação	20
Quadro 3 – Requisitos funcionais e não funcionais do retrofitting eletrônico . .	35
Quadro 4 – Setores funcionais definidos para o conjunto eletrônico	37
Quadro 5 – Funções dos transceptores empregados no interfaceamento lógico	40
Quadro 6 – Síntese do atendimento aos objetivos do trabalho	65
Quadro 7 – Síntese do atendimento aos requisitos do retrofitting eletrônico . .	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de rede adotadas no roteamento das placas	55
Tabela 2 – Regras locais de afastamento para encapsulamentos específicos .	56
Tabela 3 – Cotação para fabricação e montagem das placas pela JLCPCB . .	56
Tabela 4 – Aquisições nacionais para fabricação das placas	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico-digital
BOM	<i>Bill of Materials</i> (lista de materiais)
CC	Corrente contínua
CLP	Controlador lógico programável
DB9	Conector D-subminiatura de 9 vias
DE	<i>Driver Enable</i> (habilitação do transmissor)
DI	<i>Driver Input</i> (entrada do transmissor)
DRC	<i>Design Rule Check</i> (checagem das regras de projeto)
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
ERC	<i>Electrical Rule Check</i> (checagem das regras elétricas)
FR-4	<i>Flame Retardant 4</i>
GND	<i>Ground</i> (terra)
GPIO	<i>General-Purpose Input/Output</i> (entrada e saída de uso geral)
HASL	<i>Hot Air Solder Leveling</i>
I ² C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> (ambiente de desenvolvimento integrado)
IHM	Interface homem-máquina
IPC	<i>Institute for Printed Circuits</i>
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
JTAG	<i>Joint Test Action Group</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> (display de cristal líquido)
LDO	<i>Low-Dropout Regulator</i> (regulador linear de baixa queda)
LE	<i>Low Energy</i>

LED	<i>Light-Emitting Diode</i> (diodo emissor de luz)
MOSFET	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i>
OE	Objetivo específico
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (placa de circuito impresso)
PCI	Placa de circuito impresso
PDU	<i>Protocol Data Unit</i> (unidade de dados de protocolo)
PI	Projeto Integrador
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> (controlador lógico programável)
PPTC	<i>Polymeric Positive Temperature Coefficient</i>
PRISMA	<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (modulação por largura de pulso)
RE	<i>Receiver Enable</i> (habilitação do receptor)
RF	Requisito funcional
RGB	<i>Red, Green and Blue</i> (vermelho, verde e azul)
RNF	Requisito não funcional
RO	<i>Receiver Output</i> (saída do receptor)
RS-485	<i>Recommended Standard 485</i>
RTOS	<i>Real-Time Operating System</i> (sistema operacional de tempo real)
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i> (unidade terminal remota)
RX	<i>Receive Data</i> (recepção de dados)
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SOIC	<i>Small Outline Integrated Circuit</i>
SOP	<i>Small Outline Package</i>
SOT	<i>Small Outline Transistor</i>
SPDT	<i>Single Pole Double Throw</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>

SRAM	<i>Static Random-Access Memory</i>
SSOP	<i>Shrink Small Outline Package</i>
STEM	<i>Science, Technology, Engineering and Mathematics</i>
SoC	<i>System-on-Chip</i>
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
TVS	<i>Transient Voltage Suppressor</i> (supressor de transientes de tensão)
TX	<i>Transmit Data</i> (transmissão de dados)
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VCC	Tensão positiva de alimentação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	14
1.2	Definição do Problema	15
1.3	Objetivo Geral	15
1.4	Objetivos Específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Estado da Arte em Kits Didáticos para Automação	17
2.1.1	Conceitos e papel dos kits didáticos em mecatrônica	17
2.1.2	Exemplos de kits e plantas didáticas no mercado atual	19
2.1.3	Características desejáveis em equipamentos didáticos	20
2.2	Microcontroladores Aplicados ao Ensino e Plataformas Didáticas	21
2.2.1	Definições básicas e arquitetura de microcontroladores	21
2.2.2	Plataformas atuais: Arduino Nano e ESP32-S3 no contexto educacional	22
2.2.3	Intercambiabilidade de microcontroladores: ganhos e desafios	23
2.3	Redes Industriais e Modbus no Contexto Didático	23
2.4	Projeto de Placas de Circuito Impresso para Produtos Didáticos	24
2.4.1	Papel da PCI em produtos didáticos	24
2.4.2	Ferramentas de desenvolvimento eletrônico – ECAD	25
2.4.3	Critérios e referências técnicas para projeto	25
2.4.4	Distribuição de alimentação e sistemas de aterramento	26
2.4.5	Capacitores de desacoplamento e reserva local de energia	27
2.4.6	Dimensionamento elétrico e térmico de trilhas	28
2.4.7	Organização do layout em placas com potência e lógica	29
2.5	Síntese: Convergência para o Retrofitting Eletrônico	30
3	METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO	31
3.1	Ponto de partida e estado atual do equipamento	31
3.2	Definições de escopo e requisitos	34
3.2.1	Escopo proposto para o desenvolvimento	34
3.2.2	Requisitos do retrofitting eletrônico	34
3.2.3	Escolha das plataformas de controle	35
3.2.4	Escolha do tipo de interface para comunicação industrial	36
3.3	Desenvolvimento das placas eletrônicas	36
3.3.1	Setores funcionais necessários ao conjunto eletrônico	37
3.3.2	Estratégia de desenvolvimento e verificação dos circuitos	37
3.3.3	Decisões de projeto e componentes	38
3.3.3.1	<i>Alimentação</i>	38
3.3.3.2	<i>Interfaceamento dos microcontroladores</i>	39
3.3.3.3	<i>Comunicação RS-485</i>	40
3.3.3.4	<i>Interface Homem-Máquina</i>	41
3.3.3.5	<i>Driver do motor CC</i>	42
3.3.3.6	<i>GPIO</i>	43
3.3.4	Consolidação e versões finais dos circuitos	43
3.3.4.1	<i>Alimentação</i>	44
3.3.4.2	<i>Interfaceamento dos microcontroladores</i>	45
3.3.4.3	<i>Comunicação RS-485</i>	47

3.3.4.4	<i>Interface Homem-Máquina</i>	48
3.3.4.5	<i>Driver do motor CC</i>	50
3.3.4.6	<i>GPIO</i>	51
3.3.5	Abordagem de roteamento da placa	54
3.4	Fabricação da placa, aquisição de componentes e BOM	56
3.5	Procedimento de validação da placa	57
3.6	Documentação e planejamento do uso didático	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1	Montagem das placas e preparação para energização	59
4.2	Validação elétrica e funcional dos blocos principais	60
4.3	Intercambiabilidade entre Arduino Nano e ESP32-S3	62
4.4	Validação do meio físico RS-485 para Modbus RTU	63
4.5	Comissionamento na esteira e IHM	64
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	67
	REFERÊNCIAS	68
	APÊNDICES	74
	APÊNDICE A – ESQUEMÁTICOS COMPLETOS DAS PCBS	75
A.1	Esquemático completo da placa controladora	76
A.2	Esquemático completo da placa de IHM	82

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico contínuo tem transformado a indústria e, consequentemente, a formação de novos engenheiros. Esse movimento, impulsionado pela chamada indústria 4.0, exige dos cursos de engenharia uma profunda revisão de seus métodos e currículos, de modo a alinhar a formação às novas demandas de automação, conectividade e integração digital (COŞKUN; KAYIKÇI; GENÇAY, 2019).

No campo da Engenharia Mecatrônica, a habilidade de integrar conhecimentos de eletrônica, programação e controle de sistemas não é apenas um diferencial, mas um requisito fundamental. Essa multidisciplinaridade reflete as competências exigidas do engenheiro contemporâneo, que precisa atuar em ambientes industriais complexos, conectando diferentes tecnologias e processos (QUINTERO; MALDONADO, 2024).

Diante dessa realidade, as metodologias de ensino precisam evoluir para além da teoria, proporcionando aos estudantes experiências práticas que simulem os desafios do ambiente industrial. Essa necessidade reforça o papel das instituições de ensino na criação de ambientes que unam teoria e prática, promovendo a aprendizagem ativa e o desenvolvimento de competências aplicadas (ABICHANDANI *et al.*, 2022).

Este trabalho se insere nesse contexto por meio do *retrofitting* eletrônico de uma esteira transportadora seletora já existente. Essa abordagem visa ampliar as funcionalidades e manter o equipamento plenamente funcional para uso em laboratório (LINS; OLIVEIRA, 2019).

1.1 Justificativa

No processo de ensino-aprendizagem, diversos são os recursos empregados para a contextualização e fixação dos conhecimentos. Equipamentos didáticos, nesse sentido, surgem como ferramentas essenciais para materializar e aplicar, mesmo que em escala reduzida, os conceitos teóricos vistos em sala de aula (OSTOJIC *et al.*, 2013). Essa abordagem é particularmente importante na formação de profissionais de áreas tecnológicas, como a Engenharia Mecatrônica, pois promove a conexão entre teoria e prática, tornando o aprendizado mais significativo e estimulante.

Nesse contexto, o uso de equipamentos didáticos que integrem diferentes áreas do conhecimento, como controle com microcontroladores, lógica de programação e comunicação em redes industriais, torna-se particularmente relevante para o desenvolvimento das competências exigidas do engenheiro contemporâneo, que precisa articular múltiplas tecnologias para atuar em ambientes industriais complexos (QUINTERO; MALDONADO, 2024).

A motivação para este trabalho decorre da experiência direta do autor com a esteira transportadora seletora, desenvolvida em Projetos Integradores do curso. Esse

contato evidenciou o valor didático do equipamento já existente e, ao mesmo tempo, as limitações eletrônicas que impediam seu uso pleno em laboratório.

1.2 Definição do Problema

Em cursos de graduação, o ensino de programação tende a perder efetividade quando permanece restrito a ambientes virtuais, pois reduz a visualização prática dos algoritmos e a identificação de erros de lógica (KALISZAN; GLABOWSKI, 2011). Embora equipamentos didáticos comerciais possam suprir essa lacuna, seu custo, por vezes superior a R\$ 15.000,00, limita a adoção em instituições com recursos restritos (CABRERA; PIRES; GEORGETTI, 2023). O problema é, portanto, como qualificar eletronicamente um equipamento didático já disponível, em vez de desenvolver uma solução do zero, para torná-lo confiável, escalável e adequado ao ensino de microcontroladores e redes industriais.

Frente a esse problema, este trabalho propõe o *retrofitting* eletrônico da esteira transportadora seletora já existente no laboratório do curso. A solução consiste no reprojeto completo da eletrônica: projeto e fabricação de uma placa de circuito impresso (PCI) profissional, também referida como *Printed Circuit Board* (PCB), com suporte intercambiável a ESP32-S3 e Arduino Nano, em seus respectivos kits de desenvolvimento (ONYEKA *et al.*, 2022), conferindo ao equipamento flexibilidade para uso e conectividade industrial por meio de uma interface física RS-485 apta a viabilizar comunicação Modbus RTU (OSTOJIC *et al.*, 2013; Modbus Organization, 2006b).

Nesse contexto, a implementação da comunicação Modbus é delimitada ao escopo de hardware. O trabalho busca disponibilizar e validar o meio físico RS-485, comercialmente aceito para esse tipo de comunicação serial, de modo que a placa ofereça a infraestrutura elétrica necessária para posterior desenvolvimento do protocolo. A implementação das rotinas finais de Modbus, incluindo mapa de registradores e lógica de aplicação, permanece fora do escopo deste TCC; os firmwares produzidos foram empregados apenas como instrumentos de ensaio e validação dos blocos eletrônicos.

O ponto de partida deste trabalho é essa esteira, concebida em Projetos Integradores do curso e baseada em uma plataforma ESP32 de 32 bits, que integra controle por microcontrolador, programação e simulação de processos industriais.

1.3 Objetivo Geral

Realizar o *retrofitting* eletrônico de uma esteira transportadora seletora, mediante o desenvolvimento de solução eletrônica embarcada com suporte a microcontroladores intercambiáveis e conectividade industrial, mantendo o equipamento funcional para uso em laboratório de Engenharia Mecatrônica.

1.4 Objetivos Específicos

- a) Desenvolver solução eletrônica embarcada para controle do equipamento, com suporte a microcontroladores intercambiáveis e interface com o usuário;
- b) Disponibilizar interface física RS-485 para viabilizar comunicação Modbus RTU com sistemas industriais;
- c) Garantir a integração da solução eletrônica ao hardware existente da esteira, assegurando operação confiável dos periféricos;
- d) Gerar documentação como manuais e guias de uso para professores e alunos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são discutidos os fundamentos teóricos que embasam o *retrofitting* eletrônico proposto. Inicialmente, apresentam-se os conceitos atribuídos a kits didáticos utilizados no ensino de automação e mecatrônica, enfatizando sua importância para a aprendizagem em cursos de engenharia. Em seguida, aborda-se o uso de microcontroladores e plataformas embarcadas em contextos educacionais, incluindo o conceito de intercambiabilidade de microcontroladores.

Na sequência, são apresentados fundamentos de redes industriais e do protocolo Modbus em contextos educacionais. Posteriormente, discutem-se os princípios de projeto de placas de circuito impresso, abrangendo normas, boas práticas de *layout* e requisitos de confiabilidade aplicáveis ao contexto didático. Por fim, realiza-se uma síntese dos eixos abordados, demonstrando sua convergência para a proposta de *retrofitting* eletrônico e estabelecendo a base conceitual e técnica para a metodologia apresentada no capítulo seguinte.

2.1 Estado da Arte em Kits Didáticos para Automação

O interesse pelo desenvolvimento de kits didáticos para o ensino de automação tem crescido de forma consistente nas últimas décadas, impulsionado pela crescente demanda por formação prática alinhada às competências do engenheiro contemporâneo (QUINTERO; MALDONADO, 2024; ABICHANDANI *et al.*, 2022).

A literatura registra uma diversidade de propostas, de kits de desenvolvimento com microcontroladores para educação em ciência, tecnologia, engenharia e matemática (*Science, Technology, Engineering and Mathematics – STEM*) (KALISZAN; GLABOWSKI, 2011; ONYEKA *et al.*, 2022) a mini-células de manufatura com inversores de frequência, controladores lógicos programáveis (CLPs) e redes de campo (OSTOJIC *et al.*, 2013; ANDRADE *et al.*, 2016), concebidas em diferentes contextos geográficos e institucionais, mas convergindo em um conjunto comum de princípios: integração multidisciplinar, baixo custo de implantação e orientação à aprendizagem ativa.

Esta seção sistematiza esse cenário, discutindo os conceitos e o papel dos equipamentos didáticos na formação em engenharia, apresentando exemplos representativos da literatura e do mercado, e identificando características relevantes para a análise de equipamentos didáticos.

2.1.1 Conceitos e papel dos kits didáticos em mecatrônica

Equipamentos e kits didáticos são recursos de aprendizagem que materializam, em escala laboratorial, os princípios teóricos abordados nas disciplinas de engenharia, oferecendo ao estudante a oportunidade de verificar, experimentar e depu-

rar conceitos em situações de complexidade controlada (QUINTINO *et al.*, 2017). Na literatura, esses recursos assumem diferentes configurações, como bancadas de ensaio para automação industrial (ANDRADE *et al.*, 2016), mini-células de manufatura com inversores de frequência e redes de campo (OSTOJIC *et al.*, 2013) e plataformas de desenvolvimento embarcado para sistemas de tempo real (KALISZAN; GLABOWSKI, 2011), que se diferenciam pelo nível de integração que propiciam: desde a demonstração de um único fenômeno físico até a simulação de uma célula produtiva completa, na qual o estudante precisa articular, simultaneamente, conhecimentos de mecânica, eletrônica, programação e controle.

O modelo pedagógico predominante no ensino superior de engenharia por décadas, centrado em aulas expositivas e avaliações de memorização, tem se mostrado insuficiente para o desenvolvimento das competências exigidas pelo mercado (ANDRADE *et al.*, 2016; VOLZ; OLIVEIRA, 2022). Em resposta a essa limitação, as Diretrizes Curriculares Nacionais para os Cursos de Graduação em Engenharia (BRASIL. Conselho Nacional de Educação. Câmara de Educação Superior, 2019) reorientaram a formação em direção a metodologias ativas, à aprendizagem baseada em problemas e ao desenvolvimento de competências aplicadas, exigindo que os projetos pedagógicos dos cursos prevejam atividades que integrem teoria e prática de forma contínua.

Nesse mesmo sentido, os Referenciais Nacionais dos Cursos de Engenharia (BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Superior, 2019) já estabeleciam a obrigatoriedade de atividades laboratoriais físicas como componente estruturante da formação do engenheiro. Kits e equipamentos didáticos são, portanto, não apenas um recurso pedagógico conveniente, mas um instrumento exigido pela própria regulamentação nacional para cumprir as diretrizes de formação prática e interdisciplinar (QUINTINO *et al.*, 2017; OSTOJIC *et al.*, 2013).

Esse panorama é corroborado por revisões sistemáticas recentes. Quintero e Maldonado (2024), em análise baseada no protocolo *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) de 39 artigos sobre competências do engenheiro na Indústria 4.0, identificam que a formação técnica deve ser complementada por habilidades de resolução digital de problemas e aprendizado em ambientes multidisciplinares, o que reforça a pertinência de equipamentos que integrem programação, eletrônica e redes industriais em um único recurso de ensino.

Na mesma direção, Abichandani *et al.* (2022), em revisão de 60 artigos sobre currículo de Internet das Coisas (*Internet of Things – IoT*) para educação STEM, apontam que plataformas de *hardware* de baixo custo, com destaque para Arduino, Raspberry Pi e ESP32, são as mais adotadas em contextos educacionais, justamente por sua acessibilidade e versatilidade pedagógica.

2.1.2 Exemplos de kits e plantas didáticas no mercado atual

O mercado de kits didáticos para automação apresenta soluções com níveis distintos de complexidade, custo e proximidade com o ambiente industrial.

Esse contraste também aparece na literatura: Ostojic *et al.* (2013) descrevem conjuntos didáticos com motor trifásico, inversor de frequência, CLP, relés, botoeiras e indicadores, empregados em disciplinas de automação, sistemas de supervisão, controle e aquisição de dados (*Supervisory Control and Data Acquisition – SCADA*) e programação de CLPs, enquanto Pajpach *et al.* (2022) propõem uma linha de inspeção de baixo custo, baseada em Arduino, câmera de smartphone e componentes LEGO, com custo aproximado de EUR 108 por kit.

A pesquisa de mercado atual indica uma lacuna relevante: existem soluções acessíveis para prototipagem como a esteira EA300 V3 para Arduino, e soluções mais completas para automação industrial, como kits *Programmable Logic Controller* (PLC)/RS-485 e modelos fischertechnik 24 V; entretanto, cada uma delas atende apenas parte dos objetivos didáticos deste trabalho, conforme sintetizado no Quadro 1.

Quadro 1 – Panorama comparativo de kits didáticos relacionados ao trabalho

Produto	Síntese comparativa
Widetech, Grupo Zilocchi e Soma Levantamento do Projeto Integrador (PI) 2023 (CABRERA; PIRES; GEORGETTI, 2023)	Custo: Widetech: R\$ 10.000,00; Zilocchi: R\$ 15.800,00; Soma: R\$ 8.600,00. Funcionalidades: esteiras didáticas com pneumática, programação de CLP, inversor de frequência ou monitoramento por display. Aplicações: automação industrial, acionamentos, CLP e demonstração de transporte em bancada. Limitações: custo elevado, ausência de sensor de cor e/ou magazine seletor nos modelos analisados e foco limitado em microcontroladores e redes abertas.
Kit de inspeção de baixo custo Pajpach <i>et al.</i> (2022)	Custo: aproximadamente EUR 108 por kit. Funcionalidades: esteira com LEGO, Arduino, sensor, servomotores, câmera de smartphone e <i>software</i> livre para visão computacional. Aplicações: Indústria 4.0, inspeção visual, classificação de peças e aprendizado de máquina em controle de qualidade. Limitações: solução acadêmica de prototipagem, sem prioridade para robustez de laboratório, redes industriais ou integração com CLP/SCADA.
Modelos fischertechnik 24 V para CLP (Fischertechnik, 2026)	Custo: US\$ 459,95 para a Conveyor Belt 24V; US\$ 1.387,95 para a Sorting Line with Color Detection 24V; US\$ 2.034,95 para a Production Line 24V. Modelos mais completos, como Factory Simulation 24V e Training Factory Industry 4.0 in 24V, são apresentados sob cotação. Funcionalidades: esteira 24 V, linha de seleção por cor e fábrica simulada com armazém, estação de processamento e ciclo de material. Aplicações: programação de CLP, células produtivas, seleção por cor e integração de módulos de manufatura. Limitações: maior custo; CLP e <i>software</i> podem compor aquisição separada; menor abertura para estudo de microcontroladores de baixo custo.

Fonte: Elaboração própria com base em Cabrera, Pires e Georgetti (2023), Pajpach *et al.* (2022) e Fischertechnik (2026)

2.1.3 Características desejáveis em equipamentos didáticos

A análise dos exemplos acadêmicos e comerciais permite identificar características recorrentes em kits didáticos: baixo custo relativo, possibilidade de replicação, processo físico observável, modularidade, integração entre áreas, abertura à programação e manutenção compatível com o ambiente de laboratório. Tais características aparecem tanto em propostas baseadas em microcontroladores e materiais acessíveis (QUINTINO *et al.*, 2017; PAJPACH *et al.*, 2022) quanto em plataformas voltadas a sistemas embarcados e automação industrial (KALISZAN; GLABOWSKI, 2011; OSTOJIC *et al.*, 2013; ANDRADE *et al.*, 2016).

O Quadro 2 sintetiza os principais critérios identificados na revisão.

Quadro 2 – Características desejáveis em equipamentos didáticos de automação

Característica desejável	Contribuição ao uso didático
Baixo custo e replicabilidade	Priorizam materiais acessíveis, <i>software</i> livre e construção local como alternativa a equipamentos comerciais de maior preço (QUINTINO <i>et al.</i> , 2017; PAJPACH <i>et al.</i> , 2022; VOLZ; OLIVEIRA, 2022).
Processo físico observável	Plantas didáticas eficazes aproximam o estudante de problemas de automação com sensores, atuadores e processos observáveis, em vez de restringir a prática a simulações (OSTOJIC <i>et al.</i> , 2013; ANDRADE <i>et al.</i> , 2016).
Modularidade e integração	Equipamentos didáticos relevantes integram mecânica, eletrônica, programação, controle e comunicação, favorecendo práticas interdisciplinares em engenharia (OSTOJIC <i>et al.</i> , 2013; QUINTERO; MALDONADO, 2024).
Abertura à programação	Plataformas educacionais com microcontroladores favorecem a autonomia do estudante e permitem explorar periféricos, entradas, saídas e lógica embarcada (ONYEKA <i>et al.</i> , 2022; ABICHANDANI <i>et al.</i> , 2022).
Comunicação industrial	A integração com redes de campo permite abordar endereçamento, registradores, supervisão, diagnóstico e troca de dados com outros dispositivos de automação (OSTOJIC <i>et al.</i> , 2013; CORDEIRO; COSTA; PIRES, 2017).
Sistemas de tempo real	O estudo prático de sistemas operacionais de tempo real (RTOS) exige plataformas nas quais tarefas, temporização e sincronização possam ser observadas em um sistema embarcado real (KALISZAN; GLABOWSKI, 2011).
Robustez e manutenção	Bancadas didáticas precisam ser confiáveis, manuteníveis e adequadas ao uso recorrente por diferentes turmas. Identificação, conectores, documentação e acesso aos componentes reduzem ambiguidades durante a operação e o diagnóstico (ANDRADE <i>et al.</i> , 2016; VOLZ; OLIVEIRA, 2022).

Fonte: Elaboração própria com base em Quintino *et al.* (2017), Pajpach *et al.* (2022), Ostojic *et al.* (2013), Andrade *et al.* (2016), Kaliszan e Glabowski (2011), Onyeka *et al.* (2022) e Cordeiro, Costa e Pires (2017).

2.2 Microcontroladores Aplicados ao Ensino e Plataformas Didáticas

Microcontroladores ocupam posição central em plataformas didáticas de automação, mecatrônica e IoT, pois permitem que sensores, atuadores, interfaces e algoritmos de controle sejam integrados em um mesmo sistema embarcado. Em revisão sistemática de 60 artigos sobre currículo, pedagogia e avaliação de IoT para educação STEM, Abichandani *et al.* (2022) identificam que plataformas de baixo custo, como Arduino, Raspberry Pi, ESP32/ESP8266 e Micro:bit, são recorrentes em práticas educacionais por combinarem acessibilidade, disponibilidade de bibliotecas e adequação a metodologias ativas, especialmente aprendizagem baseada em projetos.

Essa constatação reforça a pertinência de utilizar microcontroladores como base de equipamentos didáticos, desde que eles estejam associados a situações práticas nas quais o estudante possa relacionar código, sinais elétricos e comportamento físico do processo.

