

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

JOÃO ANTONIO MADRUGA MORAIS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO PARA
AUTOMATIZAÇÃO DE PROCESSO EM UMA LINHA DE PRODUÇÃO**

FLORIANÓPOLIS, 2025

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

JOAO ANTONIO MADRUGA MORAIS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO PARA
AUTOMATIZAÇÃO DE PROCESSO EM UMA LINHA DE PRODUÇÃO**

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 Eletricista.

Orientador:
Prof. Márcio Silveira Ortmann, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2025.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Morais, João Antonio Madruga
DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO PARA AUTOMATIZAÇÃO DE
PROCESSO EM UMA LINHA DE PRODUÇÃO / João Antonio Madruga Moraes;
orientação de Márcio Silveira Ortamann - Florianópolis, SC, 2025.
124 p.

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

1. Automatização de processos. 2. Placa de circuito
impresso. 3. Processo produtivo. 4. Sistema eletrônico. 5.
Controle de máquinas. I. Ortmann, Márcio Silveira
. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III.
DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO PARA AUTOMATIZAÇÃO DE
PROCESSO EM UMA LINHA DE PRODUÇÃO.

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO PARA AUTOMATIZAÇÃO DE PROCESSO EM UMA LINHA DE PRODUÇÃO

JOAO ANTONIO MADRUGA MORAIS

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

Florianópolis, 06 de março, 2025.

Banca Examinadora:

Prof. Márcio Silveira Ortamnn, Dr Eng.

Prof. Edson Sorato, M. Eng.

Prof. Luiz Carlos Baron, M. Eng.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus — sem Ele, nada sou. À minha família, em especial à minha mãe, Rozemeli Monteiro Madruga, e ao meu pai, Antonio Carlos Morais, que foram o combustível que me impulsionou a seguir em frente. À minha esposa, Suellen Martins de Oliveira, que esteve ao meu lado em todos os momentos, oferecendo apoio e força — sem vocês, essa conquista não teria sido possível. Agradeço também aos meus colegas de equipe, que contribuíram para a realização deste trabalho, com destaque ao meu amigo e irmão na fé, Leonardo da Silva, um dos profissionais mais brilhantes que já conheci. E, por fim, ao meu orientador, Márcio Silveira Ortmann, pela constante colaboração ao longo de todo o desenvolvimento.

RESUMO

Desde a sua primeira revolução, a indústria vem passando por constantes processos de aprimoramento em seus sistemas e métodos de manufatura. Seguindo essa tendência, é fundamental que as fábricas busquem continuamente novas técnicas e tecnologias para melhorar seus processos. A automatização é uma das formas mais eficazes de aumentar a produtividade, reduzir erros e elevar a qualidade. No entanto, para garantir o sucesso da implantação de um projeto de automação, é indispensável a realização de uma avaliação técnica aprofundada do processo produtivo, dos requisitos de operação e do projeto do hardware que constituirá o sistema. O sistema de controle destaca-se como um dos componentes mais importantes do projeto, pois é responsável por coordenar e gerenciar todas as operações, garantindo que as funções sejam executadas de forma eficiente, segura e dentro dos parâmetros estabelecidos. Este trabalho foi desenvolvido no ambiente fabril de uma empresa brasileira do setor de tecnologia e tem por objetivo desenvolver um sistema de controle eletrônico, por meio do projeto de uma placa eletrônica, encarregada de controlar uma máquina desenvolvida internamente. Essa máquina tem a finalidade de automatizar parte do processo de fabricação, uma vez que é responsável por realizar a movimentação e fechamento de um produto, além de automatizar outras partes do processo. Em um primeiro momento foi feita uma análise do processo para identificar as exigências da máquina. Em seguida, cada dispositivo que a compõe foi estudado individualmente, a fim de compreender seu funcionamento e requisitos operacionais. A partir dessas informações, foram projetados e dimensionados os circuitos eletrônicos que formaram a placa de controle. Por fim, a placa foi confeccionada e testada para verificar seu desempenho.

Palavras-chave: Indústria; Automação; Sistema de controle eletrônico; Placa de controle; Avaliação técnica.

ABSTRACT

Since its first revolution, the industry has been undergoing constant improvement processes in its manufacturing systems and methods. Following this trend, it is essential that factories continually seek new techniques and technologies to improve their processes. Automation is one of the most effective ways to increase productivity, reduce errors and improve quality. However, to ensure the success of the implementation of an automation project, it is essential to carry out an in-depth technical assessment of the production process, the operating requirements and the design of the hardware that will make up the system. The control system stands out as one of the most important components of the project, as it is responsible for coordinating and managing all operations, ensuring that functions are performed efficiently, safely and within the established parameters. This work has been developed in a factory environment of a Brazilian company in the technology sector, and aims to develop an electronic control system, through the design of an electronic board, responsible for controlling a machine developed internally. This machine is designed to automate part of the manufacturing process, as it is responsible for moving and closing a product, in addition to automating other parts of the process. First, an analysis of the process was carried out to identify the machine's requirements. Then, each device that makes it up was studied individually in order to understand its operation and operational requirements. Based on this information, the electronic circuits that formed the control board were designed and sized. Finally, the board was manufactured and tested to verify its performance.

Keywords: Industry; Automation; Electronic control system; Control board; Technical evaluation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produto com suas três partes (tampa, placa eletrônica e base).	19
Figura 2 – Fluxograma do processo de montagem do produto sem automação.....	20
Figura 3 - Fluxo do processo com automação.	21
Figura 4 - Conceito da automatização do processo produtivo.....	22
Figura 5 - Detalhamento componentes que constituem a máquina.	22
Figura 6 – Máquina responsável pela automatização do processo.....	23
Figura 7 - Elementos básicos de um sistema automatizado.	27
Figura 8 - Diagrama de blocos de um sistema de controle.	28
Figura 9 - Diagrama de blocos e representação gráfica de uma configuração em malha aberta.....	29
Figura 10 - Diagrama de blocos e representação gráfica configuração malha fechada.	30
Figura 11 – Microcontrolador (em vermelho), recursos periféricos e hardwares que comumente trabalham em conjunto.	32
Figura 12 - Visão interna de um modelo de microcontrolador.	33
Figura 13 - Notação e símbolo para configuração base-comum transistor PNP.	35
Figura 14 - Regiões de operação de um TBJ com configuração base-comum.	36
Figura 15 - Circuito com um relé eletromecânico dedicado para o acionamento de um motor monofásico.....	37
Figura 16 - Configuração interna de um optoacoplador.	39
Figura 17 - Exemplo prático de utilização de um optoacoplador.	39
Figura 18 - Atuadores industriais: (a) servo motor, (b) motor de corrente contínua, (c) motor de passo, (d) motor linear, (e) cilindro pneumático, (f) atuador solenóide.....	41
Figura 19 - Motor de passo com corte lateral para exibir os componentes internos.	42
Figura 20 - Estrutura interna de um motor de passo com cinco fases.	42
Figura 21 - Diagrama de blocos das conexões entre um <i>easy servo motor</i> com um driver.	44
Figura 22 - Exemplo de ligação entre um sensor de proximidade com chaveamento PNP em uma carga.....	45
Figura 23 - Sinal PWM para valores de ciclo de trabalho.....	46

Figura 24 - Exemplo prático do microcontrolador MC68HC05B6 controlando um motor CC por meio do driver A3952.....	47
Figura 25 - Exemplo prático de um sistema de controle em malha aberta para empilhamento de objetos.....	48
Figura 26 - Percurso executado pelo produto durante o processo de montagem, teste e embalagem.	51
Figura 27 - Detalhamento do fluxo que a peça realiza durante o processo de montagem e teste.	52
Figura 28 - Detalhamento mesa indexadora.	53
Figura 29 - Robô cartesiano.....	54
Figura 30 - Jiga de teste e fechamento do produto.	55
Figura 31 - Esteira tracionada seus componentes.	56
Figura 32 - Rampa de saída para peças aprovadas.	57
Figura 33 - Vista posterior da máquina onde se encontra o posto de embalagem....	58
Figura 34 - Rampa de peças reprovadas e seus componentes.	59
Figura 35 – Interação entre a rampa de peças reprovadas e o robô cartesiano.	59
Figura 36 - Divisão dos subsistemas que constituem a máquina e forma de comunicação entre eles.	61
Figura 37 - Pinos teensy 4.1.....	67
Figura 38 - Diagrama funcional e descrição dos pinos do <i>shift register</i> 74HC595.	68
Figura 39 – Entradas e saídas de sinal identificadas nos pinos do teensy 4.1 e no <i>shift registers</i> 74HC595D-Q100.....	71
Figura 40 - Circuito para entradas de sinais via optoacoplador.....	72
Figura 41 - Circuito reserva configurável para entrada de sinal	76
Figura 42 - Sugestão de circuito para acionamento <i>drivers</i> ES-D.....	78
Figura 43 - Informações técnicas ULN2803	80
Figura 44 - Circuito de acionamento <i>drivers</i> motores.....	81
Figura 45 - Curva característica dos valores de I_D e V_{GS} do MOSFET IRFR/U5505	82
Figura 46 - Circuito de acionamento para saídas de tensão 12 V.....	83
Figura 47 - Curva característica do valor de I_D para $V_{GS}=-7,2V$ do MOSFET IRFR/U5505.	86

Figura 48 - Circuitos para acionamento de tensão 12 V para 7 saídas.....	87
Figura 49 - Circuito de acionamento 24 V para 7 saídas.	88
Figura 50 - Circuito de referência para controle de motor de passo com oscilador LM555 e CD4017.	89
Figura 51 - Forma de onda quadrada emitida por meio do circuito com oscilador 555.	90
Figura 52 - Circuito gerador de sinal PWM para acionamento do <i>driver</i> do motor de passo da esteira tracionada.	91
Figura 53 - Circuito conversor de 12 V para 5 V com LM2596 5.0	92
Figura 54 – Entrada de alimentação da placa de controle principal em conjunto com os circuitos conversores de tensão e indicadores de estado.	97
Figura 55 - Circuito de interface de USB para UART da placa de desenvolvimento.	98
Figura 56 - Circuito de interface USB para UART da placa de desenvolvimento com FT232.....	98
Figura 57 – Posicionamento dos componentes da placa de controle principal	100
Figura 58 - Placa de controle principal com as trilhas de conexão concluídas.....	101
Figura 59 - Projeto final da placa de controle principal.....	102
Figura 60 – Projeto final placa de controle para esteira tracionada com LM555.....	103
Figura 61 - Placa de controle principal montada.	104
Figura 62 - Placa de controle para esteiras tracionadas montada.	104
Figura 63 - Equipamentos usados para os testes funcionais.	105
Figura 64 - Medições níveis de tensão saída das fontes de 12 V e 24 V, circuitos conversores de 5 V e 3.3 V.	106
Figura 65 - Todas as saídas de sinal da placa acionadas.....	107
Figura 66 - Programa para teste saída de sinal para controle de pulso e direção dos motores.	107
Figura 67 - Forma de onda da saída de sinal de pulso 12 V.....	108
Figura 68 - Programa desenvolvido para teste do circuito com <i>shift register</i> e saídas de 24 V.....	109
Figura 69 - Medições saída de 24 V por meio do transistor ULN2003.....	109
Figura 70 - Teste de carga na saída de sinal de 12 V acionada via MOSFET.....	110

Figura 71 - Valores de tensão medidos na saída da fonte de 12 V, com e sem carga na saída de sinal de 12 V acionada via MOSFET.....	111
Figura 72 – Teste prático com sensor indutivo para validação da entrada de sinal com optoacoplador.	112
Figura 73 - Conexões elétricas esteira tracionada.	113
Figura 74 - Medidas sinal de controle <i>driver</i> motor de passo.	114
Figura 75 - Esteira tracionada em operação.	115
Figura 76 - Painel elétrico com as fontes de alimentação e dispositivos de segurança.	116
Figura 77 - Painel elétrico com a placa de controle principal e os <i>drivers</i> de controle dos motores.	117
Figura 78 - Máquina executando <i>home position</i>	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Detalhamento entradas de sinal da placa de controle eletrônica principal.	62
Tabela 2 - Detalhamento das saídas de sinal da placa de controle principal.	64
Tabela 3 - Informações técnicas teensy 4.1.	66
Tabela 4 - Identificação de aplicação pinos teensy 4.1.	70
Tabela 5 - Informações técnicas optoacoplador TLP291.	73
Tabela 6 - Informações de corrente direta e tensão direta no optoacoplador TLP291.	74
Tabela 7 - Características técnicas MHT170CGCT	75
Tabela 8 - Dimensionamento dos resistores para diferentes aplicações da placa de controle principal	75
Tabela 9 - Informações técnicas <i>drivers</i> família ES-D.	79
Tabela 11 - Limites dos parâmetros técnicos dos MOSFET IRFR/U5505	82
Tabela 12 - Características técnicas ULN2003.	84
Tabela 13 – Estado de operação do circuito de acionamento a MOSFET e valores das tensões que o constituem.	85
Tabela 14 – Parâmetros máximos de operação LM555.	91
Tabela 15 - Valores de operação LM2596-5.0	93
Tabela 16 - Parâmetros máximos e mínimos de operação LM1117MPX-33NOPB	93
Tabela 17 - Consumo individual componentes em 5 V e 3.3 V	94
Tabela 18 - Informações técnicas fonte 12 V 10A EFM1210 - Intelbras	94
Tabela 19 - Informações técnicas fonte 24 V 5 A EFM2405 - Intelbras	95
Tabela 20 - Consumo por parte dos componentes das fontes de 12 V e 24 V	96
Tabela 21 - Valores de tensão e corrente saídas reservas.	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	<i>Antilock Braking System</i>
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
CI	Circuito Integrado
CLPs	Controladores Lógico Programável
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
FET	<i>Field Effect Transistor</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
JFET	<i>Junction Field-Effect Transistor</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PTH	<i>Plated Through-Hole</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
ROM	<i>Read-Only Memory</i>
SMD	<i>Surface Mounted Device</i>
TBJ	<i>Transistor Bipolar De Junção</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa	18
1.2	Definição do Problema	18
1.3	Objetivo Geral.....	24
1.4	Objetivos Específicos	24
1.5	Estrutura do Trabalho.....	25
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
2.1	Sistemas automatizados	26
2.2	Sistemas de controle	27
2.2.1	Unidade Controladora – Microcontrolador.....	31
2.2.2	Interfaces com controlador	34
2.2.3	Atuadores.....	40
2.2.4	Sensores Eletrônicos	44
2.2.5	Aplicação de Controle em motores DC	46
2.3	Exemplo de aplicação de um sistema de controle.....	47
3.	VISÃO GERAL DO PROJETO	50
3.1	Detalhamento da máquina.....	50
3.1.1	Mesa de indexação	53
3.1.2	Robô cartesiano	54
3.1.3	Jigas de teste	55
3.1.4	Esteira tracionada	56
3.1.5	Rampas de aprovado/reprovado	56
3.2	Requisitos de operação.....	60
3.3	Estruturando os subsistemas da máquina.....	61
3.4	Mapeamento e definições dos sinais de entrada e saída	62
4.	PROJETO CIRCUITOS	65
4.1	Seleção e especificação do microcontrolador responsável pelo controle do sistema.	65
4.2	Detalhamento técnico circuito <i>shift registers</i> (<i>registrador de deslocamento</i>).....	68
4.2.1	Disposição dos pinos da placa de desenvolvimento em conjunto com o <i>shift register</i>	69
4.3	Circuito para entrada de sinais digitais	72
4.4	Acionamento de componentes: Circuitos para tensões de 12 V, 24 V e acionamento dos <i>drivers</i> dos motores.	77
4.4.1	Acionamento <i>drivers</i> motores robô cartesiano e mesa indexadora.....	77
4.4.2	Acionamentos 12 V via MOSFET	81
4.4.3	Acionamentos 24 V	87
4.4.4	Circuito para acionamento <i>driver</i> motor de passo esteira tracionada	88
4.5	Circuitos conversores de tensão.....	92
4.6	Módulo para conexão USB.....	97

5.	PLACA DE CICUITO IMPRESSO	100
5.1	Visão geral do layout: Planejamento de configuração	100
5.2	Inspeções das placas após processo de confecção	103
5.3	Testes funcionais em bancada – Placa de controle principal.....	105
5.4	Testes funcionais – Placa de controle esteiras tracionadas.....	112
5.5	Montagem painéis e integração da placa de controle principal com a máquina	115
5.6	Teste funcional da máquina – <i>Home position</i>	117
6.	CONCLUSÃO	120
6.1	Conclusões gerais do projeto: Resumo dos resultados obtidos e lições aprendidas	120
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	122

1. INTRODUÇÃO

Por volta de 1760 e 1840, a máquina a vapor era inventada em conjunto com a construção de ferrovias, ocasionando o que historicamente é chamado de a primeira revolução industrial. Revoluções dessa natureza, continuaram no final do século XIX e início do século XX com o advento da eletricidade e da linha de montagem. Processos de produção em massa foram criados, e com esses ocorridos, acontecia a segunda revolução industrial. A terceira revolução industrial, teve seu início na década de 1960, denominada também de revolução digital ou do computador, uma vez que ela foi impulsionada pelo desenvolvimento dos semicondutores, e da computação em *mainframe* (década de 1960), da computação pessoal (década de 1970 e 1980) e da *internet* (década de 1990) (SCHWAB, 2016).

Atualmente, a sociedade passa por uma quarta revolução industrial. Seu início ocorreu na virada do século movida por evoluções nos sistemas de internet, que permitiram uma conexão global e mais rápida, pela diversificação e aprimoramento de sensores, que ficaram menores, mais poderosos e com um custo menor, pela inteligência artificial e pelo aprendizado de máquina (SCHWAB, 2016). Dessa forma, é possível afirmar que sistemas automatizados deixaram de ser um sonho e passaram a se tornar realidade, principalmente no que se refere a sistemas de manufatura. Em processos de fabricação, o termo automação não é recente, em 1940, um engenheiro da *Ford Motor Company*, descreveu automação como sendo um conjunto de sistemas de acionamentos e controles automáticos, que tem por objetivo a substituição do esforço e da inteligência humana (LAMB, 2015).

Para garantir o funcionamento adequado, a automação de um processo produtivo depende de sistemas de controle, que têm a função de assegurar a execução automática do processo conforme o planejado. Exemplos práticos de aplicação incluem o controle de variáveis como velocidade, pressão, vazão, temperatura, umidade e viscosidade, sendo esses fatores presentes em operações industriais (PINTO, 2005).

Um sistema de controle é formado por componentes que trabalham em conjunto, geralmente sob a inteligência de circuitos eletrônicos, para operar máquinas

e processos de forma automatizada. Antigamente, esses sistemas utilizavam controles analógicos ou baseados em relés e temporizadores, mas, com a popularização do microprocessador, passaram a incorporar cada vez mais recursos e sofisticação. Exemplos são o controle de temperatura de uma casa, que se adapta a mudanças externas, e robôs industriais que movem peças conforme um percurso pré-definido (KILIAN, 2000).

1.1 Justificativa

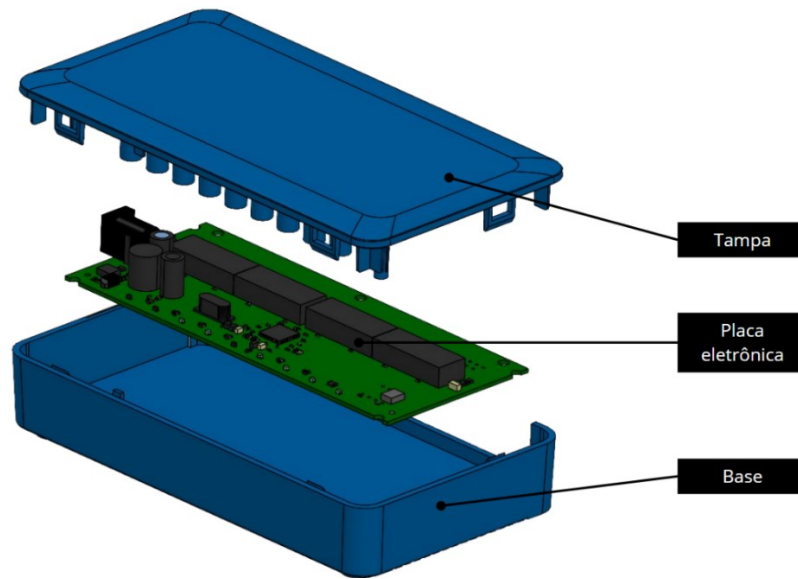
Os sistemas de controle constituem a base de inúmeras inovações, exercendo um papel fundamental no avanço da tecnologia moderna e tornando-se ainda mais relevantes nos dias de hoje. Além do setor industrial, suas aplicações abrangem áreas como geração de energia, defesa militar e até mesmo a exploração aeroespacial (SALIM e ZAINON, 2010).

O presente trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de controle, por meio do projeto de uma placa eletrônica, que vai ser usada em uma máquina desenvolvida para automatizar um processo de fabricação, em uma empresa brasileira do setor de tecnologia, cujo nome não será citado por questões de sigilo. A empresa é organizada em setores, cada qual com uma função específica que contribui para a elaboração do produto final. O trabalho em questão foi aplicado no setor de montagem final, responsável por agregar todos os componentes do produto — como placa eletrônica, estrutura injetada e demais itens complementares. Trata-se da última etapa do processo produtivo, após a qual o produto está pronto para ser enviado ao cliente. Para alcançar maior eficiência e performance produtiva, é fundamental que o processo de fabricação seja ágil e efetivo. Nesse sentido, a automatização torna-se essencial para viabilizar esses resultados.

1.2 Definição do Problema

A empresa em questão fabrica um produto com as características físicas, descritas na Figura 1. Conforme é possível notar, o produto é constituído de três partes: tampa, placa eletrônica e base.

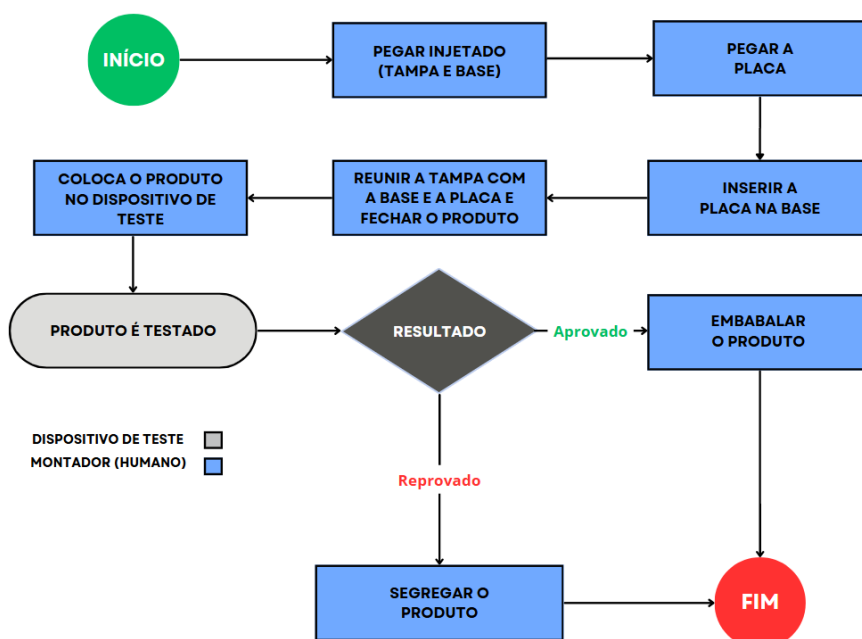
Figura 1 - Produto com suas três partes (tampa, placa eletrônica e base).



Fonte: Acervo do autor (2025).

Para o montador, as três peças identificadas na Figura 1 são fornecidas separadamente em caixas individuais. Sua função é reunir essas peças e inseri-las em um dispositivo que realizará o fechamento do produto por meio de um cilindro pneumático, aplicando pressão sobre a tampa. Após o fechamento, o próprio dispositivo testa o produto de forma automática e ao concluir o processo, indica se ele foi aprovado ou reprovado. Cabe ao montador embalar o produto caso seja aprovado ou segregá-lo se reprovado. O processo é detalhado por meio do fluxograma da Figura 2.

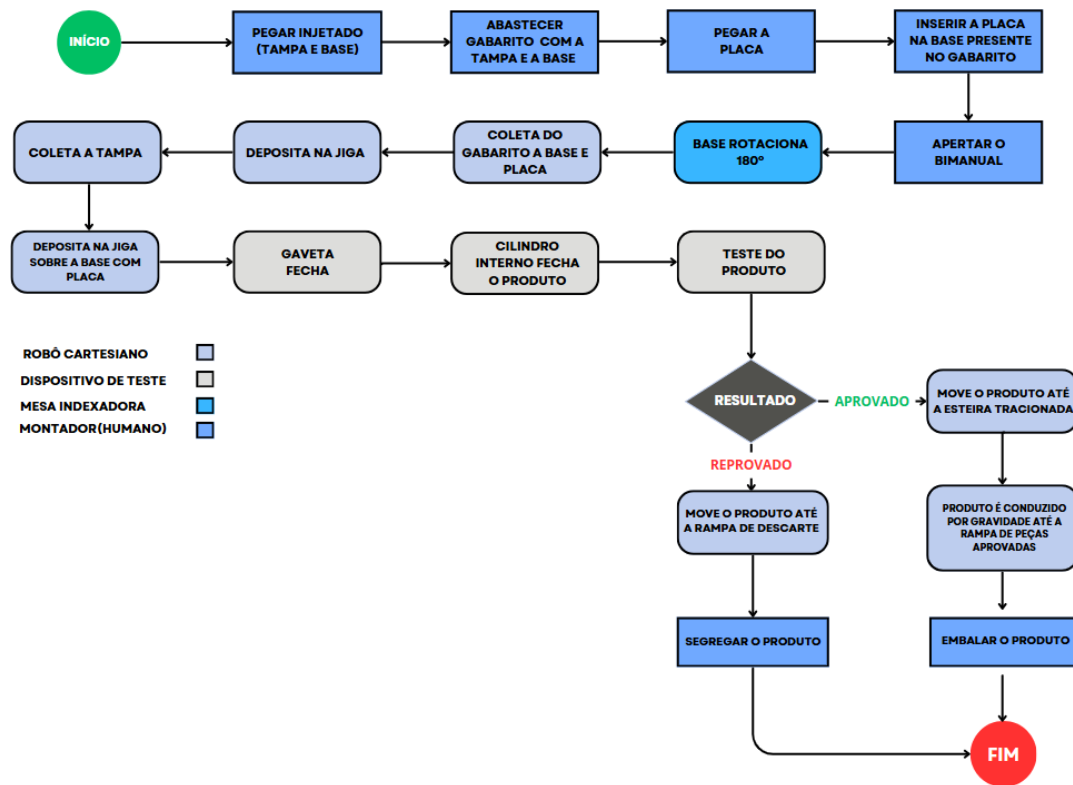
Figura 2 – Fluxograma do processo de montagem do produto sem automação.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Por questões estratégicas da empresa, evidenciou-se a possibilidade de automatizar o processo produtivo. Conforme é possível notar através do fluxograma da Figura 2, o montador efetua muitas movimentações com o produto, além disso a decisão de separar a peça aprovada/reprovada ainda fica a critério do operador, podendo ocorrer a mistura de peças. Pensando desta forma, idealizou-se um sistema onde a parte de manipulação das peças até os dispositivos de teste e separação do produto é feito de forma automática, ficando a critério do operador apenas fornecer as três partes que constituem o produto. Para essa execução, o sistema irá possuir: um robô cartesiano para manipular as peças, três dispositivos de testes, já existentes que executam o fechamento e teste do produto, entre outros *hardwares* responsáveis pelas demais ações que o processo vai exigir, como monitoramento do sistema de segurança padrão NR12, interface entre robô e montador, indicações sonoras de operação, entre outras atribuições. Na Figura 3 tem-se o fluxograma do processo automatizado.