O estudo de Abichandani *et al.* (2022) também organiza o ensino de IoT em camadas, abrangendo sensoriamento, comunicação em rede, serviços/processamento e interfaces de usuário. Nessa mesma direção, Hercog *et al.* (2023) apresentam uma abordagem educacional baseada em ESP32 e PCBs de extensão para padronizar conexões com sensores e periféricos, evidenciando que a organização física do *hardware* é parte importante da experiência de aprendizagem, e não apenas um detalhe construtivo.

Arquiteturas modulares ampliam essa possibilidade ao associar periféricos compartilhados a diferentes placas de controle (ONYEKA *et al.*, 2022). Dessa forma, uma mesma planta pode apoiar atividades introdutórias e aplicações de maior complexidade, incluindo o estudo de RTOS em uma plataforma física dedicada à observação de tarefas, temporização e sincronização (KALISZAN; GLABOWSKI, 2011).

2.2.1 Definições básicas e arquitetura de microcontroladores

Microcontroladores são circuitos integrados programáveis que reúnem, em um único dispositivo, unidade de processamento, memória e periféricos de entrada e saída. Seu objetivo principal é executar uma aplicação embarcada específica, interagindo diretamente com sinais do processo. No contexto didático, essa característica permite que o estudante observe a relação entre instruções de *software*, condições elétricas e resposta física de sensores e atuadores (ABICHANDANI *et al.*, 2022).

O programa executado por um microcontrolador é comumente denominado *firmware*, pois fica associado ao *hardware* e define o comportamento do sistema embarcado. Para desenvolvê-lo, o estudante precisa articular o código-fonte, o ambiente de programação, as bibliotecas de periféricos, o processo de gravação e a depuração

do sistema. Essa cadeia de ferramentas, frequentemente chamada de *toolchain*, possui relevância pedagógica porque evidencia que a programação embarcada não se resume à lógica do algoritmo, mas envolve também restrições de memória, temporização, níveis de tensão, disponibilidade de pinos e compatibilidade entre periféricos (HERCOG *et al.*, 2023).

O ATmega328P, utilizado como base do Arduino Nano, é um microcontrolador de 8 bits com memória Flash, memória estática de acesso aleatório (*Static Random-Access Memory* – SRAM), memória somente leitura programável e apagável eletricamente (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory* – EEPROM), entradas e saídas digitais, conversores analógico-digitais (A/D), temporizadores e interfaces receptor/transmissor assíncrono universal (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* – UART), interface periférica serial (*Serial Peripheral Interface* – SPI) e circuito interintegrado (*Inter-Integrated Circuit* – I²C) (Microchip Technology, 2015).

Já o ESP32-S3, disponível no kit de desenvolvimento ESP32-S3-DevKitC-1, é um sistema em um chip (*System-on-Chip* – SoC) de 32 bits com processador Xtensa dual-core, conectividade Wi-Fi e Bluetooth de baixa energia (*Low Energy* – LE), maior quantidade de entradas e saídas de uso geral (*General-Purpose Input/Output* – GPIOs) e periféricos seriais, oferecendo recursos para aplicações que exigem conectividade, maior capacidade de processamento e execução concorrente (Espressif Systems, 2022b). As diferenças entre as plataformas permitem discutir níveis distintos de recursos e complexidade em aplicações embarcadas.

2.2.2 Plataformas atuais: Arduino Nano e ESP32-S3 no contexto educacional

A literatura sobre educação em IoT indica que plataformas de baixo custo e amplamente documentadas são particularmente adequadas ao ensino porque reduzem barreiras de entrada e facilitam a construção de projetos práticos. Abichandani *et al.* (2022) identificam Arduino e ESP32/ESP8266 entre os *hardwares* mais recorrentes em propostas educacionais, enquanto Hercog *et al.* (2023) destacam o ESP32 como uma plataforma adequada para ensino de IoT por combinar processamento, conectividade integrada e repositório de bibliotecas de código aberto. A diferença de recursos entre plataformas permite estruturar atividades didáticas em níveis progressivos de complexidade.

O Arduino Nano é adequado a práticas introdutórias por sua total integração com a plataforma Arduino e por permitir que o estudante compreenda entradas digitais, saídas digitais, temporizadores, modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* – PWM) e comunicação serial sem lidar imediatamente com maior complexidade de sistema.

O ESP32-S3, por sua vez, oferece maior capacidade de processamento e

maior quantidade de periféricos, além de incorporar conectividade sem fio e recursos adequados a aplicações embarcadas mais complexas (Espressif Systems, 2022b). Esses recursos permitem explorar RTOS, organização de *firmware*, comunicação e integração com outros sistemas.

2.2.3 Intercambiabilidade de microcontroladores: ganhos e desafios

A intercambiabilidade de microcontroladores consiste em permitir que diferentes placas ou famílias de controle sejam utilizadas sobre uma mesma base de periféricos. Em termos didáticos, essa abordagem amplia o alcance do equipamento, pois o mesmo conjunto de sensores, atuadores e interfaces pode ser explorado em diferentes níveis de complexidade. Onyeka *et al.* (2022) apresentam esse princípio por meio de uma arquitetura do tipo placa-mãe e placa-filha, na qual os periféricos permanecem na placa principal e o microcontrolador pode ser substituído conforme o objetivo de aprendizagem. Essa estratégia reduz desperdício de recursos e favorece a comparação entre plataformas.

A intercambiabilidade, contudo, introduz desafios de projeto que precisam ser tratados de forma explícita. A intercambiabilidade exige atenção a níveis de tensão, mapeamento de pinos, capacidade de corrente, compatibilidade de periféricos, diferenças de *toolchain*, bibliotecas e procedimentos de gravação. Também exige que o *hardware* evite conflitos elétricos quando apenas uma das plataformas estiver ativa e que a documentação deixe claro quais funções estão disponíveis em cada modo de uso. Nesse tipo de arquitetura, a PCB não atua apenas como suporte mecânico para componentes, mas como elemento de organização das interfaces e da transição entre plataformas.

2.3 Redes Industriais e Modbus no Contexto Didático

A inclusão de redes industriais em equipamentos didáticos amplia a prática para além do controle local, permitindo que variáveis, comandos e estados de uma planta sejam trocados com CLPs, sistemas supervisórios e outros dispositivos de automação. Em contexto educacional, esse recurso aproxima programação embarcada, instrumentação e supervisão, favorecendo práticas nas quais o estudante observa como dados de processo podem ser disponibilizados a um sistema externo (CORDEIRO; COSTA; PIRES, 2017).

Entre os protocolos empregados nesse cenário, o Modbus se destaca por seu uso em automação industrial e por seu modelo de comunicação baseado em requisições e respostas. Sua especificação define uma unidade de dados de protocolo, denominada *Protocol Data Unit* (PDU), composta por código de função e campo de

dados, além de um modelo lógico que organiza informações em *coils*, *discrete inputs*, *input registers* e *holding registers* (Modbus Organization, 2012).

Do ponto de vista físico e de transporte, o protocolo pode ser conduzido por diferentes meios, incluindo linha serial, frequentemente associada a interfaces diferenciais como RS-485, e redes Ethernet (Modbus Organization, 2006b; Modbus Organization, 2006a).

2.4 Projeto de Placas de Circuito Impresso para Produtos Didáticos

Uma placa de circuito impresso (PCI) reúne, em uma estrutura física, as interligações elétricas, a fixação dos componentes e os elementos necessários à montagem e à conexão com outros módulos. Seu projeto não se limita ao roteamento das trilhas, pois envolve materiais, processos de fabricação, tolerâncias, montagem e condições de operação que influenciam diretamente a qualidade do produto final (COOMBS, 2007).

Em produtos didáticos, a PCI também participa da organização da experiência de aprendizagem. Plataformas educacionais descritas por Onyeka *et al.* (2022) e Hercog *et al.* (2023) utilizam placas dedicadas para integrar microcontroladores, sensores e interfaces de maneira repetível. Essa organização é especialmente relevante em equipamentos submetidos ao uso recorrente por diferentes estudantes, nos quais robustez, clareza das conexões e facilidade de diagnóstico precisam ser consideradas juntamente com o funcionamento elétrico.

2.4.1 Papel da PCI em produtos didáticos

Montagens provisórias, como matrizes de contato ou interligações ponto a ponto entre módulos e kits de desenvolvimento, são úteis durante a experimentação inicial, pois permitem alterar rapidamente as conexões e avaliar diferentes soluções. Entretanto, a manutenção de fios e módulos independentes como estrutura definitiva aumenta a quantidade de conexões sujeitas a erros, dificulta a reprodução do circuito e reduz a previsibilidade da montagem. Uma PCI dedicada substitui parte dessas interligações por condutores e pontos de conexão definidos no próprio projeto, favorecendo a repetibilidade do conjunto (COOMBS, 2007).

Essa característica amplia o valor da placa em aplicações educacionais. A integração dos periféricos em uma base comum permite que diferentes unidades do equipamento preservem a mesma organização elétrica e facilita a preparação de práticas sucessivas. A arquitetura modular apresentada por Onyeka *et al.* (2022), por exemplo, mantém os periféricos na placa principal e permite substituir o módulo de controle conforme o objetivo de aprendizagem. De forma semelhante, Hercog *et*

al. (2023) empregam placas de extensão para padronizar a conexão de sensores e interfaces em atividades com ESP32.

Como contrapartida, o desenvolvimento da PCI introduz custo de fabricação e montagem e reduz a facilidade de realizar alterações após a produção. Modificações mais significativas podem exigir retrabalho ou uma nova revisão da placa, o que torna a verificação do projeto uma etapa essencial (COOMBS, 2007).

2.4.2 Ferramentas de desenvolvimento eletrônico – ECAD

As ferramentas de desenvolvimento eletrônico assistido por computador, frequentemente identificadas pela sigla ECAD, são ambientes utilizados para registrar, organizar e verificar o projeto eletrônico antes da fabricação. No projeto de PCIs, essas ferramentas integram a captura do esquemático, a associação entre símbolos e encapsulamentos, a definição da geometria da placa, o posicionamento dos componentes, o roteamento das trilhas e a geração dos arquivos de fabricação e montagem. Também viabilizam verificações automáticas de consistência elétrica e geométrica, relacionando o modelo digital do circuito aos critérios técnicos apresentados na sequência (COOMBS, 2007). Um exemplo de ferramenta nesse domínio é o KiCad, um conjunto integrado de ferramentas livre e de código aberto para automação de projeto eletrônico que reúne captura esquemática, simulação, *layout* de PCI, visualização tridimensional e exportação de dados para fabricação (KiCad Project, 2026).

2.4.3 Critérios e referências técnicas para projeto

As regras de projeto estabelecem limites geométricos e elétricos que orientam a elaboração da PCI. Esses limites são configurados na ferramenta de desenvolvimento e verificados por meio da checagem das regras de projeto, ou *Design Rule Check* (DRC), antes da geração dos arquivos de fabricação. A verificação procura identificar, entre outros problemas, trilhas ou espaçamentos abaixo dos valores definidos, furos incompatíveis com os respectivos *pads* e elementos posicionados indevidamente nas bordas da placa (COOMBS, 2007).

Entre as categorias relevantes estão as larguras e os espaçamentos mínimos, os anéis anulares ao redor de furos metalizados, as dimensões de *pads* e vias, as distâncias até as bordas, as aberturas da máscara de solda e a legibilidade da serigrafia. Esses parâmetros não devem ser definidos isoladamente: a capacidade de corrente, a tensão de operação, o processo de montagem e as tolerâncias de fabricação precisam ser considerados em conjunto (COOMBS, 2007).

Normas da família *Institute for Printed Circuits* (IPC) são referências recorrentes para a sistematização desses requisitos. Coombs (2007) também reúne princípios de projeto, fabricação e montagem aplicáveis à análise de PCIs. Na aplicação prática,

recomendações bibliográficas não substituem os requisitos elétricos do circuito nem os limites declarados pelo serviço de fabricação. Por isso, essas fontes de restrições devem ser compatibilizadas antes da liberação dos arquivos.

2.4.4 Distribuição de alimentação e sistemas de aterramento

Em uma PCI, o nó de referência designado como terra (GND) não constitui um ponto ideal de potencial invariável. Trilhas, vias, conectores e planos apresentam resistência e indutância, de modo que a passagem de corrente produz diferenças de potencial entre pontos fisicamente separados. Consequentemente, o sistema de aterramento deve ser analisado simultaneamente como referência de tensão, caminho de retorno dos sinais e caminho de circulação das correntes de alimentação. O objetivo é oferecer baixa impedância e impedir que quedas de tensão produzidas por uma carga sejam somadas indevidamente à referência de outro circuito (COOMBS, 2007).

Entre as topologias usuais estão as conexões em ponto único, também denominadas estrela, as estruturas multiponto, as distribuições em árvore e os planos de cobre. Na conexão em estrela, as cargas possuem retornos próprios até um ponto comum, reduzindo o compartilhamento de impedância entre seus percursos. Estruturas multiponto e planos, por sua vez, oferecem trajetos distribuídos e tendem a apresentar menor impedância em frequências mais elevadas. Não existe, entretanto, uma topologia universalmente adequada: frequência, amplitude das correntes, sensibilidade dos circuitos e geometria da placa determinam a solução aplicável (COOMBS, 2007).

Em placas que reúnem controle lógico e motores, a conexão em estrela pode ser empregada para impedir que a corrente pulsante do acionamento percorra o mesmo trecho de retorno utilizado pelo microcontrolador ou pelas interfaces de comunicação. Nesse arranjo, os retornos de lógica e potência chegam separadamente a um ponto comum de baixa impedância próximo à distribuição da alimentação ou ao estágio de acionamento. A separação deve ser funcional, e não apenas gráfica: criar dois nomes de GND e uni-los por uma trilha estreita pode concentrar corrente e aumentar a diferença de potencial entre as regiões (COOMBS, 2007).

Planos sólidos proporcionam maior área condutora e resistência de folha mais baixa e previsível. Em contraste, uma malha hachurada remove parte do cobre e cria trajetos mais longos e dependentes da geometria da malha. Coombs observa que a impedância de planos perfurados é difícil de modelar devido às variações de tamanho, forma e posição das aberturas. Assim, em placas rígidas, o plano sólido é a referência inicial para GND; o preenchimento hachurado deve ser adotado apenas quando houver uma necessidade específica de projeto ou fabricação, e não como substituto eletricamente equivalente (COOMBS, 2007).

Em uma PCI de duas camadas, as expressões GND/GND e GND/VCC, em

que VCC representa a tensão positiva de alimentação, devem ser entendidas como predominância de cobre, pois componentes, trilhas e vias interrompem os preenchimentos. Na organização GND/GND, as duas faces contêm áreas de terra interligadas por vias de costura, o que pode criar caminhos paralelos de retorno, desde que as ilhas de cobre estejam efetivamente conectadas. Na organização GND/VCC, uma face privilegia o retorno e a outra distribui a alimentação, reduzindo a necessidade de trilhas longas de potência, mas exigindo cuidado para preservar um plano de retorno contínuo. A escolha depende da densidade de roteamento, das correntes e da necessidade de distribuir diferentes tensões (COOMBS, 2007).

A divisão de um plano pode ser útil para organizar grupos funcionais, como alimentação, sinais digitais e acionamentos pulsados. Contudo, um sinal roteado sobre uma abertura obriga sua corrente de retorno a contornar a descontinuidade, aumentando a área da malha e a impedância do percurso. Por essa razão, a separação física das regiões deve ser combinada com o roteamento: sinais não devem atravessar fendas entre planos, e as conexões entre grupos devem ocorrer em pontos nos quais o caminho de retorno também possa ser controlado (COOMBS, 2007). A Figura 1 apresenta um esquema ilustrativo elaborado a partir dos conceitos descritos por Coombs (2007).

Figura 1 – Conceitos de distribuição de terra em placas de circuito impresso



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4.5 Capacitores de desacoplamento e reserva local de energia

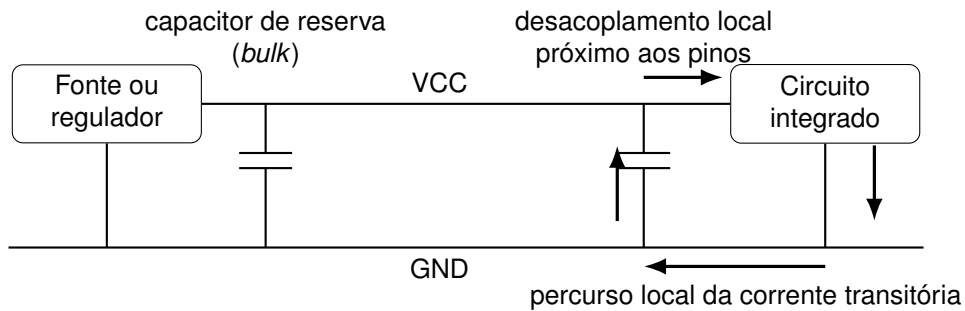
As correntes consumidas por circuitos digitais e drivers não permanecem constantes durante a operação. Quando essas variações percorrem trilhas longas desde a fonte até o componente, a própria rede de alimentação passa a participar do transitório, criando perturbações locais de tensão. Por isso, capacitores de desacoplamento são posicionados junto aos pinos de alimentação dos circuitos integrados, com o objetivo de fornecer uma reserva imediata de carga e reduzir a circulação da corrente transitória por toda a placa (COOMBS, 2007).

Além do desacoplamento local, capacitores de maior valor, frequentemente denominados capacitores de reserva ou *bulk*, são empregados próximos à entrada da

alimentação, aos reguladores e aos drivers. Sua função é sustentar variações de carga mais amplas do conjunto, enquanto os capacitores locais reduzem perturbações no entorno de cada circuito integrado. Assim, os dois grupos têm funções complementares: o capacitor de reserva atua sobre a distribuição de energia da placa, e o capacitor de desacoplamento atua sobre a malha curta entre alimentação, componente e retorno (COOMBS, 2007).

No projeto de uma PCI, essa distinção influencia diretamente o posicionamento dos componentes. O capacitor de desacoplamento deve ser mantido próximo ao pino que alimenta o circuito integrado e ao seu caminho de retorno, enquanto os capacitores de reserva são distribuídos em pontos de maior demanda de energia. A Figura 2 apresenta essa relação de forma conceitual.

Figura 2 – Funções dos capacitores de reserva e de desacoplamento local



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4.6 Dimensionamento elétrico e térmico de trilhas

Uma trilha pode ser aproximada como um condutor de seção retangular. Sua resistência elétrica depende da resistividade ρ do cobre, do comprimento L , da largura w e da espessura t , conforme a Equação 1. A queda de tensão e a potência dissipada por efeito Joule são expressas, respectivamente, pelas Equação 2 e Equação 3 (BOYLESTAD, 2012; COOMBS, 2007).

$$R = \rho \frac{L}{wt} \quad (1)$$

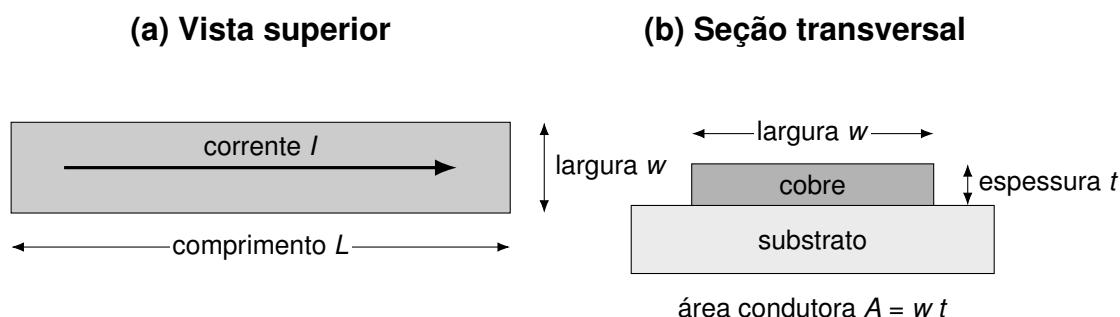
$$\Delta V = IR \quad (2)$$

$$P = I^2 R \quad (3)$$

As relações mostram que aumentar a largura ou a espessura reduz simultaneamente a resistência, a queda de tensão e a dissipação. O comprimento produz o efeito oposto, razão pela qual percursos de maior corrente devem ser curtos e diretos.

A Figura 3 apresenta um esquema ilustrativo elaborado a partir dos conceitos descritos por Coombs (2007), identificando as grandezas utilizadas no cálculo.

Figura 3 – Grandezas geométricas empregadas no dimensionamento de uma trilha



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4.7 Organização do layout em placas com potência e lógica

Placas que integram alimentação, acionamentos e circuitos lógicos devem ser organizadas em regiões funcionais. A separação física entre entrada de energia, conversores, drivers de motores, microcontroladores e comunicação reduz cruzamentos desnecessários e facilita a análise dos caminhos percorridos pelas correntes. Essa organização também auxilia a montagem, a inspeção e a localização de falhas (COOMBS, 2007).

O posicionamento deve iniciar pelos componentes que impõem restrições mecânicas ou elétricas: conectores, elementos de potência, reguladores, dispositivos de proteção e módulos de controle. Os componentes associados a cada função devem permanecer próximos, especialmente quando formam malhas de comutação ou conduzem correntes elevadas. Nós com variações rápidas de tensão ou corrente devem ocupar áreas reduzidas e permanecer afastados das entradas sensíveis e das interfaces de comunicação (COOMBS, 2007).

Nas interfaces I²C, UART e RS-485, o percurso dos sinais deve ser planejado juntamente com seu retorno. Um plano de GND contínuo oferece referência comum, enquanto fendas, estreitamentos e mudanças desnecessárias de camada aumentam a impedância e a área das malhas. Comprimento admissível, terminação, resistores de polarização e proteção dependem da interface e dos dispositivos empregados, devendo ser confirmados nos respectivos documentos de fabricante (COOMBS, 2007).

Conectores e componentes submetidos a inserção, remoção ou tração de cabos devem ser posicionados de modo que o esforço seja transferido à estrutura da placa e aos seus pontos de fixação. Pontos de teste acessíveis para alimentações, GND e sinais relevantes permitem verificar os blocos sem desmontar todo o equipamento. A serigrafia deve identificar funções, polaridades e referências sem encobrir áreas de

soldagem (COOMBS, 2007).

2.5 Síntese: Convergência para o Retrofitting Eletrônico

A fundamentação reunida caracteriza o *retrofitting* eletrônico como estratégia de atualização de um equipamento existente, e não como desenvolvimento integral de um novo produto. Esse processo pressupõe preservar funções e ativos ainda aproveitáveis e incorporar tecnologias capazes de adequá-los a requisitos atuais (LINS; OLIVEIRA, 2019).

Esses conhecimentos fornecem a base conceitual para analisar alternativas, estabelecer requisitos e justificar as decisões de um processo de atualização eletrônica. A aplicação desses critérios ao equipamento, incluindo as escolhas realizadas e as etapas efetivamente executadas, é apresentada no capítulo seguinte.

3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta a metodologia e o desenvolvimento do *retrofitting* eletrônico da esteira seletora. Inicialmente, são caracterizados o equipamento herdado e as limitações de sua configuração eletrônica, a partir dos quais se delimitam o escopo, os requisitos e os critérios adotados para a nova arquitetura. Também são justificadas as escolhas das plataformas de controle e da interface de comunicação industrial.

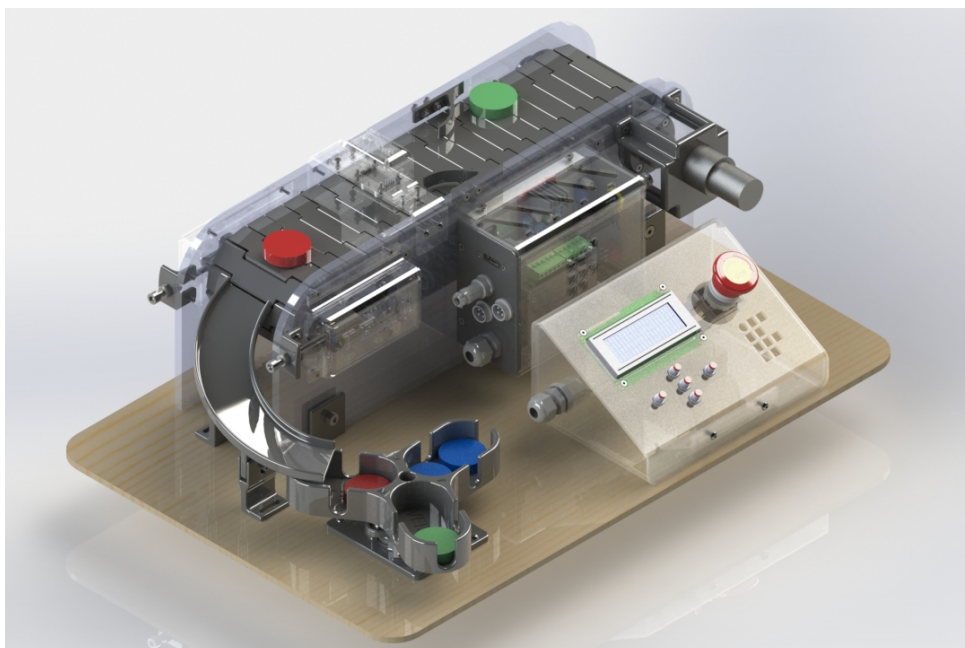
Na sequência, descrevem-se o desenvolvimento das placas, as decisões relativas aos circuitos, componentes e regras de roteamento. O capítulo apresenta ainda o processo de fabricação e aquisição de componentes, o procedimento planejado para a validação das placas e a organização da documentação.