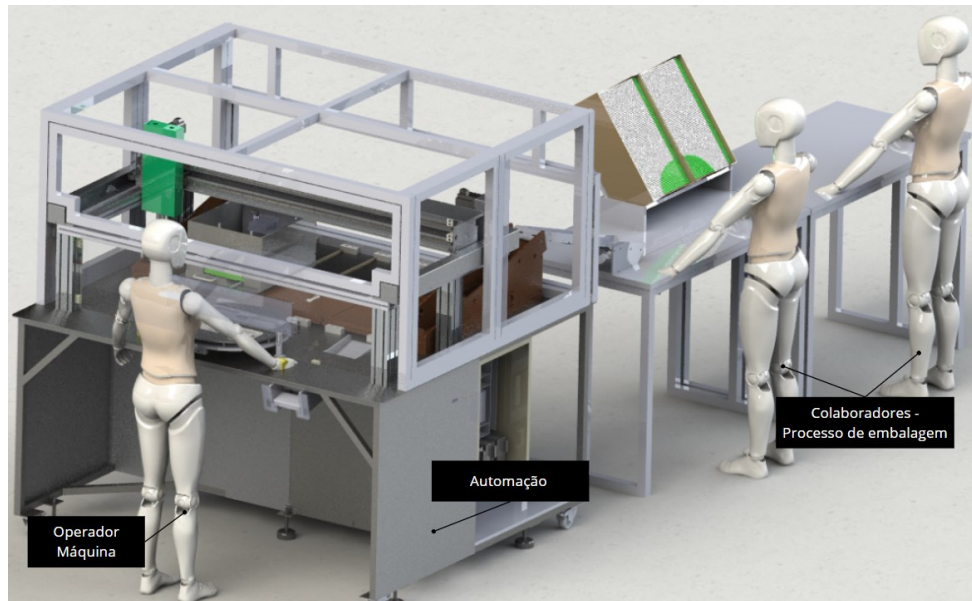
Figura 3 - Fluxo do processo com automação.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Com base no fluxograma da Figura 3 e nas considerações já apresentadas, a equipe de automação da empresa em questão projetou a solução apresentada na Figura 4.

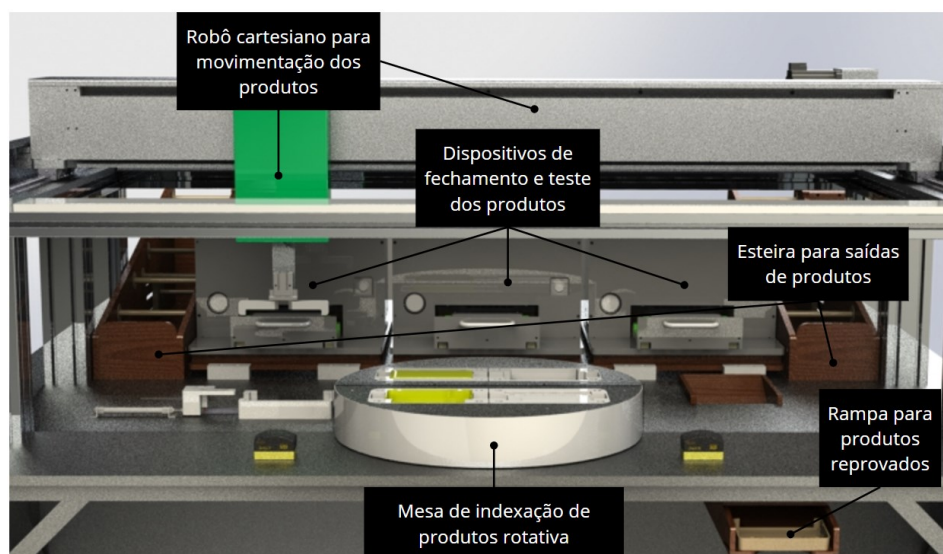
Figura 4 - Conceito da automatização do processo produtivo.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Conforme é possível notar através da Figura 4, a célula de montagem contará com três colaboradores, onde dois irão ficar posicionados na saída do sistema automatizado para embalagem do produto e um terceiro, que será o responsável por fornecer as três peças que constituem o produto para o sistema montar automaticamente. De forma mais explicativa, os componentes gerais que constituem a automação e suas funcionalidades são apresentados na Figura 5.

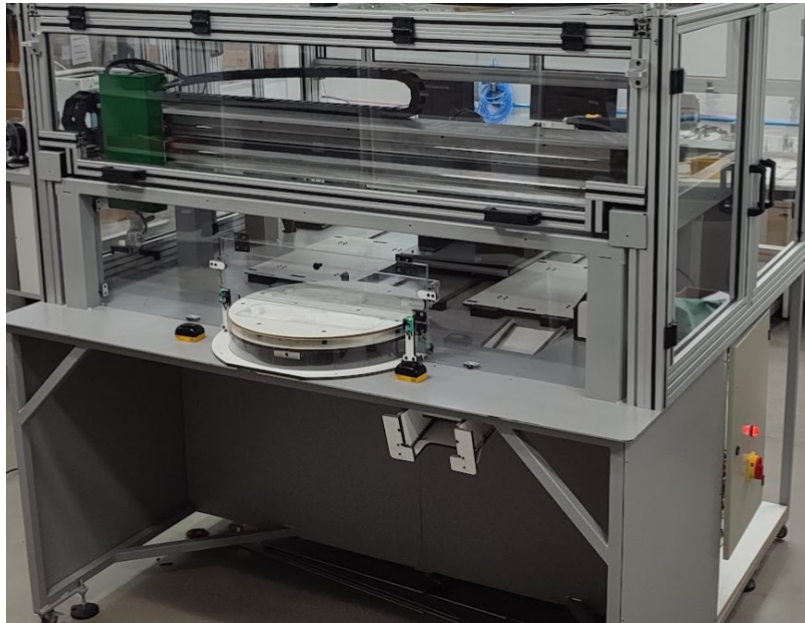
Figura 5 - Detalhamento componentes que constituem a máquina.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Em relação a ganhos, a estimativa é que com o novo conceito de produção, a produtividade da célula seja aumentada em duas vezes. Após a realização do projeto, a máquina foi fabricada e montada fisicamente, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Máquina responsável pela automatização do processo.



Fonte: Acervo do autor (2025).

O projeto e a montagem mecânica da máquina já foram executados, no entanto, para que o projeto seja plenamente concluído no que diz respeito ao *hardware*, ainda é necessário desenvolver e implementar um sistema de controle robusto e funcional. Esse sistema desempenhará um papel crucial, pois será responsável por coordenar e gerenciar todas as operações do dispositivo, garantindo que ele execute as funções previstas de maneira eficiente, segura e dentro dos parâmetros estabelecidos. Sem a presença desse sistema de controle, o dispositivo não poderá ser integrado ao processo de produção ou operar conforme os requisitos do projeto, tornando essa etapa um ponto crítico para a validação do conceito e da solução proposta.

Destaca-se que o presente trabalho é voltado apenas para o desenvolvimento do hardware eletrônico que irá controlar a máquina. O desenvolvimento do software de controle não será abordado no trabalho em questão.

1.3 Objetivo Geral

Desenvolver os elementos eletrônicos de *hardware* que compõem o sistema de controle para a máquina apresentada.

1.4 Objetivos Específicos

Para uma realização eficiente e precisa, o presente trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- a) Compreender detalhadamente os requisitos funcionais da máquina, definindo suas necessidades e limitações operacionais.
- b) Definir todos componentes do projeto e suas interações no quesito de controle.
- c) Mapear e documentar todos os sinais de entrada que podem ser recebidos, juntamente com suas características (como sensores, sistemas de segurança, interação com o operador e dispositivos de teste).
- d) Identificar e especificar todos os acionamentos necessários que o dispositivo deverá realizar durante a rotina de operação, incluindo suas características (como válvulas pneumáticas, sistemas de sinalização, *drivers* dos motores e dispositivos sonoros).
- e) Desenvolver os circuitos destinados ao controle e acionamento dos *drivers* dos motores, acionamentos gerais e recebimento dos sinais de entrada.
- f) Criar o *layout* da placa eletrônica de controle, integrando todos os circuitos definidos de forma otimizada e solicitar sua confecção.

- g) Testar e validar a placa eletrônica de controle de maneira individual e integrada ao sistema.

1.5 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho foi dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo traz a introdução, justificativa, definição do problema e os objetivos gerais e específicos.

O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica, abordando de forma introdutória conceitos importantes sobre sistemas automatizados e sistemas de controle. São explorados os microcontroladores e os principais elementos utilizados para a interface entre microcontrolador e atuador, como transistores, optoacopladores, relés e sensores. Na sequência, detalha-se o funcionamento dos motores de passo e os métodos para seu controle, fornecendo uma base técnica para sua aplicação em sistemas automatizados. Por fim, é apresentado um exemplo prático que integra todos os conceitos discutidos ao longo do capítulo.

Já no terceiro capítulo é apresentada uma visão geral do projeto, que detalha de forma aprofundada o funcionamento da máquina, que irá automatizar o processo e os componentes que a constituem. Em seguida é realizado um levantamento dos requisitos funcionais para automação do processo, que serve como base para mapeamento das entradas e saídas de sinal que o dispositivo irá necessitar.

O quarto capítulo trata do projeto dos circuitos que constituem a placa eletrônica de controle da máquina.

O quinto capítulo é referente ao projeto, confecção e testes da placa de controle.

No capítulo seis é apresentada as conclusões do trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste trabalho tem como objetivo apresentar e explorar conceitos técnicos, dispositivos elétricos e eletrônicos, que serão utilizados no desenvolvimento do sistema de controle da máquina em questão. Inicialmente serão apresentados alguns conceitos referentes a sistemas automatizados e semiautomatizados. Na sequência, serão abordados os microcontroladores, onde em algumas aplicações, são os responsáveis pelo gerenciamento dos sistemas de controle. Em seguida, serão apresentados os componentes eletrônicos que atuam como interface entre o controlador e o atuador. Além disso, será introduzido o conceito de atuadores, com destaque para o motor elétrico DC. Por fim, serão abordados os sensores, que nas configurações de malha fechada são os encarregados de fornecer o *feedback* da saída ao controlador.

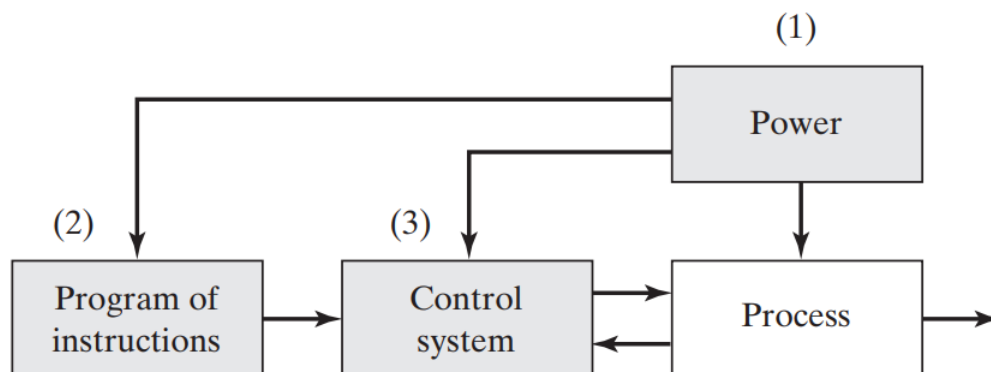
2.1 Sistemas automatizados

Os sistemas de manufatura podem ser classificados em três categorias: sistemas de trabalho manual, sistemas de operador-máquina, e sistemas automatizados, sendo esse último descrito como sendo um processo que é realizado sem a participação direta de um trabalhador humano. Dentro dessa categoria é possível ainda realizar duas divisões de implementação: semiautomática e a totalmente automática. A primeira é caracterizada quando uma parte do ciclo ocorre de forma automatizada e a outra parte é executada por um operador humano. Já uma implementação totalmente automatizada é caracterizada quando o processo é executado por longos períodos de tempo sem a necessidade um operador, sendo possível citar como exemplos, máquinas de moldagem por injeção e processos automatizados de refinarias de petróleo (POLITEKNIK PORT DICKSON, 2013). A máquina do projeto em questão irá operar de forma semiautomática, uma vez que ainda irá ocorrer a interação com operadores humanos.

Um sistema automatizado é composto por três elementos fundamentais: uma fonte de energia para alimentar o processo, um programa que define a rotina de execução e um sistema de controle responsável por implementar a rotina programada

(GROOVER, 2015). A interação entre esses elementos e o processo de fabricação está ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Elementos básicos de um sistema automatizado.



Fonte: GROOVER (2015).

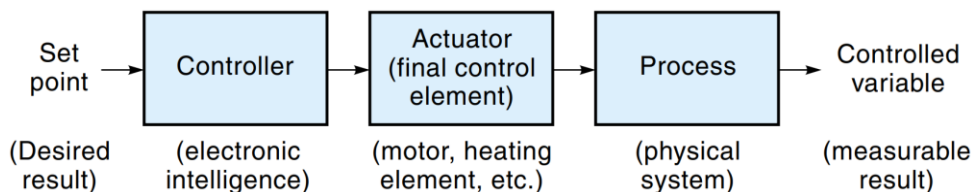
Os programas de instruções podem variar em complexidade, dependendo das exigências do processo. Programas mais simples, como aqueles usados em controles de sequência, utilizam dispositivos de temporização para determinar o momento de alterar as variáveis de saída. Um exemplo comum é a máquina de lavar, que segue uma sequência de ações programadas com base em intervalos de tempo. Por outro lado, programas mais avançados envolvem interação contínua durante o ciclo de trabalho, tomada de decisão com base nas condições do processo e, em alguns casos, capacidades de aprendizado. Porém, independentemente da complexidade, todo programa de instruções é executado por um sistema de controle, que desempenha o papel crucial de garantir que o processo atenda à função para a qual foi projetado (GROOVER, 2015).

2.2 Sistemas de controle

Segundo DiStefano, Stubberud e Williams (2014, p.1) “Um sistema de controle é uma disposição de componentes físicos, conectados ou relacionados de maneira a comandar, dirigir ou regular a si mesmo ou a outros sistemas”. Assim como já mencionado no tópico anterior, o sistema de controle é um importante componente de um sistema automatizado cuja função é executar um programa de instruções em

um processo. Comumente a configuração de um sistema de controle possui um controlador e um atuador, conforme apresenta a Figura 8.

Figura 8 - Diagrama de blocos de um sistema de controle.



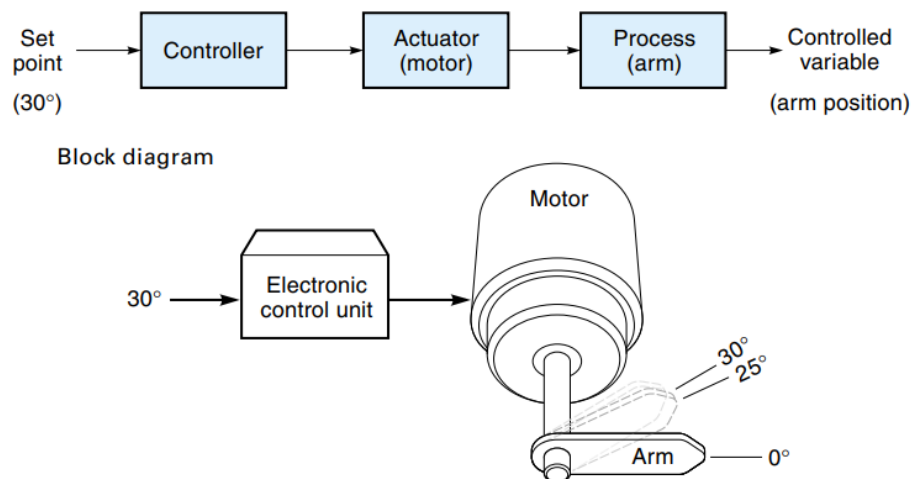
Fonte: KILIAN (2000).

O controlador atua como a "inteligência" do sistema, sendo geralmente um dispositivo eletrônico. Por sua vez, o atuador, na maioria dos casos, é um dispositivo eletromecânico/pneumático responsável por converter o sinal recebido do controlador em uma ação física. A entrada é um sinal que é aplicado com o objetivo de produzir uma saída específica, sendo essa conhecida como um resultado mensurável, que é gerado a partir do bloco chamado processo. Um exemplo prático é o caso de um forno elétrico, onde nesse contexto, o atuador seria o elemento de aquecimento elétrico, o processo corresponderia ao aquecimento do forno, e a variável controlada de saída seria a temperatura interna do forno (KILIAN, 2000).

As duas principais configurações de sistemas de controle são: malha aberta e malha fechada. Sistemas de malha aberta tem a característica que ao receberem um sinal de entrada não pode compensar a saída, ou seja, qualquer alteração que ocorra no sinal de acionamento do controlador ou na saída não poderá ser compensada, o sistema não consegue corrigir essas perturbações, são simplesmente controlados pela entrada (NISE, 2015). Na configuração de malha aberta, o controlador opera sem receber qualquer tipo de feedback sobre o sinal enviado ao atuador. Um exemplo prático é ilustrado na Figura 9, onde em um sistema tem-se um controlador que envia pulsos para um motor que rotaciona um braço mecânico. Em condições normais, o motor gira o braço a uma taxa de $5^\circ/\text{s}$, permitindo que o controlador mova o braço de 0° a 30° com um pulso de energia de 6 segundos. No entanto, com variações de temperatura, ocorre o aumento da viscosidade do lubrificante que reduz a eficiência do movimento, fazendo com que o braço alcance apenas 25° no mesmo intervalo de tempo, resultando em um erro de 5° . Esse erro

não é detectado nem corrigido pelo controlador, pois o sistema carece de feedback para ajustar sua operação (KILIAN, 2000).

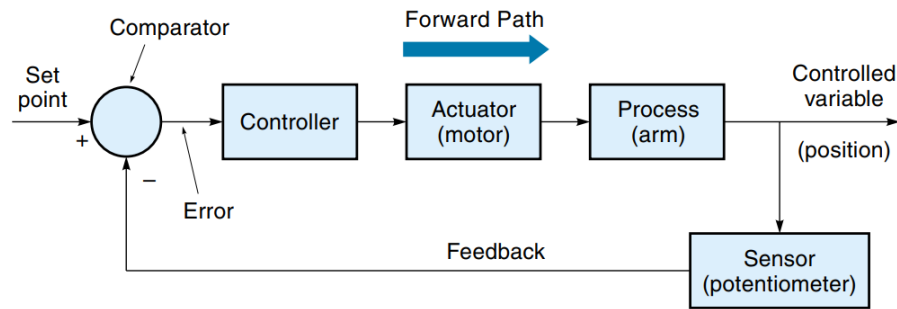
Figura 9 - Diagrama de blocos e representação gráfica de uma configuração em malha aberta.



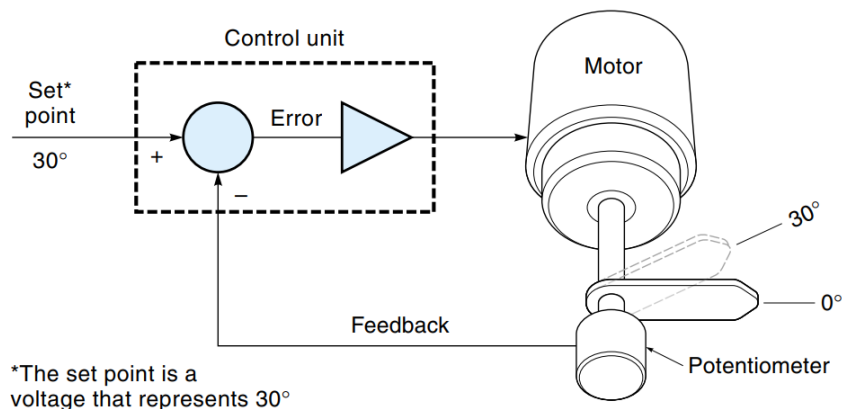
Fonte: KILIAN (2000).

Sistemas de malha fechada resolvem a principal limitação dos sistemas de malha aberta: a ausência de feedback da saída. Com o monitoramento contínuo da saída, é possível obter maior controle e precisão nos resultados. Entretanto, essa capacidade adicional implica em uma maior complexidade na configuração e em custos mais elevados quando comparados aos sistemas de malha aberta (NISE, 2015). Geralmente, na saída está presente um dispositivo eletro/eletrônico que monitora o resultado e converte a medição em sinal elétrico para o controlador. Como o controlador é programado para ter conhecimento do que o sistema está executando, por meio do sinal recebido ele tem a capacidade de executar qualquer ação para manter a saída como se espera (KILIAN, 2000). Conforme é possível observar na Figura 10, tem-se o mesmo exemplo apresentado na Figura 9, porém nota-se que agora foi acrescentado um monitoramento na saída por meio de um potenciômetro que está conectado diretamente no eixo do motor, onde de acordo com a movimentação do eixo do motor a resistência do potenciômetro será alterada.

Figura 10 - Diagrama de blocos e representação gráfica configuração malha fechada.



Block diagram



Fonte: KILIAN (2000).

Atuando como feedback, a resistência do potenciômetro é convertida em sinal elétrico que é enviado para o controlador. Para ajustar o braço em um ângulo de 30°, envia-se uma tensão de referência ao controlador que correspondente a esse valor em graus. Com o braço inicialmente em repouso na posição de 0°, o sinal de erro registra imediatamente uma diferença de 30°. Em resposta, o controlador passa a acionar o motor de forma a reduzir essa diferença até a posição desejada, 30°. Conforme o braço se aproxima do ângulo esperado, o controlador diminui gradualmente a velocidade do motor e, ao alcançar a posição desejada, o motor é desligado. Se em algum momento posterior, uma força externa mover o braço de sua posição de 30°, um novo sinal de erro será gerado, fazendo com que o motor atue para compensar a diferença (KILIAN, 2000).

O controle de movimento digital é amplamente empregado em diversos segmentos industriais, como na fabricação de embalagens, no setor têxtil, em linhas de montagem e na robótica, através da utilização de sistemas digitais como:

microcontroladores, CLPs (Controlador Lógico Programável) ou computadores. Esse tipo de controle difere do controle discreto, que é normalmente utilizado em cilindros pneumáticos e esteiras transportadoras, entre outras aplicações, pois recorre a métodos analógicos (LAMB, 2015).

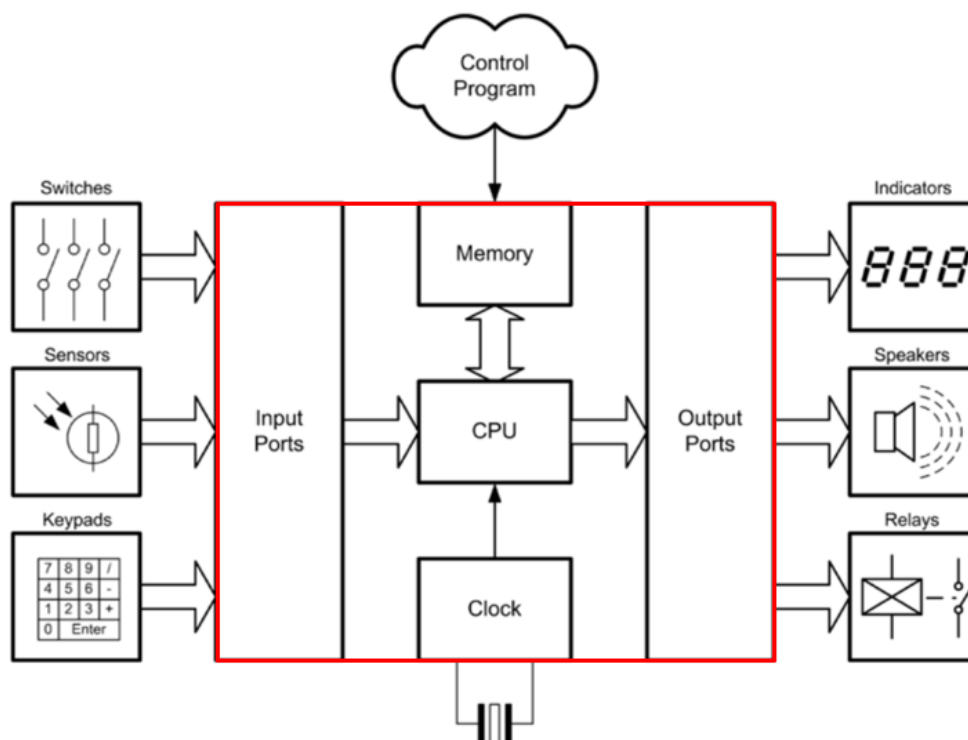
Com base nas aplicações práticas apresentadas, fica evidente a diferença entre sistema de controle de malha aberta e fechada, onde no caso do segundo, o feedback auxilia na precisão da operação e redução de erros. O projeto em questão possui aplicações para controle de motores por meio de sistemas de malha fechada, onde cada motor irá contar com *feedback* via *encoder* e demais sensores de referência.

2.2.1 Unidade Controladora – Microcontrolador

O microprocessador é um dos responsáveis pela evolução das tecnologias atuais, sendo ele uma CPU (*Central Processing Unit*) que está conectada a outros blocos do sistema. É denominado como microcomputador os computadores que usam um microprocessador como CPU, sendo esses responsáveis por executar diversas tarefas conforme o *software* que os tiverem controlando. Similarmente, tem-se os computadores dedicados, que executam tarefas como a de operar um motor ou controlar o sistema de ABS (*Antilock Braking System*) de um automóvel (TOCCI; WIDMER; MOSS, 2011).

Para entrar em operação, um microcontrolador conta com um programa que roda uma lista de instruções que devem ser executadas. Trabalhando em conjunto, assim como na Figura 11, o microcontrolador conta com um conjunto de recursos periféricos para realizar as operações.

Figura 11 – Microcontrolador (em vermelho), recursos periféricos e hardwares que comumente trabalham em conjunto.



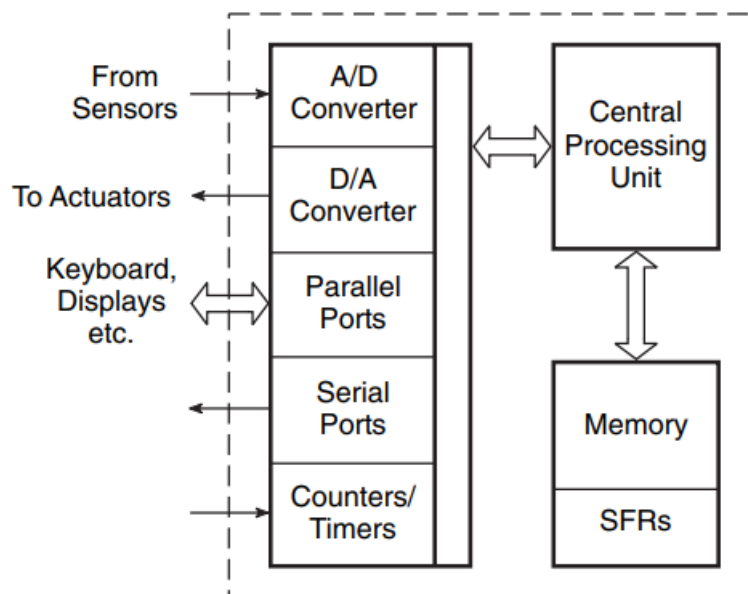
Fonte: TOOLEY (2006).

Para medição e realimentação de sinais externos, tem-se os sensores que enviam sinais no formato digital ou analógico onde o programa de controle trabalha continuamente monitorando as entradas dos sensores antes de alterar os sinais de saída que são passados aos dispositivos controlados. Em termos simples, um microcontrolador precisa gerar estados específicos em suas portas de saída de acordo com a combinação de estados presentes em suas portas de entrada (sistema de malha fechada). Para isso, conta com uma CPU capaz de realizar operações aritméticas, lógicas e de temporização. As entradas podem vir de fontes como interruptores, sensores (com níveis lógicos compatíveis) ou teclados, enquanto as saídas podem controlar dispositivos diversos, incluindo LEDs (*light emitting diode*), *displays*, motores e relés, frequentemente por meio de um *buffer/driver* ou interface apropriada (TOOLEY, 2006).

Como mencionado anteriormente, um microcontrolador é um *chip* integrado com memória, portas de *input* e *output*, CPU e mais alguns dispositivos periféricos

com a finalidade de formar uma unidade funcional. Com o intuito de especificar ainda melhor os componentes, a Figura 12 apresenta um detalhamento dos componentes que constituem um determinado modelo de microcontrolador.

Figura 12 - Visão interna de um modelo de microcontrolador.



Fonte: MAINI (2007).

Além da unidade central de processamento que já foi mencionada, tem-se na composição deste microcontrolador uma memória de acesso aleatório RAM (*Random Access Memory*), uma memória exclusiva para leitura ROM (*Read-Only Memory*), registradores de funções especiais, portas seriais e paralelas, temporizadores e contadores, conversores analógicos-digital (A/D) e conversores digital-analógico(D/A) (MAINI, 2007). Nos tópicos a seguir, tem-se um breve detalhamento de alguns itens da Figura 12.

2.2.1.1 Memória.

O microprocessador possui dois tipos principais de memória: memória de programa e memória de dados. A memória de programa é conhecida como não volátil, pois mantém seus dados mesmo após o desligamento da energia. Em contraste, a

memória de dados é volátil, perdendo todo o conteúdo armazenado quando a energia é desligada (TEXAS INSTRUMENTS, S.A).

2.2.1.2 *Counters/timers.*

Os *counters/timers* desempenham papéis fundamentais no funcionamento de um microcontrolador, sendo utilizados para monitorar intervalos de tempo entre eventos, controlar o tempo de operação de sistemas e gerar taxas de transmissão (*baud rates*), essenciais para a comunicação serial. Além disso, são empregados na contagem de eventos específicos. (MAINI, 2007).

2.2.1.3 *Interfaces de entrada e saída (I/O).*

A interface de entrada e saída também chamadas de (I/O) tem o objetivo de conectar dispositivos periféricos com microcontroladores. Geralmente as entradas e saídas são interligadas com processadores embarcados usando um espaço de memória chamado de espaço de endereço de (I/O) (entrada/ saída). Dispositivos de (I/O) podem ser interligados através de portas paralelas e seriais, que são comuns em microcontroladores típicos (TEXAS INSTRUMENTS, S.A).

2.2.2 Interfaces com controlador

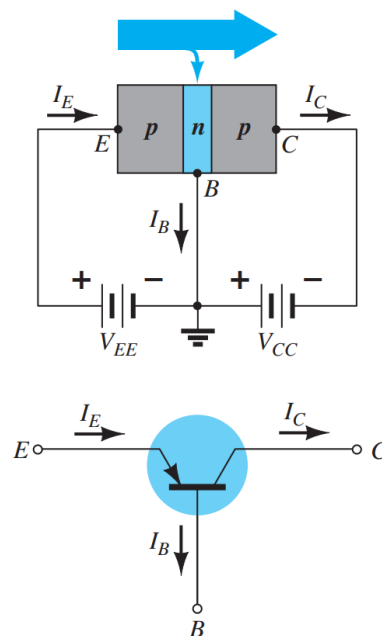
Como visto no tópico 2.2, para que o sistema automatizado tenha sucesso na sua operação, resumidamente, o controlador conta com atuadores para execução de uma ação para qual foi programado e com um *feedback*, que é geralmente fornecido por sensores para ajuste da saída conforme o sinal recebido na entrada, no caso de um sistema de malha fechada. Nos próximos subtópicos serão abordados alguns componentes que geralmente são empregados para a realização da interface com microcontrolador.

2.2.2.1 Transistores tipo TBJ e FET.

Um transistor bipolar de junção é um dispositivo fabricado com materiais semicondutores, utilizado para controlar a passagem de corrente elétrica entre dois de seus três terminais, sendo esses denominados: emissor, base e receptor. Em operação, a corrente de um transistor pode ser modulada por uma tensão ou corrente aplicada. Transistores são componentes que desempenham um papel fundamental em circuitos eletrônicos, tanto para amplificar sinais quanto para atuar como uma chave eletrônica. (FLOYD; BUCHLA, 2014).

Uma configuração convencionalmente usada para transistores bipolares de junção é a chamada base-comum, porque a base é compartilhada tanto no circuito de entrada quanto no de saída. Adicionalmente, a base costuma ser o terminal cujo potencial está mais próximo ou diretamente conectado ao potencial de terra. A configuração apresentada na Figura 13 é NPN, para uma configuração PNP a diferença será apenas o sentido da corrente (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

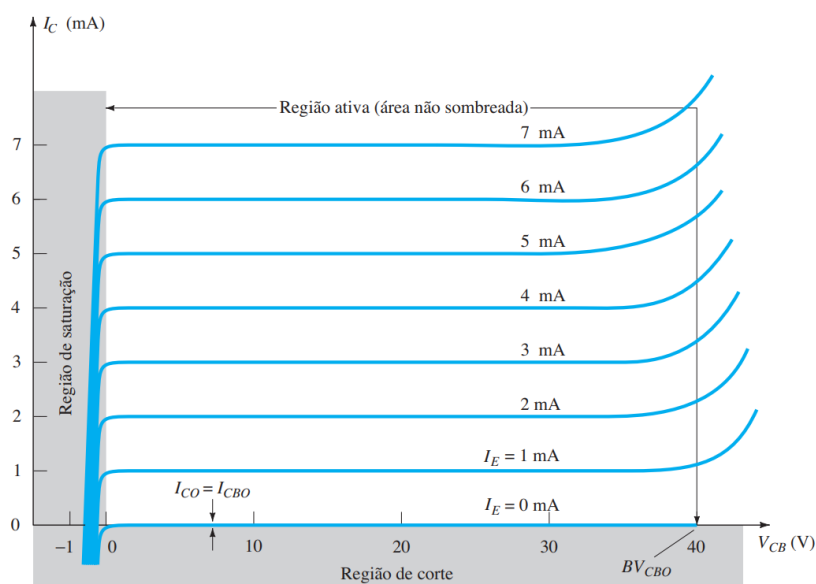
Figura 13 - Notação e símbolo para configuração base-comum transistor PNP.



Fonte: BOYLESTAD; NASHELSKY, (2013).

Um transistor bipolar de junção pode operar em três regiões: ativa, corte e saturação, conforme indica a Figura 14. A região ativa é a região de operação mais utilizada em amplificadores lineares. Nessa região a junção base-emissor são polarizadas diretamente, já a junção base-coletor é polarizada inversamente. Na região de corte, ambas as junções são polarizadas reversamente, impedindo a condução de corrente significativa e fazendo o transistor agir como um interruptor aberto. Por fim, na região de saturação, as duas junções ficam polarizadas diretamente, permitindo a máxima condução de corrente e caracterizando o comportamento de um interruptor fechado (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Figura 14 - Regiões de operação de um TBJ com configuração base-comum.



Fonte: BOYLESTAD; NASHELSKY, (2013).

Outro modelo comum de transistor é o chamado transistor de efeito de campo (FET) que se difere do TBJ (transistor bipolar de junção), pois é um dispositivo controlado por tensão e não por corrente. Existem dois tipos principais de FETs: o transistor de efeito de campo de junção (JFET) e o transistor de efeito de campo de óxido metálico semiconductor (MOSFET) (CRUZ; CHOUERI, 2013).

O projeto em questão utilizará transistores do modelo TBJ e FETs do tipo MOSFET. As aplicações para ambos os modelos vão ser com os dispositivos

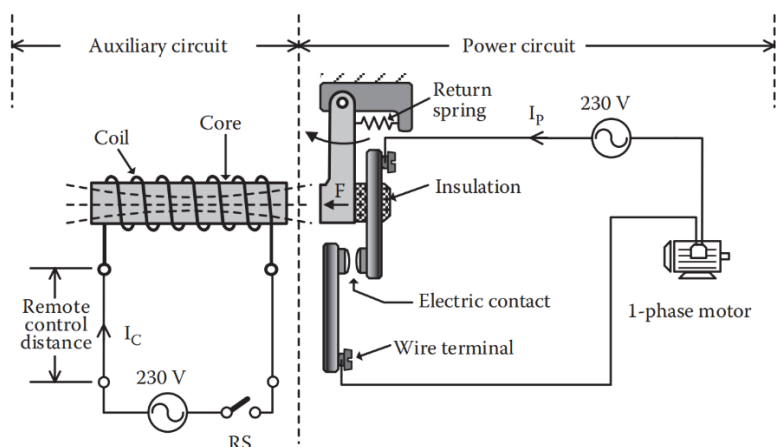
operando como interruptor, uma vez que para a execução da rotina de funcionamento da máquina é necessário a realização de chaveamento de sinais.

2.2.2.2 Relés eletromecânicos.

Considerado também como um atuador, o relé é um dispositivo amplamente utilizado na indústria em virtude de sua elevada versatilidade e de sua capacidade de comutar circuitos por meio de sinais elétricos. Atualmente, existem diversas variedades de relés, que podem operar de forma eletrônica ou eletromecânica, além de apresentarem contatos secos ou molhados em mercúrio. Independentemente do tipo, todos cumprem a mesma finalidade: controlar ou comutar uma carga ou sinal a partir de outro sinal de tensão (LAMB, 2015).

Na Figura 15, tem-se uma divisão de dois circuitos independentes dos componentes de um relé eletromecânico: o de potência e o auxiliar. É possível notar que no circuito auxiliar, uma bobina é energizada para criar um campo magnético e atrair a armadura, vencendo a força de uma mola de retorno. Esse movimento fecha (ou abre) os contatos do circuito de potência. Outro detalhe possível de se observar que é que o dispositivo é usado para ligar um motor monofásico.

Figura 15 - Circuito com um relé eletromecânico dedicado para o acionamento de um motor monofásico.



Fonte: MANESIS; NIKOLAKOPOULOS, (2018).

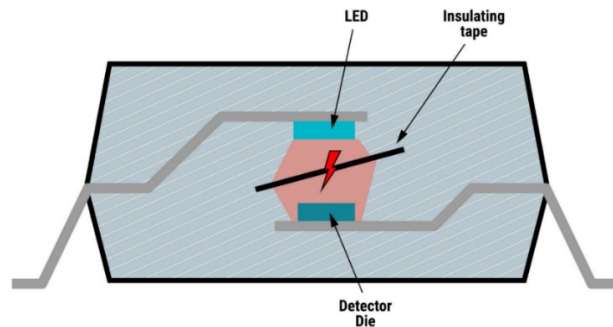
A corrente no circuito de potência pode atingir valores elevados em aplicações industriais, enquanto o circuito auxiliar geralmente trabalha com correntes bem menores. Ao desenergizar a bobina, o campo magnético se desfaz, a mola devolve a armadura à posição inicial e o circuito de potência se abre, interrompendo o fornecimento à carga. Existem relés não polarizados, que não contam com um ímã permanente, e relés polarizados, que utilizam um ímã permanente e requerem polaridade definida para a bobina. As tensões nominais da bobina seguem padrões de mercado, podendo variar, por exemplo, de 12 V a 230 V em corrente contínua ou de 24 V a 380 V em corrente alternada. O consumo de energia do relé é maior no instante em que a bobina é energizada, e o tempo de comutação costuma ficar entre *10 ms* e *50 ms* (MANESIS; NIKOLAKOPOULOS, 2018).

Para o presente projeto, a utilização de relés será voltada para o seccionamento de alimentação, de forma similar ao exemplo da Figura 15.

2.2.2.3 *Optoacopladores.*

O isolamento de circuitos elétricos se faz necessário para muitas aplicações, como prevenção contra ruídos, segurança elétrica, proteção de circuitos sensíveis em condições de falha, entre outras diversas aplicações. Como indica a Figura 16, internamente um optoacoplador possui um componente emissor de luz, tipicamente sendo um diodo emissor de luz (LED). O componente que complementa o funcionamento é geralmente um fotodiodo ou fototransistor, que apresenta um comportamento de sensibilidade à luz. Os componentes ficam separados por meio de um material isolador. Quando o LED é ligado, o fototransistor entra em operação e então conduz sinal para a saída. (TEXAS INSTRUMENTS, 2023).

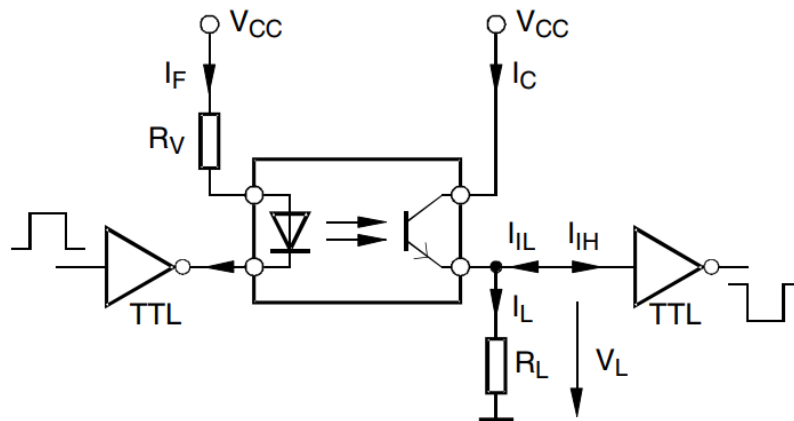
Figura 16 - Configuração interna de um optoacoplador.



Fonte: TEXAS INSTRUMENTS, (2023).

Na Figura 17, é apresentada uma aplicação prática de um optoacoplador. É possível observar que no catodo do LED é aplicado um sinal TTL (*Transistor-Transistor Logic*), e na saída, emissor do fototransistor, tem-se o próximo estágio TTL conectado em paralelo com um resistor R_L . Tem-se ainda uma tensão identificada como V_{CC} em um resistor R_V que se encontra em série com LED e no coletor do fototransistor.

Figura 17 - Exemplo prático de utilização de um optoacoplador.



Fonte: VISHAY SEMICONDUCTORS, (2011).

Conforme é possível observar, e com base no funcionamento básico de transistores, quando sinal TTL de entrada está em nível alto, o optoacoplador entra em condução, fazendo com que a tensão no ponto entre o fototransistor e R_L fique baixa. Dessa forma, a entrada seguinte TTL efetua a leitura de um sinal de nível baixo.

Quando o LED está apagado, o fototransistor não conduz. O coletor (ligado a VCC) e a entrada TTL acabam ficando com nível alto, pois não há corrente.

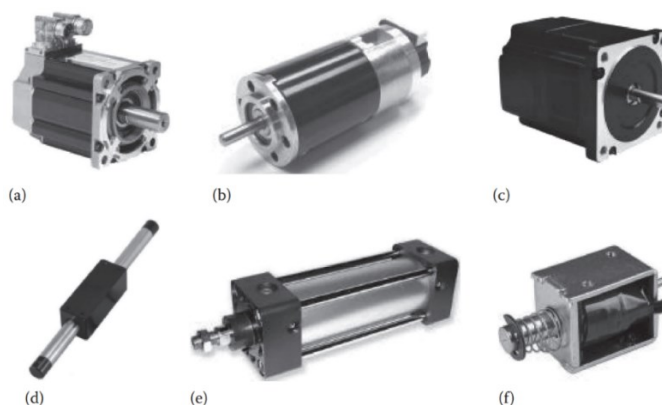
Dessa forma, é possível concluir que mesmo apresentando um funcionamento relativamente simples, o optoacoplador se apresenta como uma alternativa para trabalhar com entradas de sinais que podem apresentar valores iguais/diferentes de tensão.

2.2.3 Atuadores

Um atuador é definido como um transdutor por sua capacidade de converter um sinal, como uma corrente elétrica, em uma ação mecânica, como no ajuste de velocidade de rotação de um motor. Na maioria das vezes, o sinal de controle possui nível baixo; por isso, em determinadas situações, faz-se necessário o uso de um amplificador para que o atuador execute a operação desejada (GROOVER, 2015).

Existem diversos tipos de atuadores, geralmente classificados de acordo com seu princípio de operação, como: pneumáticos, elétricos, hidráulicos, térmicos e microeletromecânicos. Em geral, eles se destinam a produzir movimentos mecânicos, algo essencial em qualquer processo físico de uma linha de produção. Sem os atuadores, todos os sistemas automatizados perderiam a capacidade de operar de forma satisfatória (MANESIS; NIKOLAKOPOULOS, 2018). Na Figura 18 é apresentado diferentes tipos de atuadores que podem ser destinados para diversas aplicações.

Figura 18 - Atuadores industriais: (a) servo motor, (b) motor de corrente contínua, (c) motor de passo, (d) motor linear, (e) cilindro pneumático, (f) atuador solenóide



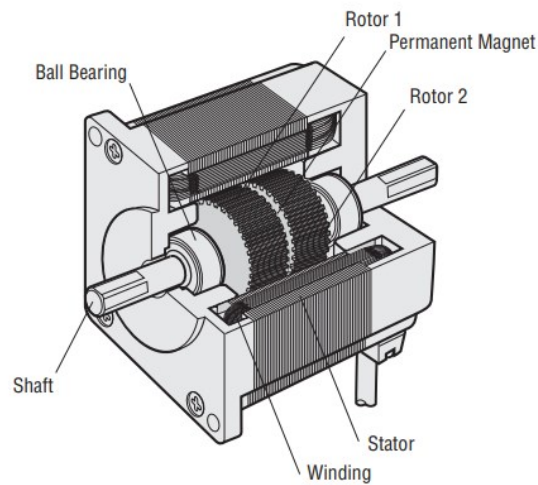
Fonte: MANESIS; NIKOLAKOPOULOS, (2018).

Da Figura 18, os elementos utilizados no projeto serão os cilindros pneumáticos e os motores de passo, sendo esse último o foco da próxima seção, que irá abordar os motores de passo e os easy servos motores, sendo esses dois modelos utilizados em partes específicas da máquina que irá automatizar o processo de fabricação.

2.2.3.1 Motor de passo e easy servo motor.

Na indústria de automação, os motores de corrente alternada (CA) são mais utilizados do que os de corrente contínua (CC), pois oferecem maior eficiência e exigem menos manutenção, apresentando-se como uma solução simples para aplicações em máquinas em geral. Entre os modelos de motor que se assemelham aos de corrente contínua, no que diz respeito ao modo de operação, destacam-se os motores de passo, capazes de girar em passos discretos e muito pequenos. Em geral, esses motores fornecem controle preciso de velocidade, posição e direção em malha aberta, dispensando codificadores ou outros tipos de sensores comumente necessários em motores elétricos convencionais (MANESIS; NIKOLAKOPOULOS, 2018). Na Figura 19, tem-se um motor de passo e seus componentes externos e internos.

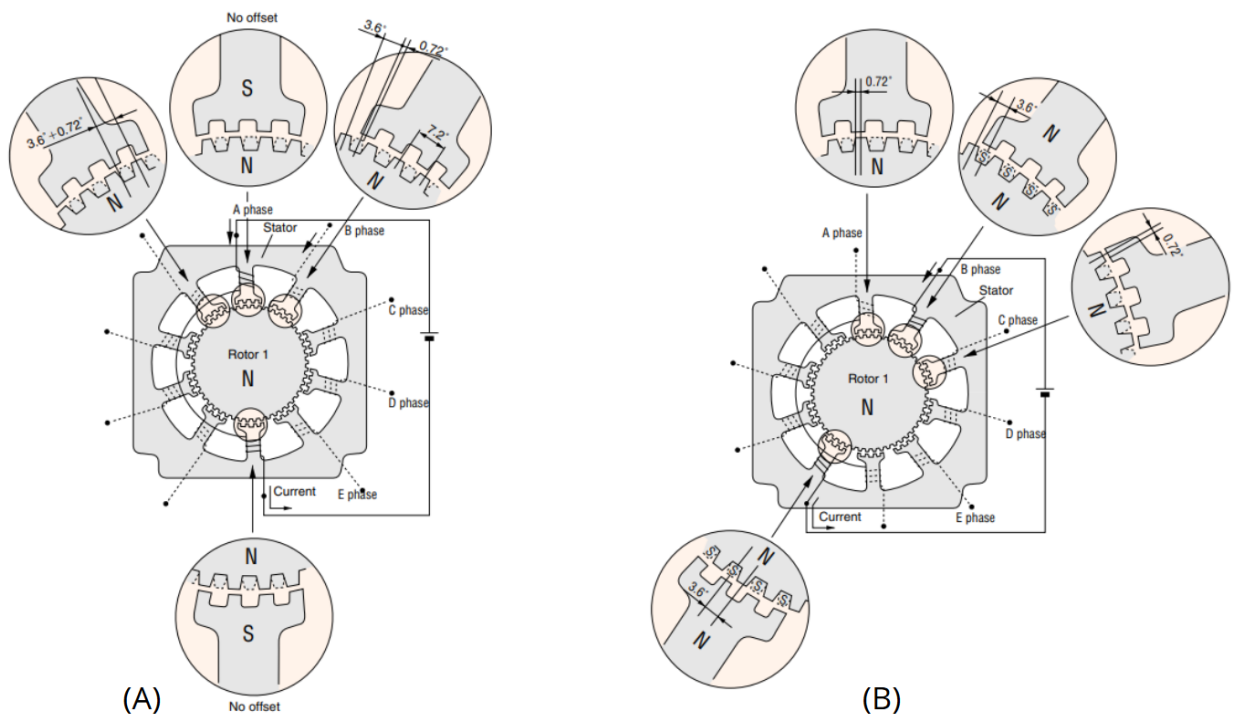
Figura 19 - Motor de passo com corte lateral para exibir os componentes internos.



Fonte: ORIENTAL MOTOR GENERAL (2019).

Na Figura 20, tem-se uma vista interna de um motor de passo. É possível notar a presença de cinco fases identificadas (A, B, C, D, E), assim como o rotor (identificado com polos “N” e “S”), o estator e os dentes que se alinham de maneira ligeiramente defasada.

Figura 20 - Estrutura interna de um motor de passo com cinco fases.



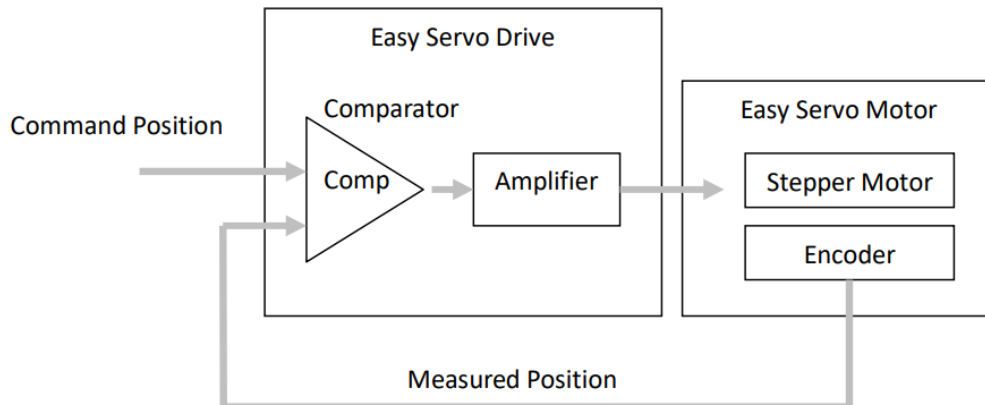
Fonte: (Oriental motor general, 2019)

Quando cada bobina é energizada, ela cria polos magnéticos norte (N) e sul (S) em seus respectivos dentes. O rotor também possui dentes, assim como o estator, e ambos se alinham por meio desses polos magnéticos. Intencionalmente, há um pequeno deslocamento de $0,72^\circ$ entre os dentes do rotor e do estator. Na Figura 20 em (A), quando a fase A é energizada, os polos magnéticos surgem nos dentes correspondentes do estator. O rotor, então, tende a se alinhar com esses polos, de modo que seus dentes sejam atraídos pelos polos de polaridade oposta e repelidos pelos de mesma polaridade. Esse alinhamento faz o motor parar em uma posição bem definida. Enquanto isso, os dentes das fases que não estão energizadas permanecem “desalinhados” em relação aos polos ativos, ajudando a manter o rotor travado na posição atual enquanto não ocorre a comutação para outra fase. Para continuar o movimento, como apresenta a Figura 20 em (B), basta desenergizar a fase A e energizar a fase B, resultando em um passo de $0,72^\circ$ (ORIENTAL MOTOR GENERAL, 2019).

Assim como mencionado, motor de passo trabalha em malha aberta, o controle é exercido sem levar em conta a resposta ou o resultado real do sistema. Isso significa que o motor opera com base em instruções pré-definidas, sem mecanismos de feedback para ajustar seu desempenho em tempo real. No presente projeto, será utilizado um motor de passo para a operação de uma esteira tracionada que tem a finalidade de transportar os produtos aprovados até a saída da máquina. Para acionamento do motor, será utilizado um *driver* controlado por uma placa eletrônica a parte. No caso em questão, o motor empregado possui *encoder* e é conectado no *driver*.

Um modelo alternativo, aos motores de passo são os motores de passo de malha fechada, conhecidos como (*closed-loop stepper*) ou (*easy servo motor*). Na Figura 21, tem-se o diagrama de blocos das conexões entre um motor de malha fechada com driver de controle.

Figura 21 - Diagrama de blocos das conexões entre um *easy servo motor* com um driver.



Fonte: LEADSHINE (s.d.).

Combinando as características de operação de um motor de passo e de um servo motor, os motores de malha fechada utilizam *feedback* de *encoder* e controle de corrente orientado por campo para regular torque e posição com maior precisão. Com isso, o motor reduz vibrações, aumenta eficiência energética e diminui o risco de perdas de passo. Comparados a servomotores, os motores de passo em malha fechada mantêm alto torque em baixa rotação e têm custo competitivo (NANOTEC, 2016). Esse modelo será o escolhido para as partes da máquina do projeto em questão que requerem movimentação, devido aos benefícios mencionados.

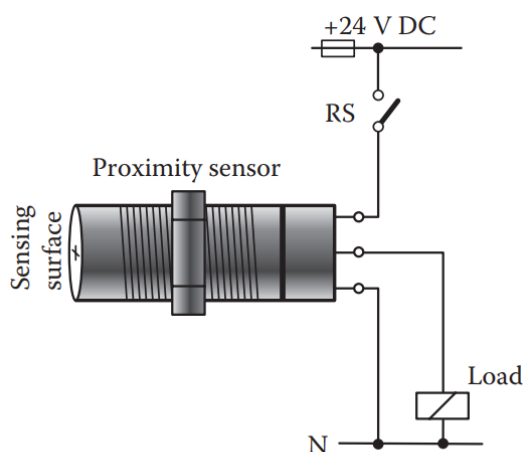
2.2.4 Sensores Eletrônicos

Um sensor é um dispositivo capaz de emitir sinais para detectar ou medir grandezas físicas, como posição, força, torque, pressão, velocidade, entre outras grandezas. Devido à sua funcionalidade, os sensores se tornaram elementos essenciais em sistemas de fabricação, permitindo a interação do mundo físico com equipamentos eletrônicos e sistemas automatizados (GUPTA; ARORA; WESTCOTT, 2013).

Geralmente um sensor opera enviando o *feedback* por meio de um sinal liga/desliga. Os modelos mais comuns possuem três fios, sendo dois de alimentação e outro de sinal, com configurações de sinais de saída com valores de 24 Vcc, 120

vca, ou contato fechado. Sensores CC contam dois métodos de chaveamento: PNP, que envia sinal positivo, e NPN que envia sinal negativo (LAMB, 2015). Na Figura 22, tem-se um exemplo onde um sensor de proximidade, que conforme é possível observar por meio das conexões, opera executando um chaveamento positivo na carga (PNP).

Figura 22 - Exemplo de ligação entre um sensor de proximidade com chaveamento PNP em uma carga.



Fonte: MANESIS; NIKOLAKOPOULOS, (2018).