3.1 Ponto de partida e estado atual do equipamento

O ponto de partida do trabalho foi a esteira seletora desenvolvida em Projetos Integradores anteriores, composta por estrutura mecânica de bancada, esteira transportadora, magazine seletor, sensor de cor, interface com o usuário, dispositivos de comando e eletrônica baseada em ESP32 (CABRERA; PIRES; GEORGETTI, 2023; SILVA; PIRES; CABRERA, 2024). Esses trabalhos demonstraram a viabilidade do processo de seleção e seu potencial didático, mas a eletrônica permanecia distribuída em módulos de prototipação e interligações frágeis.

A visão geral da configuração herdada é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Visão geral da esteira seletora

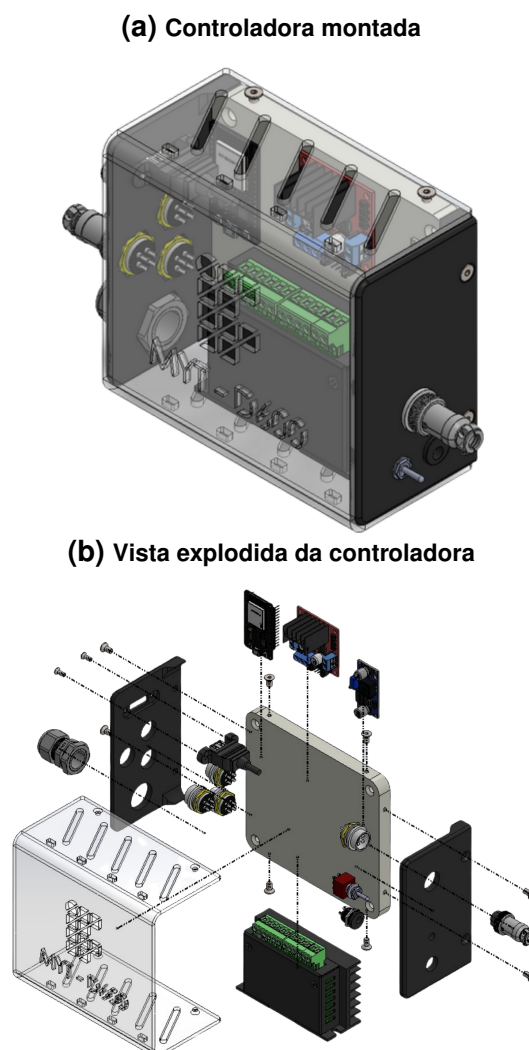


Fonte: Cabrera, Pires e Georgetti (2023).

A estrutura física, a esteira transportadora, o mecanismo de separação e os sensores foram tratados como elementos herdados do equipamento. A função principal da esteira, isto é, transportar objetos, identificar sua cor e acionar o mecanismo de separação, também foi preservada. O trabalho não teve como objetivo redesenhar a planta mecânica nem alterar o princípio de funcionamento do processo; sua contribuição concentrou-se na reorganização da eletrônica e das interfaces associadas ao controle.

A controladora empregada na versão anterior é registrada na Figura 5, evidenciando a organização física dos componentes no interior do módulo de controle.

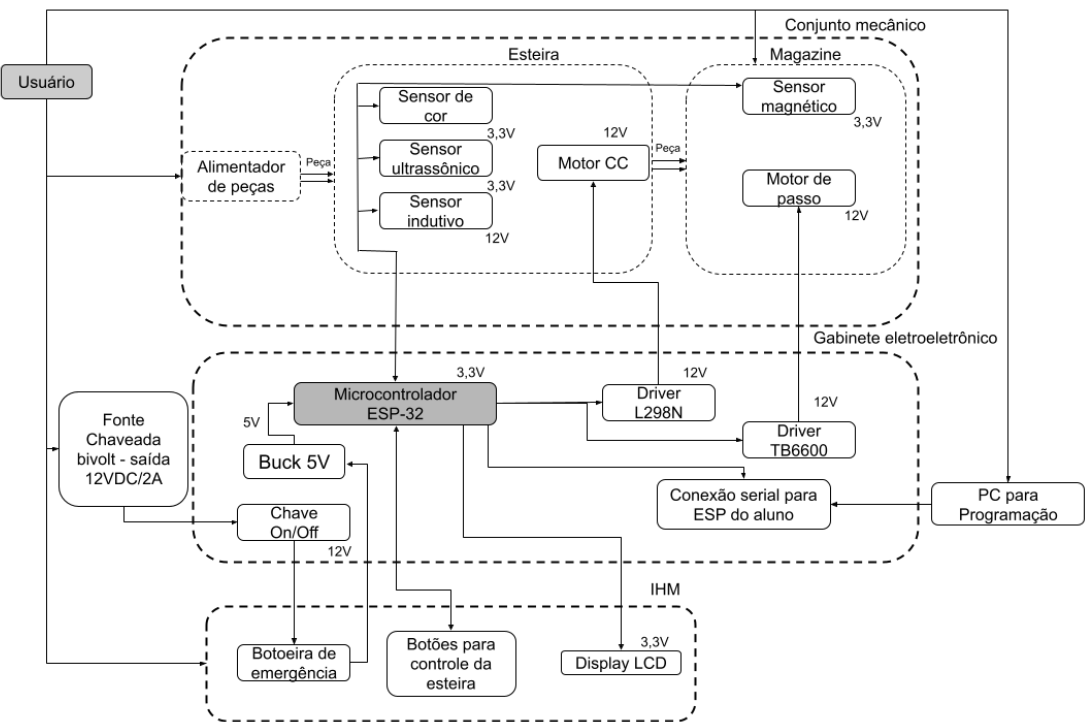
Figura 5 – Controladora empregada na versão anterior do equipamento



Fonte: Cabrera, Pires e Georgetti (2023).

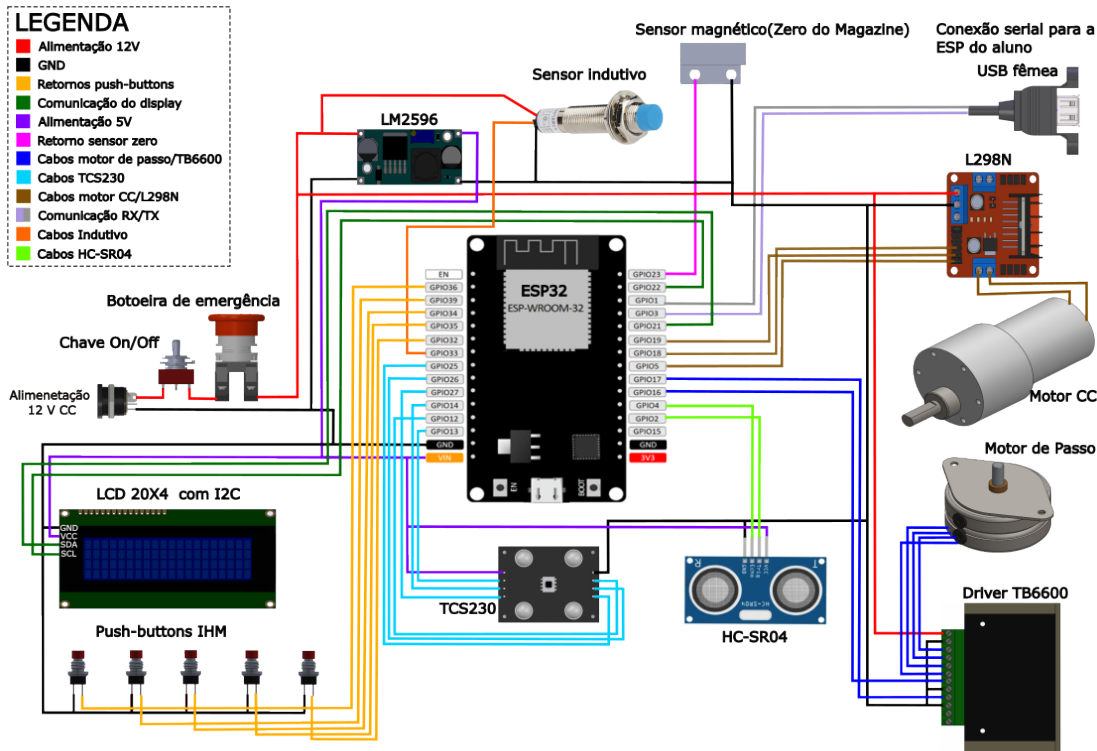
O diagrama de blocos apresentado na Figura 6, sintetiza os principais componentes existentes no equipamento enquanto o diagrama elétrico geral, mostrado na Figura 7, detalha as interligações elétricas antes do *retrofitting* eletrônico.

Figura 6 – Diagrama de blocos da arquitetura eletrônica anterior



Fonte: Silva, Pires e Cabrera (2024).

Figura 7 – Diagrama elétrico geral da arquitetura eletrônica anterior



Fonte: Silva, Pires e Cabrera (2024).

A partir desse estado inicial, as limitações observadas estavam relacionadas principalmente à ausência de uma placa dedicada, à dificuldade de inspeção dos sinais, à menor clareza para manutenção e à falta de uma arquitetura preparada para diferentes níveis de uso didático. Também não havia, na configuração original, uma solução consolidada para alternar entre plataformas de microcontrolador nem para disponibilizar comunicação industrial por meio de um barramento RS-485 com protocolo Modbus RTU.

3.2 Definições de escopo e requisitos

Nesta seção, são apresentadas as definições de escopo e os requisitos adotados para o desenvolvimento do *retrofitting* eletrônico.

3.2.1 Escopo proposto para o desenvolvimento

O escopo do *retrofitting* eletrônico foi definido para transformar a eletrônica previamente montada em uma solução mais organizada, documentada e adequada ao uso didático. Foram incluídos no trabalho o desenvolvimento de uma placa controladora dedicada, a compatibilidade com Arduino Nano e ESP32-S3, a interface RS-485 com Modbus RTU, a placa de interface homem-máquina (IHM), a reorganização das conexões da esteira e a documentação necessária para operação, testes e práticas de ensino. Permaneceram fora do escopo o redesenho da estrutura mecânica principal, a alteração do processo de seleção por cor e a validação pedagógica longitudinal com turmas.

A IHM foi concebida como uma placa separada da controladora, destinada à instalação no módulo físico de interação com o usuário. Essa placa se comunica com a controladora por meio de barramento I²C e sinais digitais auxiliares, permitindo concentrar comandos e sinalizações no módulo de IHM. Também foram previstos recursos de expansão para teclado matricial 4x3 e *display* de sete segmentos com até quatro dígitos; esses recursos permaneceram como reserva de projeto e não integraram a montagem nem a validação em bancada, em razão da relação entre complexidade, benefício e prazo.

3.2.2 Requisitos do retrofitting eletrônico

O Quadro 3 sintetiza os requisitos adotados para orientar o desenvolvimento do *retrofitting* eletrônico e os respectivos critérios de aceite. Os requisitos funcionais descrevem as capacidades que o equipamento deve oferecer para cumprir sua finalidade operacional e didática, enquanto os requisitos não funcionais indicam restrições, condições de qualidade e aspectos de manutenção, fabricação e documentação. Os requisitos são apresentados de forma vinculada às evidências que deverão comprovar

seu atendimento. Assim, esta seção estabelece o que deve ser atendido e como cada item será verificado. Nos códigos do quadro, RF indica requisito funcional e RNF indica requisito não funcional.

Quadro 3 – Requisitos funcionais e não funcionais do retrofitting eletrônico

Código	Tipo	Requisito	Critério de Aceite
RF-01	Funcional	Organizar, em placas dedicadas, as conexões elétricas da controladora e da interface IHM, reduzindo ruído e mau contato.	Inspeção de montagem e testes de continuidade.
RF-02	Funcional	Permitir a operação da placa com Arduino Nano e com ESP32-S3, garantindo a coexistência de ambos na placa, porém sem ativação simultânea.	Testes funcionais em cada plataforma e verificação do seletor.
RF-03	Funcional	Disponibilizar barramento RS-485, compartilhado entre as plataformas de controle, como meio físico apto a sustentar comunicação Modbus RTU com mestre externo.	Transmissão e recepção serial pelo meio físico RS-485 em ensaio de bancada.
RF-04	Funcional (Opcional)	Disponibilizar entradas e saídas de uso geral extras para testes, expansão e práticas didáticas.	Ensaio de leitura e acionamento individual de GPIOs.
RNF-01	Não funcional	Garantir estabilidade da comunicação entre a placa controladora e a placa de interface IHM por meio de I ² C e sinais digitais.	Teste das linhas de comunicação e conferência de continuidade.
RNF-02	Não funcional	Melhorar organização, identificação e manutenibilidade das conexões eletrônicas.	Inspeção da placa, serigrafia, conectores e documentação.
RNF-03	Não funcional	Priorizar componentes, fornecedores e processos compatíveis com custo, prazo e disponibilidade.	Análise da lista de materiais (<i>Bill of Materials</i> – BOM), cotações e substituições de componentes.
RNF-04	Não funcional	Manter fabricabilidade compatível com fornecedores de prototipagem de PCI e com as regras de projeto adotadas.	Chechagem das regras elétricas (<i>Electrical Rule Check</i> – ERC), DRC e conferência dos arquivos de fabricação.
RNF-05	Não funcional	Garantir entrega mínima de valor esperado pelo projeto acima das entregas opcionais.	Registro em documentação e encaminhamento para trabalhos futuros.

Fonte: Elaboração própria.

3.2.3 Escolha das plataformas de controle

A escolha das plataformas de controle retomou a revisão sistemática de 60 artigos conduzida por Abichandani *et al.* (2022), na qual Arduino e ESP32/ESP8266 estão entre os recursos de *hardware* mais recorrentes nos estudos sobre ensino de IoT. Entre as duas plataformas adotadas, o Arduino Nano foi selecionado como a alternativa de menor complexidade, por ser compacto, facilmente acessível aos estudantes e disponível no câmpus. Além disso, o ATmega328P e a plataforma Arduino

já são conhecidos pelos alunos e empregados nas aulas, o que reduz a barreira inicial para atividades de entradas, saídas, temporização e comunicação serial (Microchip Technology, 2015).

Para a plataforma de maior capacidade, selecionou-se o kit de desenvolvimento ESP32-S3-DevKitC-1 após o levantamento das conexões da eletrônica existente indicar que as entradas e saídas do kit de desenvolvimento DOIT-ESP32-Devkit-V1, baseado no módulo ESP32-WROOM-32, anteriormente utilizada já estavam ocupadas. Essa condição impediria a inclusão de novas funções, como a interface RS-485 destinada ao Modbus RTU, sem remanejamentos ou recursos adicionais.

O ESP32-S3 disponibiliza maior quantidade de GPIOs e um conjunto mais amplo de periféricos; na placa ESP32-S3-DevKitC-1, também estão disponíveis um diodo emissor de luz (*Light-Emitting Diode* – LED) endereçável no padrão vermelho, verde e azul (*Red, Green and Blue* – RGB) e uma interface de barramento serial universal (*Universal Serial Bus* – USB) conectada ao controlador USB Serial/ *Joint Test Action Group* (JTAG) do microcontrolador, que permite gravação e depuração JTAG sem uma sonda externa (Espressif Systems, 2022b; Espressif Systems, 2022a).

A compatibilidade da placa desenvolvida com o Arduino Nano e o ESP32-S3 preserva, assim, a progressão didática pretendida e aplica ao contexto da esteira o princípio de intercambiabilidade discutido por Onyeka *et al.* (2022).

3.2.4 Escolha do tipo de interface para comunicação industrial

Para a comunicação industrial, foram avaliadas as alternativas Modbus RTU sobre linha serial e Modbus sobre *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (TCP/IP) em rede Ethernet. O Modbus TCP/IP possibilitaria integração direta a uma rede Ethernet, mas exigiria interface de rede, integração com a pilha TCP/IP e validações adicionais. O Modbus RTU atende ao objetivo de comunicação com CLPs, supervisórios e dispositivos externos por meio de uma interface RS-485, com menor impacto sobre o *hardware* e sobre o prazo disponível.

Com base no exposto, o RTU foi selecionado como decisão de escopo, e não como indicação de superioridade geral sobre o TCP/IP (Modbus Organization, 2012; Modbus Organization, 2006b; Modbus Organization, 2006a).

3.3 Desenvolvimento das placas eletrônicas

O desenvolvimento da placa controladora e da placa de IHM foi conduzido mediante definição de uso de PCBs de dupla face, configuração que equilibra redução das dimensões e custo, e a partir do levantamento das interfaces necessárias à esteira e da divisão do circuito em setores funcionais. O esquemático e o *layout* foram desenvolvidos no KiCad 10. A organização adotada permitiu tratar separadamente as

funções do circuito e definir, para cada setor, critérios de desenvolvimento e verificação compatíveis com suas características.

3.3.1 Setores funcionais necessários ao conjunto eletrônico

O levantamento inicial resultou na divisão do conjunto eletrônico em setores associados às funções de alimentação, controle, acionamento, comunicação, interfaceamento e seleção de plataforma. Essa divisão permitiu organizar o esquemático, agrupar componentes no *layout*, planejar conectores e estabelecer critérios de teste para cada bloco. O Quadro 4 apresenta os setores definidos.

Quadro 4 – Setores funcionais definidos para o conjunto eletrônico

Setor	Função no projeto
Alimentação 5 V	Disponibilizar a alimentação principal dos circuitos lógicos e periféricos compatíveis com esse nível de tensão como ESP32-S3(VIN) e Arduino Nano.
Alimentação 3,3 V	Alimentar os circuitos e interfaces associados ao ESP32-S3 e a dispositivos que exigem nível lógico de 3,3 V.
Driver do motor de corrente contínua (CC)	Permitir o acionamento do motor de corrente contínua empregado na movimentação da esteira.
Comunicação RS-485 e multiplexação do barramento de entrada	Disponibilizar a interface física de comunicação Modbus RTU e organizar o compartilhamento de sinais de entrada conforme a plataforma ativa.
Interface GPIO	Disponibilizar entradas e saídas de uso geral (<i>General-Purpose Input/Output</i> – GPIO) para testes funcionais, expansão e atividades didáticas.
Interface Arduino Nano	Conectar o Arduino Nano aos periféricos compartilhados da placa respeitando alimentação, pinagem e limitações elétricas da plataforma.
Interface ESP32-S3	Conectar o ESP32-S3 aos periféricos compartilhados e exclusivos da placa respeitando alimentação, pinagem e limitações elétricas da plataforma.
Seletor de microcontrolador	Impedir a ativação simultânea das duas plataformas e direcionar os sinais compartilhados ao controlador selecionado.
Placa de IHM	Concentrar comandos locais e sinalizações no módulo físico de IHM, comunicando-se com a controladora por I ² C e sinais digitais auxiliares.
Recursos opcionais da IHM	Reservar interface para teclado matricial 4x3 e <i>display</i> de sete segmentos com até quatro dígitos, sem incluí-los na montagem e validação desta etapa.

Fonte: Elaboração própria.

3.3.2 Estratégia de desenvolvimento e verificação dos circuitos

A análise da documentação técnica constituiu uma etapa comum ao desenvolvimento de todos os setores. Em cada circuito, foram examinadas as folhas de dados, as especificações, os circuitos de referência e as recomendações dos fabricantes para confirmar características elétricas, conexões e condições de operação dos componentes. A partir dessa base documental, foram selecionados métodos complementares de

desenvolvimento e verificação conforme a natureza de cada setor e a disponibilidade de modelos de simulação adequados.

Os circuitos convencionais que podiam ser representados no Proteus 8 foram submetidos à simulação, como ocorreu com o módulo de GPIOs. Nos demais setores não foi empregado o mesmo procedimento por não haver modelos específicos disponíveis ou suficientemente representativos no simulador. Em casos de topologias anteriormente aplicadas em projetos profissionais do autor, houve o reaproveitamento após a adequação dos requisitos. Para os circuitos sem topologia previamente empregada, o desenvolvimento seguiu recomendações da documentação técnica.

3.3.3 Decisões de projeto e componentes

As decisões comuns aos setores eletrônicos consideraram a compatibilidade elétrica com as interfaces herdadas da esteira, a disponibilidade de componentes no mercado nacional, o custo, a existência de documentação técnica, a facilidade de manutenção e a preservação da arquitetura com Arduino Nano e ESP32-S3. Esses critérios foram aplicados em conjunto: a adoção de um componente eletricamente adequado não seria suficiente se sua aquisição, substituição ou inspeção comprometesse a fabricação e o uso recorrente da placa.

3.3.3.1 Alimentação

A entrada principal de 12 V foi mantida por ser a alimentação disponível na arquitetura herdada da esteira. A partir dessa linha, o conversor *buck* síncrono TPS563201 foi empregado para gerar o barramento de 5 V. O componente admite entrada entre 4,5 V e 17 V e saída ajustável, condição compatível com a conversão prevista, além de integrar os transistores de comutação em um encapsulamento compacto (Texas Instruments, 2024b). A linha de 12 V também permaneceu disponível para as cargas que operam diretamente nesse nível, como o estágio de potência do motor e a bobina do relé do módulo GPIO.

O barramento de 5 V foi definido como tensão externa comum para o Arduino Nano, a entrada de alimentação da placa ESP32-S3, o transceptor MAX485, os periféricos compatíveis e o lado de 5 V dos circuitos de interfaceamento. A partir dele, o regulador linear de baixa queda (*Low-Dropout Regulator* – LDO) AMS1117-3.3 gera localmente 3,3 V para os circuitos lógicos associados ao domínio do ESP32-S3. A opção pelo LDO, em vez de um segundo estágio *buck*, buscou fornecer uma alimentação estável com menor quantidade de componentes e menor complexidade de *layout*, sem um risco térmico relevante para a conversão de 5 V para 3,3 V nas cargas locais previstas. A folha de dados do regulador apresenta essa conversão como aplicação prevista e estabelece a necessidade de capacitores para estabilidade e

resposta transitória (Advanced Monolithic Systems, 2009).

O dimensionamento separou, portanto, três linhas: 12 V para as cargas de maior tensão; 5 V para os módulos e interfaces externas; e 3,3 V para a lógica de baixa tensão. Capacitores de desacoplamento foram posicionados junto aos circuitos integrados, enquanto a filtragem de entrada e de saída dos reguladores seguiu as recomendações dos fabricantes. No regulador linear, a dissipação resulta da diferença entre 5 V e 3,3 V multiplicada pela corrente das cargas atendidas; por esse motivo, o AMS1117-3.3 foi reservado às cargas locais de 3,3 V, e a confirmação térmica integra o procedimento de validação da placa. A disposição final desses estágios é apresentada posteriormente na Figura 8.

3.3.3.2 Interfaceamento dos microcontroladores

O Arduino Nano e o ESP32-S3 foram mantidos simultaneamente instalados para permitir a alternância rápida entre atividades introdutórias e avançadas sem remover repetidamente os módulos da placa. A permanência física dos dois controladores reduz o manuseio dos conectores e preserva a proposta didática de utilizar a mesma planta com plataformas de complexidades distintas. Entretanto, apenas um conjunto de interfaces compartilhadas pode permanecer ativo por vez, conforme estabelecido no requisito RF-02.

A seleção atua sobre as habilitações dos transceptores de barramento e sobre a multiplexação dos sinais compartilhados. Para o microcontrolador não selecionado, as saídas dos *buffers* são colocadas em alta impedância; para o selecionado, são habilitados somente os caminhos correspondentes. O uso complementar desses estados impede que saídas do Arduino Nano e do ESP32-S3 sejam conectadas eletricamente em oposição. Essa estratégia evita contenção entre portas lógicas e mantém os sinais compartilhados definidos pela plataforma ativa. Na implementação, a chave de seleção foi combinada à porta lógica inversora SN74LVC1G04 para gerar sinais complementares de habilitação, conforme o esquema apresentado posteriormente na Figura 11 (Texas Instruments, 2025).

No sentido de 3,3 V para 5 V, adotou-se o transceptor de barramento octal SN74HCT245 alimentado em 5 V. Essa família lógica reconhece nível alto a partir de 2 V em sua faixa recomendada de alimentação, permitindo receber sinais de 3,3 V e entregar saídas referenciadas ao barramento de 5 V. O pino de habilitação também permite colocar as portas em alta impedância (Texas Instruments, 2022). No sentido de 5 V para 3,3 V, empregou-se o transceptor de barramento octal SN74LVC245 alimentado em 3,3 V. Suas entradas admitem até 5,5 V, enquanto as saídas permanecem limitadas à tensão de alimentação do componente, protegendo o domínio lógico do ESP32-S3 (Texas Instruments, 2015). Os esquemáticos consolidados dessas interfaces são

apresentados posteriormente nas Figura 9 e Figura 10.

Quadro 5 – Funções dos transceptores empregados no interfaceamento lógico

Componente	Alimentação	Níveis considerados	Função no circuito
SN74HCT245	5 V	Entrada compatível com nível alto de 3,3 V; saída no domínio de 5 V.	Transferir sinais do domínio de 3,3 V para periféricos e interfaces de 5 V, com estado de alta impedância quando desabilitado.
SN74LVC245	3,3 V	Entradas tolerantes a 5 V; saída limitada ao domínio de 3,3 V.	Transferir sinais provenientes de interfaces de 5 V para o ESP32-S3, com estado de alta impedância quando desabilitado.