Essenciais para a automação, os sensores de proximidade e os sensores fotoelétricos destacam-se por possibilitar a detecção de objetos sem contato físico. Os sensores de proximidade podem ser indutivos, capacitivos ou magnéticos, operando por variações na indutância, capacitância ou fluxo magnético, o que os torna amplamente utilizados na identificação de materiais metálicos ou não. Já os sensores fotoelétricos, também conhecidos como fotocélulas, detectam objetos a longas distâncias por meio de um feixe de luz (visível ou infravermelho) (MANESIS; NIKOLAKOPOULOS, 2018).

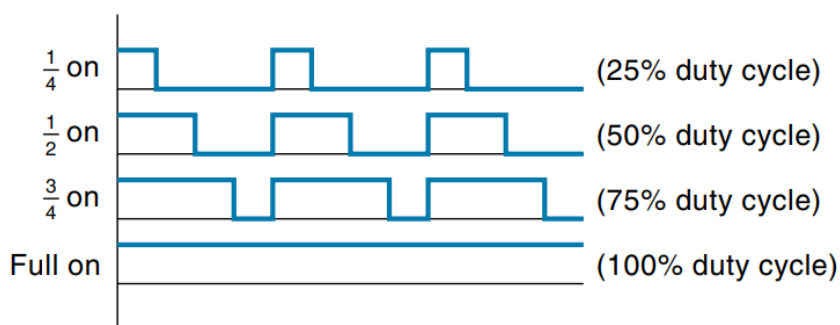
A aplicação dos sensores na automatização do processo será diversificada devido as necessidades requeridas. Serão usados sensores do tipo de indução, feixe e proximidade.

2.2.5 Aplicação de Controle em motores DC

Convencionalmente, não é possível acionar um motor DC diretamente pelo controlador, pois ele não fornece potência suficiente. Assim, as duas abordagens mais comuns são: utilizar um *drive* analógico, no qual um amplificador de potência linear amplia o sinal de acionamento do controlador, ou empregar a modulação por largura de pulso (PWM) (KILIAN, 2000).

Um sinal PWM pode ser definido como um sinal cíclico que permanece “ligado” por um período determinado, o qual é proporcional à tensão emitida. Esse período é denominado ciclo de trabalho (*duty cycle*). O PWM surge como uma alternativa para que dispositivos digitais gerem níveis variados de tensão, uma vez que, em vez de alterar diretamente a tensão, ele produz uma sequência de pulsos temporizados (PREDKO, 2005). O PWM realiza o ajuste da velocidade conforme o ciclo de trabalho. Conforme indica a Figura 23, para velocidades mais lentas a energia é fornecida em um quarto do tempo de ciclo. Para um ciclo de 50%, o motor irá girar metade da velocidade. No entanto, sempre devem ser levadas em considerações as não idealidades e perdas que fazem com que a proporção não seja direta, porém o conceito se mantém (KILIAN, 2000).

Figura 23 - Sinal PWM para valores de ciclo de trabalho.

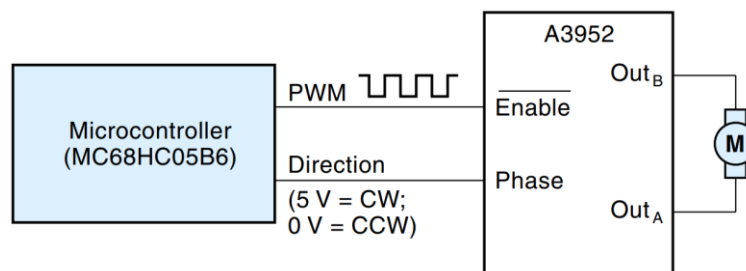


Fonte: KILIAN (2000).

Controlar motores via PWM oferece vantagens em relação à utilização de *drivers* analógicos. A principal delas é que o sinal PWM é intrinsecamente digital e pode ser gerado por um microcontrolador; em seguida, esse sinal passa por um *driver* amplificador antes de ser fornecido ao motor (KILIAN, 2000). A Figura 24 apresenta

um exemplo prático, onde o microcontrolador MC68HC05B6 é usado para fornecer o acionamento PWM para um motor CC. O sinal é amplificado pelo drive A3952, para fornecer a corrente necessária ao motor.

Figura 24 - Exemplo prático do microcontrolador MC68HC05B6 controlando um motor CC por meio do driver A3952.



Fonte: KILIAN (2000).

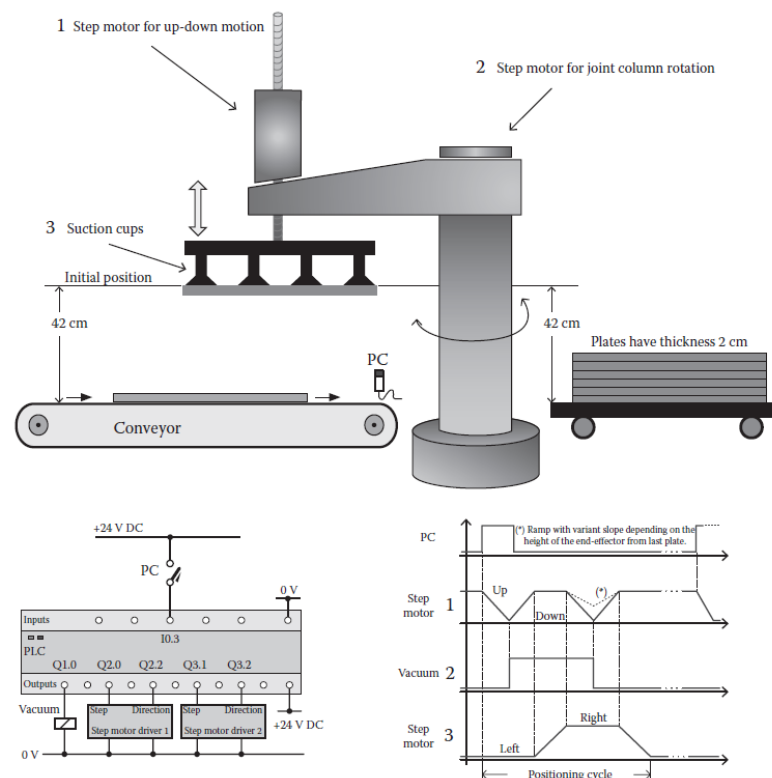
Assim como apresentando na Figura 24, o projeto em questão utilizará o microcontrolador com um circuito eletrônico intermediário para o acionamento dos motores através de um *driver*. Enviando um sinal PWM programado via *software* no microcontrolador, o sinal de pulso de direção será aplicado no *driver* conectado no motor.

2.3 Exemplo de aplicação de um sistema de controle

Até o momento, foi apresentado os principais componentes que constituem um sistema de controle, como o do diagrama de blocos da Figura 10. Conforme percebeu-se, cada componente possui sua contribuição para que o sistema funcione da forma com que for programado.

Com a finalidade de reunir todos os conceitos já apresentados em uma aplicação prática, observa-se o exemplo na Figura 25.

Figura 25 - Exemplo prático de um sistema de controle em malha aberta para empilhamento de objetos.



Fonte: MANESIS; NIKOLAKOPOULOS, (2018).

Utilizando um PLC (*Programmable Logic Controller*) como controlador, há um robô do tipo *scara*, que recebe objetos por meio de uma esteira proveniente de outro processo e os empilha em um palete. Conforme ilustram as curvas da figura, quando o sensor PC detecta uma peça, o robô — equipado com dois motores de passo (um para rotação da coluna e outro para movimento vertical) — coleta o objeto por meio de ventosas e o deposita no palete, formando assim uma pilha (MANESIS; NIKOLAKOPOULOS, 2018).

É possível observar que o sistema apresentado opera em malha aberta ao coletar os objetos por vácuo, uma vez que não há confirmação de que a peça foi efetivamente capturada. Da mesma forma, a movimentação do robô também ocorre em malha aberta, pois os motores de passo não possuem um mecanismo de *feedback* para garantir que o deslocamento foi concluído corretamente, sem interferências causadas por falhas mecânicas ou obstáculos.

Similar a solução apresentada na Figura 25, o projeto de automatização do presente trabalho também utiliza um sistema robotizado para movimentação de peças e sensores para detecções de movimentos e interações. No entanto, o sistema será do tipo de malha fechada. Todos os motores possuirão *encoders* conectados aos *drivers*. Os demais componentes que constituem a máquina serão sensorizados e estarão conectados a placa de controle principal que irá monitorar alterações de estado e garantir que o ciclo de operação da máquina está sendo executado conforme foi programado.

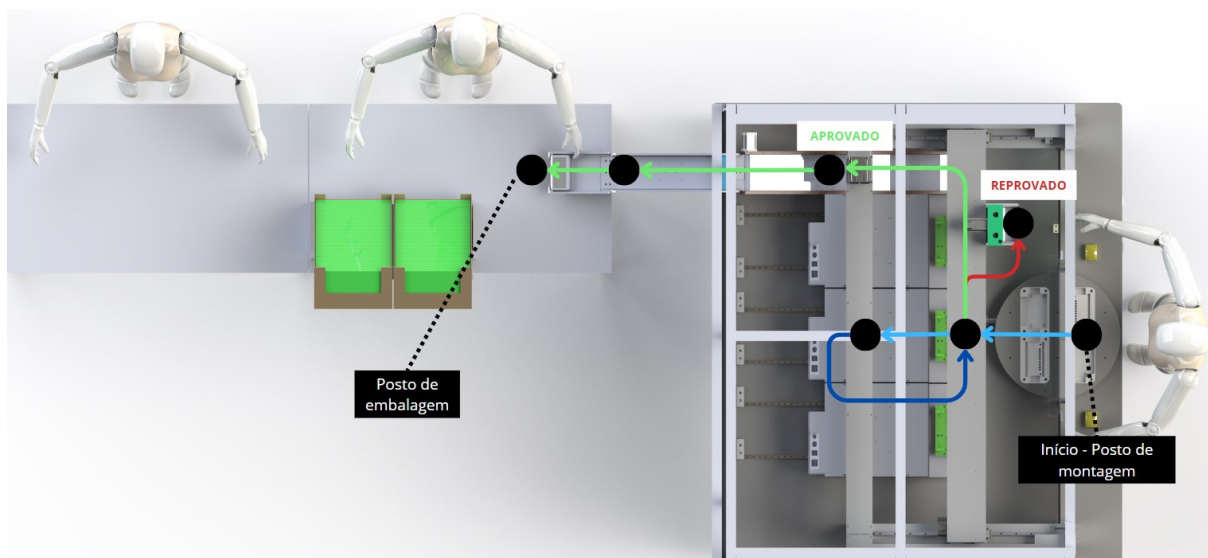
3. VISÃO GERAL DO PROJETO

Conforme ilustrado no fluxograma da Figura 3, a máquina foi projetada para montar produtos com máxima eficiência, aumentando o desempenho produtivo e reduzindo as chances de erros no processo de montagem. Sua estrutura é composta pelos componentes apresentados na Figura 5, onde cada um desempenha uma função específica. Este capítulo, tem como objetivo detalhar cada um desses componentes, explicando seus requisitos funcionais dentro do sistema. Em seguida, serão identificados e analisados os requisitos operacionais do dispositivo com base no processo de produção. Posteriormente, será elaborado um diagrama de conexões, representando os subsistemas da máquina e suas interações. A partir de então, o projeto estará suficientemente detalhado para que seja realizada a especificação do número de entradas e saídas da máquina. Dessa forma, vai ser possível iniciar o desenvolvimento da placa eletrônica responsável pelos acionamentos e controle da máquina no capítulo 4.

3.1 Detalhamento da máquina

Para detalhar a máquina com precisão, é fundamental mapear o percurso do produto ao longo do processo de montagem e compreender as interações entre os dispositivos envolvidos. A fim de ilustrar o percurso, a Figura 26 apresenta o trajeto do produto desde o abastecimento na mesa indexadora, através do montador, até as etapas de montagem, teste e embalagem.

Figura 26 - Percurso executado pelo produto durante o processo de montagem, teste e embalagem.

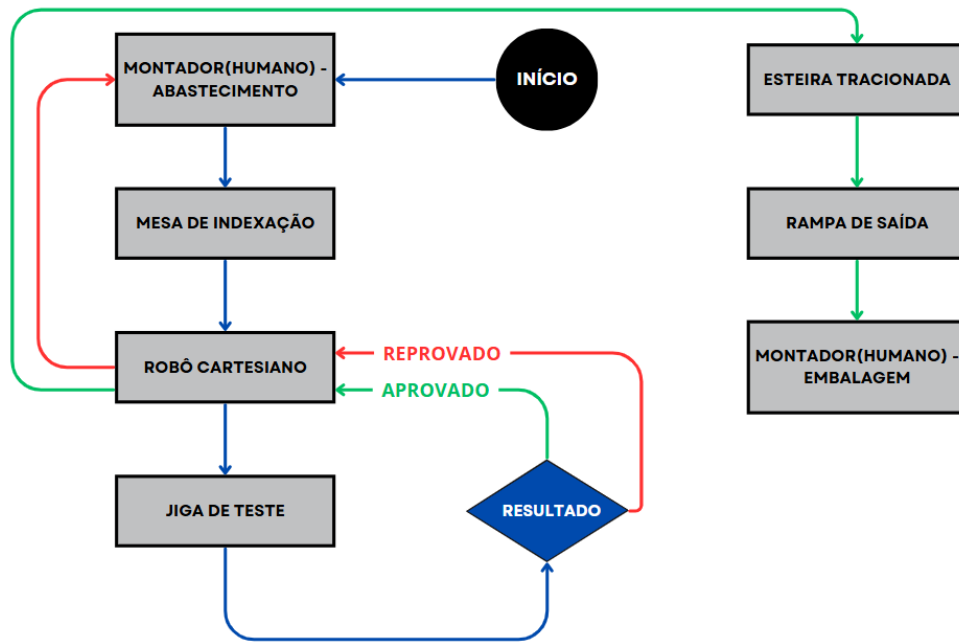


Fonte: Acervo do autor (2025).

Percebe-se através da Figura 26 que a separação entre peças aprovadas e reprovadas aparenta ser eficaz, uma vez que o posto de embalagem só recebe produtos aprovados, os reprovados o robô cartesiano leva até a rampa de descarte.

Com o objetivo de detalhar a relação entre os dispositivos que constituem a máquina, a Figura 27 demonstra um fluxo simplificado do processo apresentado na Figura 3, porém nomeando os dispositivos envolvidos com a finalidade de evidenciar as relações existentes.

Figura 27 - Detalhamento do fluxo que a peça realiza durante o processo de montagem e teste.



Fonte: Elaboração própria (2025).

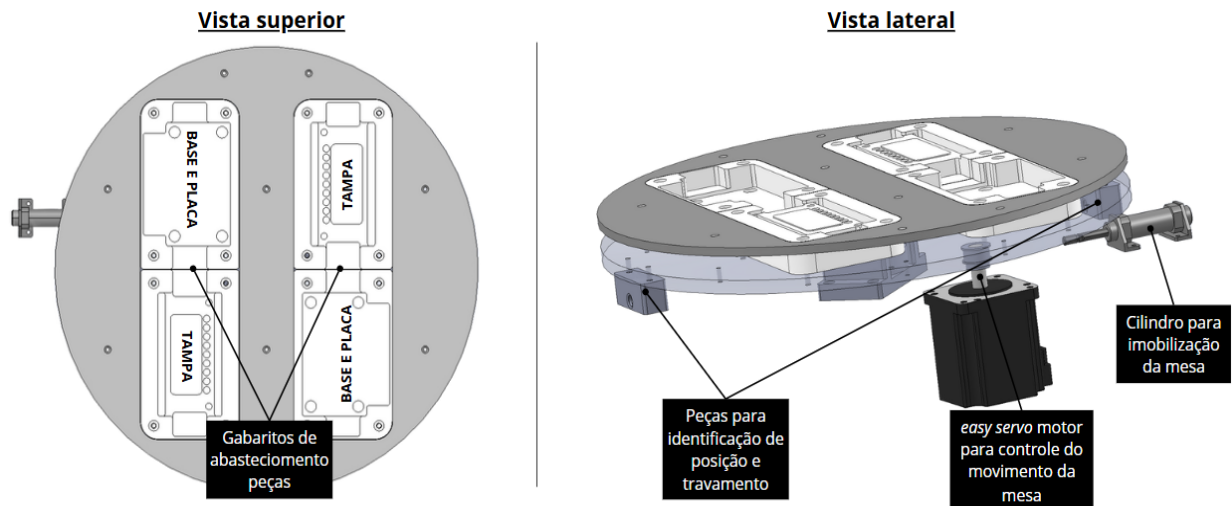
Conforme observado, a interação entre os colaboradores e a máquina ocorre por meio da mesa de indexação, onde as três partes do produto são abastecidas. Em seguida, o robô transporta as peças até a jiga. Após a conclusão do teste, se aprovado, o produto é encaminhado pelo robô para a esteira tracionada, que o conduz até a rampa de saída. Caso reprovado, o produto é direcionado para a rampa de descarte, chegando ao colaborador responsável pelo abastecimento, que fará a segregação da peça.

O robô cartesiano atua como intermediador, sendo o responsável pela manipulação do produto. As jigas de teste não interagem diretamente com o operador, dependendo do robô cartesiano para o fornecimento dos produtos. Após a conclusão dos testes funcionais, as jigas emitem um resultado de aprovação ou reprovação, e o robô cartesiano conduz a peça para a próxima etapa. Nos tópicos a seguir, cada dispositivo que compõe a máquina será abordado separadamente, com detalhamento de seus aspectos técnicos.

3.1.1 Mesa de indexação

A mesa de indexação é projetada para receber as três peças que compõem o produto. Para isso, a mesma conta com dois gabaritos, como ilustrado na Figura 28: um destinado à tampa e outro à base que acomoda a placa. Sempre que o montador posiciona as peças nos gabaritos, ele emite um sinal para a máquina, através de um comando bimanual, indicando que a mesa está devidamente abastecida. Em seguida, a mesa realiza um movimento de 180° por meio de um *easy servo motor*, transportando as peças para dentro da máquina permitindo que o robô cartesiano tenha acesso as peças.

Figura 28 - Detalhamento mesa indexadora.

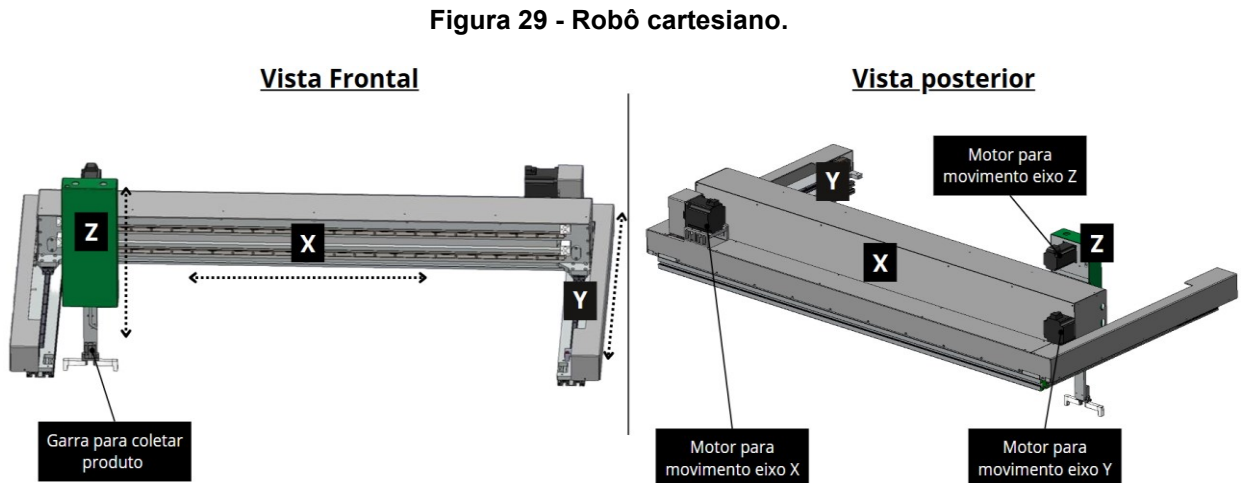


Fonte: Acervo do autor (2025).

Para garantir que a mesa concluiu seu movimento e fornecer um *feedback* para a máquina, há peças metalizadas na parte inferior da mesa. Essas peças são detectadas por um sensor magnético, que confirma o término do deslocamento. Além disso, para assegurar a posição correta, a mesa conta com um cilindro pneumático de indexação. Ao final do movimento, esse cilindro é acionado para travar a mesa por meio do orifício presente nas peças de travamento.

3.1.2 Robô cartesiano

Responsável pelo processo de movimentação do produto, o robô cartesiano conta com três *easy* servos motores nos eixos X, Y e Z conforme é possível notar por meio da Figura 29 (as setas na figura apontam o sentido de movimento de cada eixo).



Fonte: Acervo do autor (2025).

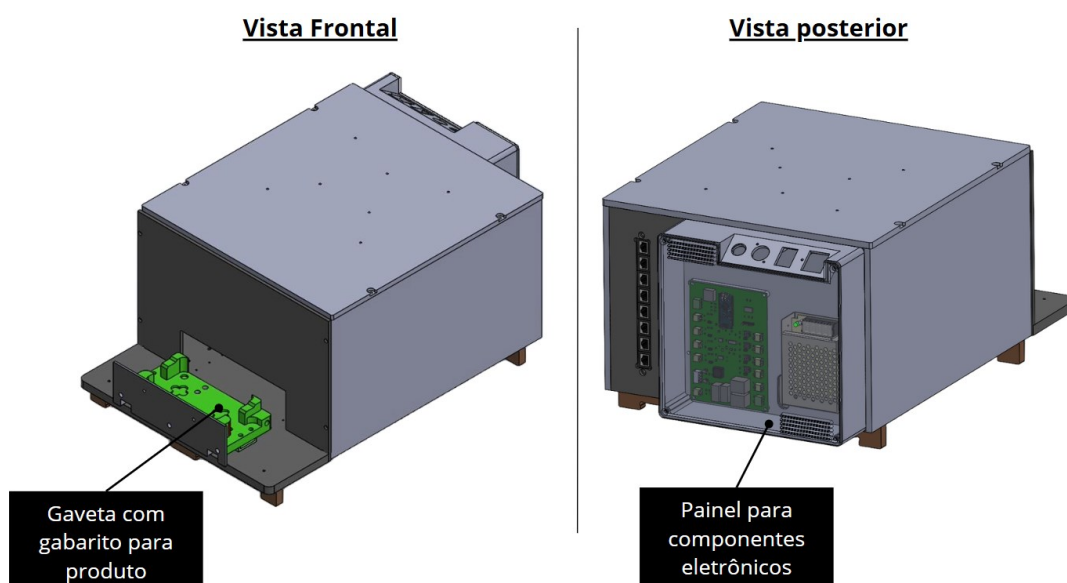
Para coletar a peça no eixo Z, o robô conta com uma garra instalada em um cilindro pneumático responsável por realizar um movimento de pinça. Esse cilindro possui um sensor de êmbolo que detecta quando o cilindro está completamente avançado. Durante a coleta, se a garra não conseguir segurar a peça, o cilindro irá avançar por completo e o sensor vai ser ativado, indicando a falha na captura. Por outro lado, se a peça for coletada com sucesso, a garra não irá se fechar completamente, exercendo força para manter a peça presa na garra.

Outro sensoriamento presente no robô cartesiano é o para referência de posição. Cada eixo possui um sensor magnético que será utilizado no movimento de *home position*. Quando os eixos X,Y e Z estiverem sobre o sensor, a máquina irá entender que os motores estão na origem (0°).

3.1.3 Jigas de teste

As jigas de teste são dispositivos responsáveis pelo fechamento e teste do produto. Como ilustrado na Figura 30, a jiga possui uma gaveta onde o produto é posicionado. Na versão de processo manual, essa gaveta é fechada através da ação do operador. No entanto, para o projeto da máquina que automatizará o processo, o fechamento foi modificado para ser automático, com o uso de um cilindro pneumático localizado na parte de baixo da jiga.

Figura 30 - Jiga de teste e fechamento do produto.



Fonte: Acervo do autor (2025).

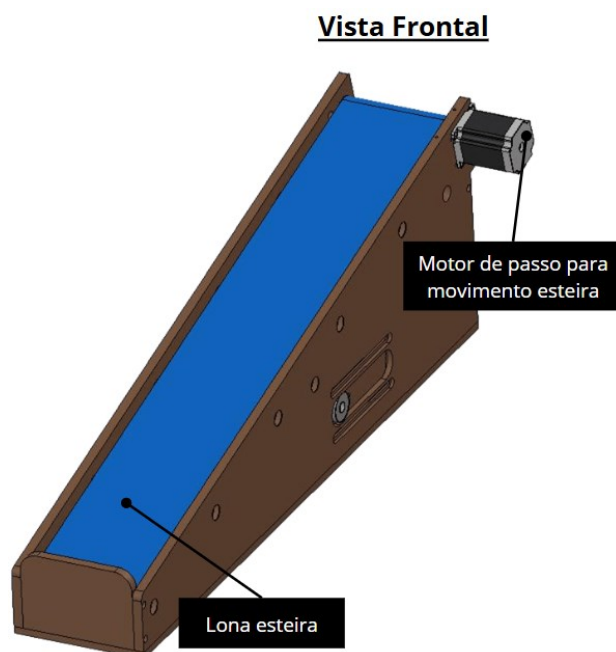
A placa eletrônica de controle, a fonte de tensão e os demais componentes que possibilitam o funcionamento da jiga estão presentes na parte de trás. Vale ainda destacar que a jiga realiza também o fechamento do produto. Internamente há instalado um cilindro pneumático que pressiona o produto para que o fechamento seja realizado por completo.

No processo manual a célula conta com duas jigas para teste, no caso da automação do processo vão ser três.

3.1.4 Esteira tracionada

Após a conclusão do teste, caso o produto esteja aprovado ele deverá ser conduzido até o posto de embalagem, sendo essa a função da esteira tracionada presente na Figura 31.

Figura 31 - Esteira tracionada seus componentes.



Fonte: Acervo do autor (2025).

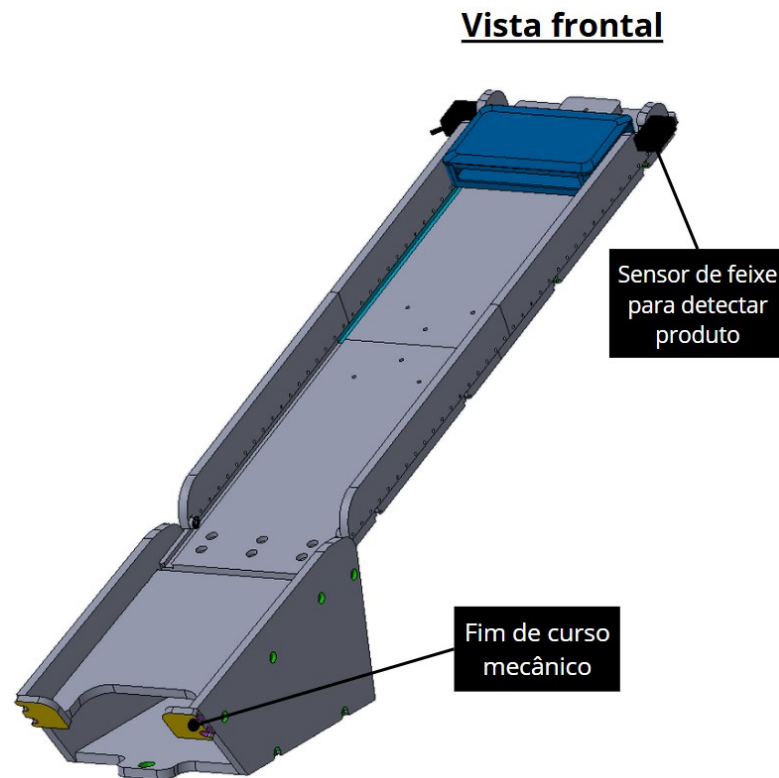
O robô irá abastecer a esteira que deve conduzir o produto até a saída da máquina. Para realizar a movimentação, a esteira conta com um motor de passo. Conforme é possível notar através da Figura 31, a esteira tem uma configuração para que o produto ganhe altura com o objetivo que no final ele seja conduzido por gravidade na rampa de saída (rampa de aprovado) até o posto de embalagem.