Fonte: Elaboração própria com base em Texas Instruments (2022) e Texas Instruments (2015).

As linhas UART destinadas ao transceptor RS-485 foram tratadas separadamente dos demais sinais digitais. O multiplexador/demultiplexador triplo 74HCT4053, com chaves bidirecionais, direciona os sinais de transmissão de dados (*Transmit Data* – TX), recepção de dados (*Receive Data* – RX) e o comando de direção conforme o microcontrolador selecionado. Seu pino de habilitação, ativo em nível baixo, foi conectado permanentemente ao GND, mantendo as três chaves habilitadas; assim, o direcionamento dos sinais é determinado pelas entradas de seleção. O componente apresenta característica típica de abertura antes do fechamento, pela qual o caminho anteriormente selecionado é interrompido antes do estabelecimento do novo caminho (Nexperia, 2024). Como essa transição interrompe temporariamente os sinais compartilhados, alterar a seleção com a comunicação ativa, irá gerar perda de comunicação.

3.3.3.3 Comunicação RS-485

O setor de comunicação utiliza o transceptor RS-485 half-duplex MAX485 alimentado em 5 V. O sinal TX da plataforma ativa é aplicado à entrada do transmissor (*Driver Input* – DI), enquanto a saída do receptor (*Receiver Output* – RO) fornece o sinal RX. Os pinos de habilitação do transmissor (*Driver Enable* – DE) e de habilitação do receptor (*Receiver Enable* – $\overline{RE}$), respectivamente, foram interligados e comandados por um único sinal de direção. Em nível lógico baixo, DE desabilita o transmissor e coloca suas saídas em alta impedância, enquanto $\overline{RE}$ habilita o receptor; em nível lógico alto, o transmissor é habilitado e a saída do receptor é colocada em alta impedância. Assim, não existe uma condição lógica estável em que ambos permaneçam desabilitados, e o mesmo comando alterna o MAX485 entre recepção e transmissão (Maxim Integrated, 2014). Os caminhos de TX, RX e direção são integrados à lógica de seleção e ao multiplexador UART descritos anteriormente.

As linhas diferenciais receberam o arranjo supressor de transientes de tensão (*Transient Voltage Suppressor* – TVS) SM712, desenvolvido para proteção de portas RS-485 contra descargas eletrostáticas e transientes com tensões de trabalho assimétricas (Littelfuse, 2019). Foi também reservada posição para o resistor de terminação, que deve ser montado somente quando a placa ocupar uma extremidade física do barramento. A placa não inclui dispositivo polimérico de coeficiente positivo de temperatura (*Polymeric Positive Temperature Coefficient* – PPTC) nem resistores fusíveis em série com as linhas. Essa ausência é registrada como limitação associada a custo e disponibilidade.

Para a conexão ao barramento, adotou-se um borne que expõe diretamente D0/A, D1/B e Common/GND, conforme a nomenclatura das linhas do Modbus serial (Modbus Organization, 2006b). Não se pressupôs uma pinagem para conector D-subminiatura de 9 vias (DB9) universalmente seguida pelos equipamentos comerciais, pois cabos e dispositivos podem adotar distribuições distintas. O borne permite conferir a polaridade e conectar diferentes cabos de par trançado sem depender de adaptadores ou cabos proprietários, aumentando a flexibilidade das atividades didáticas e reduzindo o risco de incompatibilidade com equipamentos externos. A implementação visual desse setor é apresentada posteriormente na Figura 12.

3.3.3.4 Interface Homem-Máquina

A interface homem-máquina foi distribuída em uma placa própria instalada dentro da carcaça do módulo IHM. Os elementos de interação como o display de cristal líquido (*Liquid Crystal Display* – LCD) e os botões permanecem fixados à carcaça e são conectados a essa placa, que concentra as interligações antes de encaminhá-las à controladora. Essa separação reduz a quantidade de cabos individuais entre os módulos e permite remover ou inspecionar a IHM sem alterar o restante da placa de controle.

Entre a IHM e a controladora foram mantidas as linhas I²C e sinais digitais auxiliares. O repetidor bidirecional e tradutor de nível PCA9517A foi empregado também como elemento de separação das capacitâncias dos dois segmentos do barramento. O componente permite alimentação distinta em seus lados e admite capacitância de até 400 pF em cada segmento, mas acrescenta atrasos de propagação e exige resistores de *pull-up* em ambos os lados (NXP Semiconductors, 2016).

As interfaces reservadas para teclado matricial 4x3 e *display* de sete segmentos de até quatro dígitos foram mantidas como recursos opcionais. Os esquemáticos correspondentes são apresentados posteriormente nas Figura 13 e Figura 14.

3.3.3.5 Driver do motor CC

O driver de ponte H L298N empregado na arquitetura anterior foi substituído pelo driver de motor em ponte H TB6612FNG. O TB6612FNG utiliza transistores de saída e apresenta menor resistência de condução (Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, 2014). A seleção também considerou a disponibilidade do componente no mercado nacional e a compatibilidade com os sinais lógicos das duas plataformas.

O TB6612FNG admite tensão de alimentação do motor entre 4,5 V e 13,5 V em sua faixa de operação; assim, os 12 V disponíveis na controladora permanecem dentro do intervalo especificado pelo fabricante (Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, 2014). O motor instalado na esteira foi identificado como AK380/5.5MF24R35CE, com tensão nominal de 24 V e faixa de operação entre 12 V e 30 V. Sua ficha técnica informa, sem carga, rotação de 35 RPM e corrente de 90 mA; no ponto de máximo rendimento, indica 29 RPM, corrente de 2,90 A, torque de 5,5 kgf.cm e potência de 7,18 W; para a partida, apresenta corrente de 3,2 A e torque de 33 kgf.cm (Neoyama Automação, 2017). Para o projeto, foi mantida a operação em 12 V para preservar a arquitetura previamente desenvolvida e o modo de funcionamento observado nos projetos anteriores.

A comparação documental não é suficiente para confirmar a compatibilidade entre o motor e o driver. Para $V_M \geq 5$ V, o TB6612FNG especifica corrente de saída de até 1,0 A em sua faixa de operação; nos valores máximos absolutos, apresenta 1,2 A por canal e pico de 3,2 A apenas para pulso único de 10 ms (Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, 2014). A ficha do motor associa os dados de desempenho à tensão nominal de 24 V e não informa as correntes correspondentes à operação em 12 V. Além disso, os valores de 2,90 A e 7,18 W apresentados para o ponto de máximo rendimento são internamente incompatíveis com a tensão nominal declarada, devendo a corrente indicada ser confirmada.

Apesar dessa limitação documental, o histórico de operação da esteira forneceu um indício prático favorável ao dimensionamento: o motor CC era alimentado em 12 V por uma fonte chaveada com capacidade nominal de 2 A, compartilhada com o motor de passo e com o conversor *buck* responsável pela geração do barramento de 5 V. Como essa configuração permitia o funcionamento do conjunto, considerou-se plausível que, em regime normal e nas condições de carga observadas, a corrente requerida pelo motor CC pudesse ser atendida pelo TB6612FNG. Essa inferência orientou a escolha do componente, mas não substitui a medição das correntes de partida e de regime nem a verificação do comportamento térmico do driver na condição real da esteira.

Como o TB6612FNG avulso não foi encontrado nas condições de compra

adotadas, utilizou-se um módulo comercial como fonte do circuito integrado. A des-soldagem, a montagem e os custos são descritos na seção de fabricação e BOM. O circuito consolidado de acionamento é apresentado posteriormente na Figura 15.

3.3.3.6 GPIO

O módulo GPIO foi mantido como recurso opcional de expansão e de experimentação didática. Sua finalidade é disponibilizar uma entrada isolada para sinais externos e uma saída por contato seco, sem torná-las necessárias ao funcionamento básico da esteira. Por empregar componentes discretos representáveis no Proteus 8, esse setor também foi utilizado para verificar previamente os limites elétricos adotados.

Na entrada, o diodo de sinal 1N4148W em série evita a aplicação de polaridade reversa ao estágio de leitura, o resistor de 866 Ω limita a corrente e o supressor TVS SMBJ8.5A restringe transientes sobre o circuito (Vishay Semiconductors, 2023; Littelfuse, 2025). O optoacoplador da família 817 separa o sinal externo do domínio lógico; na simulação foi utilizado o modelo PC817C, enquanto a documentação de referência do componente corresponde à série LTV-817 (Lite-On Technology, 2017). O circuito foi dimensionado para reconhecer 3,3 V como limite inferior, operar nominalmente em 24 V e suportar 32 V somente como condição-limite, condicionada pela dissipação do resistor de entrada.

Na saída, outro optoacoplador recebe o comando lógico e aciona o transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor* – MOSFET) BSS138, que energiza a bobina de 12 V do relé. Um diodo de retorno fornece caminho para a corrente indutiva na desenergização da bobina, e o contato do relé permanece eletricamente separado do sinal de comando (onsemi, 2024; Vishay Semiconductors, 2023; Sanyou Corporation, 2019). O resultado é uma saída por contato seco destinada à conexão de cargas externas dentro dos limites do relé. As topologias e as simulações desse setor são apresentadas posteriormente nas Figura 16, Figura 17, Figura 18 e Figura 19.

3.3.4 Consolidação e versões finais dos circuitos

Após a definição dos setores e das decisões de componentes, o esquemático foi consolidado pela interligação dos blocos de alimentação, controle, comunicação, acionamento e interfaceamento. Nessa etapa, foram revisados nomes de sinais, conectores, alimentação dos circuitos integrados e compatibilidade entre os sinais compartilhados pelos dois microcontroladores. A consolidação do esquemático serviu para preparar a lista de materiais e reduzir ambiguidades antes do roteamento.

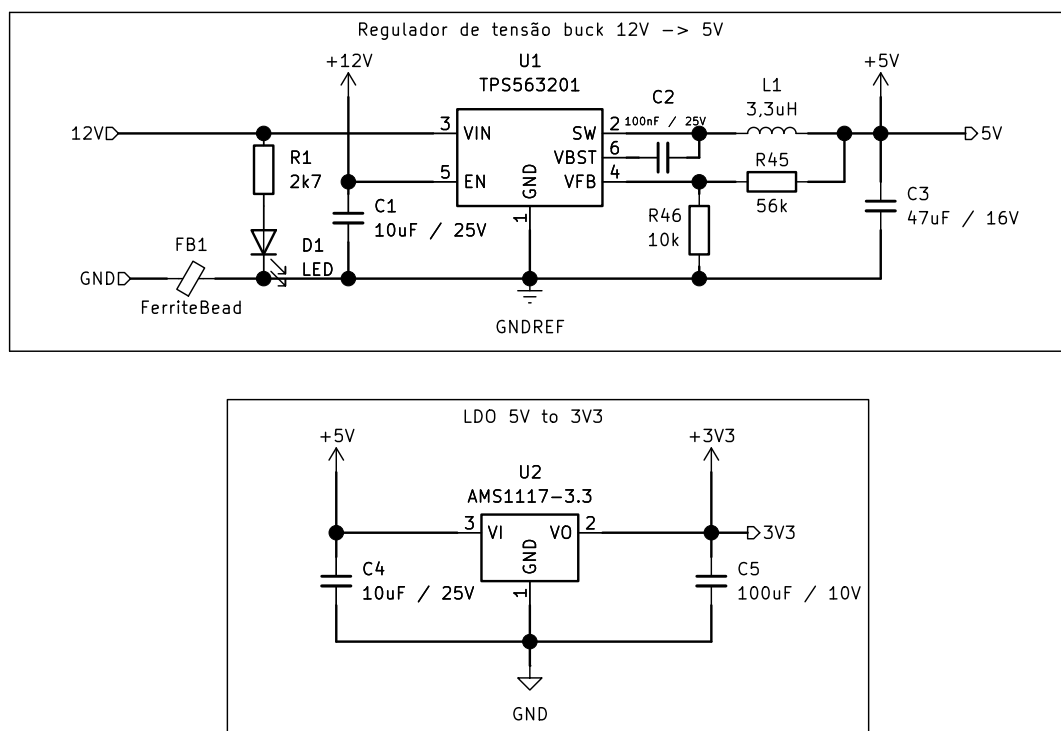
O inteiro teor dos esquemáticos da placa controladora e da placa de IHM é apresentado no Apêndice A. Nesta subseção, para fins de ilustração e consolidação das

escolhas de projeto, os circuitos são apresentados separadamente por setor funcional. Os recortes foram extraídos das folhas hierárquicas desenvolvidas no KiCad 10 e mantêm os identificadores empregados na lista de materiais, permitindo relacionar as decisões descritas anteriormente às respectivas implementações elétricas sem comprometer a legibilidade pela reprodução das folhas completas.

3.3.4.1 Alimentação

A versão consolidada do setor de alimentação é apresentada na Figura 8. O primeiro estágio recebe a linha de 12 V e emprega o TPS563201 (U1), o indutor L1 e a rede de realimentação formada por R45 e R46 para gerar o barramento de 5 V. Por se tratar de um circuito de conversão chaveada, foi previsto em projeto a separação dos planos de terra do circuito por meio de um *ferrite bead*. O segundo estágio utiliza o regulador linear de baixa queda (*Low-Dropout Regulator* – LDO) AMS1117-3.3 (U2) para obter 3,3 V a partir de 5 V.

Figura 8 – Circuitos de alimentação da placa controladora



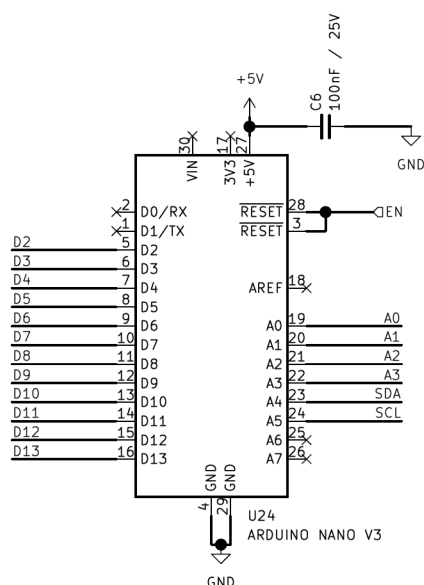
Fonte: Elaboração própria.

3.3.4.2 Interfaceamento dos microcontroladores

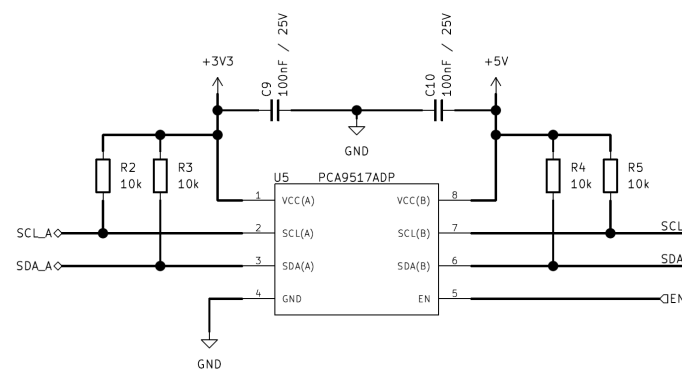
O interfaceamento foi distribuído em folhas próprias para o Arduino Nano e para o ESP32-S3, apresentadas por blocos funcionais nas Figura 9 e Figura 10. Na folha do Arduino, os transceptores U3 e U4 agrupam os sinais compartilhados e o repetidor U5 separa os lados de 3,3 V e 5 V do barramento I²C. Na folha do ESP32-S3, U7 conduz os sinais destinados ao domínio de 5 V, enquanto U8 recebe os sinais provenientes desse domínio e os entrega ao microcontrolador em 3,3 V. A decomposição das folhas permite visualizar separadamente o mapeamento de pinos, os sentidos dos sinais digitais e o interfaceamento do barramento I²C.

Figura 9 – Versão consolidada da interface do Arduino Nano

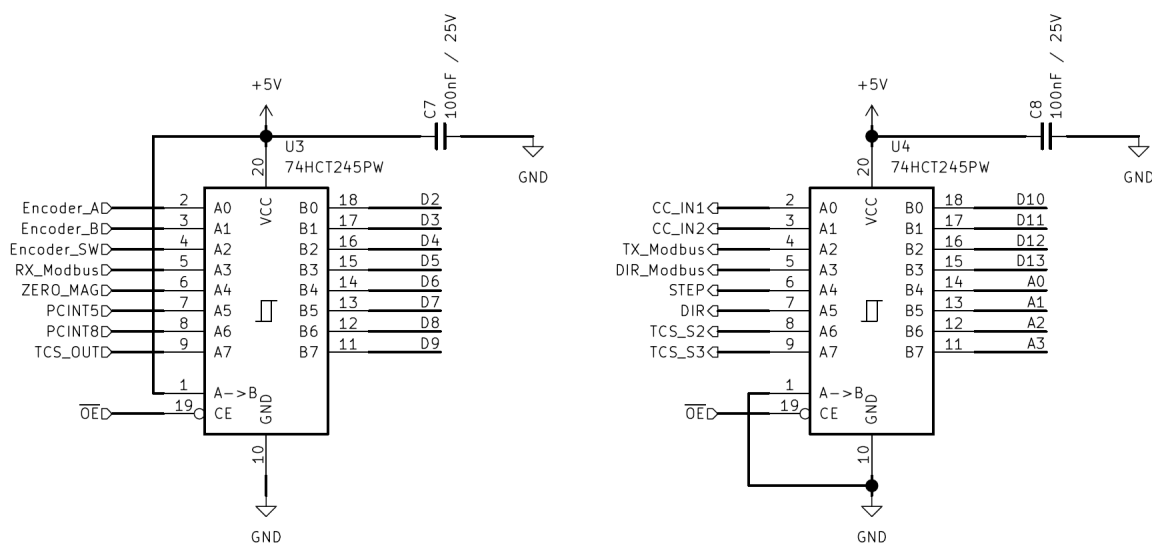
(a) Microcontrolador e mapeamento de pinos



(b) Repetidor e tradução do barramento I²C



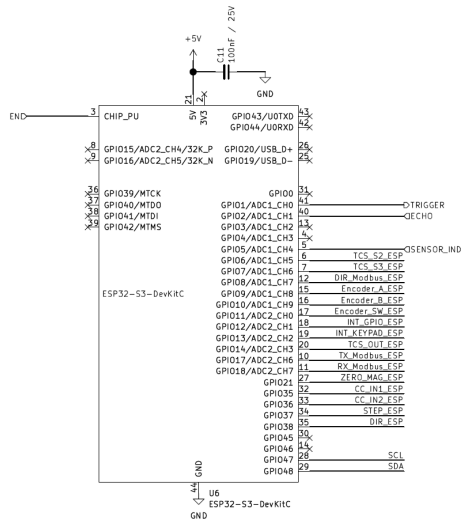
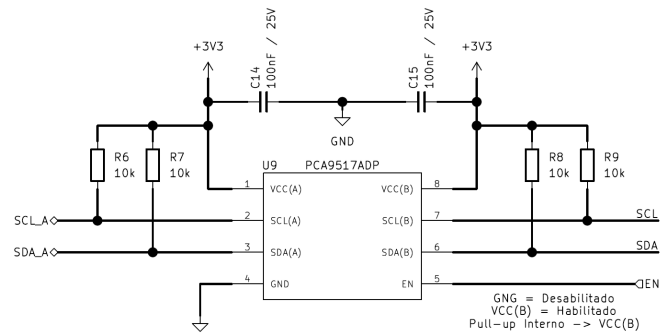
(c) Buffers dos sinais digitais de entrada e saída



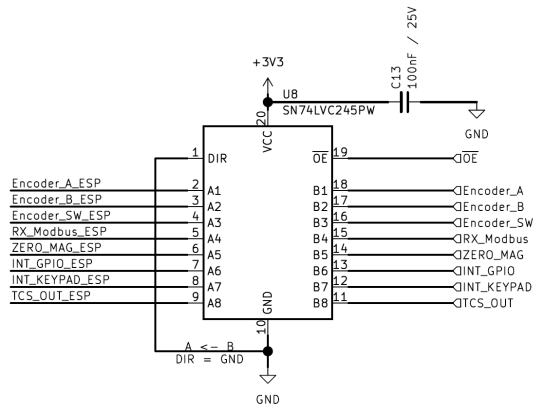
Fonte: Elaboração própria.

Figura 10 – Versão consolidada da interface do ESP32-S3

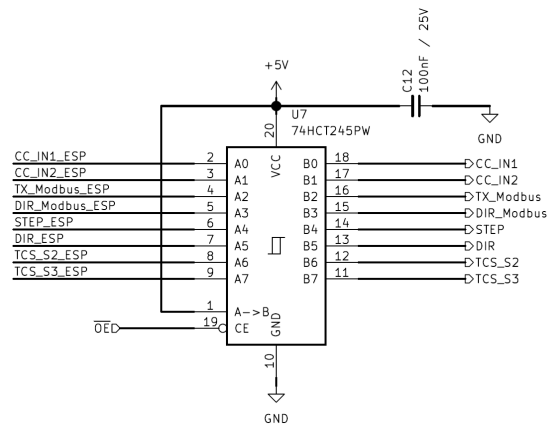
(a) Microcontrolador e mapeamento de pinos

(b) Repetidor do barramento I²C

(c) Interface dos sinais de entrada

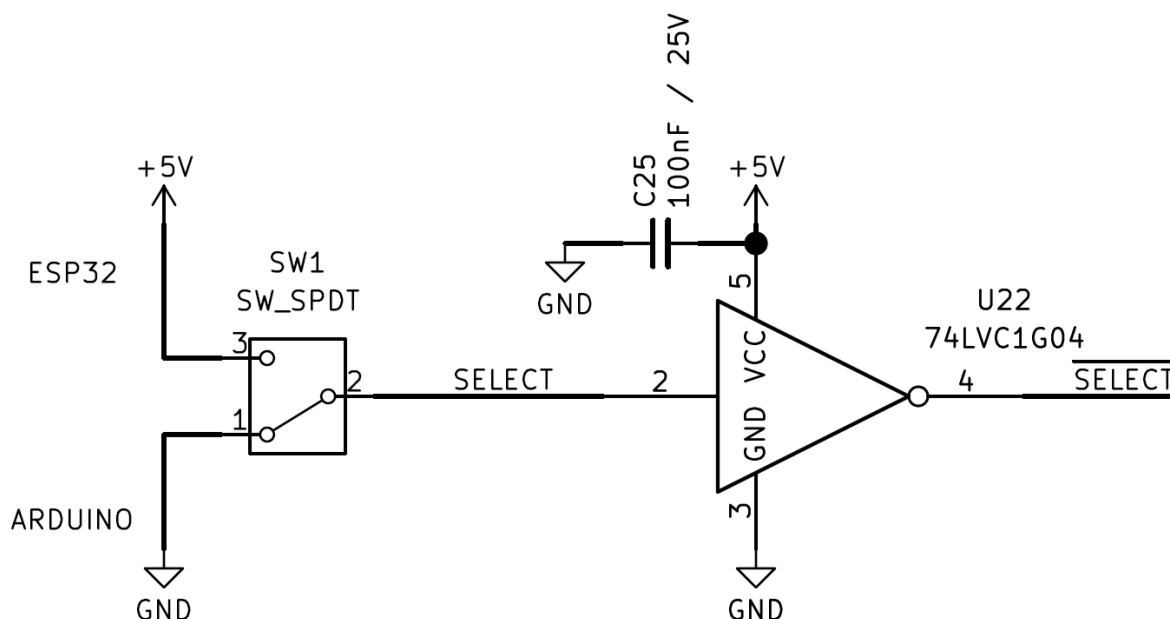
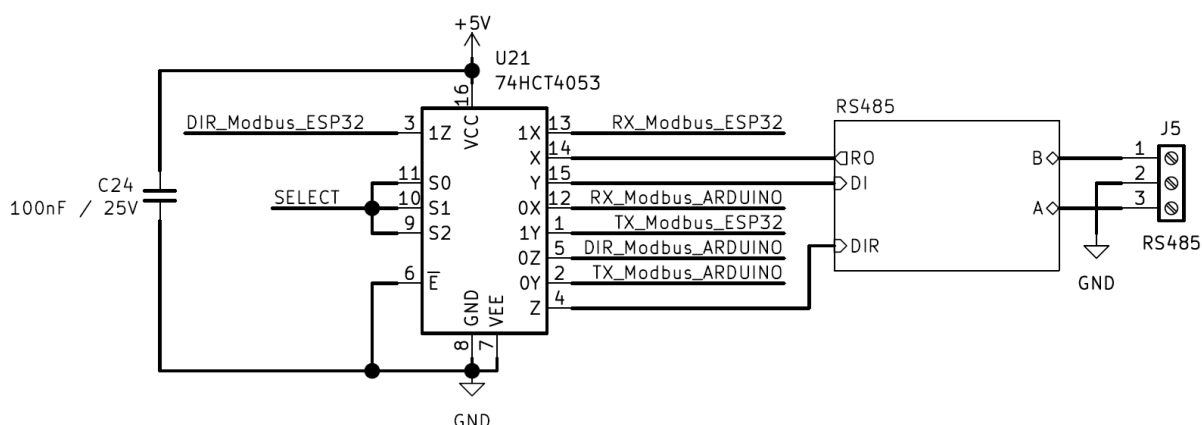


(d) Interface dos sinais de saída



Fonte: Elaboração própria.

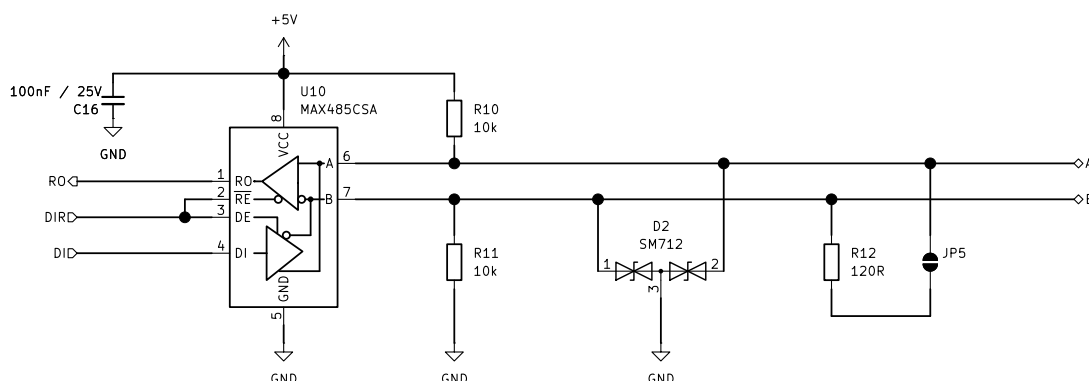
O comando comum de seleção é produzido pela chave de um polo e duas posições (*Single Pole Double Throw* – SPDT) SW1 e pelo inversor U22, gerando os sinais complementares $\overline{\text{SELECT}}$ e SELECT (Texas Instruments, 2025). Além de habilitar os transceptores correspondentes à plataforma ativa, esse comando atua sobre o 74HCT4053 (U21), que direciona os sinais de transmissão, recepção e controle de direção da UART ao setor RS-485. Esses dois trechos do circuito são mostrados na Figura 11.

Figura 11 – Seleção da plataforma e multiplexação dos sinais da UART**(a) Geração dos sinais de seleção****(b) Multiplexação da UART destinada ao RS-485**

Fonte: Elaboração própria.

3.3.4.3 Comunicação RS-485

O setor RS-485 consolidado, apresentado na Figura 12, reúne o transceptor MAX485 (U10), o capacitor de desacoplamento C16, a rede de polarização formada por R10 e R11, o arranjo de proteção SM712 (D2) e a terminação configurável composta por R12 e JP5. As linhas A e B são encaminhadas ao borne J5 no diagrama geral da controladora, juntamente com a referência de GND.

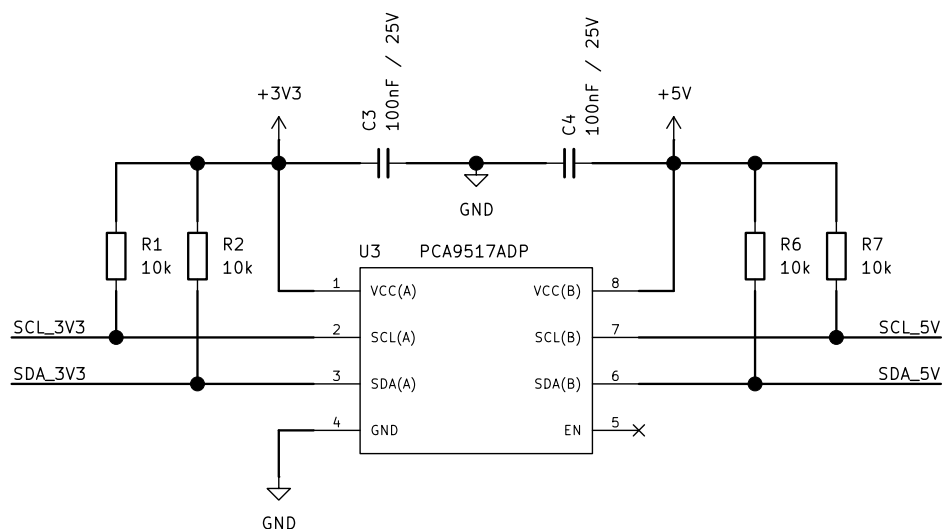
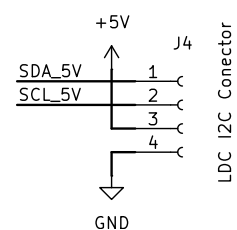
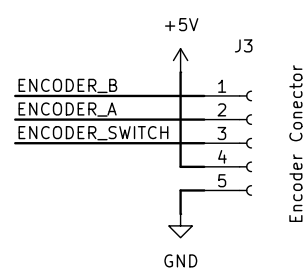
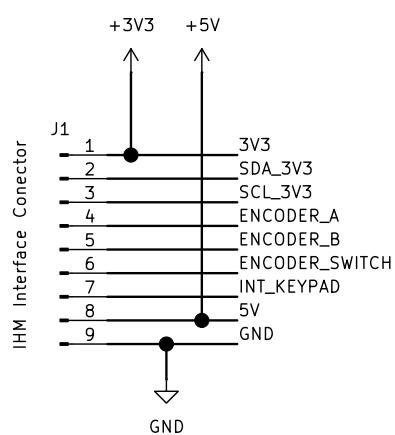
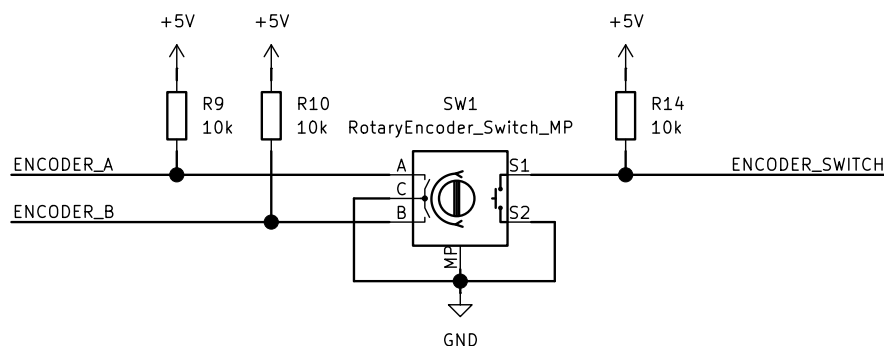
Figura 12 – Versão consolidada do setor de comunicação RS-485

Fonte: Elaboração própria.

3.3.4.4 Interface Homem-Máquina

A interface principal da IHM é apresentada na Figura 13. O conector J1 reúne alimentação, barramento I²C, sinais do encoder e interrupção do teclado, estabelecendo uma única interface com a controladora. O PCA9517A (U3) realiza a transição entre os segmentos de 3,3 V e 5 V do barramento, enquanto SW1 e J3 correspondem ao encoder rotativo e à sua conexão física. O conector J4 foi reservado ao módulo LCD com interface I²C.

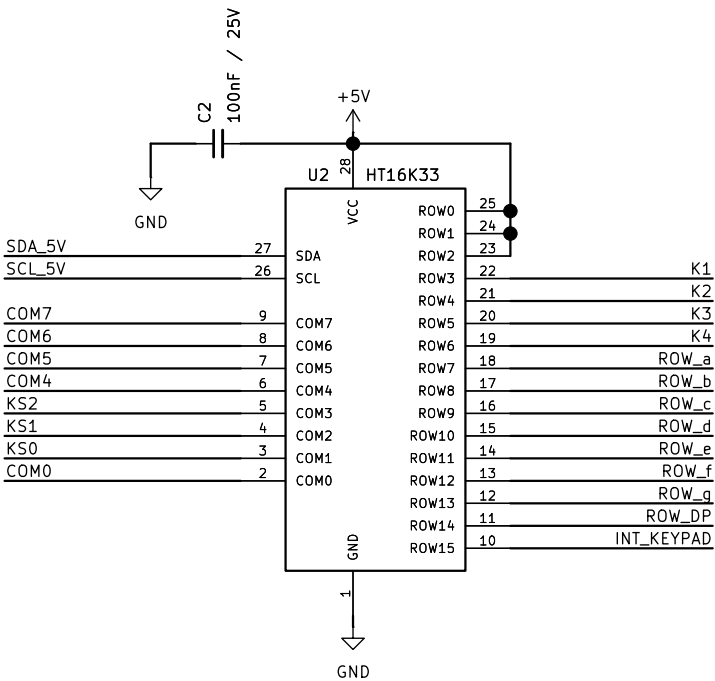
O HT16K33 (U2) e os conectores J2 e J5 registram no projeto a expansão prevista para teclado matricial e *display* de sete segmentos (Holtek Semiconductor, 2011). Esses componentes permanecem representados no esquemático e na BOM da IHM para documentar a arquitetura completa da placa, embora os recursos opcionais não integrem a montagem e a validação delimitadas para esta etapa do trabalho. Esses recursos são apresentados separadamente na Figura 14.

Figura 13 – Interface principal da placa IHM**(a) Tradução do barramento I²C****(b) Encoder e conectores com a placa controladora e o módulo LCD**

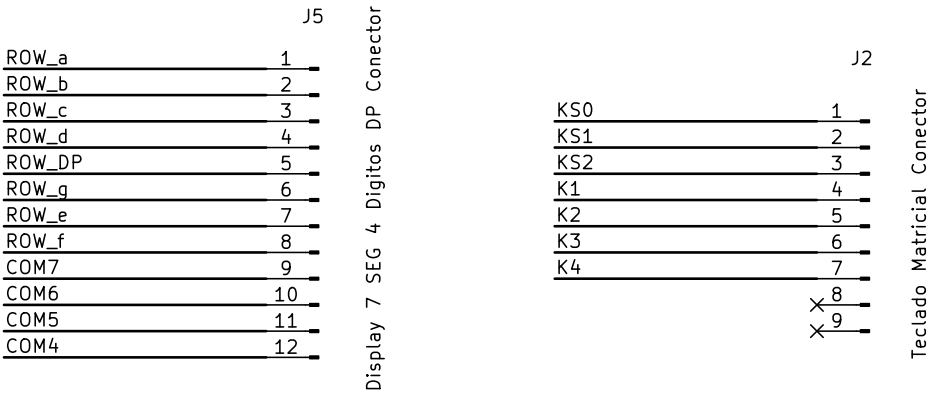
Fonte: Elaboração própria.

Figura 14 – Recursos opcionais previstos para a placa IHM

(a) Controlador de *display* e varredura do teclado



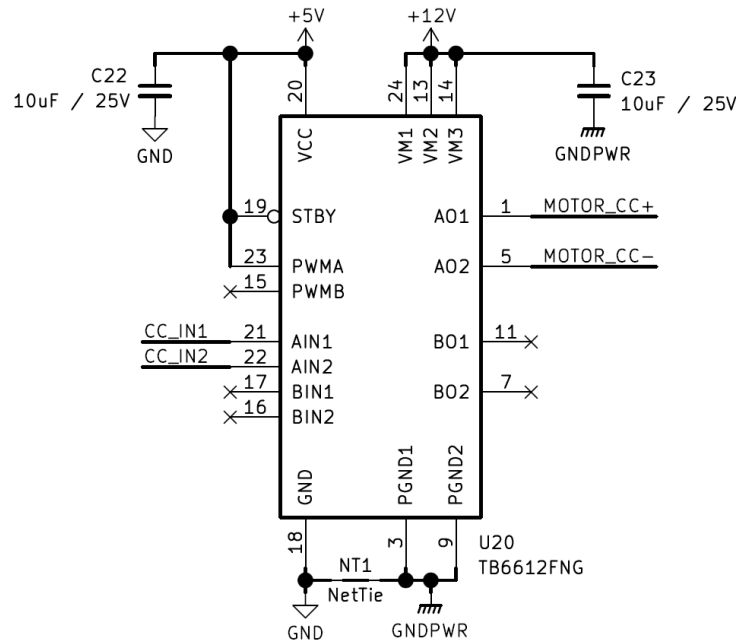
(b) Conectores do teclado matricial e do *display*



Fonte: Elaboração própria.

3.3.4.5 Driver do motor CC

O circuito final de acionamento utiliza o canal A do TB6612FNG (U20), conforme a Figura 15. A alimentação lógica VCC foi conectada ao barramento de 5 V, enquanto os pinos VM1, VM2 e VM3 recebem 12 V para o estágio de potência. Os sinais CC_IN1 e CC_IN2 comandam as entradas AIN1 e AIN2, e as saídas AO1 e AO2 são encaminhadas ao conector do motor como MOTOR_CC+ e MOTOR_CC-. O segundo canal do componente não foi empregado. O *net tie* NT1 mantém identificada a união entre o GND lógico e o retorno de potência, permitindo tratá-los separadamente durante o roteamento.

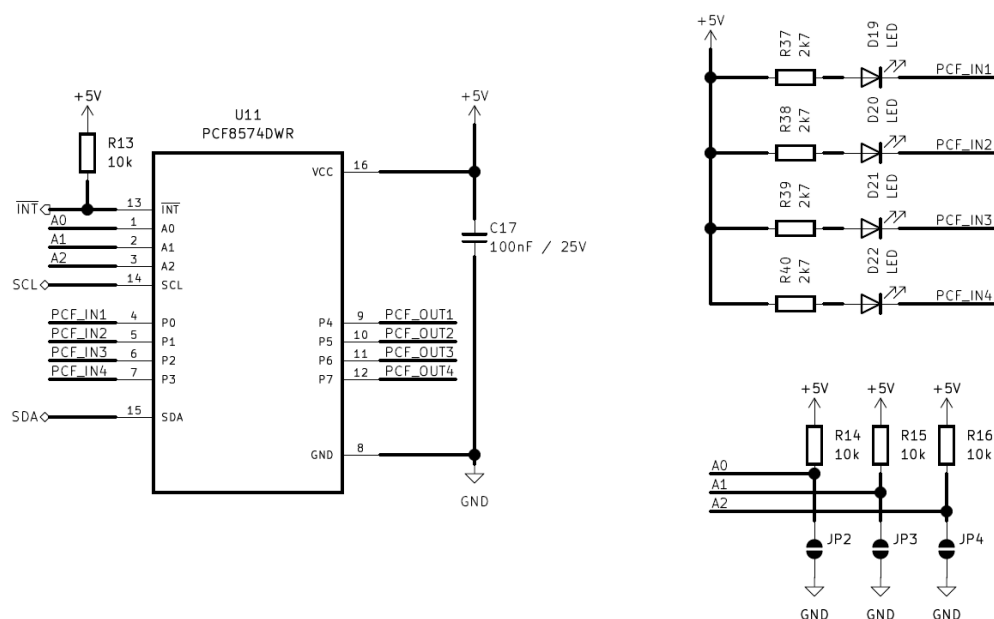
Figura 15 – Versão consolidada do circuito de acionamento do motor CC

Fonte: Elaboração própria.

3.3.4.6 GPIO

A topologia de entrada e saída descrita anteriormente foi replicada em quatro canais. O PCF8574 (U11) concentra a comunicação I²C e disponibiliza quatro sinais para leitura das entradas e quatro sinais para comando das saídas (Texas Instruments, 2024a). Os optoacopladores U16 a U19 recebem os sinais externos do conector J7, enquanto U12 a U15 comandam os MOSFETs e os relés associados ao conector J8. A Figura 16 apresenta o expensor, os indicadores de estado das entradas e os *jumpers* JP2 a JP4 empregados na configuração do endereço I²C. Como os canais possuem a mesma estrutura, a Figura 17 apresenta somente uma topologia representativa de saída e uma de entrada; o esquemático integral é destinado ao Apêndice A.

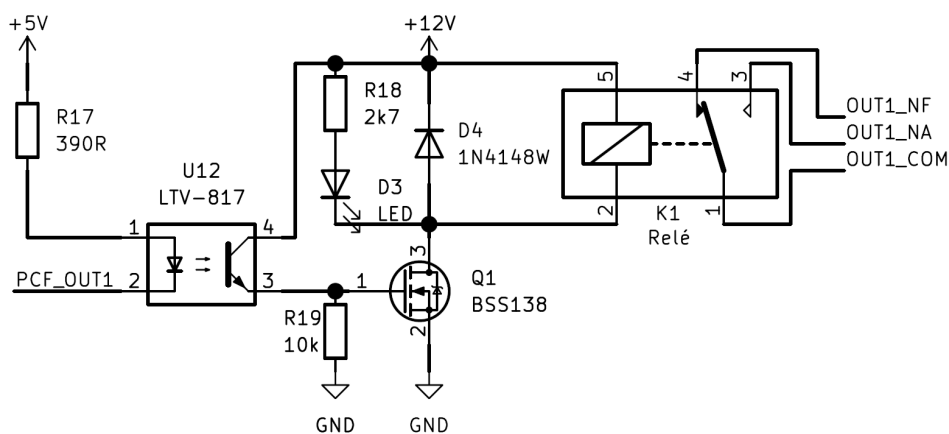
Figura 16 – Expansor de entradas e saídas, indicadores e seleção de endereço



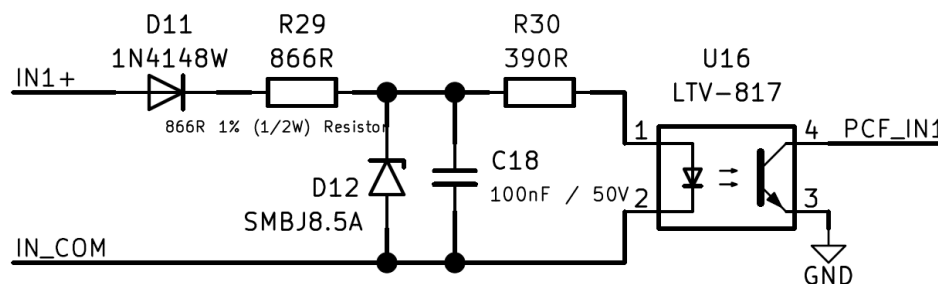
Fonte: Elaboração própria.

Figura 17 – Topologias representativas dos canais do módulo GPIO

(a) Topologia do canal de saída isolada a relé



(b) Topologia do canal de entrada isolada

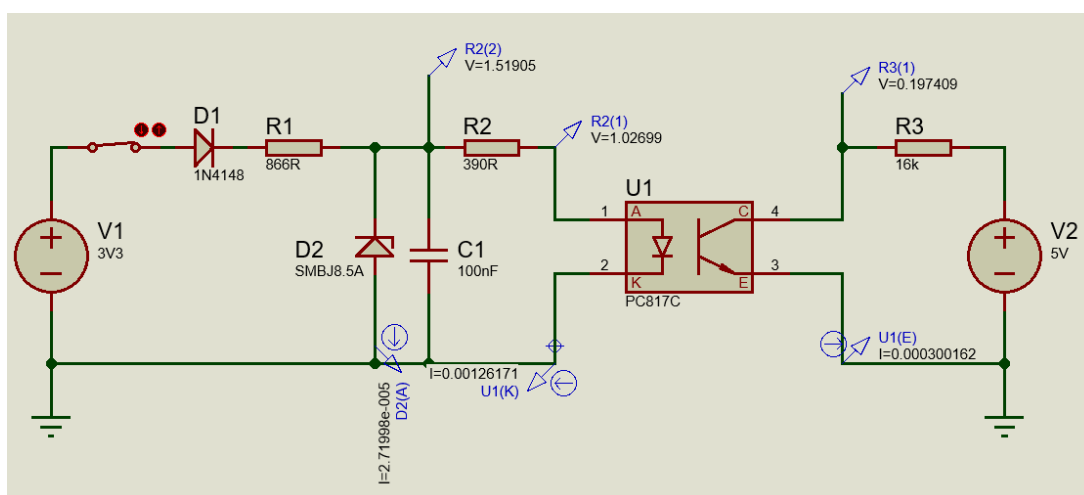


Fonte: Elaboração própria.

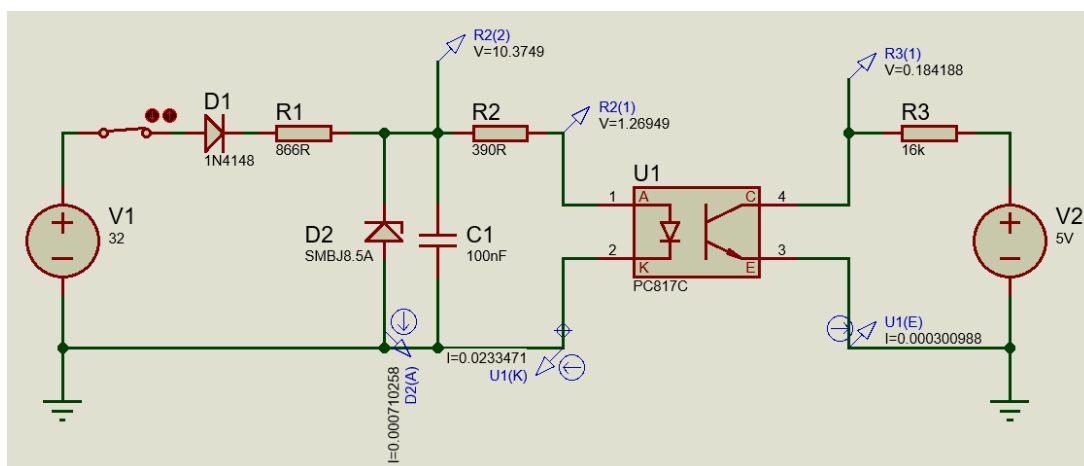
A interface de entrada foi simulada nas condições inferior e superior consideradas no dimensionamento. A Figura 18a apresenta a aplicação de 3,3 V, definida como limite inferior para o reconhecimento do sinal, enquanto a Figura 18b registra a condição de 32 V utilizada para verificar a margem superior do circuito. A operação nominal foi estabelecida em 24 V, de modo que a simulação em 32 V corresponde a uma condição-limite e não a um ponto recomendado para operação contínua.

Figura 18 – Simulação dos limites de operação da entrada GPIO

(a) Limite inferior de entrada em 3,3 V



(b) Condição-limite de entrada em 32 V



Fonte: Elaboração própria.

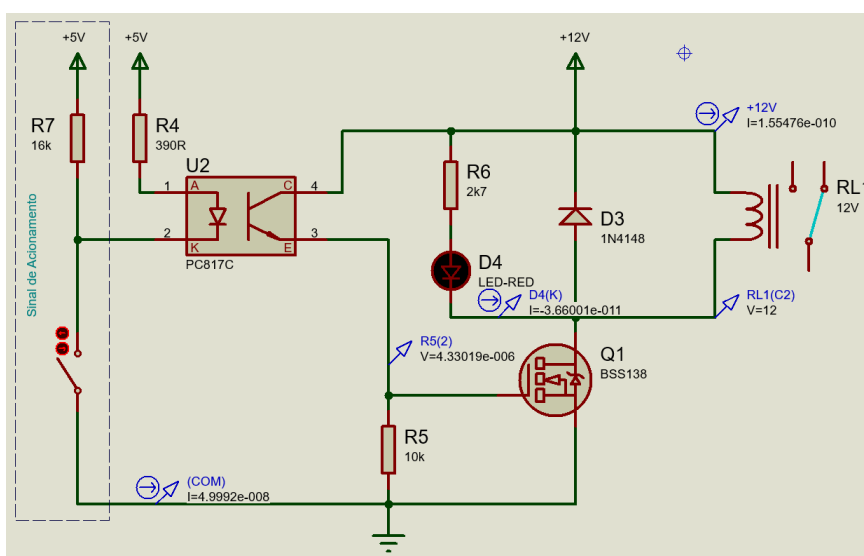
Na condição de 32 V, o componente que restringe a operação contínua é o resistor de entrada de 866 Ω , dimensionado para uma potência nominal de 500 mW. A potência dissipada nesse componente foi de aproximadamente 502 mW na simulação, valor que atinge e excede ligeiramente sua especificação nominal. Esse resultado caracteriza 32 V como limite não contínuo e indica que a operação nominal em 24 V preserva margem de potência para o circuito de entrada.

A interface de saída foi verificada nos dois estados lógicos apresentados na

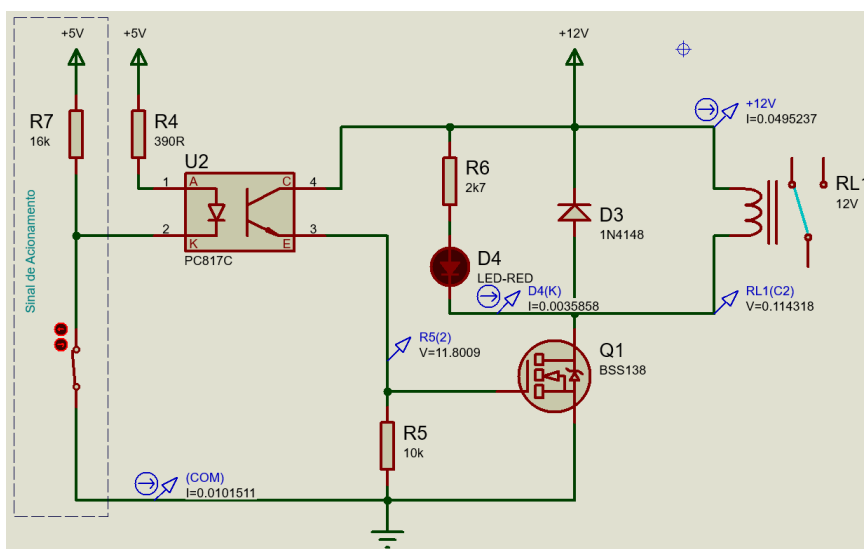
Figura 19. Com a entrada de comando aberta ou em nível alto, condição mostrada na Figura 19a, o optoacoplador não conduz, o MOSFET permanece em corte e o relé fica desenergizado. Ao aplicar nível baixo, conforme a Figura 19b, o optoacoplador conduz, o MOSFET é acionado e a bobina do relé é energizada. Dessa forma, o relé converte a lógica invertida do circuito eletrônico em um contato seco destinado ao acionamento externo.