3.1.5 Rampas de aprovado/reprovado

Ambas as rampas têm a mesma finalidade: fornecer o produto aprovado/reprovado para os colaboradores que estão utilizando a máquina. A distinção entre ambas é que uma irá fornecer o produto aprovado para o posto de

embalagem, já a outra para o posto de montagem, caso o produto esteja reprovado. Conforme mencionado anteriormente, ambas as rampas funcionam por gravidade. A rampa de peças aprovada, presente na Figura 32, fica instalada na saída da máquina e conta com um sensor de feixe de luz na entrada, que tem o objetivo de detectar quando a rampa de saída estiver cheia.

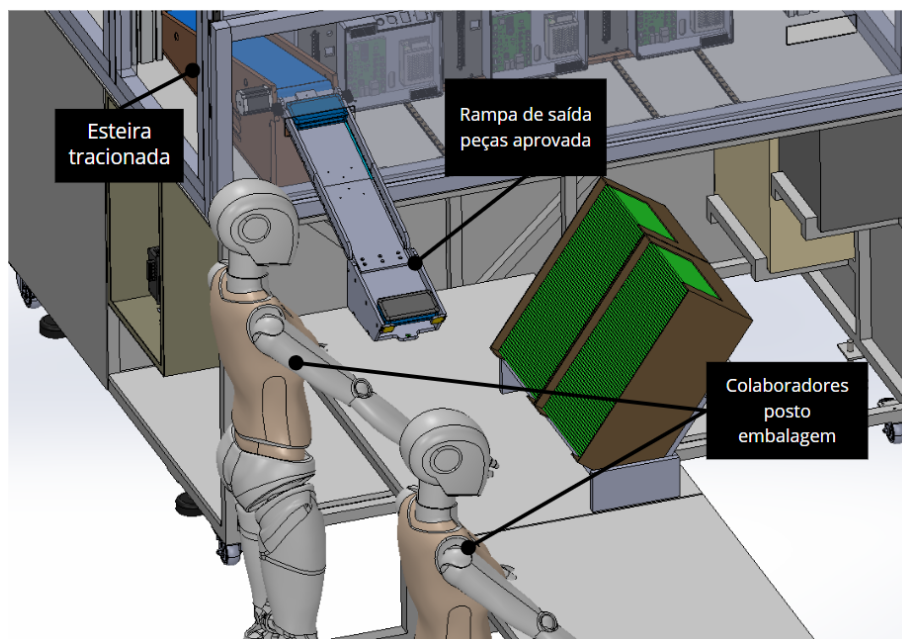
Figura 32 - Rampa de saída para peças aprovadas.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Sempre que o produto chega, ele se desloca por gravidade até o fim de curso mecânico. Nesse momento, o colaborador responsável pelo processo de embalagem deverá coletar o produto e iniciar a finalização do produto. A Figura 33 apresenta a disposição do colaborador e da rampa de saída para peças aprovadas

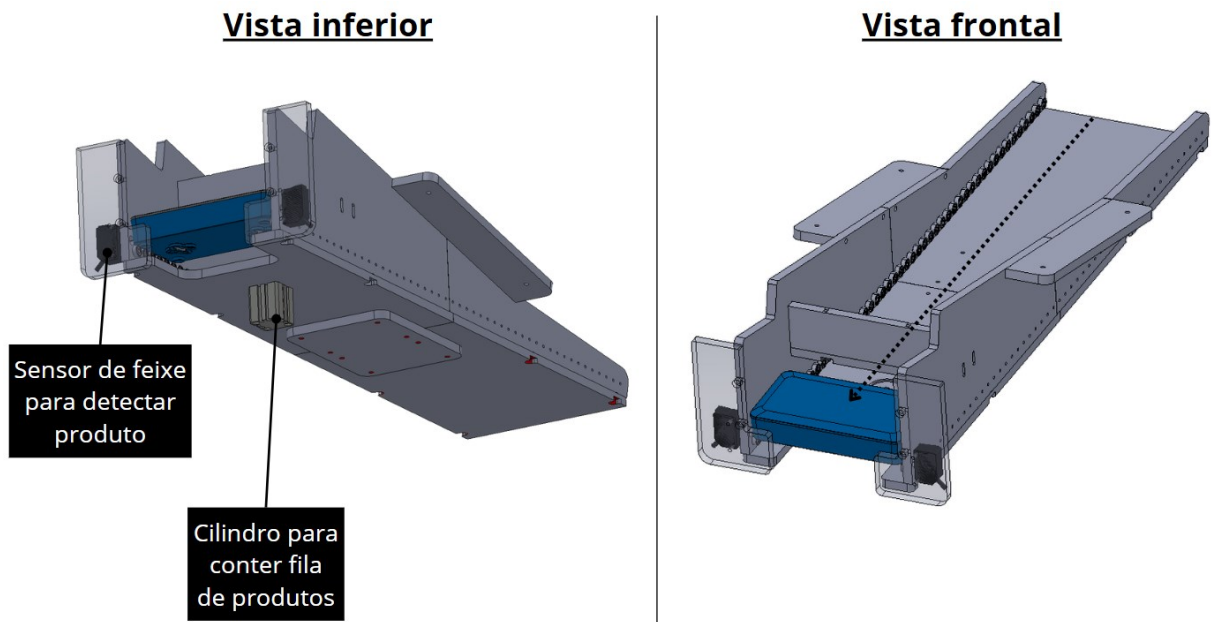
Figura 33 - Vista posterior da máquina onde se encontra o posto de embalagem.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Assim como já destacado anteriormente, a separação dos produtos aprovados e reprovados é fundamental. Dessa forma, o local que ambos são encaminhados é diferente. Produtos reprovados voltam para o montador por meio da rampa de peças reprovadas. Similar a rampa de peças aprovadas, a de reprovadas também funciona por gravidade. Conforme apresenta a Figura 34, ela conta com um sensor de feixe de luz na parte de saída, que irá servir para que a máquina detecte quando uma peça chegou e quando saiu.

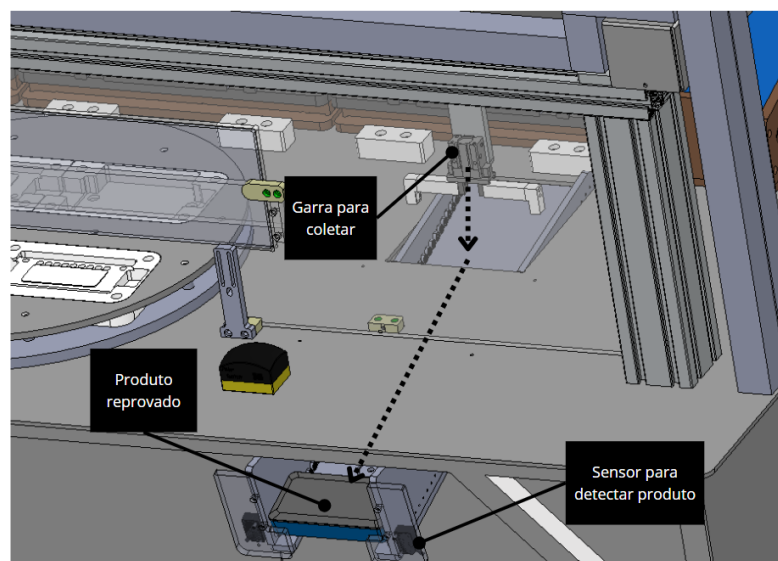
Figura 34 - Rampa de peças reprovadas e seus componentes.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Para garantir que a saída de produtos reprovados seja controlada, a parte inferior da rampa conta com um cilindro pneumático que retém os produtos até que o primeiro da fila seja removido pelo colaborador. A Figura 35 ilustra a disposição da rampa de peças reprovadas na máquina.

Figura 35 – Interação entre a rampa de peças reprovadas e o robô cartesiano.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Conforme é possível notar através da Figura 35, o colaborador tem acesso a um produto por vez. Isso contribui para que o processo seja mais organizado e controlado.

3.2 Requisitos de operação

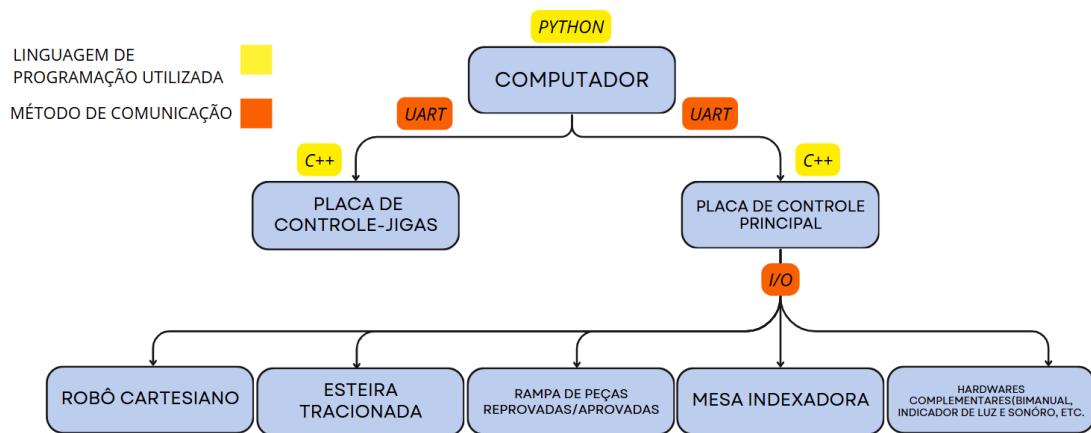
Até o momento, o detalhamento da máquina e os componentes que a constituem foram explorados. Para concluir a análise de como ela irá operar, foram levantados todos os requisitos de operação com os colaboradores dos setores relacionados ao processo produtivo, que estão listados a seguir:

- A máquina deve ser adequada conforme a norma regulamentadora 12 (NR12).
- Sempre que alguma peça for reprovada ou o sistema de segurança for violado, é necessário a emissão de um som para atenção.
- Deve haver uma torre luminosa indicando os estados de operação.
- Todos os produtos que forem aprovados devem possuir uma marcação para rastreabilidade.
- Sempre que um produto for reprovado a máquina deve emitir um som de indicação.
- A mesa indexadora necessita de um sensor de feixe de luz para detectar produtos que não foram bem encaixados e ficaram altos.
- Os *drivers* dos motores possuem uma saída de sinal chamada *fault*. Ela é acionada em casos onde o *driver* entra em proteção devido a picos de corrente nos motores. Nessa condição o *driver* do motor deve ser desligado e ligado novamente para entrar em operação. Logo, é necessário que os *drivers* possuam um seccionamento controlado.

3.3 Estruturando os subsistemas da máquina.

Por se tratar de uma máquina que possui variados componentes e detalhes de operação, os subsistemas foram organizados conforme a Figura 36, com o objetivo de visualizar de maneira mais clara todos os dispositivos contidos na máquina e a comunicação entre eles.

Figura 36 - Divisão dos subsistemas que constituem a máquina e forma de comunicação entre eles.



Fonte: Elaboração própria (2025).

A máquina contará com um computador central responsável por monitorar todos os componentes por meio dos subsistemas, que incluem as placas de controle das jigas e a chamada placa de controle principal. Ressalta-se que as jigas já foram desenvolvidas em conjunto com as placas que as controlam. As jigas não possuem comunicação direta com a placa de controle principal; em vez disso, a troca de informações será gerenciada pelo computador, que atuará como intermediário no processo de comunicação.

O padrão de comunicação entre o computador e as jigas será baseado em conexão serial utilizando o protocolo UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*). O *software* do computador vai ser desenvolvido em *Python*, enquanto o código da placa principal e da de controle das jigas em C++ diretamente nos microcontroladores.

3.4 Mapeamento e definições dos sinais de entrada e saída

Com conhecimento de como o dispositivo irá operar e quais *hardwares* irão constituir-lo, o próximo passo para iniciar o projeto da placa de controle principal é realizar o mapeamento da quantidade de entradas e saídas que o sistema irá exigir. Além disso, se faz necessário já realizar o levantamento de quais as características técnicas do sinal, como nível de tensão.

Após o levantamento das informações, constatou-se que a placa requer 23 entradas de sinal, com tensões variando entre 12 V e 24 V, conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1 - Detalhamento entradas de sinal da placa de controle eletrônica principal.

Dispositivo	Componente	Tensão(V)	Tipo de sinal	Aplicação
Robô cartesiano	Sensor magnético - TL-5WMC1	24,00	NPN	Homeposition motor X
		24,00	NPN	Homeposition motor Y
		24,00	NPN	Homeposition motor Z
	Driver - ES-D808	24,00	NPN	Fault driver motor X
		24,00	NPN	Fault driver motor Y
	Driver - ES-D508	24,00	NPN	Fault driver motor Z
		Driver - ES-D808	24,00	NPN
	24,00		NPN	In-position motor Y
	Mesa indexadora	Sensor de êmbolo - D-A93	24,00	NPN
Sensor indutivo - BTRR78500		24,00	NPN	Sensor para homeposition motor mesa
		24,00	NPN	Fault driver motor mesa
Jigas de teste	Sensor indutivo - BTRR78500	24,00	NPN	in-position motor mesa
		24,00	NPN	certificação presença jiga 1
		24,00	NPN	certificação presença jiga 2
		24,00	NPN	certificação presença jiga 3
Rampa de peças aprovadas	Sensor de barreira - ERO10T-11R1DP-R	24,00	NPN	sensor de rampa cheia
Rampa de peças reprovadas		24,00	NPN	sensor de produto na posição
Hardwares complementares	Bimanual - PALM-30R3PDA	24,00	NPN	bimanual - posto de montagem
	Sensor de barreira - OBE20M-R100-S2EP-IO-V31-IR	24,00	NPN	identificação peça alta na mesa indexadora
	Relé de segurança - Não definido	24,00	NPN	
	Reserva		12,00 ou 24,00	NPN ou PNP
NPN ou PNP				reserva
NPN ou PNP				reserva
Total de 23 entradas de sinal				

Fonte: Elaboração própria (2025).

Por questões de projeto e padronização, optou-se por deixar todas as entradas de sinal do tipo NPN. A seguir, tem-se um breve detalhamento da finalidade de algumas entradas mapeadas na Tabela 1.

- As entradas destinadas para *Fault* e *In-position* são *feedbacks* que os *drivers* dos motores fornecem. A aplicação de *Fault* já foi mencionada

no capítulo 3.2. Em relação a *In-position*, é um retorno que o *driver* fornecerá quando o motor concluir o movimento, ou seja, caso seja passado para o motor realizar um movimento de 90°, ao final do movimento o *driver* retornará um sinal. Apenas o motor do eixo Z não possui esse *feedback*.

- O *homeposition* é o movimento que os motores realizam para se referenciar. A partir dos sensores, a máquina reconhece o 0° dos motores.
- A certificação de presença da jiga é para que a máquina tenha capacidade de reconhecer se todas as jigas estão na posição. Isso se faz necessário uma vez que as jigas devem ficar em posições fixas para que o robô cartesiano consiga sempre realizar a ação de depositar/remover a peça.
- As saídas de reserva podem ser configuradas como NPN ou PNP e aceitar sinais de 12 V ou 24 V. Sua finalidade é permitir possíveis expansões das funcionalidades da máquina.

Em relação as saídas de sinal, foi mapeado a necessidade de a placa possuir 22 saídas de sinal, variando entre 12 V e 24 V, conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2 - Detalhamento das saídas de sinal da placa de controle principal.

Dispositivo	Componente	Tensão(V)	Corrente(mA)	Aplicação
Robô cartesiano	Driver - ES - D808	12,00	20,00	Pulso - Movimentação eixo X
	Driver - ES - D808	12,00	20,00	Pulso - Movimentação eixo Y
	Driver - ES-D508	12,00	20,00	Pulso - Movimentação eixo Z
	Driver - ES - D808	12,00	20,00	Direção - Movimento eixo X
	Driver - ES - D808	12,00	20,00	Direção - Movimento eixo Y
	Driver - ES-D508	12,00	20,00	Direção - Movimento eixo Z
	Relé	24,00	20,00	Relé de alimentação fontes motores
Mesa indexadora	Válvula pneumática	12,00	250,00	Garra de coletar produto
	Driver - TMA.DES.HSS86	12,00	20,00	Pulso de movimentação mesa
		12,00	20,00	Direção de movimentação mesa
	Válvula pneumática	12,00	250,00	Cilindro para imobilização mesa
Rampa de descarte	Válvula pneumática	12,00	250,00	Cilindro para conter fila de produtos
Hardwares complementares	Laser eletrônico	12,00	300,00	Laser para marcação de produtos aprovados
	Relé	24,00	20,00	Ligar esteira tracionada
			30,00	Luz verde - Equipamento em funcionamento
	Torre luminosa - TL50b-GYRAQ	24,00	30,00	Luz vermelha - Máquina parada/Segurança violada
			30,00	Luz amarela- Solicitação de abastecimento.
			30,00	Indicação sonora - Produto com defeito/Segurança violada.
Reserva		12,00		Reserva 1
		12,00		Reserva 2
		12,00	AVALIAR	Reserva 3
		24,00		Reserva 4
		Total de 22 saídas de sinal		

Fonte: Elaboração própria (2025).

A corrente informada na Tabela 2 é uma aproximação do consumo que a aplicação exigirá. A informação foi baseada, em alguns casos, em catálogos técnicos dos componentes e em outros, via medição com amperímetro digital de fonte de bancada.

De posse da quantidade de entradas e saídas de sinal que serão necessárias, com detalhamento técnico e com a compreensão de como cada sinal deverá ser emitido ou recebido, é possível a realização do projeto da placa de controle principal.

4. PROJETO CIRCUITOS

Para realização dos projetos dos circuitos, buscou-se manter a utilização de componentes eletrônicos que a equipe técnica comumente utiliza em outros projetos internos na empresa para manter uma padronização de peças de estoque e familiaridade por parte dos colaboradores.

O software que será utilizado para o projeto dos circuitos será o *easyEAD*, sendo este uma ferramenta de projeto de circuitos eletrônicos e *design* de PCBs (*Printed Circuit Board*) gratuito. Por conta da integração com a fabricante de PCBs, JLCBPCB, facilitará a etapa de projeto e confecção, uma vez que os componentes escolhidos no projeto são integrados a cadeia de suprimentos do fabricante. Logo, durante o projeto é possível saber o custo do componente escolhido e a quantidade de itens disponíveis no estoque. Para o projeto da PCB será dada preferência para componentes SMD (*Surface Mounted Device*) com o objetivo de deixar a placa o mais compacta possível.

O projeto será iniciado por meio da definição de qual microcontrolador vai ser utilizado na placa de controle principal, com base nos requisitos técnicos. Em seguida, será avaliado o projeto dos demais circuitos que a placa irá exigir, como os circuitos de entradas e saídas de sinal. Por fim, será feita uma avaliação do consumo de corrente da placa para verificar se as fontes de alimentação escolhidas para o projeto atendem às necessidades.

4.1 Seleção e especificação do microcontrolador responsável pelo controle do sistema.

Por padrão de projeto, será utilizada a placa de desenvolvimento *teensy 4.1*, a qual é baseada no microcontrolador *i.MXRT1062DVJ6 (Cortex-M7)*, visto que esse é o dispositivo mais comum nos demais desenvolvimentos internos da empresa em questão. Avaliando se ele irá atender a aplicação, o *teensy 4.1* é uma placa de desenvolvimento que conta com as seguintes características técnicas informadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Informações técnicas teensy 4.1.

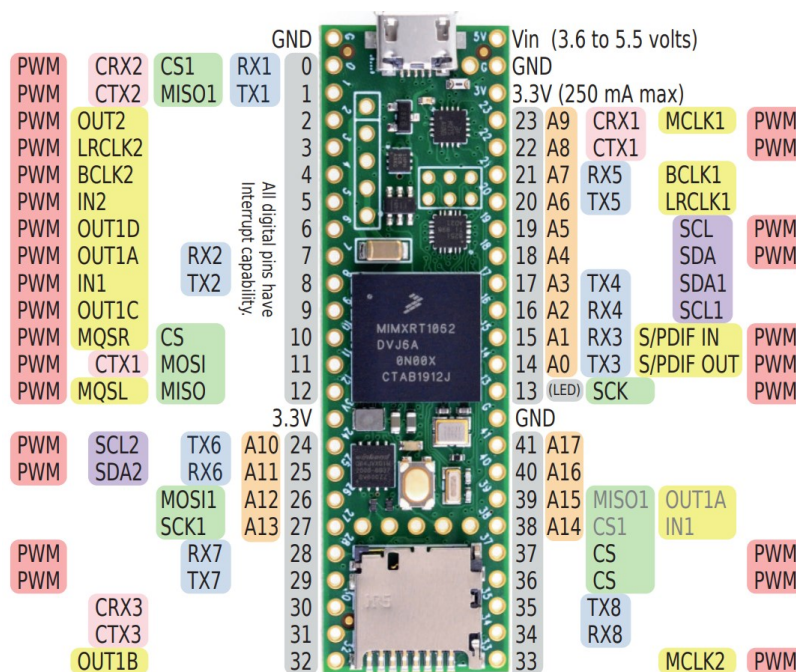
Categoria	Característica	Valor
Processador	Core	i.MXRT1062DVJ6 (Cortex-M7)
	FPU	Sim
	Rated Speed	600 MHz
	Overclockable	Sim
Memória	Flash Memory	7936 KB
	Bandwidth	66 Mbytes/sec
	Cache	65536 Bytes
	RAM	1024 KB
	EEPROM	4284 bytes (emulado)
Acesso Direto à Memória (DMA)	Canais	32
I/O Digital	Total de pinos	55
	Breadboard I/O	24
	Tensão de saída	3.3V
	Corrente de saída	10mA
	Tensão de entrada	3.3V Only
	Interrupções	55 pinos
Entradas Analógicas	Conversores ADC	18 pinos
	Resolução utilizável	12 bits
	Amplificador de ganho	0
	Touch Sensing	2 pinos
Saídas Analógicas	Comparadores	4 pinos
	DAC	Não possui
Temporizadores	Total de timers	49
	PWM, 32-bit	3
	PWM, 16-bit	32
	PWM, 8/10-bit	32
	Total de saídas PWM	31 pinos
	POB Type	3
	CMT Type	1
	Quadrature Encoder	4
	LPTMR Type	1
	PIT/Interval	1
	IEEE 1588	1
	Systick	1
	RTC	1
Comunicação	USB	2 portas
	Serial	8 portas (com FIFOs e alta taxa de baud)
	SPI	3 portas
	I2C	3 portas
	CAN Bus	2 portas (com CAN-FD)
	Áudio digital (entrada S/PDIF)	1 porta (com FIFO)
	Áudio digital (saída S/PDIF)	1 porta (com FIFO)
	Cartão SD	1 porta
	Ethernet	1 porta

Fonte: Adaptado de PJRC (s.d.).

Conforme indica a Tabela 3, a placa de desenvolvimento conta com um *clock* interno de 600 MHz, através do processador *i.MXRT1062DVJ6 (Cortex-M7)*. Com um total de 55 pinos, possui 31 com saídas PWM e 18 com conversores ADC (*Analog-to-Digital Converter*).

A máquina do projeto em questão necessita de 45 I/O *pins*, sendo 23 para entrada e 22 para saída. Dos 55 pinos que o teensy 4.1 possui, os possíveis de utilizar na aplicação são no total 41, conforme aponta a Figura 37 com os números em cinza.

Figura 37 - Pinos teensy 4.1.



Fonte: PJRC (s.d.).

É possível observar que a alimentação do teensy é 3.6 V até 5.5 V. As saídas de sinal fornecem 3.3 V e conforme a Tabela 3 indica com capacidade de até 10mA.

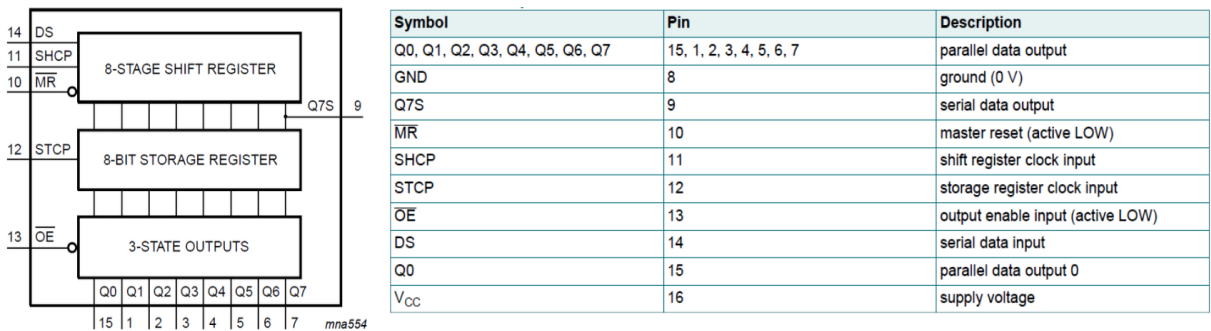
O teensy 4.1 se apresenta como uma solução adequada para o projeto sendo por vezes até sobredimensionado para a aplicação, uma vez que ele oferece diversas funcionalidades e circuitos periféricos que não serão utilizados no projeto, além de possuir um *clock* bem elevado em comparação aos microcontroladores convencionais. No entanto, a grande quantidade de I/O *pins* disponíveis (41 no total) e por ser um componente comum nos demais projetos da empresa, torna o teensy 4.1 a placa de desenvolvimento escolhida. Porém, ainda irá faltar em torno de 4 I/O *pins* para atender ao projeto. Dessa forma, será usado um circuito *Shift Registers* (Registradores de Deslocamento) para expandir a quantidade de saídas disponíveis.

4.2 Detalhamento técnico circuito *shift registers* (registrador de deslocamento)

O circuito integrado usado para aplicação será o **74HC595D-Q100** que é um registrador de deslocamento de 8 *bits* com armazenamento interno e saídas em três estados. Possui entrada e saída seriais para encadeamento e uma entrada de reset assíncrono. Suas entradas incluem diodos de proteção, permitindo o uso de resistores de limitação para tensões acima de VCC. Qualificado no padrão AEC-Q100 (Grau 1), é adequado para uso em aplicações automotivas. As tensões de operação estão na faixa de -0,5 V até 7 V, sendo recomendado trabalhar entre 2 V até 5 V. A corrente de saída tem capacidade de até +/- 25 mA no pino Q7S e +/- 35 mA nos demais pinos Qn (NEXPERIA, 2024).

O 74HC595 é um *shift register* de 8 bits com *latch* interno. Ele permite converter dados seriais em saídas paralelas, usando apenas três pinos da placa de desenvolvimento (*data*, *clock* e *latch*). O diagrama funcional do componente com a tabela de descrição de cada pino é apresentado na Figura 38.

Figura 38 - Diagrama funcional e descrição dos pinos do *shift register* 74HC595.



Fonte: NEXPERIA (2024).

O 74HC595 possui um registrador de armazenamento (*storage register*) que “segura” as saídas enquanto o microcontrolador envia novos dados. Somente quando o sinal de *latch* é acionado, as novas saídas são efetivamente colocadas nos pinos de saída. Além disso ele possibilita a expansão de mais de 8 saídas, onde é possível conectar vários 74HC595 em série (encadeados) (NEXPERIA, 2024). Para expansão de saída, nesse caso será necessário usar mais de um componente, onde

o primeiro 74HC595 recebe os dados seriais e, após 8 pulsos de *clock*, os *bits* excedentes "passam" para o segundo 74HC595, e assim por diante.

Outro fator importante na escolha do componente é a as diversas aplicações internas em outros dispositivos que o componente é utilizado na empresa do projeto em questão, evidenciando sua robustez. Considera-se também a familiaridade que a equipe técnica possui e estoque para substituição em eventuais problemas. Dessa forma o *shift register* 74HC595 se apresenta como uma ótima opção. Com a definição do modelo do componente a ser utilizado é possível determinar a aplicação de cada pino do teensy 4.1.