Figura 19 – Simulação dos estados de operação da saída GPIO

(a) Saída desativada com o comando aberto ou em nível alto



(b) Saída acionada com o comando em nível baixo



Fonte: Elaboração própria.

3.3.5 Abordagem de roteamento da placa

O roteamento foi realizado buscando manter coerência entre a organização física dos conectores e a função de cada setor da placa. Trilhas de alimentação e acionamento foram tratadas separadamente dos sinais lógicos, e os conectores foram

posicionados considerando montagem, manutenção e integração com os cabos da esteira. Antes da liberação para fabricação, foram executadas verificações ERC e DRC, com revisão das pendências e conferência dos arquivos de fabricação.

Como regra geral, adotaram-se afastamento e largura mínima de trilha de 10 mils, equivalentes a 0,254 mm, e furo mínimo de via de 0,30 mm. Esses valores foram escolhidos como margens conservadoras para o roteamento de sinais comuns. Para redes de alimentação, acionamento do motor e contatos de relé, foram definidas classes próprias, com larguras, afastamentos e dimensões de vias superiores, conforme sintetizado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classes de rede adotadas no roteamento das placas

Classe	Afastamento	Largura da trilha	Diâmetro da via	Furo da via
Relé 240 VAC	2,032 mm	1,524 mm	1,00 mm	0,50 mm
Motor CC	0,3048 mm	0,635 mm	0,80 mm	0,40 mm
Potência baixa	0,254 mm	0,635 mm	0,80 mm	0,40 mm
Potência alta	0,3048 mm	1,524 mm	1,00 mm	0,50 mm
Padrão	0,254 mm	0,254 mm	0,60 mm	0,30 mm

Fonte: Elaboração própria a partir das configurações do projeto no KiCad 10.

As redes de 12 V foram associadas à classe de potência alta, enquanto as redes de 5 V e 3,3 V utilizaram a classe de potência baixa. As conexões do motor CC e das saídas a relé receberam classes específicas. A capacidade técnica publicada pela TEC-CI para placas de dupla face indica valores mínimos de 0,20 mm para largura de trilha e isolamento e de 0,25 mm para furos (TEC-CI Circuitos Impressos, 2026). Dessa forma, os valores gerais de 0,254 mm e 0,30 mm permaneceram acima dos mínimos declarados pelo fabricante.

Alguns circuitos integrados e a chave de seleção dos microcontroladores apresentavam encapsulamentos com menor distância entre terminais. Para essas regiões foram criadas regras locais de afastamento, aplicadas apenas aos componentes identificados na Tabela 2, incluindo *Small Outline Package* (SOP), *Shrink Small Outline Package* (SSOP), *Small Outline Transistor* (SOT) e *Small Outline Integrated Circuit* (SOIC), sem substituir as classes gerais de rede. No caso do encapsulamento SOP, o afastamento adotado ficou abaixo da capacidade nominal publicada, condição para a qual o fabricante informa a possibilidade de análise técnica específica (TEC-CI Circuitos Impressos, 2026).

Tabela 2 – Regras locais de afastamento para encapsulamentos específicos

Componente ou encapsulamento	Afastamento mínimo
Chave de seleção dos microcontroladores (<i>switch</i>)	0,25 mm
SSOP e SOT	0,20 mm
SOP	0,15 mm
SOIC	0,20 mm

Fonte: Elaboração própria a partir das regras personalizadas do projeto no KiCad 10.

3.4 Fabricação da placa, aquisição de componentes e BOM

Com a conclusão do *layout* e das verificações de projeto, foram gerados os arquivos necessários à fabricação da placa. Inicialmente, considerou-se contratar a produção e adquirir parte dos componentes por meio da JLCPCB, localizada na China. A cotação foi realizada em 7 de abril de 2026 para a fabricação mínima de cinco unidades de cada placa, incluindo as PCIs, os componentes, o serviço de montagem, o frete e os tributos de importação, com pagamento à vista por cartão de crédito. Os valores considerados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Cotação para fabricação e montagem das placas pela JLCPCB

Descrição	Lote controladora + IHM (5 un. de cada)
Valor declarado	US\$ 101,00
Frete	US\$ 53,00
Câmbio considerado	R\$ 5,1400
Base de cálculo do Imposto de Importação	R\$ 791,56
Imposto de Importação	R\$ 474,94
Base de cálculo do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS)	R\$ 1.266,50
ICMS	R\$ 259,40
Despesas administrativas	R\$ 120,00
Total de impostos e despesas administrativas	R\$ 854,34
Total da compra	R\$ 1.645,90

Fonte: Elaboração própria a partir da cotação realizada em 7 abr. 2026.

Como o projeto necessitava inicialmente de duas unidades de cada placa, foram pesquisadas alternativas no mercado nacional para reduzir o desembolso inicial e adequar a quantidade produzida à necessidade imediata. A TEC-CI foi selecionada por oferecer fabricação em menor quantidade e capacidade técnica compatível com as regras adotadas no projeto (TEC-CI Circuitos Impressos, 2026). As placas controladora e IHM foram especificadas em *Flame Retardant 4* (FR-4), com duas faces, espessura total de 1,6 mm, cobre de 1 oz, acabamento *Hot Air Solder Leveling* (HASL), máscara de solda verde, serigrafia branca e contorno guilhotinado para a placa de IHM e fresado

para a placa controladora. A controladora possui dimensões de 123 mm por 138 mm, enquanto a placa IHM mede 50 mm por 70 mm.

O orçamento aprovado para duas unidades de cada placa foi de R\$ 651,24, composto por R\$ 311,16 para as controladoras, R\$ 259,08 para as placas IHM e R\$ 81,00 de frete. Os componentes foram adquiridos separadamente no mercado nacional. As compras na Achei Componentes Eletrônicos e na Eletrogate foram realizadas em 23 de maio de 2026. A primeira totalizou R\$ 311,85, sendo R\$ 275,88 em componentes e R\$ 35,97 de frete. A segunda foi necessária para adquirir o circuito integrado TB6612FNG, encontrado em uma placa de desenvolvimento, e a chave SPDT destinada à seleção do microcontrolador; essa compra totalizou R\$ 30,98, dos quais R\$ 20,74 corresponderam aos componentes e R\$ 10,24 ao frete. A Tabela 4 consolida os desembolsos.

Tabela 4 – Aquisições nacionais para fabricação das placas

Fornecedor e item	Placas ou componentes	Frete	Total
TEC-CI: duas placas controladoras	R\$ 311,16	–	R\$ 311,16
TEC-CI: duas placas IHM	R\$ 259,08	–	R\$ 259,08
TEC-CI: envio das placas	–	R\$ 81,00	R\$ 81,00
Achei Componentes Eletrônicos	R\$ 275,88	R\$ 35,97	R\$ 311,85
Eletrogate	R\$ 20,74	R\$ 10,24	R\$ 30,98
Total	R\$ 866,86	R\$ 127,21	R\$ 994,07

Fonte: Elaboração própria a partir dos orçamentos e comprovantes de compra.

A comparação entre as alternativas deve considerar que os escopos e as quantidades não eram equivalentes. A cotação internacional correspondia a cinco conjuntos e incluía o serviço de montagem, enquanto as aquisições nacionais atenderam a duas unidades de cada placa e não incluíram mão de obra de montagem. Portanto, a decisão pelo fornecimento nacional foi baseada no menor desembolso inicial, na quantidade necessária para o protótipo e na continuidade do cronograma, sem caracterizar uma comparação direta de custo unitário.

A indisponibilidade ou o custo de alguns itens exigiu pesquisa de equivalentes e ajustes na lista de materiais. Cada substituição foi avaliada quanto às características elétricas, ao encapsulamento e à compatibilidade de montagem antes da consolidação da versão destinada à fabricação.

3.5 Procedimento de validação da placa

A validação foi planejada de forma progressiva, iniciando pela inspeção visual e pela conferência de continuidade antes da energização. Em seguida, foram previstos testes de alimentação sem os microcontroladores instalados, verificação das

tensões principais e conferência dos sinais críticos. Essa sequência buscou reduzir o risco de danificar a placa, os controladores ou os periféricos da esteira durante os primeiros ensaios.

O *firmware* desenvolvido nesta etapa teve finalidade de teste funcional da placa, e não de consolidar a versão final de operação didática do equipamento. Foram previstas rotinas mínimas para acionar saídas, ler entradas, verificar GPIOs, comandar o driver do motor CC, verificar as linhas destinadas à placa IHM e exercitar a interface RS-485. A mesma lógica de validação foi aplicada às duas plataformas de controle, com as adaptações necessárias à pinagem, aos periféricos e às limitações de cada microcontrolador.

Os testes críticos foram associados aos objetivos específicos do trabalho: funcionamento das fontes de 5 V e 3,3 V, acionamento do motor CC, leitura dos sinais de entrada, operação do seletor de microcontrolador, comunicação RS-485/Modbus RTU e interface elétrica com a placa IHM. Após a verificação dos blocos principais, foram previstos testes adicionais das GPIOs para avaliar o comportamento das entradas e saídas de uso geral e seu potencial em práticas didáticas.

3.6 Documentação e planejamento do uso didático

A documentação consolidada do equipamento foi organizada para relacionar a revisão da placa, a lista de materiais, os diagramas elétricos, os *firmwares* de teste e a configuração física adotada na esteira. Esse conjunto permite identificar conexões, compreender o papel de cada setor da controladora e da placa IHM, programar as plataformas de controle, reproduzir testes básicos e apoiar ações de manutenção ou substituição de componentes. A documentação também distingue os recursos efetivamente validados daqueles mantidos como reserva de projeto, especialmente teclado matricial, *display* de sete segmentos e expensor de GPIO.

Como material de uso direto, foi elaborado um guia único para professores e alunos, disponibilizado em página pública do GitHub Pages (PIRES, 2026a) e vinculado ao repositório de documentação do projeto (PIRES, 2026b). O guia apresenta os cuidados prévios à aula, a seleção do microcontrolador pela chave da placa, as limitações conhecidas do conjunto, os materiais complementares disponíveis e uma sequência mínima de prática. Também foram disponibilizados *sketches* para o ambiente de desenvolvimento integrado (*Integrated Development Environment* – IDE) do Arduino, separados para Arduino Nano e ESP32-S3, de modo a reduzir a barreira inicial de programação em laboratório.

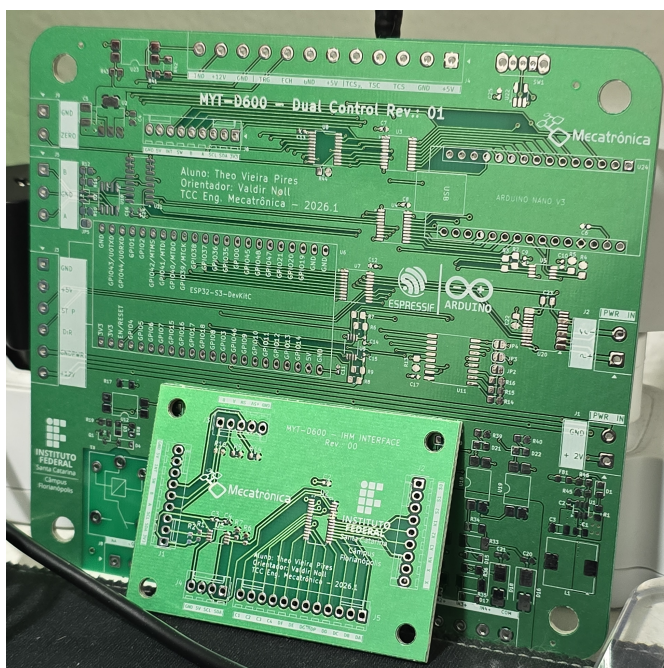
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos após a fabricação, montagem, validação de bancada e comissionamento do conjunto eletrônico desenvolvido para o *retrofitting* da esteira seletora por cor. A análise é organizada de acordo com a sequência efetivamente executada: recebimento das placas, inspeção e correções antes da montagem e energização, validação dos blocos funcionais, verificação da operação com Arduino Nano e ESP32-S3, ensaios do meio físico RS-485 e integração final ao equipamento.

4.1 Montagem das placas e preparação para energização

As placas controladora e de IHM foram fabricadas em duas faces, com máscara de solda verde e serigrafia branca, conforme as especificações de fabricação descritas no Capítulo 3. A Figura 20 apresenta as unidades recebidas, antes da montagem dos componentes, e registra a materialização física das revisões encaminhadas à fabricação: controladora Rev. 01 e IHM Rev. 00.

Figura 20 – Placas controladora e IHM recebidas para montagem



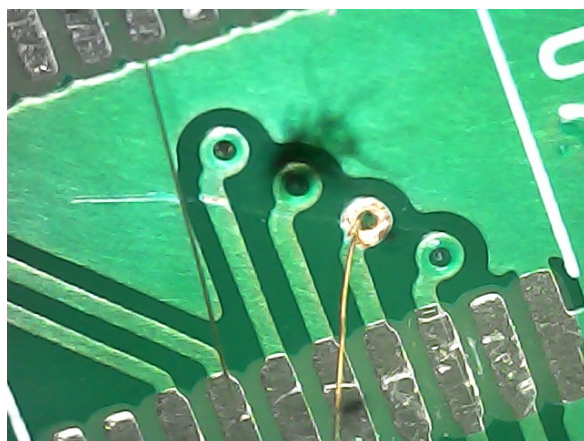
Fonte: Elaboração própria.

Antes da montagem dos componentes e da primeira energização, foram realizados testes de continuidade, busca por circuitos abertos e verificação de curtos entre as malhas de alimentação. Essa etapa permitiu identificar dois grupos de falhas de fabricação. O primeiro envolveu vias e furos metalizados sem continuidade elétrica entre as faces da placa, exigindo raspagem localizada dos *pads* e soldagem de fio de

cobre fino para restabelecer a conexão. O segundo correspondeu aos *tooling holes* posicionados nos cantos da placa pela fabricante, que ocasionou curto entre as malhas de GND e VCC. Para remoção dos curtos foi realizado um chanfro nos *tooling holes* com uma microretífica.

Figura 21 – Correções realizadas antes da energização da placa

(a) Restauração de continuidade em via



(b) Isolamento de *tooling hole*



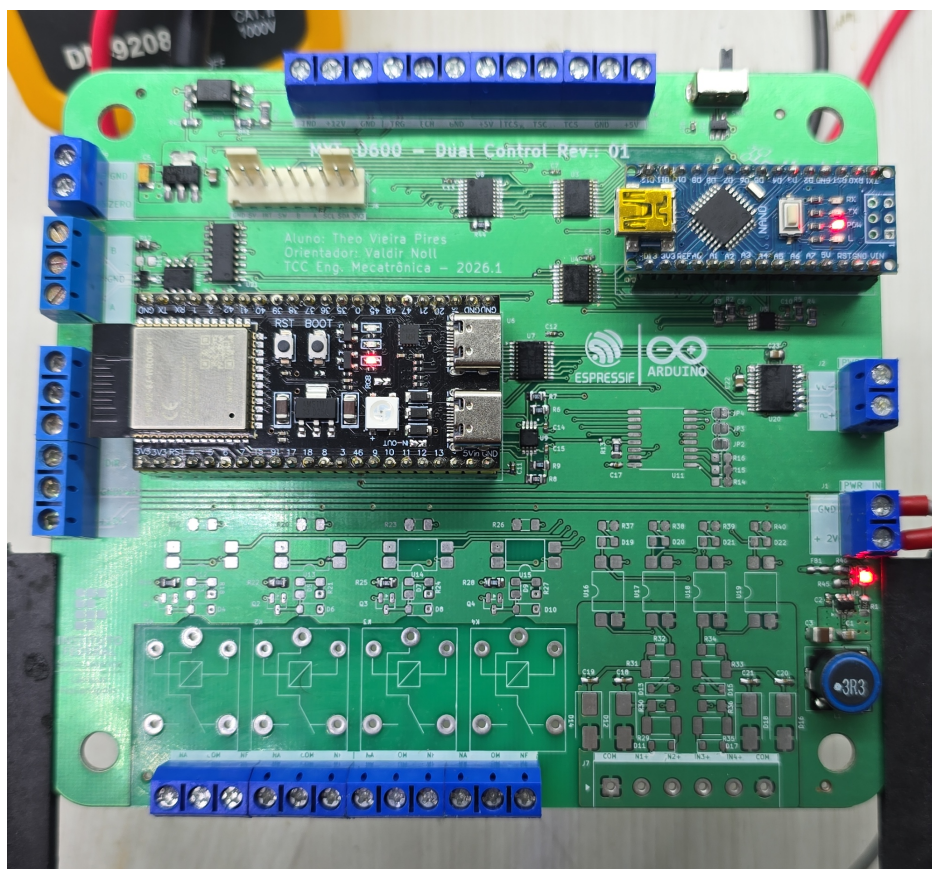
Fonte: Elaboração própria.

Após as correções, as falhas de continuidade foram eliminadas e o curto entre as malhas de alimentação foi removido antes da aplicação de tensão à placa. Por terem sido localizadas em vias e furos de apoio ao processo produtivo, essas ocorrências foram classificadas como falhas de fabricação da PCB, e não como falhas de projeto elétrico ou de roteamento. A identificação prévia desses problemas reduziu o risco de dano aos componentes e permitiu prosseguir com a montagem e os ensaios funcionais.

4.2 Validação elétrica e funcional dos blocos principais

A validação elétrica inicial confirmou o funcionamento dos reguladores de tensão. O conversor *buck* regulou a entrada de 12 V para aproximadamente 5,15 V, enquanto o regulador linear forneceu corretamente o barramento de 3,3 V. Durante os ensaios da placa, a corrente observada na entrada da fonte permaneceu aproximadamente entre 60 mA e 90 mA. Nas rampas de aceleração e desaceleração do motor CC, foi observado um aumento no consumo em aproximadamente 100 mA associado ao acionamento desse motor.

Figura 22 – Placa controladora montada e energizada em bancada



Fonte: Elaboração própria.

Os *firmwares* de ensaio para ESP32-S3 e Arduino Nano foram utilizados como instrumentos de validação do *hardware*. Eles permitiram acionar saídas, observar entradas digitais, contar bordas, comandar os motores, testar o barramento I²C, exercitar a comunicação RS-485 e verificar o comportamento dos periféricos da placa. Esses *firmwares* não correspondem à aplicação final da esteira; sua finalidade foi fornecer comandos de bancada para comprovar a integridade elétrica e funcional dos circuitos desenvolvidos.

O driver do motor CC respondeu corretamente ao controle por PWM e à inversão de sentido. A interface com o driver de motor de passo também foi validada, com geração e recepção dos sinais de passo e direção. As interfaces de sensores foram verificadas por meio dos circuitos previstos de condicionamento, isolamento e leitura pelos microcontroladores. No conjunto de ensaios realizados, não foi observado aquecimento anormal perceptível nos blocos de acionamento.

O barramento I²C foi validado por meio da geração de sinais, comunicação com periféricos e observação com osciloscópio. A atuação dos repetidores/tradutores PCA9517A foi confirmada inclusive no ensaio com cabo de aproximadamente 3,5 m até a IHM, sem perda perceptível de informações durante os testes. A captura apresentada

na Figura 23 registra a atividade do barramento e reforça a validação da estratégia adotada para comunicação entre a placa controladora e a interface.

Figura 23 – Pacotes I²C observados durante a validação da IHM



Fonte: Elaboração própria.

4.3 Intercambiabilidade entre Arduino Nano e ESP32-S3

A placa foi validada quanto à operação com Arduino Nano e com ESP32-S3, preservando os dois microcontroladores instalados e selecionando apenas uma plataforma ativa por vez. Os ensaios confirmaram que as entradas, saídas e interfaces principais puderam ser acessadas pelos dois controladores por meio dos *buffers*, circuitos de seleção e estágios de interfaceamento previstos no projeto.

A lógica de seleção com porta inversora também funcionou, comutando corretamente o sinal de seleção e seu complemento. Entretanto, durante a montagem e os primeiros ensaios, foi identificada uma falha de projeto associada ao uso dessa lógica nos pinos de *reset/enable* dos microcontroladores. Como a linha de seleção era ora conectada ao GND ora conectado ao 5 V, sua aplicação ao pino de *enable* da ESP32-S3 representava risco elétrico ao módulo. No Arduino Nano, a mesma estratégia inviabilizava o reinício necessário durante a gravação do *firmware*.

A correção aplicada foi remover a ligação dos pinos de *reset/enable* dos microcontroladores com a lógica de seleção. Após essa intervenção, a gravação do Arduino Nano passou a ocorrer com o módulo instalado na placa, assim como a do ESP32-S3, e o risco de aplicação de 5 V ao *enable* da ESP32-S3 foi eliminado.

Dessa forma, o resultado final confirma a intercambiabilidade funcional dos microcontroladores para os periféricos principais, com a ressalva de que a lógica de seleção não deve atuar sobre os pinos de *reset/enable* indiscriminadamente, podendo ser usado por meio de *pull-up* ou *pull-down* fracos respeitando os níveis de tensão recomendados por cada microcontrolador.

4.4 Validação do meio físico RS-485 para Modbus RTU

O circuito RS-485 passou por uma sequência específica de investigação. Nos primeiros ensaios, a comunicação não ocorreu de forma confiável, o que levou à verificação dos sinais DI, RO, /RE, DE, DIR_MODBUS, do par diferencial A/B, da terminação do barramento e dos conversores USB para RS-485 usados no computador. Após a remoção dos resistores de *bias*, instalação do resistor de terminação de 120 ohms e substituição do transceptor MAX485, o circuito estabeleceu comunicação entre o computador e a ESP32-S3, com retorno da placa ao computador pelo barramento RS-485.

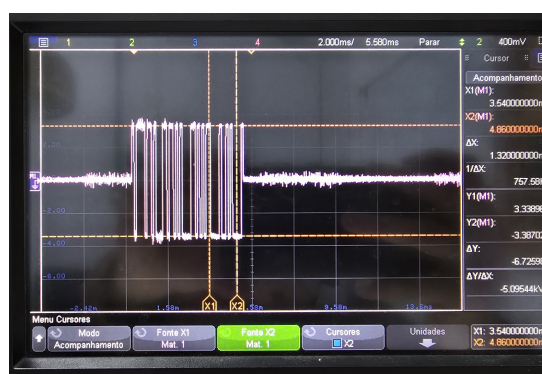
Esse resultado validou o meio físico adotado para a implementação de Modbus RTU. A validação obtida foi elétrica e de comunicação serial em bancada: o *hardware* demonstrou capacidade de transmitir e receber dados pelo barramento diferencial. A implementação das rotinas finais de Modbus, com mapa de registradores e lógica de aplicação, permanece como desenvolvimento de *firmware* sobre uma interface física já estabelecida.

Figura 24 – Comparação entre sinais diferenciais observados no ensaio RS-485

(a) Sinal do MAX485



(b) Sinal do conversor RS-485 comercial



Fonte: Elaboração própria.

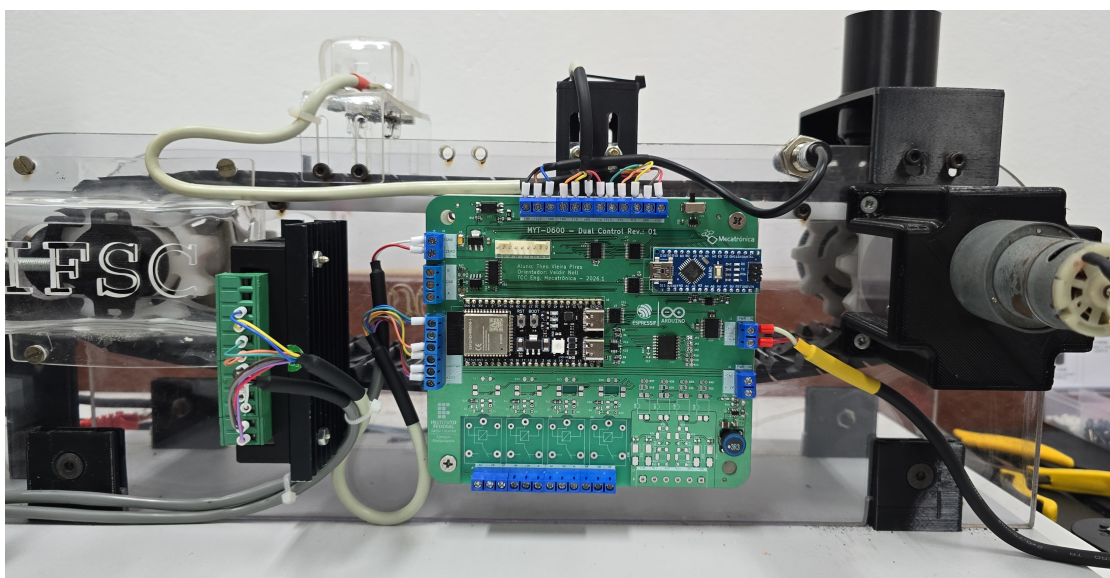
Durante os testes, ocorreu um curto accidental entre os barramentos de 5 V e 12 V, provocado pela ponta de prova do multímetro. O evento danificou a ESP32-S3 e o MAX485 que havia permitido a validação anterior. Após a substituição do transceptor por componentes disponíveis, o circuito voltou a apresentar modulação diferencial temporalmente coerente com a transmissão, porém sem amplitude e simetria

suficientes para comunicação confiável com conversores comerciais. Assim, a ressalva final não recai sobre a topologia do circuito, mas sobre a necessidade de substituir o MAX485 danificado por componente confiável e de procedência adequada.

4.5 Comissionamento na esteira e IHM

Após a validação individual dos blocos em bancada, a placa controladora foi instalada na esteira e o conjunto foi comissionado com *firmwares* de teste para ESP32-S3 e Arduino Nano. A montagem final integrou a placa principal, os sensores, os acionamentos, os periféricos existentes e a IHM refeita, permitindo verificar a operação dos principais recursos eletrônicos no equipamento real.

Figura 25 – Conjunto eletrônico instalado na esteira durante o comissionamento



Fonte: Elaboração própria.

A interface com a IHM foi validada funcionalmente. O LCD com interface I²C respondeu aos comandos de teste, e o encoder foi lido sem ruído perceptível nos ensaios realizados. Durante a montagem, foi necessário reparar a placa de interface I²C do LCD em razão de queda de tensão elevada na trilha de alimentação do *backlight*. Após o reparo, o *backlight* e o LCD passaram a funcionar corretamente.

A IHM também recebeu nova solução mecânica, com caixa impressa em 3D e tampa em acrílico cristal. Essa solução preservou a proposta didática de permitir a visualização interna do conjunto, ao mesmo tempo em que organizou os elementos de interação local. No estado final do comissionamento, a esteira ficou montada e funcional com *firmware* de teste. Não foi consolidado um *firmware* demonstrativo completo da aplicação final, pois o foco do trabalho foi a infraestrutura eletrônica para que essa implementação possa ser desenvolvida em atividades didáticas futuras.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho realizou o *retrofitting* eletrônico de uma esteira transportadora seletora já existente, transformando-a em uma plataforma didática mais adaptável, organizada e documentada para uso em laboratório. A proposta qualificou a eletrônica do equipamento sem descaracterizar sua função original, com microcontroladores intercambiáveis, conexões centralizadas em placas dedicadas e infraestrutura física compatível com aplicações didáticas de automação e redes industriais.

Estas considerações finais retomam o objetivo geral, os objetivos específicos e os requisitos definidos para o projeto, relacionando-os às evidências apresentadas no capítulo de resultados. Também são registradas as ressalvas identificadas durante a validação, de modo a distinguir as entregas efetivamente concluídas, os recursos opcionais não consolidados e os pontos que permanecem como continuidade natural do trabalho.

O Quadro 6 organiza a leitura final do trabalho a partir dos objetivos específicos e das principais evidências obtidas na validação. No quadro, o código OE indica objetivo específico.

Quadro 6 – Síntese do atendimento aos objetivos do trabalho

Código	Objetivo específico	Situação	Evidência ou ressalva
OE-01	Desenvolver solução eletrônica embarcada com suporte a microcontroladores intercambiáveis e interface com o usuário.	Atendido	Placa controladora montada, operação validada com Arduino Nano e ESP32-S3, IHM funcional com LCD e encoder, e correção da atuação indevida sobre os pinos de <i>reset/enable</i> .
OE-02	Disponibilizar interface física RS-485 para viabilizar comunicação Modbus RTU com sistemas industriais.	Atendido	RS-485 validado em bancada por <i>loop</i> de comunicação serial antes do dano posterior ao transceptor.
OE-03	Garantir a integração da solução eletrônica ao <i>hardware</i> existente da esteira, assegurando operação confiável dos periféricos.	Atendido	Sensores, acionamento do motor CC, interface com driver de motor de passo, I ² C, IHM e montagem final na esteira verificados com <i>firmwares</i> de ensaio.
OE-04	Gerar documentação como manuais e guias de uso para professores e alunos.	Atendido	Guia de uso para professores e alunos publicado em página pública (PIRES, 2026a), com <i>sketches</i> para Arduino IDE com Arduino Nano e ESP32-S3, BOM, diagramas elétricos e arquivos de fabricação organizados no repositório de documentação do projeto (PIRES, 2026b).

Fonte: Elaboração própria.

A análise dos objetivos é complementada pelo atendimento aos requisitos funcionais e não funcionais definidos no Quadro 3, pois esses requisitos traduziram o escopo do *retrofitting* em critérios verificáveis. O Quadro 7 consolida a situação final de cada item frente às evidências obtidas durante a montagem, validação e comissionamento.

Quadro 7 – Síntese do atendimento aos requisitos do retrofitting eletrônico

Código	Situação	Evidência de atendimento	Ressalva
RF-01	Atendido	Placas dedicadas fabricadas e montadas; continuidade restaurada e curto causado pelos <i>tooling holes</i> removido antes da energização.	Reparos associados a falhas de fabricação da PCB, não a falhas de projeto elétrico.
RF-02	Atendido	Operação validada com Arduino Nano e ESP32-S3; seletor funcionou e os periféricos principais foram acessados pelas duas plataformas.	A lógica de seleção foi removida dos pinos de <i>reset/enable</i> .
RF-03	Atendido	RS-485 validado em bancada por <i>loop</i> de comunicação serial antes do dano posterior ao transceptor.	As ressalvas posteriores se relacionam ao dano e à procedência do MAX485, não à inviabilidade da placa.
RF-04	Não validado, opcional	O PCF8574AT do expensor não respondeu mesmo após intervenção para operação no barramento adequado I ² C em 5 V.	Recurso de expansão adicional, sem impacto sobre os objetivos centrais.
RNF-01	Atendido	Comunicação I ² C/IHM validada com PCA9517A, LCD, encoder e cabo de aproximadamente 3,5 m; há captura de osciloscópio.	Sem perda perceptível de informações nos testes realizados.
RNF-02	Atendido	Conexões centralizadas em PCBs, com serigrafia, conectores e montagem final organizada na esteira.	Guia de uso, BOM, diagramas e <i>firmwares</i> de ensaio apoiam manutenção, reprodução e uso didático inicial.
RNF-03	Atendido	BOM, cotações e substituições foram analisadas durante a fabricação e aquisição de componentes.	Os MAX485 adquiridos eram de baixa qualidade; componente original disponível nacionalmente.
RNF-04	Atendido	ERC, DRC e arquivos de fabricação permitiram produzir as placas, posteriormente montadas e validadas em bancada.	Falhas de fabricação foram corrigidas; avaliar aumento das dimensões das vias usadas.
RNF-05	Atendido	A entrega mínima priorizou microcontroladores, periféricos principais, IHM, montagem na esteira e RS-485 como meio físico validado.	Itens opcionais despriorizados frente ao atingimento dos objetivos centrais.

Fonte: Elaboração própria.

Com base nessa consolidação, verifica-se que o objetivo geral foi atendido: a esteira recebeu uma nova infraestrutura eletrônica, organizada em placas dedicadas, compatível com Arduino Nano e ESP32-S3, integrada ao equipamento existente e preparada para uso didático inicial. Mesmo com prazo curto, restrições de orçamento e uma única oportunidade de fabricação das placas de circuito impresso, foi possível fabricar, montar, corrigir e validar os principais blocos eletrônicos do sistema.

No caso específico da confiabilidade dos periféricos, associada ao OE-03, a solução não se limitou à reorganização física das conexões da esteira. A criação de uma placa dedicada para a IHM, a adoção do PCA9517A no barramento I²C e sua validação reforçam que a integração dos periféricos foi tratada seguindo boas práticas de projeto, visando reduzir a suscetibilidade a falhas.

As ressalvas identificadas não comprometem a entrega central do trabalho, mas delimitam o alcance da validação realizada. O meio físico RS-485 foi validado

em bancada antes do dano posterior ao transceptor, a operação com os dois micro-controladores foi confirmada após a correção da atuação indevida sobre os pinos de *reset/enable*, e a IHM foi integrada com LCD e encoder funcionais.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como continuidade direta, recomenda-se concluir os recursos opcionais previstos para a placa de IHM, com a montagem do teclado matricial e a implementação do *display* de sete segmentos com o circuito integrado HT16K33. Também se recomenda substituir o MAX485 e o PCF8574 por componentes de procedência confiável, visto que os componentes de baixo custo usados nos ensaios não se mostraram adequados.

Em uma futura revisão da placa controladora, recomenda-se incluir proteções contra inversão de polaridade, surtos e sobrecorrente na entrada de 12 V, de modo a aumentar a robustez do equipamento. Também se recomenda revisar a proteção do par diferencial RS-485 A/B, incluindo PPTCs em série com as linhas A e B em articulação com o SM712, a terminação e a polarização já previstas. Além disso, é importante a inclusão de pontos de testes e melhoria da legibilidade da serigrafia da PCI.

Outra frente é a construção de um *firmware* funcional padrão para a esteira, demonstrando seu uso completo e servindo como ponto de partida para aulas. Por fim, recomenda-se aperfeiçoar continuamente as documentações de uso, manutenção e reprodução do projeto, de modo que professores e alunos utilizem o equipamento com maior autonomia e segurança.

REFERÊNCIAS

- ABICHANDANI, P. *et al.* **Internet-of-Things Curriculum, Pedagogy, and Assessment for STEM Education: A Review of Literature.** *IEEE Access*, IEEE, v. 10, p. 38351–38369, 2022. Revisão sistemática de 60 artigos sobre currículo, pedagogia e avaliação em ensino de IoT para educação STEM. 80 citações; FWCI 10.3. Open Access (Gold, CC-BY). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9744617>. Acesso em: 31 mai 2026. 14, 17, 18, 20, 21, 22, 35
- Advanced Monolithic Systems. **AMS1117: 1A Low Dropout Voltage Regulator.** [S.l.], 2009. Folha de dados oficial da família de reguladores lineares AMS1117, incluindo a versão fixa de 3,3 V. Disponível em: <http://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2026. 39
- ANDRADE, A. A. d. *et al.* **Elaboração de bancadas didáticas para automação industrial baseadas em CLPs e Freios de Foucault.** *Revista de Ensino de Engenharia*, ABENGE, v. 35, n. 2, p. 3–13, 2016. ISSN 0101-5001. Bancadas didáticas multidisciplinares para automação industrial com CLP e freio de Foucault. Crescimento de vagas em automação no Brasil. Projeto replicável com Arduino/Raspberry Pi. Disponível em: <https://revista.abenge.org.br/abenge/article/view/343/764>. 17, 18, 20
- BOYLESTAD, R. L. **Introdução à Análise de Circuitos.** 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012. Tradução de "Introductory Circuit Analysis", 12th ed. Revisão técnica de Benedito Bonatto. ISBN 978-85-64574-20-5. 28
- BRASIL. Conselho Nacional de Educação. Câmara de Educação Superior. **Resolução CNE/CES nº 2, de 24 de abril de 2019. Institui as Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia.** Brasília, DF: [s.n.], 2019. Diário Oficial da União: seção 1, p. 43 e 44, 26 abr. 2019. Estabelece metodologias ativas, aprendizagem baseada em problemas e desenvolvimento de competências como eixos estruturantes da formação em engenharia. Disponível em: https://www.gov.br/mec/pt-br/cne/pdf/resolucoes-do-cne/ces/2019/rces002_19.pdf. Acesso em: 03 jun 2026. 18
- BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Superior. **Referenciais Nacionais dos Cursos de Engenharia.** Brasília, DF, 2019. Define referenciais curriculares nacionais para cursos de engenharia, estabelecendo a obrigatoriedade de atividades laboratoriais práticas como componente estruturante da formação do engenheiro. Disponível em: https://www.gov.br/mec/pt-br/cne/pdf/normas-classificadas-por-assunto/diretrizes-curriculares-cursos-de-graduacao/rces002_19.pdf. Acesso em: 03 jun 2026. 18
- CABRERA, M. B.; PIRES, T. V.; GEORGETTI, Y. **Desenvolvimento de uma Esteira Seletora por Cor.** Florianópolis: [s.n.], 2023. Projeto Integrador II — 5ª fase do curso de Engenharia Mecatrônica. Trabalho acadêmico não publicado, disponibilizado publicamente no repositório de documentação do projeto. Orientadores: Adriano Regis, Aurelio da Costa Sabino Netto, Silvana Rosa Lisboa de Sá. Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Disponível em: https://github.com/Mewtry/REPO_MYT/blob/main/Trabalhos%20Relacionados/Artigo-PIN22305-2023.pdf. Acesso em: 30 jun. 2026. 15, 19, 31, 32

COOMBS, C. F. **Printed Circuits Handbook**. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2007. Referência abrangente sobre projeto, fabricação e montagem de placas de circuito impresso. Cobre: materiais (laminados, prepreg), processos de fabricação, metalização, solder mask, acabamentos superficiais, montagem SMT/THT, e controle de qualidade. 6ª edição. ISBN 978-0-07-146734-6. 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30

CORDEIRO, A.; COSTA, P.; PIRES, V. F. **Modbus Protocol as Gateway Between Different Fieldbus Devices – a Didactic Approach**. In: IGIP / IEEE. *Proceedings of the International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL)*. 2017. Explores the use of the Modbus protocol as a didactic gateway for industrial communication in education. Disponível em: https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/19127/1/ARTIGO_ICL2017_PIRES.pdf. Acesso em: 22 out 2025. 20, 23

COŞKUN, S.; KAYIKÇI, Y.; GENÇAY, E. **Adapting Engineering Education to Industry 4.0 Vision**. *Technologies*, MDPI, v. 7, n. 1, p. 10, 2019. Discusses how engineering curricula must adapt to Industry 4.0 through practical and interdisciplinary approaches, covering curriculum development, lab concepts, and extracurricular activities. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-7080/7/1/10>. Acesso em: 22 out 2025. 14

Espressif Systems. **ESP32-S3-DevKitC-1 User Guide**. [S.l.], 2022. Guia do kit de desenvolvimento ESP32-S3-DevKitC-1: pinout completo, alimentação, interfaces USB, conector JTAG, LEDs e botões de controle. Disponível em: https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32s3/esp32-s3-devkitc-1/user_guide_v1.1.html. Acesso em: 31 mai 2026. 36

Espressif Systems. **ESP32-S3 Series Datasheet**. V2.2. [S.l.], 2022. Datasheet oficial do SoC ESP32-S3: microprocessador Xtensa dual-core LX7, Wi-Fi 802.11b/g/n, Bluetooth 5 LE, 45 GPIOs, periféricos UART/I2C/SPI/TWI, módulo de segurança. Pacote QFN56 7x7 mm. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_datasheet_en.pdf. Acesso em: 31 mai 2026. 22, 23, 36

Fischertechnik. **24 V for use with PLC**. 2026. Página comercial consultada em 04 jun. 2026. Lista modelos fischertechnik 24 V para uso com CLP, incluindo Conveyor Belt 24V por US\$ 459,95, Sorting Line with Color Detection 24V por US\$ 1.387,95 e Production Line 24V por US\$ 2.034,95; alguns modelos, como Factory Simulation 24V e Training Factory Industry 4.0 in 24V, são apresentados sob cotação. Disponível em: <https://www.fischertechnik.biz/24-v-for-use-with-plc-2>. Acesso em: 04 jun 2026. 19

HERCOG, D. *et al.* **Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices**. *Sensors*, MDPI, v. 23, n. 15, p. 6739, 2023. Apresenta ferramentas e metodologias para ensino de IoT com ESP32 e Arduino, incluindo curso introdutório e projetos desenvolvidos pelos alunos. 199 citações; FWCI 24.70. Open Access (Gold). Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/15/6739>. Acesso em: 31 mai 2026. 21, 22, 24, 25

Holtek Semiconductor. **HT16K33: RAM Mapping 16x8 LED Controller Driver with Keyscan**. Rev. 1.10. [S.l.], 2011. Folha de dados oficial do controlador de LED e varredura de teclado HT16K33. Disponível em: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/ht16K33v110.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2026. 48

KALISZAN, A.; GLABOWSKI, M. **A Didactic Platform for Practical Study of Real-Time Embedded Operating Systems**. *International Journal on Advances in Telecommunications*, IARIA, v. 4, n. 3-4, p. 115–123, 2011. Proposes a practical platform for studying embedded real-time operating systems in educational settings. Disponível em: https://personales.upv.es/thinkmind/dl/journals/tele/tele_v4_n34_2011/tele_v4_n34_2011_7.pdf. Acesso em: 22 out 2025. 15, 17, 18, 20, 21

KiCad Project. **KiCad Documentation: Introduction**. [S.l.], 2026. Documentação oficial do KiCad 10.0, suíte livre e de código aberto para automação de projeto eletrônico. Disponível em: <https://docs.kicad.org/10.0/en/introduction/introduction.html>. Acesso em: 19 jul. 2026. 25

LINS, T.; OLIVEIRA, R. A. R. **Cyber-physical production systems retrofitting in context of industry 4.0**. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 139, p. 106193, 2019. Propõe plataforma de retrofitting para sistemas de produção cyber-físicos em direção à Indústria 4.0, independente de modelo ou tipo de equipamento. 141 citações; FWCI 16.1. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106193>. Acesso em: 31 mai 2026. 14, 30

Lite-On Technology. **LTV-817/827/847 Series Photocoupler**. Rev. o. [S.l.], 2017. Folha de dados oficial da família de optoacopladores LTV-817. Disponível em: <https://optoelectronics.liteon.com/en-global/Led/led-component/Detail/651>. Acesso em: 10 jun. 2026. 43

Littelfuse. **SM712 Series 600W Asymmetrical TVS Diode Array**. [S.l.], 2019. Folha de dados oficial do arranjo de diodos TVS SM712 destinado à proteção de interfaces RS-485. Disponível em: <https://www.littelfuse.com/assetdocs/tvs-diode-array-spa-sm712-datasheet?assetguid=8313a28c-8802-4d47-a2a7-e30b5b1f67d8>. Acesso em: 10 jun. 2026. 41

Littelfuse. **SMBJ Series: Surface Mount 600 W TVS Diodes**. Jc.07/04/25 v4. [S.l.], 2025. Folha de dados oficial da série de diodos TVS SMBJ, incluindo o SMBJ8.5A. Disponível em: <https://www.littelfuse.com/assetdocs/tvs-diodes-smbj-series-datasheet?assetguid=ba555e99-a12d-4f72-a0b6-86b06c67171e>. Acesso em: 10 jun. 2026. 43

Maxim Integrated. **MAX481–MAX1487: Low-Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 Transceivers**. Rev. 10. [S.l.], 2014. Folha de dados oficial da família que inclui o transceptor half-duplex MAX485 alimentado em 5 V. Disponível em: <https://br.mouser.com/datasheet/2/256/MAX490-1389177.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2026. 40

Microchip Technology. **ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash Datasheet**. [S.l.], 2015. Datasheet do microcontrolador ATmega328P, base do Arduino Nano V3: CPU AVR 8-bit, 32KB Flash, 2KB SRAM, 1KB EEPROM, 23 pinos I/O, UART/SPI/I2C, ADC 10-bit, operação 1.8–5.5V. Disponível em: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf. Acesso em: 31 mai 2026. 22, 36

Modbus Organization. **MODBUS Messaging on TCP/IP Implementation Guide V1.0b**. [S.l.], 2006. Guia oficial para implementação do serviço de mensagens MODBUS sobre

redes Ethernet TCP/IP, incluindo os modelos cliente, servidor e gateway. Disponível em: <https://www.modbus.org/file/secure/messagingimplementationguide.pdf>. Acesso em: 6 jun. 2026. 24, 36

Modbus Organization. **MODBUS over Serial Line Specification and Implementation Guide V1.02**. [S.l.], 2006. Especificação do protocolo MODBUS sobre linha serial (RS-485/RS-232). Cobre camadas OSI 1 e 2: modos RTU e ASCII, CRC/LRC, diagramas de estado, classes de implementação. Documento público disponível via Wayback Machine. Disponível em: https://web.archive.org/web/20250108085608/https://www.modbus.org/docs/Modbus_over_serial_line_V1_02.pdf. Acesso em: 31 mai 2026. 15, 24, 36, 41

Modbus Organization. **MODBUS Application Protocol Specification V1.1b3**. [S.l.], 2012. Especificação oficial do protocolo MODBUS na camada de aplicação (OSI nível 7). Define PDU, function codes (01–43), modelo de dados e tratamento de exceções. Documento público disponível via Wayback Machine após redesenho do site modbus.org em mar/2026. Disponível em: https://web.archive.org/web/20250108085608/https://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf. Acesso em: 31 mai 2026. 24, 36

Neoyama Automação. **Micro Motor DC com Caixa de Redução: Série AK380, AK380/5.5MF24R35CE**. [S.l.], 2017. Ficha técnica disponibilizada pela Saravati Materiais Técnicos. O arquivo público reúne fichas de diferentes modelos; a página 3 corresponde ao motor AK380/5.5MF24R35CE empregado na esteira. Disponível em: <https://cdn.awsli.com.br/945/945993/arquivos/MicroMotorDC-R3-Red.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2026. 42

Nexperia. **74HC4053; 74HCT4053: Triple 2-channel Analog Multiplexer/Demultiplexer**. Rev. 13. [S.l.], 2024. Folha de dados oficial do multiplexador e demultiplexador analógico triplo 74HCT4053. Disponível em: https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74HC_HCT4053.pdf. Acesso em: 10 jun. 2026. 40

NXP Semiconductors. **PCA9517A: Level Translating I2C-bus Repeater**. Rev. 4.1. [S.l.], 2016. Folha de dados oficial do repetidor e tradutor de nível para barramento I2C PCA9517A. Disponível em: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCA9517A.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2026. 41

onsemi. **BSS138: N-Channel Logic Level Enhancement Mode Field Effect Transistor**. Rev. 7. [S.l.], 2024. Folha de dados oficial do MOSFET de canal N BSS138. Disponível em: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/bss138-d.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2026. 43

ONYEKA, E. *et al.* **Design and Implementation of a Microcontroller Development Kit for STEM Education**. *Global Scientific Journal (GSJ)*, v. 10, n. 7, p. 1897–1907, 2022. ISSN 2320-9186. Propõe kit modular de desenvolvimento (ATmega32A) com arquitetura motherboard+daughterboard para intercambialidade de microcontroladores. PCB projetada em KiCad. Periféricos integrados: LCD 16x2, HC-05, SIM800L, USBasp, relé, buzzer, breakout I/O. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/362644421_Design_and_implementation_o

f_a_microcontroller_development_kit_for_STEM_education. Acesso em: 31 mai 2026. 15, 17, 20, 21, 23, 24, 36

OSTOJIC, G. *et al.* **Development and Implementation of Didactic Sets in Problem-Based Classroom Setting.** *Irish Journal of Engineering Education*, v. 26, n. 1, 2013. Describes the implementation of didactic sets to enhance problem-based learning in engineering education. Disponível em: https://www.ijee.ie/articles/Vol26-1/02_ijee2242.pdf. Acesso em: 22 out 2025. 14, 15, 17, 18, 19, 20

PAJPACH, M. *et al.* **Low-Cost Education Kit for Teaching Basic Skills for Industry 4.0 Using Deep-Learning in Quality Control Tasks.** *Electronics*, MDPI, v. 11, n. 2, p. 230, 2022. Presents a low-cost educational kit designed for teaching basic Industry 4.0 skills. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/2/230>. Acesso em: 22 out 2025. 19, 20

PIRES, T. V. **Guia de uso da esteira seletora por cor.** 2026. Página pública GitHub Pages. Guia público de uso do equipamento, com orientações para professores e alunos, cuidados prévios, seleção do microcontrolador, limitações conhecidas e materiais complementares. Disponível em: https://mewtry.github.io/REPO_MYT/Guias/GUIA_USO_ESTEIRA.html. Acesso em: 30 jun. 2026. 58, 65

PIRES, T. V. **Repositório de documentação do projeto de retrofitting eletrônico de equipamento didático mecatrônico.** 2026. Repositório GitHub. Repositório público com README, guia de uso, documentações técnicas, firmwares, trabalhos relacionados e arquivos de apoio do projeto. Disponível em: https://github.com/Mewtry/REPO_MYT. Acesso em: 30 jun. 2026. 58, 65

QUINTERO, W. R.; MALDONADO, J. E. N. **Competencies of the Engineer in Industry 4.0 Context: A Systematic Literature Review.** *Production*, ABEPRO, v. 34, p. e20230051, 2024. Identifies key competencies required for engineers in the Industry 4.0 context. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20230051>. Acesso em: 22 out 2025. 14, 17, 18, 20