4.2.1 Disposição dos pinos da placa de desenvolvimento em conjunto com o *shift register*

A Tabela 4, apresentada a seguir, descreve a disposição dos pinos do teensy 4.1, conforme definido para atender aos requisitos da placa de controle principal do projeto em questão.

Tabela 4 - Identificação de aplicação pinos teensy 4.1.

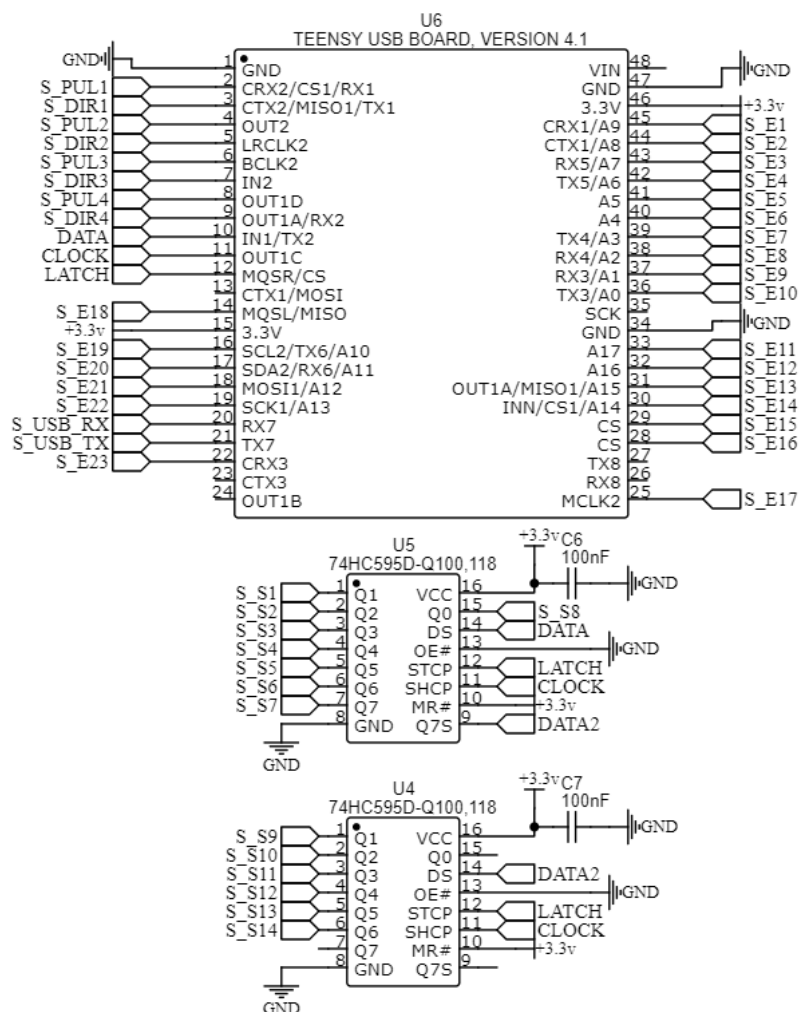
Pino	Aplicação
	GND
0	Sinal_Pulso(1)
1	Sinal_Direção(1)
2	Sinal_Pulso(2)
3	Sinal_Direção(2)
4	Sinal_Pulso(3)
5	Sinal_Direção(3)
6	Sinal_Pulso(4)
7	Sinal_Direção(4)
8	DATA
9	CLOCK
10	LATCH
11	(não utilizado)
12	Sinal_Entrada(18)
13	+3.3V
14	Sinal_Entrada(19)
15	Sinal_Entrada(20)
16	Sinal_Entrada(21)
17	Sinal_Entrada(22)
18	S_USB_RX
19	S_USB_TX
20	Sinal_Entrada(23)
21	(não utilizado)
22	(não utilizado)
23	Sinal_Entrada(17)
24	(não utilizado)
25	(não utilizado)
26	Sinal_Entrada(16)
27	Sinal_Entrada(15)
28	Sinal_Entrada(14)
29	Sinal_Entrada(13)
30	Sinal_Entrada(12)
31	Sinal_Entrada(11)
32	GND
33	(não utilizado)
34	Sinal_Entrada(10)
35	Sinal_Entrada(9)
36	Sinal_Entrada(8)
37	Sinal_Entrada(7)
38	Sinal_Entrada(6)
39	Sinal_Entrada(5)
40	Sinal_Entrada(4)
41	Sinal_Entrada(3)
42	Sinal_Entrada(2)
43	Sinal_Entrada(1)
44	+3.3V
45	GND
46	(não utilizado)

Fonte: Elaboração própria (2025).

Conforme é possível notar, todas as entradas de sinal foram alocadas. Os pinos 18 e 19 estão reservados para a utilização de módulo USB, que será projetado na seção 4.6. As saídas de sinal para os motores foram destinadas para os pinos com

capacidade de emissão de sinal PWM. Do pino 8 até o 10 é destinado para o uso dos *shifts registers*, que nesse caso será responsável por gerar 14 saídas de sinal, logo a placa irá contar com dois 74HC595D-Q100. O esquema eletrônico dos componentes é apresentado na Figura 39.

Figura 39 – Entradas e saídas de sinal identificadas nos pinos do teensy 4.1 e no *shift registers* 74HC595D-Q100.



Fonte: Elaboração própria (2025).

O *software* usado no projeto gerou uma *USB board* do teensy 4.1 que contabiliza o GND com número 1, porém na versão física do *hardware*, apresentada na Figura 37, o GND não é contabilizado e o primeiro pino é identificado com número 0. Isso não gerará problemas na confecção, porém a numeração dos I/O *pins* do projeto eletrônico não pode ser usada como referência para programação do *software*

de controle da máquina. No caso, o pino com identificação S_PUL1 da Figura 39, ao invés de ser utilizado como referência o pino 2 da placa de desenvolvimento, usa-se o número 0, conforme apresentado na Tabela 4.

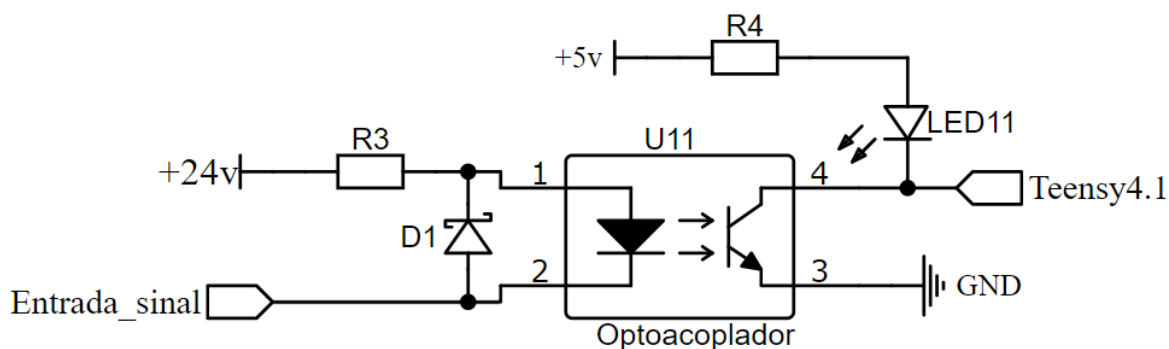
Com todas os pinos da placa de desenvolvimento já destinados para suas respectivas aplicações, é possível iniciar o projeto dos circuitos intermediários.

4.3 Circuito para entrada de sinais digitais

No total serão vinte três entradas de sinal que a placa necessitará, com tensão de 24 V de operação. Dessas 23, 20 serão NPN e as outras três serão reservas e podem receber NPN/PNP, com níveis de tensão 12 V ou 24 V.

Para o circuito de entrada será usada uma configuração com optoacopladores, apresentada na Figura 40.

Figura 40 - Circuito para entradas de sinais via optoacoplador.



Fonte: Elaboração própria (2025).

No chaveamento NPN, a entrada de sinal é aplicada ao cátodo do diodo do optoacoplador, enquanto no ânodo há um sinal de +24 V em série com o resistor R1, responsável por limitar a corrente que aciona o LED interno do componente. Na saída, o fototransistor do optoacoplador está diretamente conectado ao pino do teensy 4.1 e chaveia o sinal de GND quando a entrada de sinal é ativada. Quando não há sinal na entrada, o fototransistor permanece em corte, o LED de saída não acende e o pino do teensy 4.1 lê um sinal digital de tensão, resultante da subtração das quedas de tensão

no resistor R2 e no LED. O diodo em paralelo com o optoacoplador tem a função de proteger o componente de tensões reversas.

O modelo do optoacoplador escolhido é o **TLP291**. Suas características técnicas são apontadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Informações técnicas optoacoplador TLP291.

	CHARACTERISTIC	SYMBOL	NOTE	RATING	UNIT
LED	Input forward current	I_F		50	mA
	Input forward current derating ($T_a \geq 90^\circ\text{C}$)	$\Delta I_F / \Delta T_a$		-1.5	mA / $^\circ\text{C}$
	Input forward current (pulsed)	I_{FP}	(Note 2)	1	A
	Input reverse voltage	V_R		5	V
	Input power dissipation	P_D		100	mW
	Input power dissipation derating ($T_a \geq 90^\circ\text{C}$)	$\Delta P_D / \Delta T_a$		-3.0	mW / $^\circ\text{C}$
	Junction temperature	T_j		125	$^\circ\text{C}$
DETECTOR	Collector-emitter voltage	V_{CEO}		80	V
	Emitter-collector voltage	V_{ECO}		7	V
	Collector current	I_C		50	mA
	Collector power dissipation	P_C		150	mW
	Collector power dissipation derating($T_a \geq 25^\circ\text{C}$)	$\Delta P_C / \Delta T_a$		-1.5	mW / $^\circ\text{C}$
	Junction temperature	T_j		125	$^\circ\text{C}$
	Operating temperature range	T_{opr}		-55 to 110	$^\circ\text{C}$
	Storage temperature range	T_{stg}		-55 to 125	$^\circ\text{C}$
	Lead soldering temperature	T_{sol}		260 (10s)	$^\circ\text{C}$
	Total package power dissipation	P_T		200	mW
	Total package power dissipation derating($T_a \geq 25^\circ\text{C}$)	$\Delta P_T / \Delta T_a$		-2.0	mW / $^\circ\text{C}$
	Isolation voltage	BV_S	(Note3)	3750	Vrms

Fonte: TOSHIBA (2013).

O componente apresenta uma capacidade de corrente de coletor (I_C) por parte do fototransistor de 50 mA, sendo suficiente para a entrada de sinal do teensy 4.1. A corrente máxima de entrada do optoacoplador (I_F) é 50 mA, e o componente suporte até 1A de corrente pulsada direta. Para o dimensionamento de R1, considera-se as informações da Tabela 6.

Tabela 6 - Informações de corrente direta e tensão direta no optoacoplador TLP291.

CHARACTERISTIC		SYMBOL	TEST CONDITION	MIN	TYP.	MAX	UNIT
LED	Input forward voltage	V_F	$I_F = 10 \text{ mA}$	1.1	1.25	1.4	V
	Input reverse current	I_R	$V_R = 5 \text{ V}$	-	-	5	μA
	Input capacitance	C_T	$V = 0 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}$	-	30	-	pF
DETECTOR	Collector-emitter breakdown voltage	$V_{(BR) \text{ CEO}}$	$I_C = 0.5 \text{ mA}$	80	-	-	V
	Emitter-collector breakdown voltage	$V_{(BR) \text{ ECO}}$	$I_E = 0.1 \text{ mA}$	7	-	-	V
	Dark current	I_{DARK}	$V_{CE} = 48 \text{ V}$	-	0.01	0.08	μA
			$V_{CE} = 48 \text{ V}, T_a = 85^\circ\text{C}$	-	2	50	μA
	Collector-emitter capacitance	C_{CE}	$V = 0 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}$	-	10	-	pF

Fonte: TOSHIBA (2013).

A corrente (I_F) indicada na Tabela 6 é de 10 mA, e a tensão direta do LED (V_F) é 1,25 V.

O dimensionamento que será realizado para o circuito de entrada de sinal, em relação aos resistores, possui a finalidade de acender LEDs, que é o caso do resistor R1 e R2 da Figura 40. Para dimensionar, primeiramente é necessário saber o valor de queda de tensão sobre o componente, conforme a equação (1). Em seguida, é possível calcular o valor do resistor com a equação (2). Por fim, por meio da equação (3), calcula-se a potência dissipada sobre o resistor.

$$V_{R_{led}} = V_{entrada} - V_F \quad (1)$$

$$R_{led} = \frac{V_{R_{led}}}{I_F} \quad (2)$$

$$P_{R_{led}} = \frac{V_{R_{led}}^2}{R_{led}} \quad (3)$$

Onde:

$V_{R_{led}}$ = Queda de tensão sobre o resistor

$V_{entrada}$ = Tensão em série com resistor

R_{led} = Resistência que limita a corrente no LED

$P_{R_{led}}$ = Potência dissipada no resistor

VF = Queda de tensão sobre LED

IF = Corrente direta do LED

O LED usado como indicação visual para todos os sinais da placa será o **MHT170CGCT** na cor verde. As informações técnicas do componente são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Características técnicas MHT170CGCT

光电特性 Optical-Electrical Characteristic(Ta=25℃)

符号 Symbol	参数 Parameter	测试条件 Test Condition	最小 Min	标准 Typ	最大 Max	单位 Unit
VF	正向压降 Forward Voltage	IF = 20mA	1.7		2.3	V
IR	反向漏电流 Reverse Current	VR=5V			50	uA
λ_p	峰值波长 Peak Wavelength	IF = 20mA		575		
λ_d	主波长 Dominant Wavelength	IF = 20mA	567		575	
2θ1/2	发光角度 Viewing Angle	IF = 20mA		140		deg
Iv	发光强度 Luminous Intensity	IF = 20mA	22.4		57.0	mcd

Fonte: LIANYUNGANG MEIHUA ELECTRONICS TECHNOLOGY (2015).

Com base nas equações (1), (2) e (3) e com as informações da Tabela 6 e da Tabela 7 , tem-se o dimensionamento dos resistores para as aplicações descritas na Tabela 8.

Tabela 8 - Dimensionamento dos resistores para diferentes aplicações da placa de controle principal

Aplicação	$V_{entrada}$ (V)	VF (V)	IF (mA)	$V_{R_{led}}$ (V)	$R_{led_{comercial}}$ (Ω)	$P_{R_{led}}$ (mW)
Entrada de sinal optoacoplador	24	1,25	10	22,75	2,2k	235,2
Entrada de sinal optoacoplador	12	1,25	10	10,75	1,2k	115,5

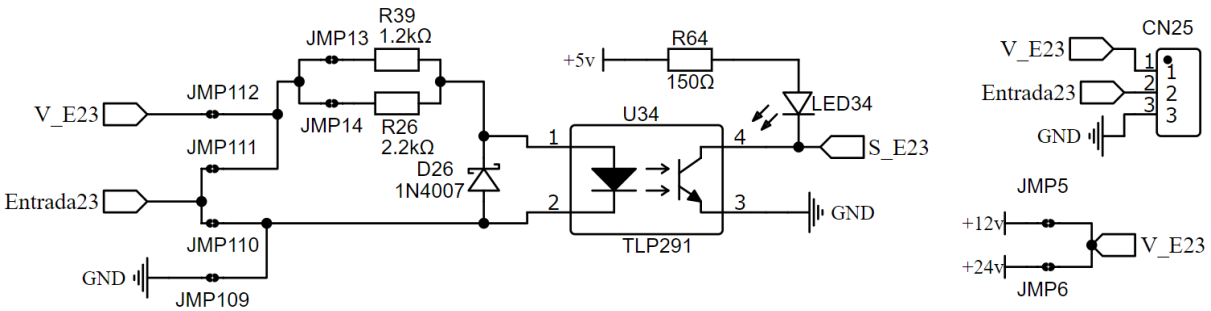
LED de indicação sinal de entrada (5v)	5	2,0	20	3	150	60
LED de indicação sinal de saída (12v)	12	2,0	20	10	470	212,3
LED de indicação sinal de saída (24v)	24	2,0	20	22	1,2k	403,3

Fonte: Elaboração própria (2025).

De acordo com a Tabela 5, a máxima tensão reversa que o optoacoplador TLP291 suporta é de 5 V. Logo, para proteção de tensões reversas, o modelo do diodo D1 da Figura 40, será o **1N4007**, que possui uma tensão máxima reversa de até 1KV, sendo mais que suficiente para aplicação.

As entradas de sinal reserva serão configuráveis conforme a necessidade de aplicação. Essa configuração será possível através de *jumpers* que ficarão na placa para o usuário configurar a saída conforme a necessidade de tensão e tipo de sinal (NPN/PNP). A Figura 41 apresenta o circuito para entrada de sinal, já com os componentes definidos.

Figura 41 - Circuito reserva configurável para entrada de sinal



Fonte: Elaboração própria (2025).

No total cada circuito irá contar com 6 *jumpers* que serão configurados conforme a necessidade. As 20 entradas NPN de 24 V serão iguais ao circuito apresentado na Figura 40, já as três entradas reserva são iguais ao circuito da Figura 41.

Os conectores que serão usados na placa vão fornecer a tensão direta em dois dos três pinos disponíveis, com a finalidade de alimentar diretamente os sensores, sem a necessidade de conectar em algum barramento de alimentação. O modelo escolhido para os terminais é o **KF2EDGV-3.81-3P** com capacidade de até 300 V de tensão e 8 A de corrente, sendo mais que necessário para a aplicação.

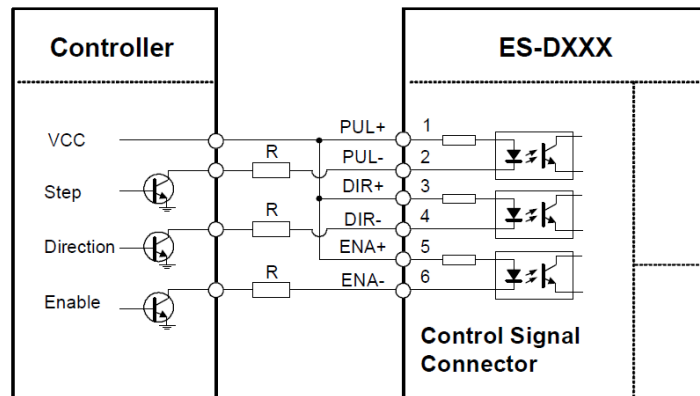
4.4 Acionamento de componentes: Circuitos para tensões de 12 V, 24 V e acionamento dos *drivers* dos motores.

No total, a placa precisa realizar 21 acionamentos, conforme a Tabela 2, sendo 15 com valor de tensão 12 V e 7 com tensão de 24 V. O projeto dos circuitos de acionamento seguirá esta sequência: primeiro, será feita a especificação do circuito para acionamento dos *drivers* dos motores do robô cartesiano e da mesa indexadora. Na sequência, serão projetados os circuitos de acionamento para as tensões de 24 V e 12 V. Por fim, será realizado o projeto do circuito de acionamento do *driver* para o motor de passo da esteira tracionada.

4.4.1 Acionamento *drivers* motores robô cartesiano e mesa indexadora

Conforme apontado na Tabela 2, por meio do critério do projetista mecânico da máquina, vão ser usados três modelos diferentes para os *drivers* dos motores. Porém, conforme a documentação técnica dos fabricantes, a metodologia de acionamento é equivalente. Na Figura 42 é indicado o circuito de acionamento sugerido para os *drivers* da família ES-D.

Figura 42 - Sugestão de circuito para acionamento *drivers* ES-D



Fonte: LEADSHINE (s.d.).

No projeto, as portas de (ENA+) e (ENA-) não serão utilizadas. O fabricante sugere diversas configurações para acionamento, conforme a Figura 42 , a configuração escolhida será a utilização de transistores com chaveamento NPN. O valor de R, a tensão de acionamento e a faixa de corrente que a saída deve fornecer estão especificados na Tabela 9.

Tabela 9 - Informações técnicas *drivers* família ES-D

PARÂMETRO	MÍNIMO	TÍPICO	MÁXIMO	UNIDADE
Tensão de alimentação	24	68	80	VDC
Corrente de saída	0.5	-	8.2	A (pico)
Frequência de entrada de pulso	0	-	200	kHz
Corrente do sinal lógico	7	10	16	mA
Resistência de Isolação	500	-	-	M Ω

PINO	NOME	I/O	DESCRIÇÃO
1	PUL +	I	Sinal de Pulso: No modo de Pulso e Direção, essa entrada representa o sinal de pulso. Cada borda de subida (configurável) é considerada um pulso. No modo CW e CCW, essa entrada representa o sentido horário (CW), ativa em ambos os níveis, alto e baixo. É considerado nível alto de 4-5V e nível baixo de 0-0.5V. Para uma resposta mais confiável, a largura do pulso deve ser maior que 2.5μS (config. em 200kHz) ou 1μS (config. em 500kHz). *Para controladores de 12V e 24V deve ser adicionado um resistor em série de 1kΩ e 2kΩ respectivamente. O mesmo se aplica para os sinais de direção e enable.
2	PUL -	I	
3	DIR +	I	Sinal de Direção: No modo de Pulso e Direção, essa entrada define o sentido do giro do motor: 0 - horário e 1 - anti-horário (configurável). No modo CW e CCW, essa entrada é o sentido anti-horário do motor (CCW), ativa em ambos os níveis alto e baixo. Para uma resposta de movimento mais confiável, o sinal de DIR deve estar à frente do sinal de PUL por pelo menos 5μS. É considerado nível alto de 4-5V e nível baixo de 0-0.5V.
4	DIR -	I	
5	ENA +	I	Sinal de Enable: Usado para habilitar ou desabilitar o driver. Nível baixo deixa o driver habilitado, quando não utilizado pode ser deixado desconectado. O nível de sinal alto/baixo para ativar essa entrada pode ser configurado via software.
6	ENA -	I	

Fonte: TECH MAKERS - PRODUTOS PARA AUTOMAÇÃO (s.d.).

No total, serão 8 saídas de sinal dedicadas aos motores. O nível de tensão será em 12 V e conforme a Tabela 9, a faixa de corrente que o circuito deverá fornecer está entre 7mA até 16mA, além de ser usado no circuito um resistor em série com valor de 1 k Ω .

O transistor escolhido para utilização do acionamento dos motores foi o transistor **ULN2803A**, que é um conjunto de oito transistores Darlington NPN. Possui diodos de proteção para cargas indutivas e permite conexão em paralelo para maior corrente. Suas aplicações incluem *drivers* de relé, lâmpadas, LEDs *displays* e *buffers* lógicos. Conta com resistores de base de 2,7 k Ω , permitindo operação direta com dispositivos TTL e CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) de 5 V (TEXAS INSTRUMENTS, 2004). Além da robustez, a escolha também se justifica por

ser um CI (Circuito Integrado), que ocupará pouco espaço na placa e possibilita o acionamento das oito saídas necessárias para os motores por meio de um único componente. As informações técnicas do componente estão presentes na Figura 43.

Figura 43 - Informações técnicas ULN2803

absolute maximum ratings at 25°C free-air temperature (unless otherwise noted)†

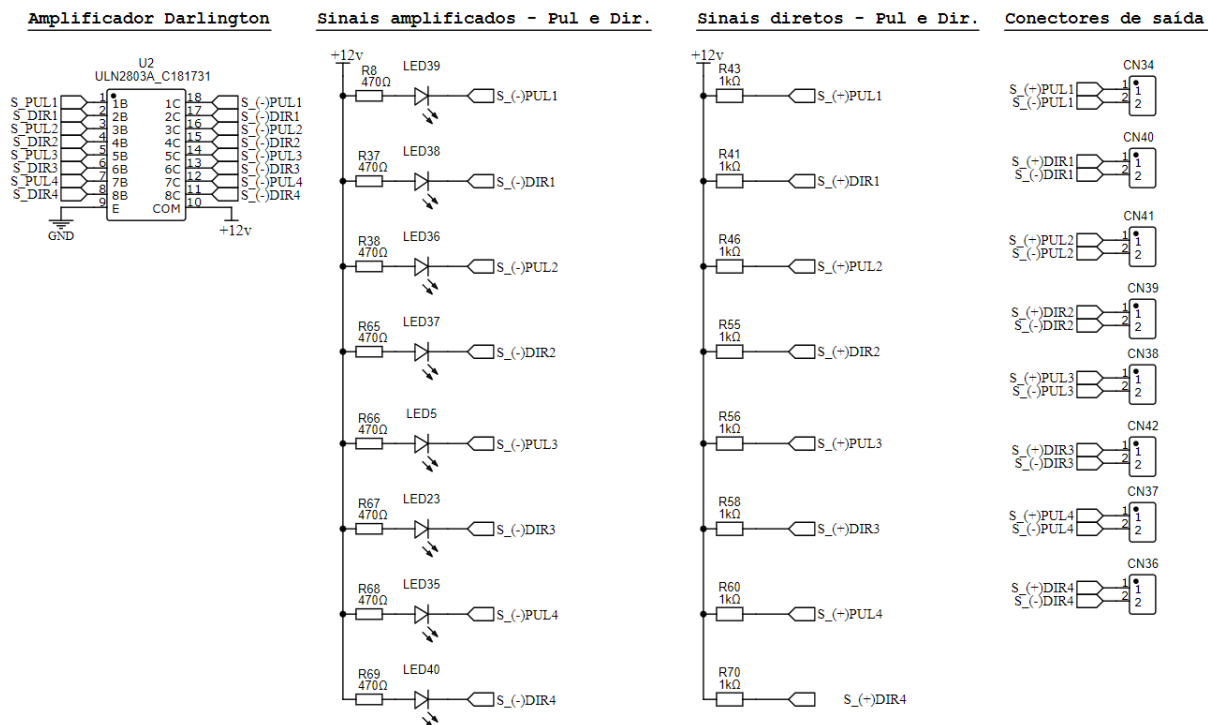
Collector-emitter voltage	50 V
Input voltage (see Note 1)	30 V
Continuous collector current	500 mA
Output clamp diode current	500 mA
Total substrate-terminal current	-2.5 A
Package thermal impedance, θ_{JA} (see Notes 2 and 3): DW package	TBD°C/W
N package	TBD°C/W
Operating virtual junction temperature, T_J	150°C
Storage temperature range, T_{stg}	-65°C to 150°C

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
I_{CEX} Collector cutoff current	$V_{CE} = 50\text{ V}$, See Figure 1 $I_I = 0$			50	μA
$I_{I(off)}$ Off-state input current	$V_{CE} = 50\text{ V}$, $T_A = 70^\circ\text{C}$, $I_C = 500\text{ }\mu\text{A}$, See Figure 2	50	65		μA
$I_{I(on)}$ Input current	$V_I = 3.85\text{ V}$, See Figure 3		0.93	1.35	mA
$V_{I(on)}$ On-state input voltage	$V_{CE} = 2\text{ V}$, See Figure 4			$I_C = 200\text{ mA}$	2.4
				$I_C = 250\text{ mA}$	2.7
				$I_C = 300\text{ mA}$	3
$V_{CE(sat)}$ Collector-emitter saturation voltage	$I_I = 250\text{ }\mu\text{A}$, See Figure 5			$I_C = 100\text{ mA}$	0.9
				$I_C = 200\text{ mA}$	1
				$I_C = 350\text{ mA}$	1.3
I_R Clamp diode reverse current	$V_R = 50\text{ V}$, See Figure 6			50	μA
V_F Clamp diode forward voltage	$I_F = 350\text{ mA}$, See Figure 7		1.7	2	V
C_i Input capacitance	$V_i = 0\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$		15	25	pF

Fonte: TEXAS INSTRUMENTS (2004).