QUINTINO, L. F. *et al.* **Kit didático de baixo custo para práticas interdisciplinares em cursos de Engenharia Eletrônica.** *Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB*, n. 34, 2017. Kit de baixo custo para práticas interdisciplinares em engenharia eletrônica. Disponível em: <https://doi.org/10.18265/1517-03062015v1n34p124-131>. Acesso em: 22 out 2025. 18, 20

Sanyou Corporation. **SRD-Series Miniature Power Relay.** Version 3.2. [S.l.], 2019. Folha de dados oficial da série de relés de potência SRD, disponível com bobina de 12 V. Disponível em: <https://www.sanyourelay.ca/public/products/pdf/SRD.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2026. 43

SILVA, Y. d. M. G.; PIRES, T. V.; CABRERA, M. B. **Equipamento Didático de Seleção Flexível e Automático de Peças.** Florianópolis: [s.n.], 2024. Projeto Integrador — curso de Engenharia Mecatrônica. Trabalho acadêmico não publicado, disponibilizado publicamente no repositório de documentação do projeto. Departamento de Metal Mecânica (DAMM), Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Disponível em: https://github.com/Mewtry/REPO_MYT/blob/main/Trabalhos%20Relacionados/Artigo-PIN22406-2024.pdf. Acesso em: 30 jun. 2026. 31, 33

TEC-CI Circuitos Impressos. **Placas de circuito impresso face dupla**. 2026. Página institucional com materiais, processos produtivos e capacidade técnica para placas de circuito impresso de dupla face. Disponível em: <https://tec-ci.com.br/produtos/pci-dupla-face>. Acesso em: 12 jun. 2026. 55, 56

Texas Instruments. **SN74LVC245A Octal Bus Transceiver With 3-State Outputs**. Rev. x. [S.I.], 2015. Folha de dados oficial do transceptor de barramento SN74LVC245A. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc245a.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2026. 39, 40

Texas Instruments. **SNx4HCT245 Octal Bus Transceivers With 3-State Outputs**. Rev. h. [S.I.], 2022. Folha de dados oficial do transceptor de barramento SN74HCT245. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74hct245.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2026. 39, 40

Texas Instruments. **PCF8574 Remote 8-Bit I/O Expander for I2C Bus**. Rev. k. [S.I.], 2024. Folha de dados oficial do expansor remoto de entradas e saídas PCF8574. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcf8574.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2026. 51

Texas Instruments. **TPS563201, TPS563208: 4.5-V to 17-V Input, 3-A Synchronous Step-Down Voltage Regulator in SOT-23**. Rev. b. [S.I.], 2024. Folha de dados oficial do conversor buck TPS563201. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps563201.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2026. 38

Texas Instruments. **SN74LVC1G04 Single Inverter Gate**. Rev. af. [S.I.], 2025. Folha de dados oficial do inversor lógico SN74LVC1G04. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc1g04.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2026. 39, 46

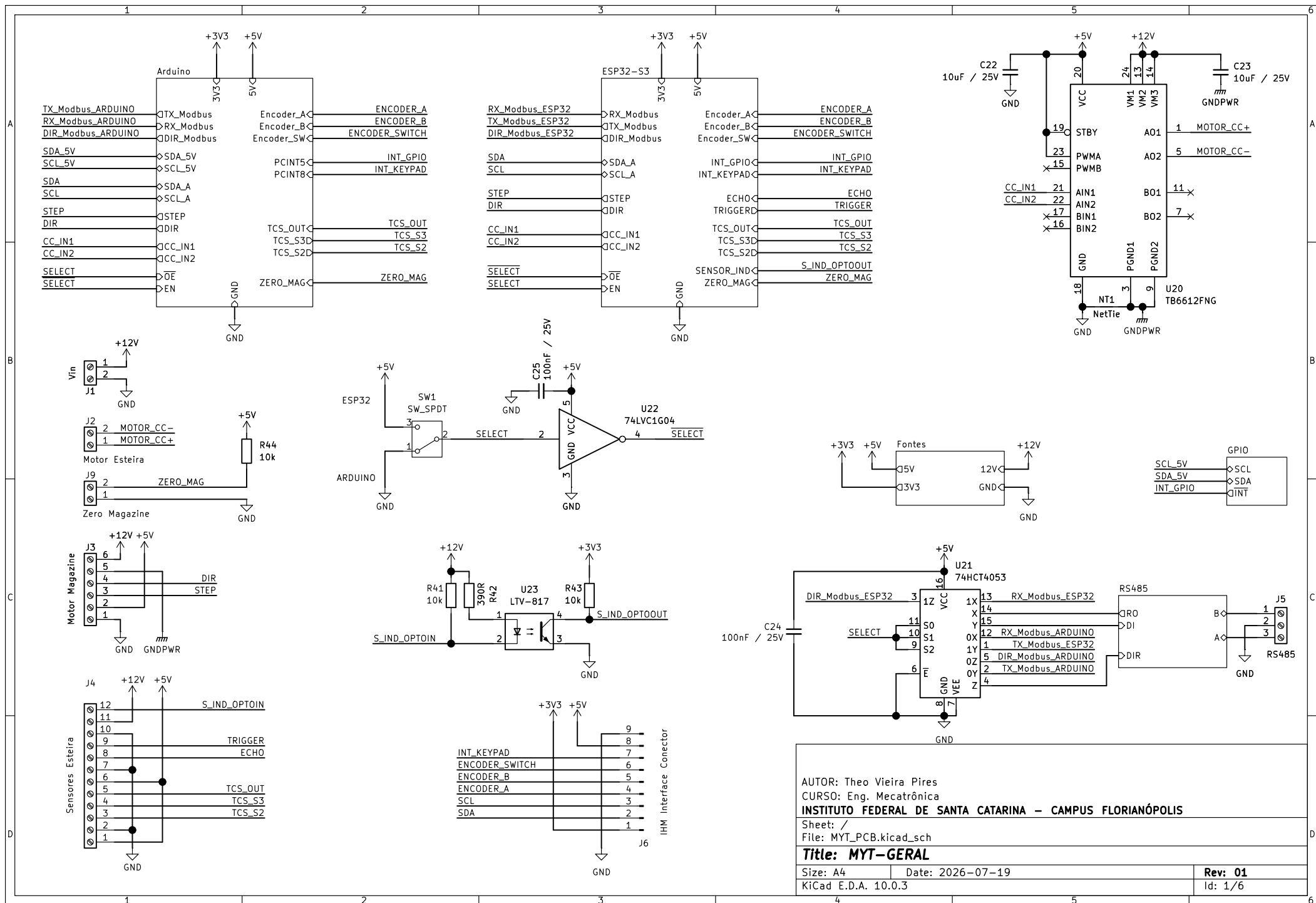
Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation. **TB6612FNG: Driver IC for Dual DC Motor**. [S.I.], 2014. Folha de dados oficial do driver de ponte H dupla TB6612FNG. Disponível em: <https://toshiba.semicon-storage.com/us/semiconductor/product/motor-driver-ics/brushed-dc-motor-driver-ics/detail.TB6612FNG.html>. Acesso em: 10 jun. 2026. 42

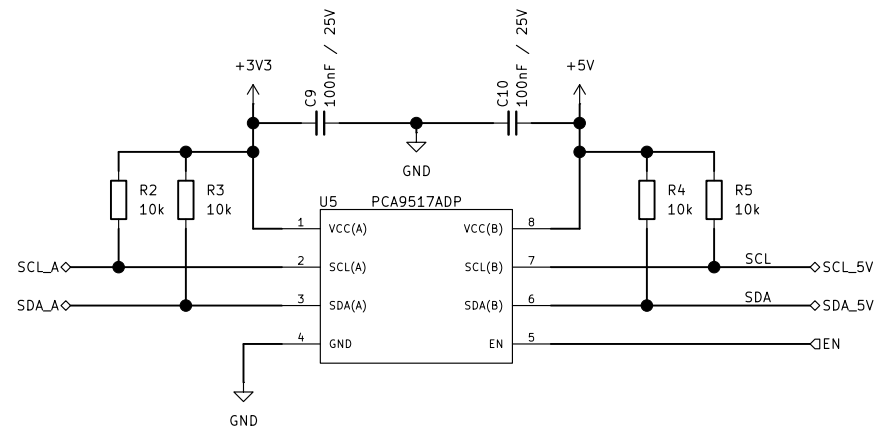
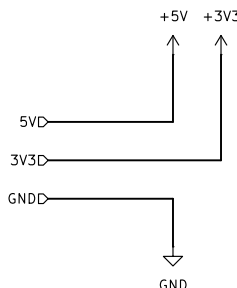
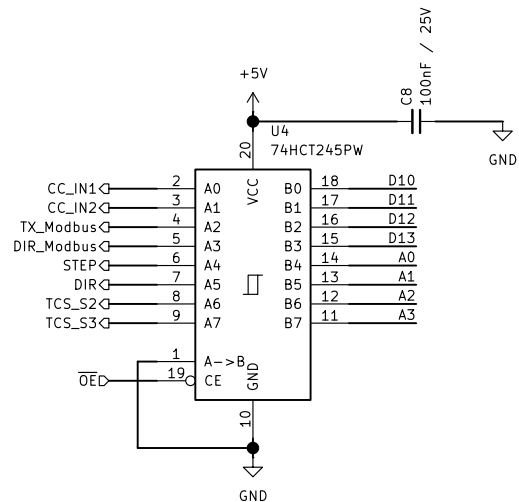
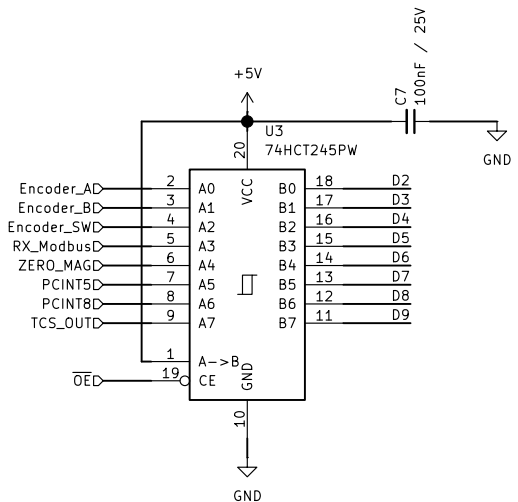
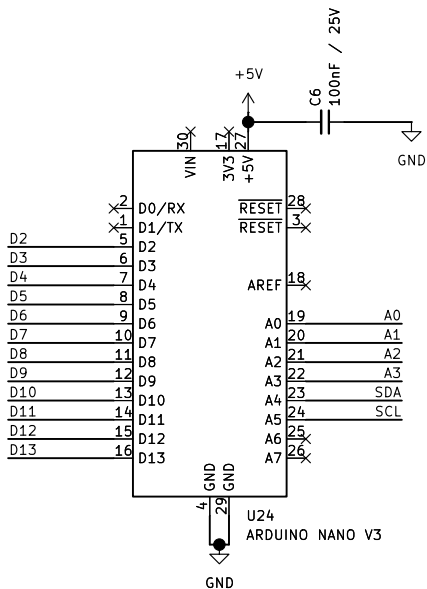
Vishay Semiconductors. **1N4148W: Small Signal Fast Switching Diode**. Rev. 1.0. [S.I.], 2023. Folha de dados oficial do diodo de comutação rápida 1N4148W. Disponível em: <https://www.vishay.com/docs/86356/1n4148w.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2026. 43

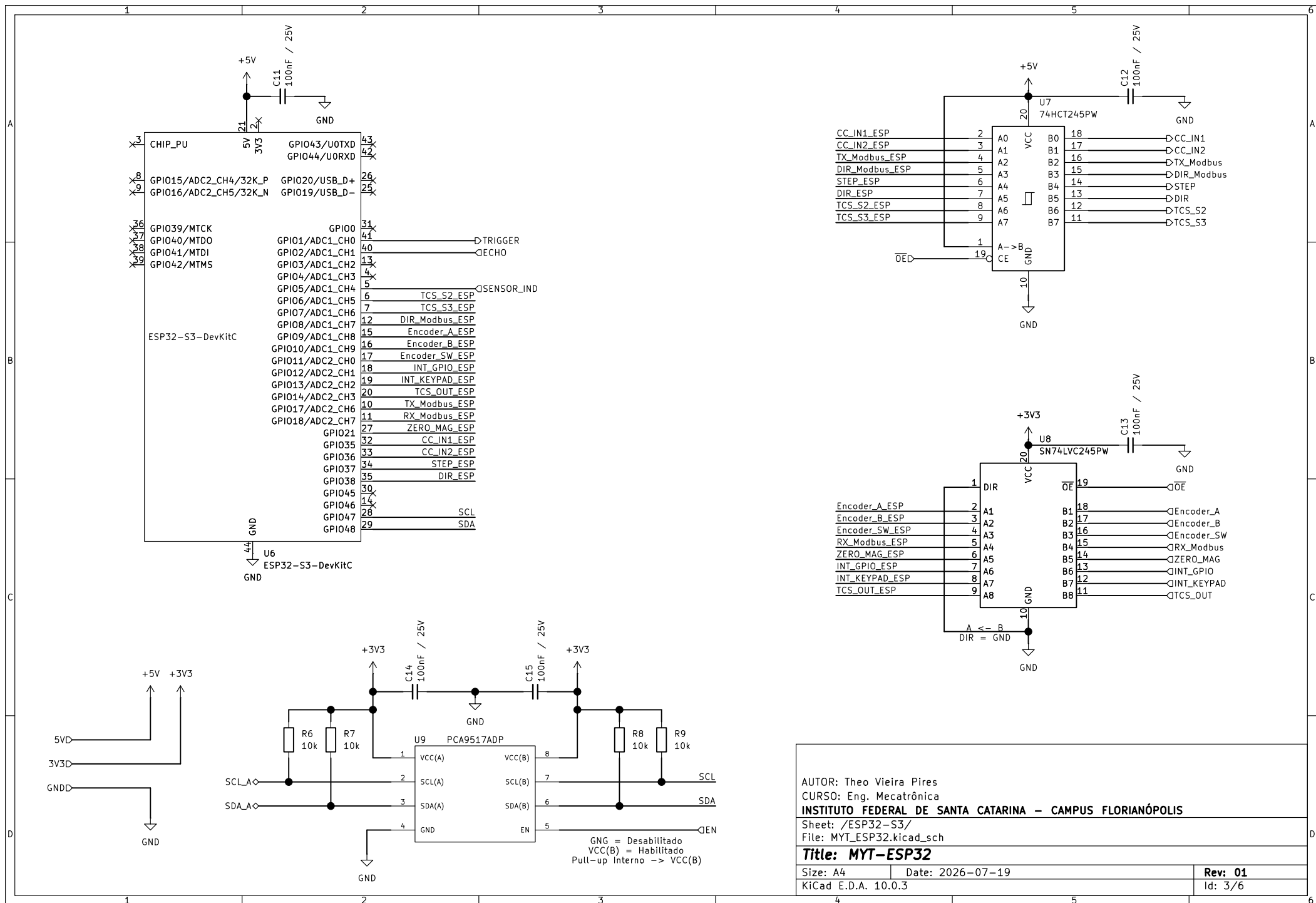
VOLZ, A. K.; OLIVEIRA, J. A. **Elaboração de uma bancada didática para controle de temperatura e medição de vazão**. *Revista de Ensino de Engenharia*, ABENGE, v. 41, p. 373–384, 2022. ISSN 2236-0158. Bancada didática de baixo custo para controle de temperatura e medição de vazão com CLP Schneider Twido. Construída com materiais doados/reutilizados na UFMT, campus Rondonópolis. Disponível em: <https://revista.abenge.org.br/abenge/article/view/1781/1099>. Acesso em: 31 mai 2026. 18, 20

APÊNDICES

APÊNDICE A – ESQUEMÁTICOS COMPLETOS DAS PCBs

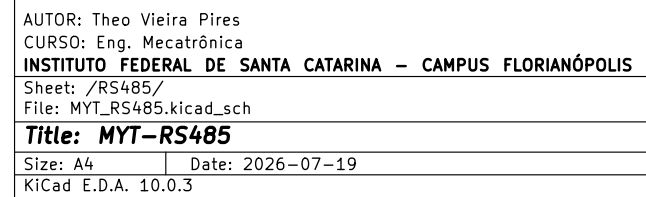


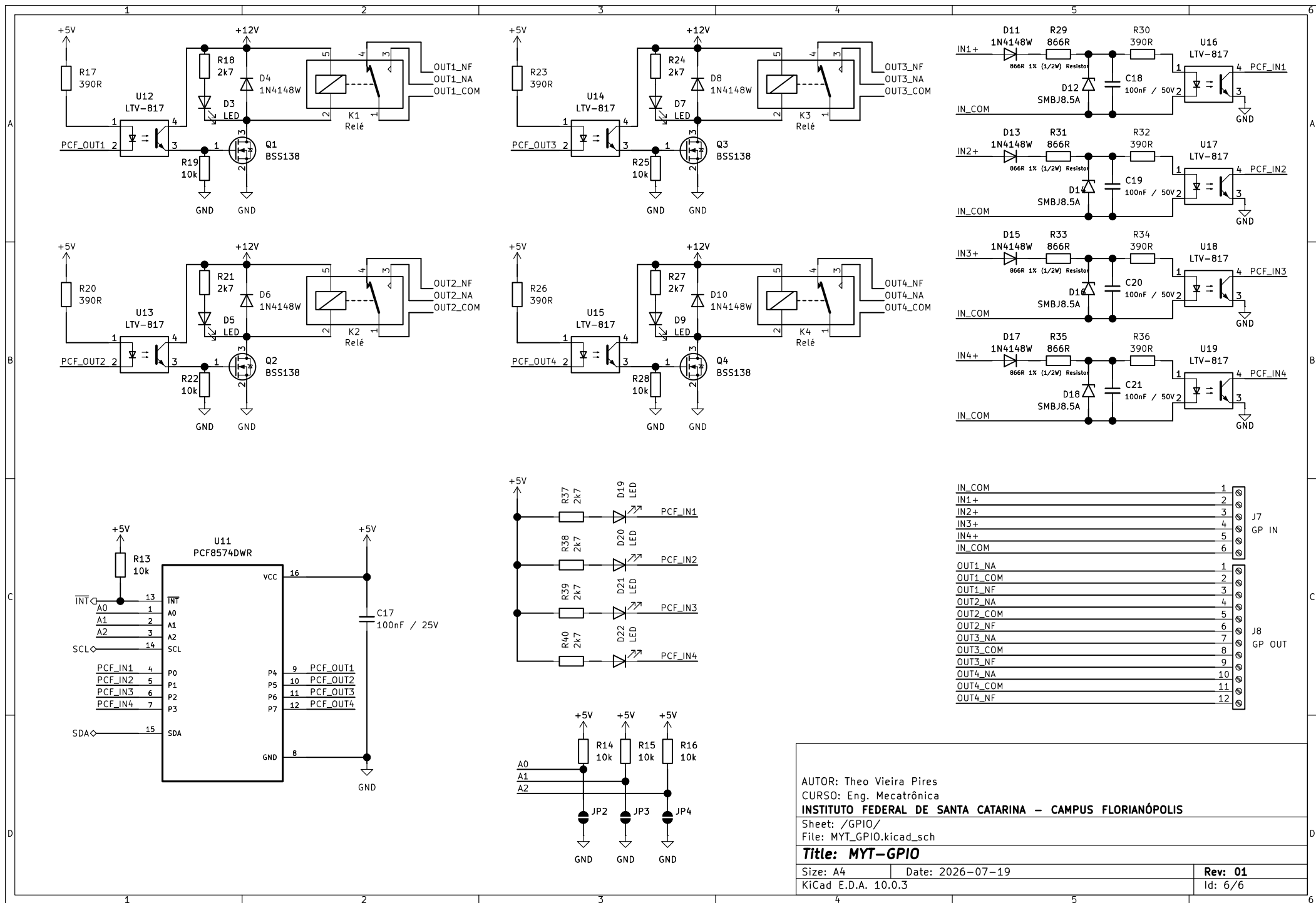




AUTOR: Theo Vieira Pires
CURSO: Eng. Mecatrônica
INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA – CAMPUS FLORIANÓPOLIS
Sheet: /ESP32-S3/
File: MYT_ESP32.kicad_sch
Title: MYT-ESP32

Size: A4	Date: 2026-07-19
KiCad E.D.A. 10.0.3	Rev: 01 Id: 3/6





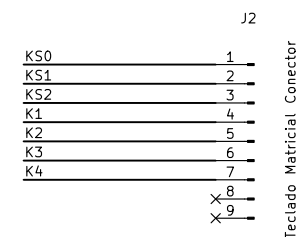
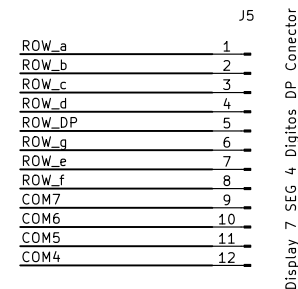
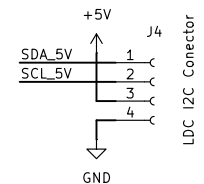
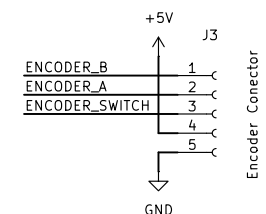
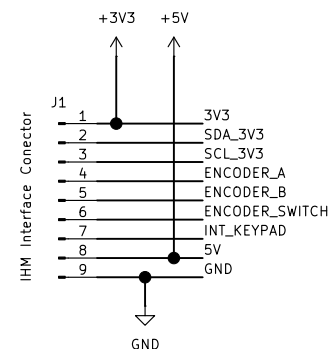
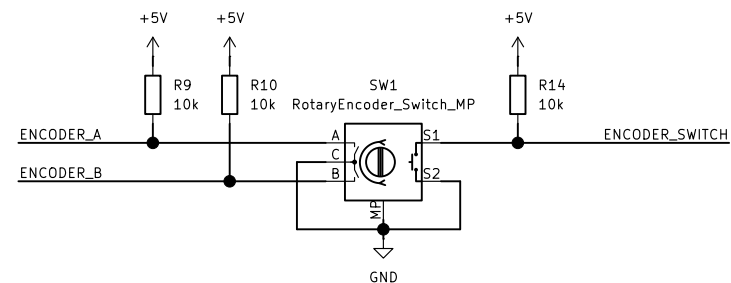
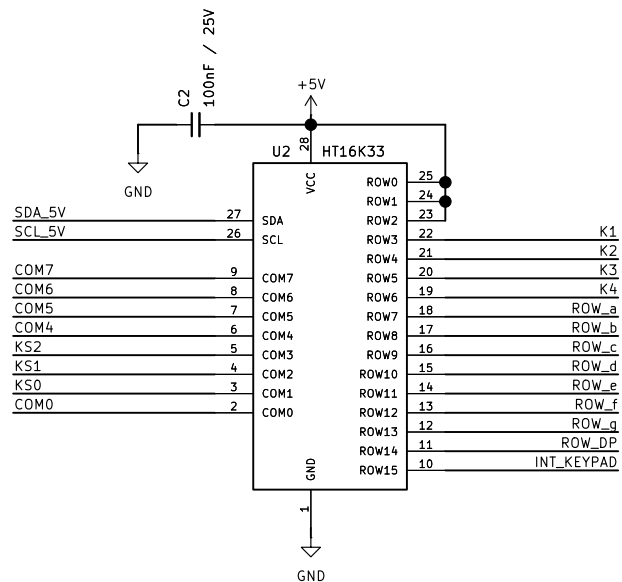
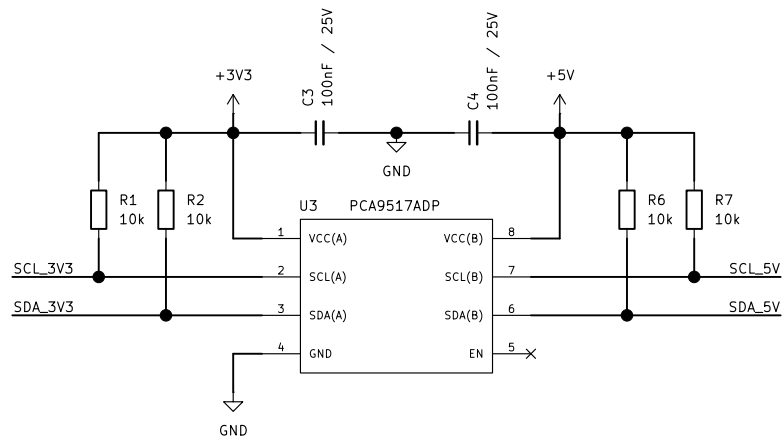
AUTOR: Theo Vieira Pires
CURSO: Eng. Mecatrônica
INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA – CAMPUS FLORIANÓPOLIS

Sheet: /GPIO/
File: MYT_GPIO.kicad_sch

Title: MYT–GPIO

Size: A4 Date: 2026–07–19
KiCad E.D.A. 10.0.3

Rev: 01
Id: 6/6



AUTOR: Theo Vieira Pires
CURSO: Eng. Mecatrônica
INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA – CAMPUS FLORIANÓPOLIS

Sheet: /
File: MYT_IHM_PCB.kicad_sch

Title: MYT-IHM-PCB

Size: A4 Date: 2026-06-12
KiCad E.D.A. 10.0.3

Rev: 00
Id: 1/1