Conforme é possível notar por meio das informações da Figura 43, a aplicação do ULN2803 é suficiente para o acionamento dos *drivers* dos motores, uma vez que ele conta com a capacidade de fornecer até 500 mA de corrente e máximo valor de tensão de 50 V. O circuito para acionamento dos motores utilizando ULN2803 com sinal NPN em 12 V é indicado na Figura 44.

Figura 44 - Circuito de acionamento *drivers* motores



Fonte: Elaboração própria (2025).

O modelo de LED usado no circuito é o padrão escolhido para a placa e os cálculos para o dimensionamento do resistor de 470Ω foram feitos na Tabela 8. O terminal usado para conexão é o **KF2EDGV-3.81-2P** que segundo documento técnico, suporta até 8A de corrente e 300V de tensão.

4.4.2 Acionamentos 12 V via MOSFET

Os demais acionamentos com tensões de 12 V possuem a necessidade de corrente maior que os *drivers* dos motores, conforme indica a Tabela 2. Além disso, existe a necessidade de três saídas reserva que idealmente não podem ficar limitadas a um valor de corrente mais baixo, como é o caso do ULN2803 que limita em 500mA as saídas. Dessa forma, as saídas 12 V possuirão circuitos exclusivos.

O componente escolhido para o circuito de acionamento é o MOSFET modelo **IRFR/U5505**, um MOSFET de canal P com alta capacidade de condução de

corrente. Alguns parâmetros técnicos do componente o valor limite de trabalho estão indicados na Tabela 10.

Tabela 10 - Limites dos parâmetros técnicos dos MOSFET IRFR/U5505

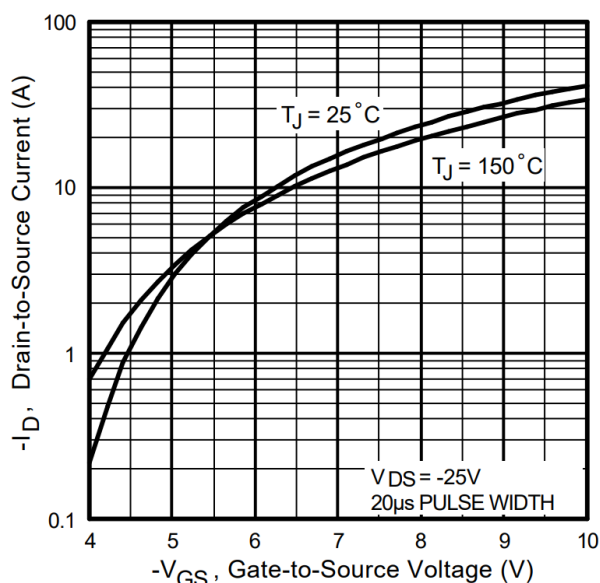
	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ -10\text{V}$	-18	A
$I_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ -10\text{V}$	-11	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	-64	
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	57	W
	Linear Derating Factor	0.45	W/ $^\circ\text{C}$
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy②	150	mJ
I_{AR}	Avalanche Current①	-9.6	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy①	5.7	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	-5.0	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to + 150	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds		
		300 (1.6mm from case)	

Fonte: INFINEON TECHNOLOGIES (s.d.).

Conforme indica a tabela, o IRFR/U5505 possui capacidade de conduzir até 18A com uma tensão $V_{GS} = -10\text{V}$ em 25°C . Por questões de projeto, a saída será indicada para fornecer até 1A, no entanto o projeto do circuito será dimensionado para valores superiores, embora na documentação técnica não ficará aconselhado superar o limite.

Conforme indica a curva da Figura 45, para que o IRFR/U5505 entre em operação, é necessário que seja emitida uma tensão $V_{GS} \leq -4\text{V}$.

Figura 45 - Curva característica dos valores de I_D e V_{GS} do MOSFET IRFR/U5505

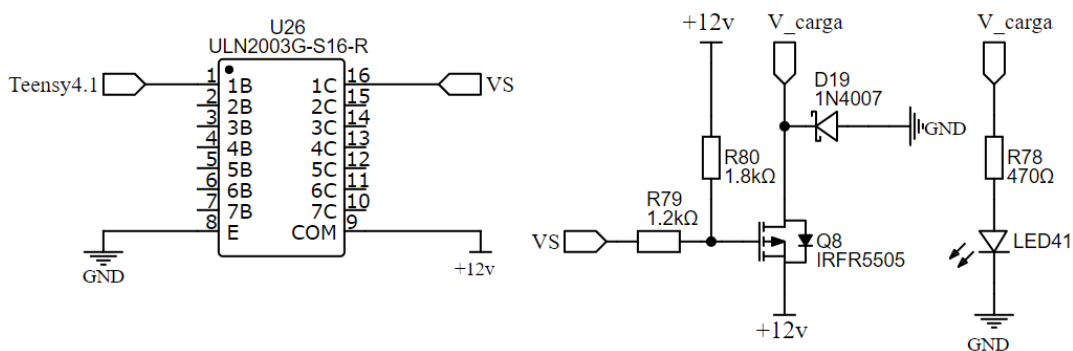


Fonte: INFINEON TECHNOLOGIES (s.d.).

A curva apresentada Figura 45 ilustra como a corrente de dreno (I_D) do MOSFET varia em função da tensão de gate (V_{GS}) sob condições específicas de teste: $V_{DS} = -25\text{ V}$, pulso de $20\text{ }\mu\text{s}$ e temperaturas de junção de $25\text{ }^\circ\text{C}$ e $150\text{ }^\circ\text{C}$. No eixo horizontal, tem-se $-V_{GS}$ (em valores cada vez mais negativos conforme se move para a direita), enquanto o eixo vertical (logarítmico) mostra a corrente de dreno (I_D). Importante notar é que os valores são para pulsos de curta duração e para uma tensão de $V_{DS} = -25\text{ V}$. No caso do projeto, será especificado para que a tensão V_{GS} que irá chavear o MOSFET seja menor que -4 V e possua uma margem para que o circuito forneça até 1 A por saída.

No projeto, para o sinal de chaveamento do *gate* do MOSFET será utilizado um amplificador **ULN2003G** com um divisor de tensão, uma vez que a placa de desenvolvimento escolhida trabalha com sinais de tensão de 3.3 V . O circuito é apresentado na Figura 46.

Figura 46 - Circuito de acionamento para saídas de tensão 12 V.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Conforme ilustrado na Figura 57, o equacionamento da tensão do gate do MOSFET e da tensão entre *gate* e *source* é definido pelas equações (4) e (5).

$$V_g = \frac{V_s * R_{80} + V_{+12v} * R_{79}}{R_{79} + R_{80}} \quad (4)$$

$$V_{gs} = V_g - V_s \quad (5)$$

Onde:

V_g = Tensão no *gate* do MOSFET

R_{79} e R_{80} = Resistores para divisor de tensão

V_{+12v} = Tensão fonte para divisor de tensão

V_s = Tensão de saída transistor ULN2003

Por meio das equações (4) e (5) será possível avaliar os estados de operação do circuito.

Um importante componente no equacionamento é o ULN2003. Suas características são similares ao ULN2803, conforme indica a Tabela 11.

Tabela 11 - Características técnicas ULN2003.

PARAMETER		SYMBOL	RATING	UNIT
Output Sustaining Voltage		V_{OUT}	-0.5~50	V
Input Voltage		V_{IN}	-0.5~30	V
Clamp Diode Reverse Voltage		V_R	50	V
Output Current		I_{OUT}	500	mA / ch
Clamp Diode Forward Current		I_F	500	mA
Power Dissipation	DIP-16	P_D	1.47	W
	SOP-16		1.25 (Note2)	W
	TSSOP-16		0.62	W
Junction Temperature		T_J	+125	°C
Operating Temperature		T_{OPR}	-40~+85	°C
Storage Temperature		T_{STG}	-55~+150	°C

Fonte: SINOTECH MIXIC ELECTRONICS (2014).

O ULN2003 é um transistor Darlington NPN com limite de corrente por saída de até 500 mA. Sua escolha é justificada por possuir sete saídas, sendo essa a

quantidade que a placa precisa para as tensões de 12 V, além do chaveamento NPN que será usado para o acionamento do MOSFET IRFR/U5505.

Os estados de operação do circuito da Figura 46 com a aplicação das equações (4) e (5) estão indicados na Tabela 12.

Tabela 12 – Estado de operação do circuito de acionamento a MOSFET e valores das tensões que o constituem.

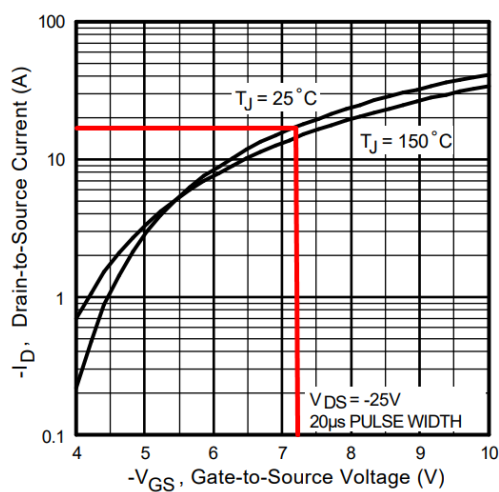
<i>Sinal microcontrolador(V)</i>	<i>V_s(V)</i>	<i>V_{+12V}(V)</i>	<i>V_g(V)</i>	<i>V_{gs}(V)</i>	<i>Estado MOSFET</i>	<i>V_{carga}(V)</i>
3,3	0	12	4,8	-7,2	Ativo	12
0	12	12	12	0	Corte	0

Fonte: Elaboração própria (2025).

Quando sinal do teensy 4.1 é de 3.3 V, o transistor ULN2003 realiza o chaveamento do GND em Vs. Isso faz com que a tensão VGS seja negativa, e conforme a Figura 45, com $V_{GS} \leq -4$ V o MOSFET entra na região ôhmica e conduz corrente, fazendo com que a tensão de 12 V no *source* seja direcionada para carga. Já nas situações onde o microcontrolador não emite sinal, a tensão de 12 V é direcionada diretamente no *gate* do MOSFET, levando $V_{GS}=0$, onde nesse caso, o MOSFET está em corte, desligando o sinal de tensão da carga.

Em relação a corrente fornecida, o circuito está sendo projetado com o objetivo de fornecer até 1 A em 12 V para cada saída, embora com valor de $V_{GS}=-7,2$ V, conforme a Figura 47, a capacidade de condução de corrente está acima de 15 A.

Figura 47 - Curva característica do valor de I_D para $V_{GS} = -7,2V$ do MOSFET IRFR/U5505.

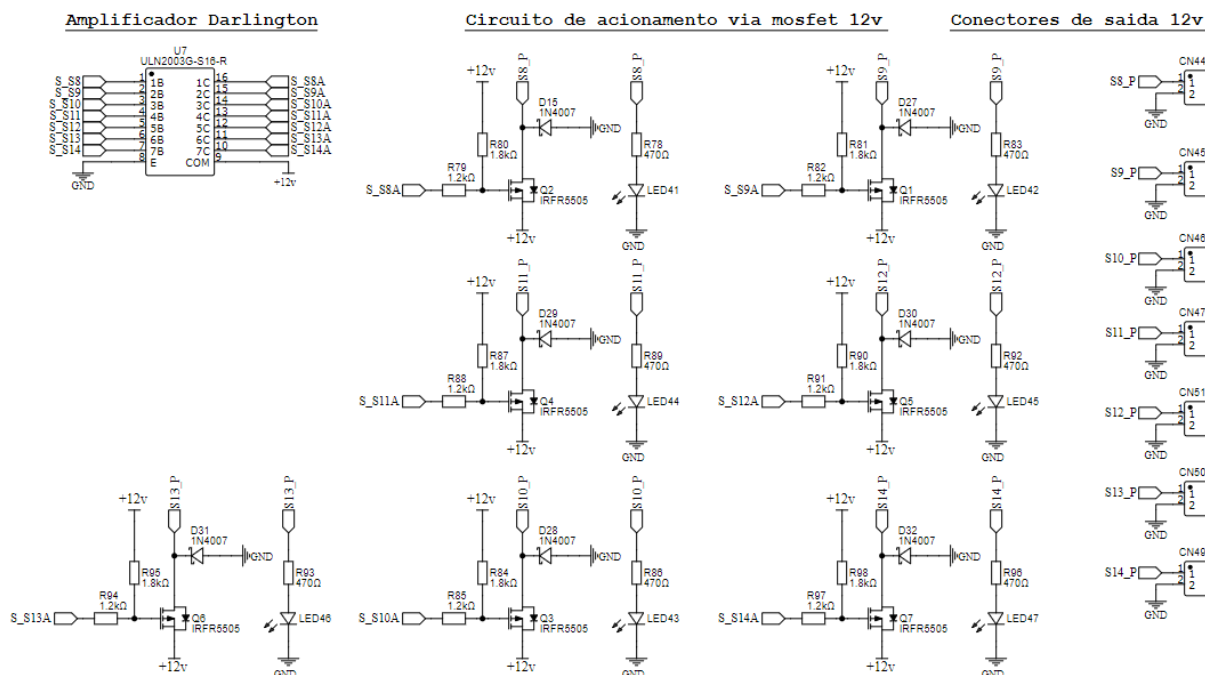


Fonte: INFINEON TECHNOLOGIES (s.d.).

No entanto, conforme já mencionado, a curva considera a tensão de $V_{DS} = -25V$, com um pulso de $20\mu s$ e temperaturas de junção de $25^\circ C$, não sendo essas as condições de operação da placa, porém para aplicação que se propõe o circuito atenderá.

Para as sete saídas de tensão, conforme indica a Figura 48, foi replicado o circuito da Figura 46.

Figura 48 - Circuitos para acionamento de tensão 12 V para 7 saídas.



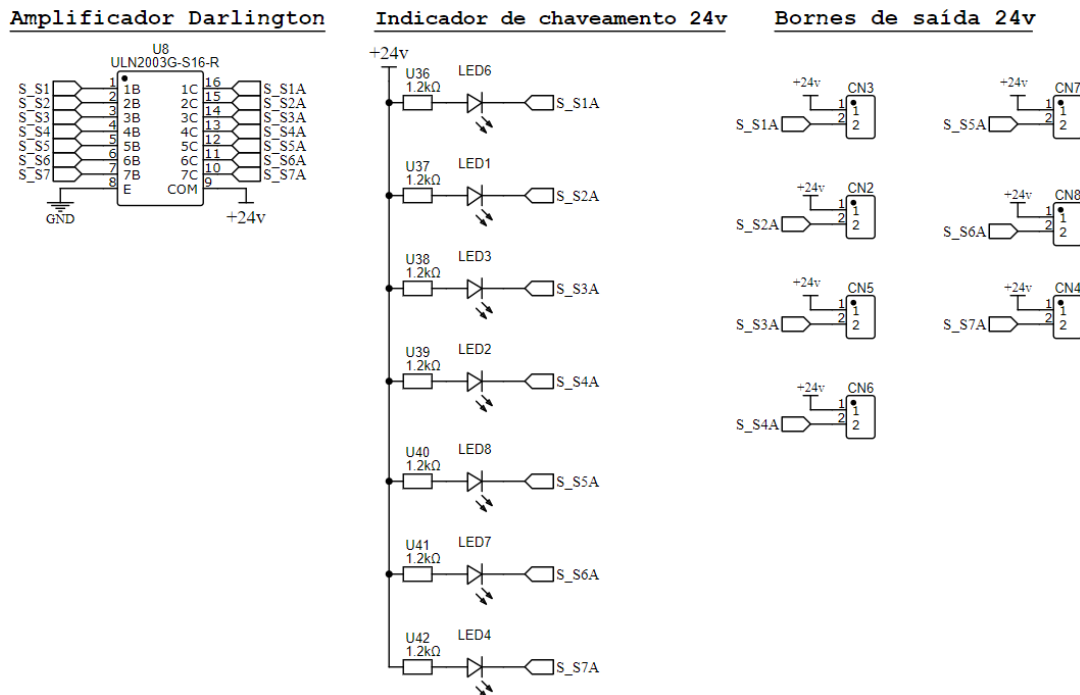
Fonte: Elaboração própria (2025).

O terminal para as saídas foi o mesmo usado para o circuito de acionamento dos *drivers* dos motores. O dimensionamento do resistor para o LED indicativo foi realizado na Tabela 8.

4.4.3 Acionamentos 24 V

Para o projeto, são requisitadas 7 saídas 24 V, de acordo com a Tabela 2. A necessidade de corrente para essas saídas é relativamente baixa, onde o maior valor é 30mA. Dessa forma, será usado o transistor **ULN2003** que conforme a Tabela 11, tem a capacidade de fornecer até 500mA. O circuito será similar ao de acionamentos dos *drivers* dos motores, levando em conta que o transistor e os resistores para os LEDs indicativos são diferentes. O circuito de acionamento projetado é apresentado na Figura 49.

Figura 49 - Circuito de acionamento 24 V para 7 saídas.



Fonte: Elaboração própria (2025).

O dimensionamento dos resistores está de acordo com a Tabela 8. O terminal é o mesmo utilizado nos demais circuitos com duas saídas.

4.4.4 Circuito para acionamento *driver* motor de passo esteira tracionada

Para simplificar o projeto, definiu-se que a esteira tracionada deverá operar de forma independente, sem a necessidade de um circuito dedicado na placa de controle principal. Idealmente, a esteira deve funcionar apenas quando a máquina estiver em operação. Portanto, o acionamento para ligar e desligar a esteira ficará a cargo da placa de controle principal por meio de um relé, enquanto sua operação será autônoma.

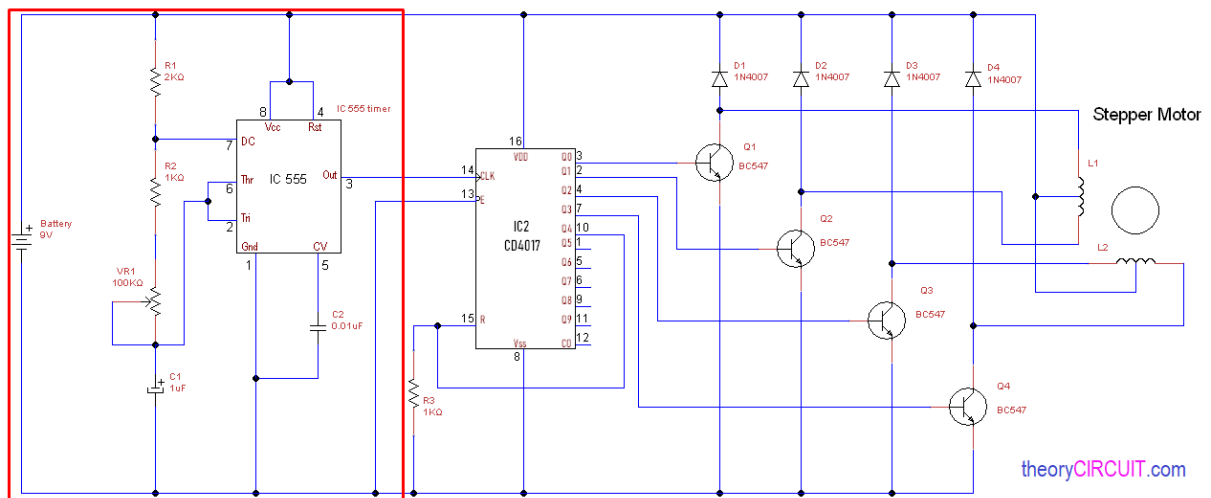
O projetista usou para a esteira um motor de passo **TMA. MPHS. 23020.04**. Para o controle do motor de passo, será usado o *driver* **TMA DMP.556D**.

Com funcionamento similar ao circuito projetado para controle dos motores do robô cartesiano e da mesa indexadora, os sinais de pulso e direção vão ser

aplicados no diretamente no *driver*, porém a diferença é que para a esteira tracionada o sinal de pulso vai ser gerado por uma placa individual com sinal PWM, e a direção será sempre fixa.

Em questão de projeto, buscou-se simplificar ao máximo a solução para sinal PWM da esteira, então foi utilizado um circuito com **oscilador 555**. O circuito utilizado como referência é o apresentado na Figura 50 destacada em vermelho.

Figura 50 - Circuito de referência para controle de motor de passo com oscilador LM555 e CD4017.



Fonte: THEORYCIRCUIT (2018).

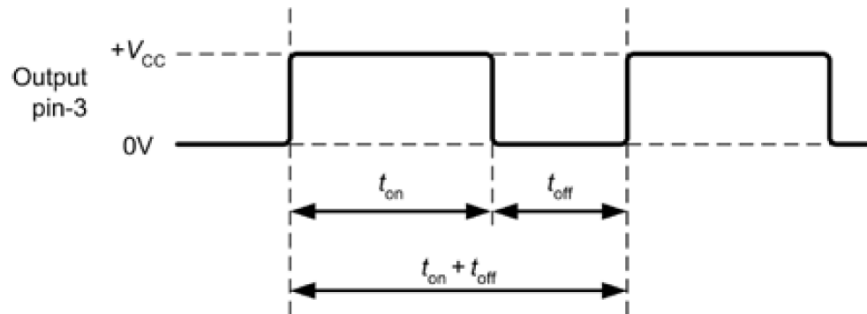
o CI555 na Figura 50 está operando como um multivibrador astável, onde o ajuste do sinal com forma de onda quadrada varia de acordo com a resistência de temporização e tensão no capacitor C1. Para adaptar o circuito a aplicação desejada, em relação a frequência que o sinal será gerado, utiliza-se as equações (6) e (7) para o dimensionamento dos resistores e do potenciômetro (TheoryCircuit, 2018).

$$T = t_{on} + t_{off} \quad (6)$$

$$F \approx \frac{1.44}{(R2+2*VR1)C1} \quad (7)$$

O sinal que se espera que seja gerado, é apresentado na Figura 51 , que ilustra de maneira mais clara t_{on} e t_{off} das equações (6) e (7).

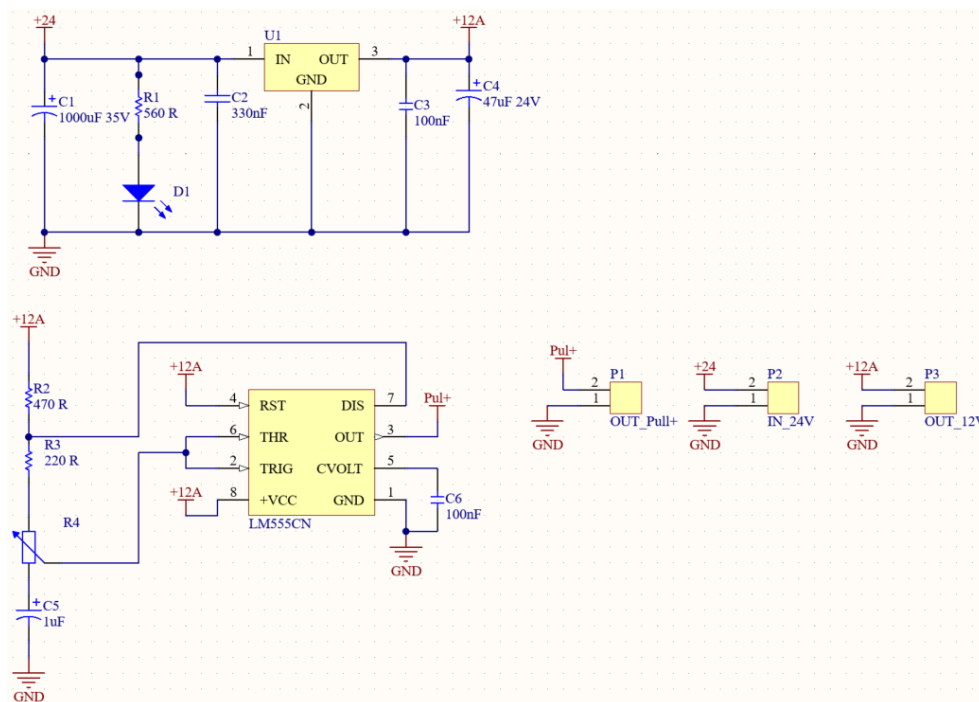
Figura 51 - Forma de onda quadrada emitida por meio do circuito com oscilador 555.



Fonte: TOOLEY (2006).

A velocidade desejada da esteira é em torno de 120 rpm, porém idealmente é necessário que a mesma seja ajustável para permitir adaptações conforme o ritmo da máquina e do processo. Considerando que o *driver* do motor operará na configuração de 400 pulso/rev, e com base nas equações (6) e (7), dimensionou-se o circuito apresentado na Figura 52.

Figura 52 - Circuito gerador de sinal PWM para acionamento do *driver* do motor de passo da esteira tracionada.



Fonte: Elaboração própria (2025).

O *driver* do motor utilizado na esteira trabalha com tensão de 24 V, já o LM555 com 12 V até 15 V de acordo com a Tabela 13.

Tabela 13 – Parâmetros máximos de operação LM555.

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
Output Voltage Drop (High)	$I_{SOURCE} = 200\text{ mA}$, $V_{CC} = 15\text{ V}$		12.5		V
	$I_{SOURCE} = 100\text{ mA}$, $V_{CC} = 15\text{ V}$	12.75	13.3		V
	$V_{CC} = 5\text{ V}$	2.75	3.3		V
Rise Time of Output			100		ns
Fall Time of Output			100		ns

Fonte: TEXAS INSTRUMENTS (2015).

Para que não seja necessário a inclusão de duas fontes externas, conforme indicado na Figura 52, foi utilizado um regulador de tensão **LM7812** com a finalidade de converter 24 V para 12 V.

Tal como apresentado na Tabela 13, o LM555 pode fornecer até 200 mA de corrente na saída com uma tensão de saída por volta de 12.5 V, considerando V_{cc}

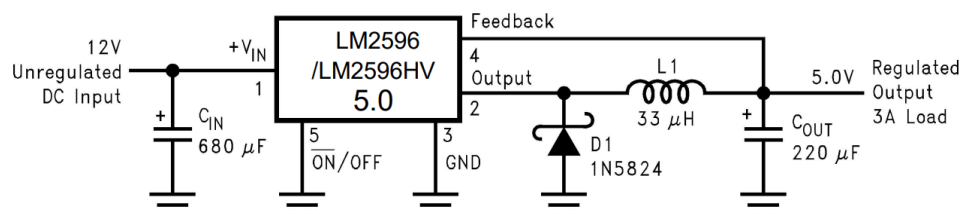
=15 V, que no caso do presente projeto vai ser 12 V, onde ainda assim, a capacidade de fornecimento de corrente será mais que suficiente para a entrada de sinal optoacoplada do *driver* TMA DMP.556D. Logo, o circuito irá operar de maneira com que se espera.

4.5 Circuitos conversores de tensão

A placa de controle principal é alimentada por duas fontes externas: uma de 12 V e 5 A e outra de 24 V e 5 A. No entanto, como o teensy 4.1 opera com uma tensão de 3.3 V, será utilizado um conversor de 12 V para 5 V e outro de 5 V para 3.3 V. Além de fornecer a tensão de 3.3 V, os 5 V gerados também serão utilizados para os LEDs de indicação nos circuitos de entrada de sinal.

Para reduzir a tensão de 12 V para 5 V, será usado o **LM2596S - 5.0** com a configuração sugerida pelo fabricante, conforme exibido na Figura 53.

Figura 53 - Circuito conversor de 12 V para 5 V com LM2596 5.0



Fonte: MSKSEMI (s.d.).

O circuito apresentado na Figura 53 indica o fornecimento de uma corrente de 3A com 5 V regulado, além disso, a Tabela 14 indica que a tensão de entrada do regulador pode variar de 7v até 40v.

Tabela 14 - Valores de operação LM2596-5.0

Symbol	Parameter	Conditions	LM2596 -5.0 LM2596HV -5.0		Units (Limits)
			Typ	Limit	
SYSTEM PARAMETERS (Note 5) Test Circuit <i>Figure 1</i>					
V _{OUT}	Output Voltage	7V ≤ V _{IN} ≤ 40V, 0.2A ≤ I _{LOAD} ≤ 3A	5.0	4.800/4.750 5.200/5.250	V V(min) V(max)
η	Efficiency	V _{IN} = 12V, I _{LOAD} = 3A	80		%

Fonte: MSKSEMI (s.d.).

Já para a redução da tensão de 5 V para 3.3 V, foi utilizado o **LM1117MPX-33NOPB**, onde os valores máximos e mínimos de tensão e corrente são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Parâmetros máximos e mínimos de operação LM1117MPX-33NOPB

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Reference Voltage, Adjustable Output Devices (V _{in} -V _{out} = 2.0 V, I _{out} = 10 mA, T _A = 25°C) (V _{in} -V _{out} = 1.4 V to 10 V, I _{out} = 10 mA to 800 mA) (Note 4)	V _{ref}	1.238 1.225	1.25 –	1.262 1.270	V
Output Voltage, Fixed Output Devices 1.8 V (V _{in} = 3.8 V, I _{out} = 10 mA, T _A = 25 °C) (V _{in} = 3.2 V to 11.8 V, I _{out} = 0 mA to 800 mA) (Note 4)	V _{out}	1.782 1.755	1.800 –	1.818 1.845	V
2.5 V (V _{in} = 4.5 V, I _{out} = 10 mA, T _A = 25 °C) (V _{in} = 3.9 V to 10 V, I _{out} = 0 mA to 800 mA,) (Note 4)		2.475 2.450	2.500 –	2.525 2.550	
3.3 V (V _{in} = 5.3 V, I _{out} = 10 mA, T _A = 25 °C) (V _{in} = 4.75 V to 10 V, I _{out} = 0 mA to 800 mA) (Note 4)		3.267 3.235	3.300 –	3.333 3.365	

Fonte: MSKSEMI (s.d.).

Nota-se através da Tabela 14 e da Tabela 15 que os reguladores oferecem níveis de tensão de saída conforme o projeto necessita.

Os valores aproximados de corrente consumida, dos circuitos que os conversores de tensão vão alimentar é apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Consumo individual componentes em 5 V e 3.3 V

Nível de tensão(V)	Componente	Consumo(mA)	Quantidade	Consumo total(mA)
3.3	Microcontrolador - <i>Teensy 4.1</i>	100	1	100
	<i>Shift register</i> - 74HC595D-Q100	20	2	40
5.0	Conversor de tensão DC-DC - LM1117	10	1	10
	LED de sinalização entrada de sinal - MHT170CGCT	20	24	480
Total (mA) : 630				

Fonte: Elaboração própria (2025).

Conforme é possível notar na Tabela 16, considerando uma situação de acionamento de todos os componentes, sendo essa uma situação que não irá ocorrer, ambos os circuitos possuem capacidade de suprir os valores de corrente visto que se encontra dentro dos limites para o LM1117MPX-33NOPB e para o LM2596S - 5.0.

A fonte externa que será usada para alimentar a placa de controle principal em 12 V é a **EFM1210**. Suas características técnicas são apontadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Informações técnicas fonte 12 V 10A EFM1210 - Intelbras

Entrada	
Tensão nominal	110 ~ 240 Vca
Variação máxima de tensão	90 ~ 264 Vca
Corrente máxima	3 A (com tensão e cargas nominais)
Frequência de rede elétrica	50 ou 60 Hz
Variação máxima na frequência da rede elétrica	47 a 63 Hz
Saída	
Tensão nominal	12,8 Vcc
Variação da tensão	11,5 a 13,8 Vcc
Corrente	Mínima: 0 A Máxima: 10 A
Potência	Sem carga: 1,2 W máximo Carga nominal: 128 W

Fonte: INTELBRAS (s.d.).

Já a fonte que alimentará os circuitos em 24 V é a **EFM2405 G2**. O detalhamento técnico de alguns parâmetros de operação da fonte é apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Informações técnicas fonte 24 V 5 A EFM2405 - Intelbras

Entrada	
Tensão nominal	100 ~ 240 Vac
Variação máxima de tensão	90 ~ 264 Vac
Corrente máxima	3,0 A máximo (com tensão e cargas nominais)
Frequência de rede elétrica	50 ou 60 Hz
Variação máxima na frequência da rede elétrica	47 a 63 Hz
Saída	
Tensão nominal	24 Vdc
Variação da tensão	23 – 25,5 Vdc
Corrente	Mínima: 0 A Máxima: 5 A
Potência	Sem carga: 1,0 W máximo Carga nominal: 120 W

Fonte: INTELBRAS (s.d.).

Nota-se através da Tabela 17, que o valor máximo de corrente que fonte tem capacidade de fornecer é de 10 A. Já a fonte de 24 V, de acordo com a Tabela 18, conta com a capacidade de 5 A.

A placa de controle principal não foi projetada para acionar cargas de alto consumo, mas sim para gerenciar o controle da máquina do projeto em questão. A maioria das saídas exige correntes relativamente baixas. No entanto, para garantir a certificação do estado operacional em relação ao consumo de corrente das fontes de 12 V e 24 V, a Tabela 19 apresenta uma estimativa detalhada do consumo exigido pelos componentes.

Tabela 19 - Consumo por parte dos componentes das fontes de 12 V e 24 V

Nível de tensão(V)	Componente	Consumo(mA)	Quantidade	Consumo total(mA)
3.3	Microcontrolador - <i>Teensy 4.1</i>	100	1	100
	<i>Shift register</i> - 74HC595D-Q100	20	2	40
5.0	Conversor de tensão DC-DC - LM1117	10	1	10
	LED de sinalização entrada de sinal - MHT170CGCT	20	24	480
	Pulso - Movimentação motores	20	4	80
12	Direção - Movimentação motores	20	4	80
	Válvula pneumática	250	3	750
	Laser eletrônico	300	1	300
	LEDs de sinalização	20	15	300
Consumo Total(mA)				2140

Nível de tensão(V)	Componente	Consumo(mA)	Quantidade	Consumo total(mA)
24	Entradas optoacopladas	50	23	1150
	Torre luminosa	120	1	120
	Relés	20	2	40
	LEDs de sinalização	20	7	140
	Alimentação sensores	9	20	180
	Alimentação bimanual	50	2	100
Consumo Total(mA)				1730

Fonte: Elaboração própria (2025).

Nota-se que o cenário da Tabela 19 é um caso atípico onde todos os componentes estariam em operação, sendo esse um cenário que não irá acontecer. De qualquer modo, ambas as fontes possuem margem para trabalhar com segurança.

Referente as saídas de sinal reserva, a Tabela 20 indica os valores máximos recomendados.

Tabela 20 - Valores de tensão e corrente saídas reservas.

Dispositivo	Componente	Tensão(V)	Corrente(mA)	Aplicação
Reserva		12,00	1000	Reserva 1
		12,00	1000	Reserva 2
		12,00	1000	Reserva 3
		24,00	500	Reserva 4

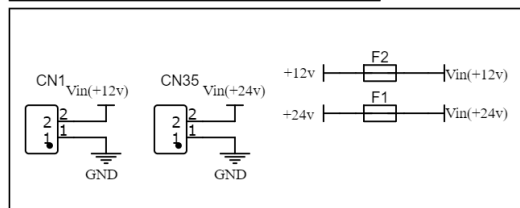
Fonte: Elaboração própria (2025).

Ainda que todas as saídas reservas sejam acionadas simultaneamente, as fontes ainda operariam com margem de segurança. No entanto, será recomendado no documento técnico da máquina que, caso as saídas reservas sejam utilizadas simultaneamente e em seus valores máximos recomendados, seja avaliada a possível queda de tensão da fonte. Se necessário, deve-se ajustar o nível de tensão por meio do *trimpot* disponível na fonte.

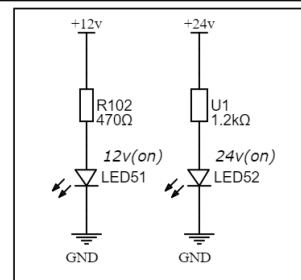
Com base nas avaliações realizadas e configurações de circuitos apresentadas, tem-se na Figura 54 os circuitos projetados para utilização como conversor de tensão 12 V para 5 V e 3.3 V.

Figura 54 – Entrada de alimentação da placa de controle principal em conjunto com os circuitos conversores de tensão e indicadores de estado.

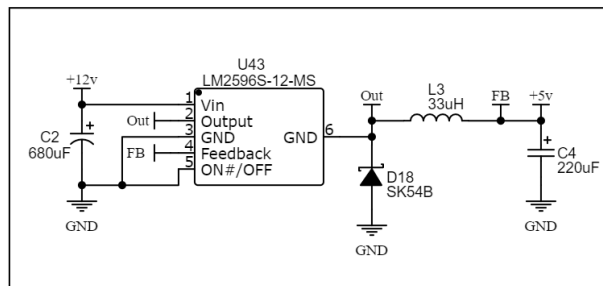
Entradas de alimentação



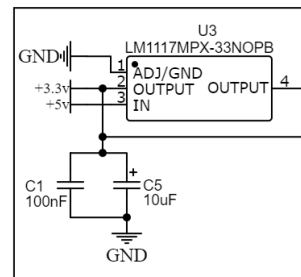
Indicadores de estado 24v e 12v



Conversor de tensão 12v p/ 5v



Conversor de tensão 5v p/ 3.3v

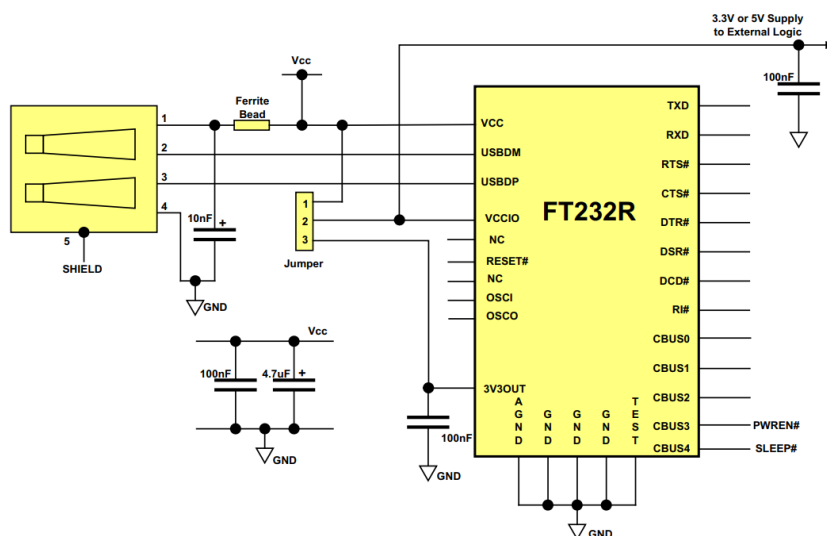


Fonte: Elaboração própria (2025).

4.6 Módulo para conexão USB

Conforme apresentado na Figura 36, a placa de controle principal se comunicará com o computador via comunicação serial por meio do protocolo UART. Embora o teensy 4.1 possua um conector próprio para conexão serial MICRO-USB, deixar o cabo conectado diretamente não é uma boa prática pois movimentações do cabo podem vir a causar instabilidade na conexão e até mesmo danos mecânicos a placa de desenvolvimento. Logo, para evitar uma conexão direta, usa-se o circuito de referência do *datasheet* do **FT232R**, apresentado na Figura 55.

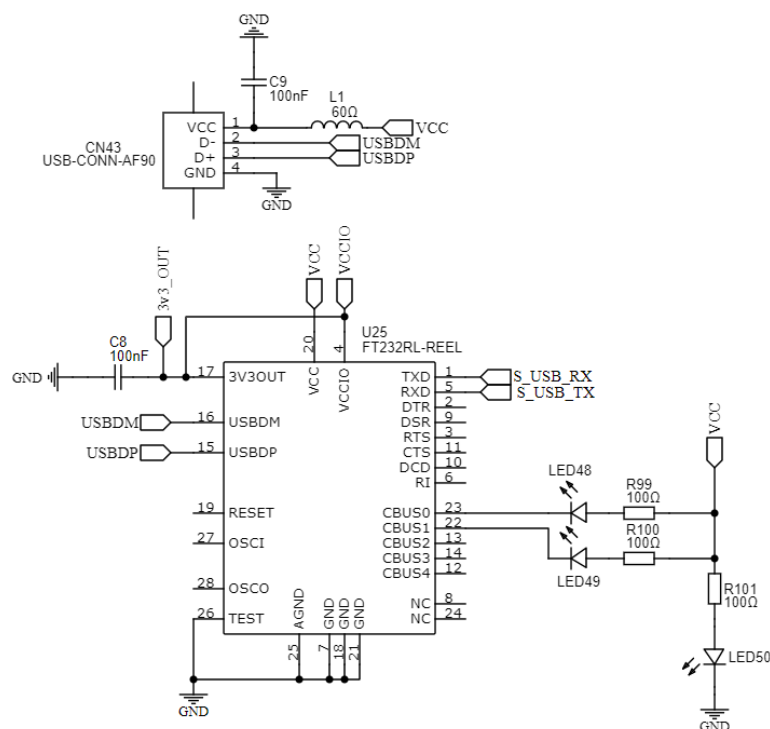
Figura 55 - Circuito de interface de USB para UART da placa de desenvolvimento.



Fonte: FTDI (2005).

Conforme apresentado na Figura 55, o FT232R se comunica com o teensy 4.1 via I/O. Para conexão com o computador, usa-se um conector USB. O circuito projetado é exibido na Figura 56.

Figura 56 - Circuito de interface USB para UART da placa de desenvolvimento com FT232



Fonte: Elaboração própria (2025).

Para que seja possível ver o dispositivo em operação, foram inseridos os LEDs 48 e 49 nos sinais de TX e RX, além do LED 50 para indicação de alimentação.

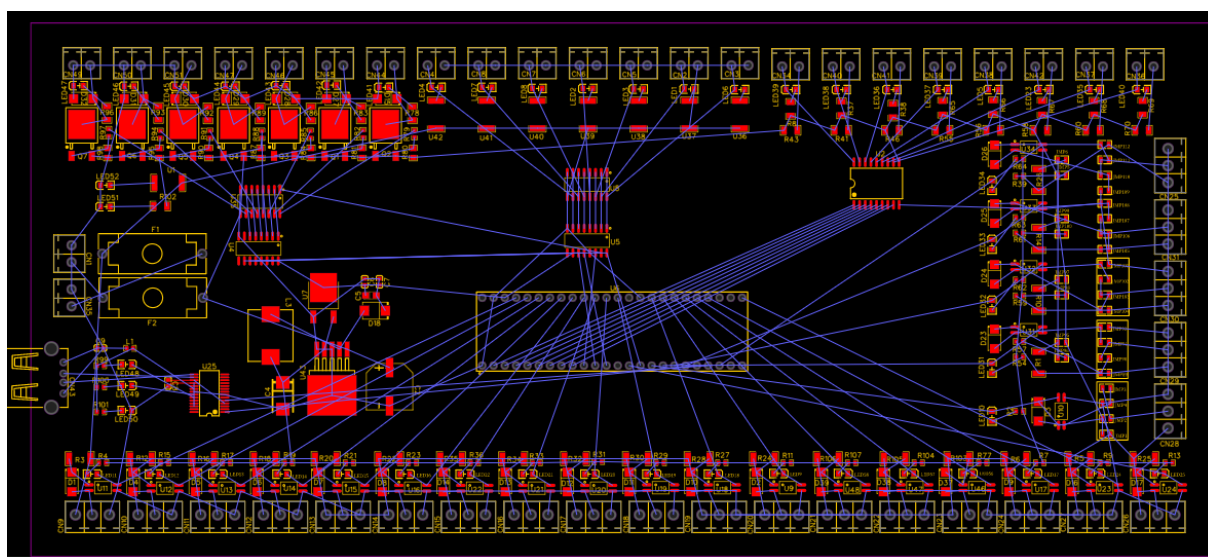
5. PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

Após a definição de todos os circuitos que compõem a placa, iniciou-se o desenvolvimento do design da placa de circuito impresso. A maioria dos componentes selecionados para o projeto são do tipo SMD, exceto os terminais de conexão, que precisam ser PTH (*Plated Through-Hole*).

5.1 Visão geral do layout: Planejamento de configuração

Durante a confecção do *design*, os componentes foram organizados em circuitos individuais, conforme ilustrado na Figura 57.

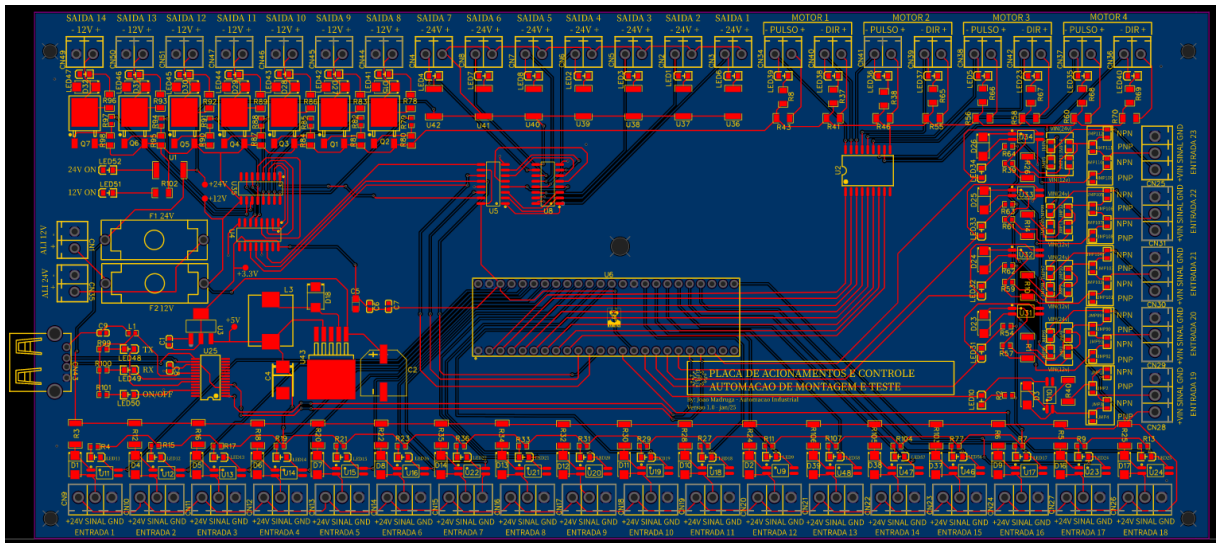
Figura 57 – Posicionamento dos componentes da placa de controle principal



Fonte: Acervo do autor (2025).

Para simplificar as conexões, conforme nota-se na Figura 57, os componentes foram posicionados para atender a usabilidade da placa e facilitar o processo de roteamento (conexão das trilhas em azul). Em seguida, foram realizadas as conexões de forma manual, como apresentado na Figura 58.

Figura 58 - Placa de controle principal com as trilhas de conexão concluídas.

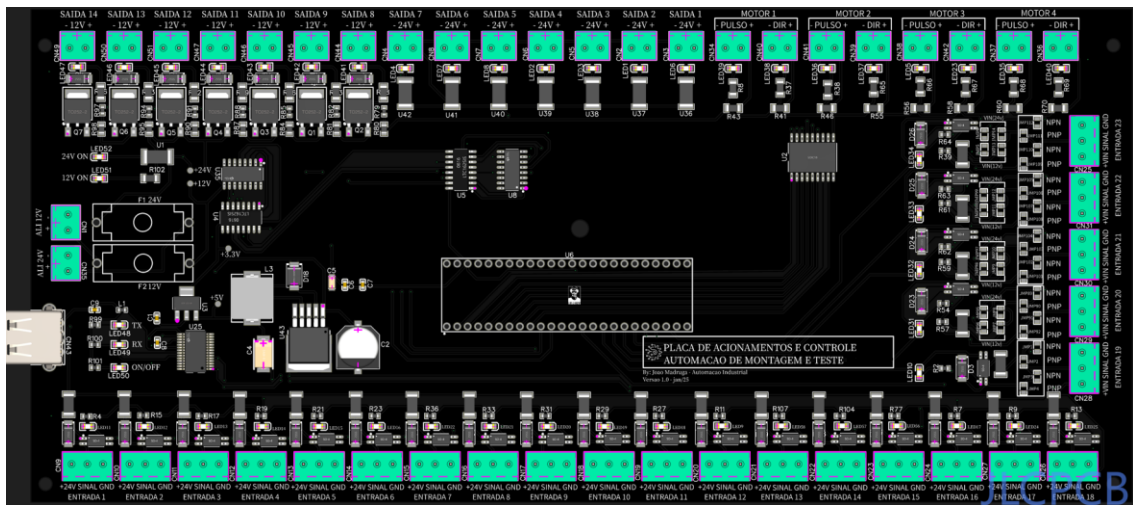


Fonte: Acervo do autor (2025).

Na Figura 58, é possível observar que existem trilhas em vermelho e em azul escuro. Em vermelho são as conexões na parte *Top Layer* (Camada superior) e em azul escuro é a parte *Bottom Layer* (Camada inferior). A presença das duas camadas é fundamental para simplificar o processo de roteamento, uma vez que em certos pontos da placa, para não haver encontro de trilhas, usa-se o artifício de passar uma trilha para parte de baixo e outra para cima. O GND (*Ground*) é comum a todos os componentes e níveis de tensão da placa. Para reduzir o número de trilhas, foi utilizada a malha de cobre da placa nas áreas sem trilhas como GND.

Após a realização do processo de roteamento das trilhas, o projeto foi concluído conforme apresentado na Figura 59.

Figura 59 - Projeto final da placa de controle principal.

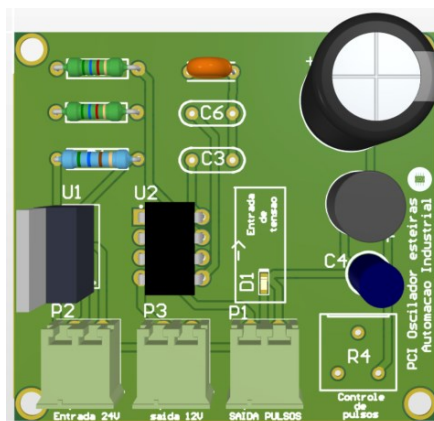


Fonte: Acervo do autor (2025).

Conforme ilustrado na Figura 59, esta versão da placa não possui o teensy 4.1, pois ele será inserido separadamente. Além disso, os terminais de conexão foram posicionados de forma estratégica para otimizar a usabilidade da placa. Na parte superior, encontram-se as saídas de sinal de 12 V, 24 V, pulso e direção. À direita, estão localizadas as entradas de sinal configuráveis, enquanto à esquerda ficam a conexão USB para o teensy 4.1 e as entradas de alimentação de 12 V e 24 V. Assim que concluído o projeto, foi gerado a solicitação de serviço para confecção da placa e montagem dos componentes SMD.

A placa de controle da esteira tracionada foi projetada utilizando outro software de projeto. A com base no circuito apresentado na Figura 52, a versão final da placa é apresentada na Figura 60.

Figura 60 – Projeto final placa de controle para esteira tracionada com LM555.



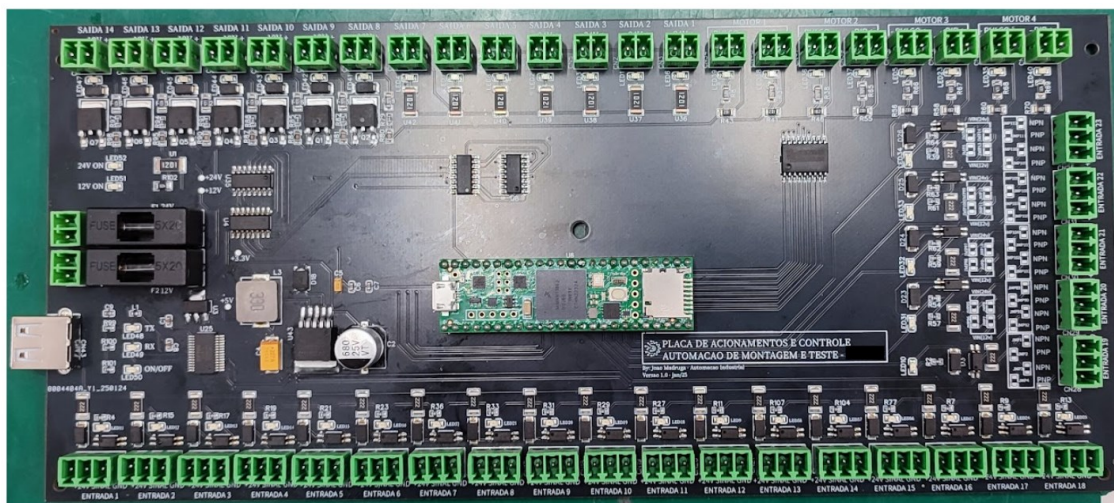
Fonte: Acervo do autor (2025).

Para a placa em questão, o objetivo era que o *hardware* fosse algo compacto com função *plug and play*. Referente a confecção, o serviço foi gerado para um fabricante sem o processo de montagem, por esse motivo, para facilitar a soldagem manual, os componentes usados são PTH.

5.2 Inspeções das placas após processo de confecção

A placa de controle principal chegou de acordo com as especificações do projeto. Os terminais PTH das saídas e entradas de sinal foram soldados manualmente, em conjunto com o porta fusível e os conectores para o teensy 4.1, como é indicado na Figura 61.

Figura 61 - Placa de controle principal montada.



Fonte: Acervo do autor (2025).

A placa de controle principal chegou de acordo com as especificações do projeto. Porém, durante a inspeção verificou-se que dois componentes haviam sido inseridos no projeto com identificação incorreta e foi possível realizar a substituição pelas versões corretas.

Como já mencionado anteriormente, a placa para acionamento da esteira tracionada foi confeccionada em outro fabricante e seus componentes foram soldados manualmente. A placa completa é apresentada na Figura 62.

Figura 62 - Placa de controle para esteiras tracionadas montada.



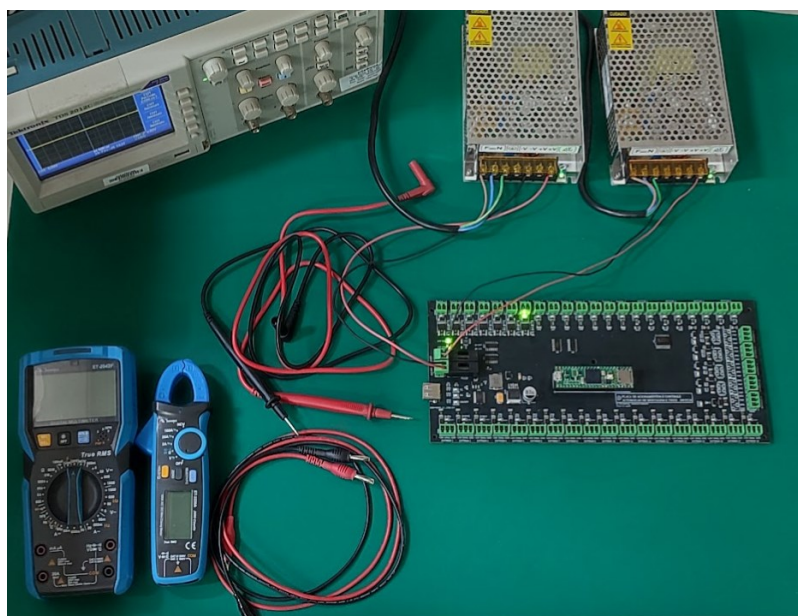
Fonte: Acervo do autor (2025).

Conforme é possível notar através da Figura 62, um detalhe que não estava presente na parte de projeto é o *trimpot* (componente azul) usado para realizar o ajuste da largura dos pulsos PWM que a placa fornece ao *driver* do motor de passo da esteira.

5.3 Testes funcionais em bancada – Placa de controle principal

Para os testes foi usado o osciloscópio **TDS 2012C**, o multímetro **ET-2042F** e o amperímetro **ET-3320A**, as fontes de alimentação de 12 V e 24 V que serão usadas no projeto e a placa de controle principal, conforme apresentado na Figura 63.

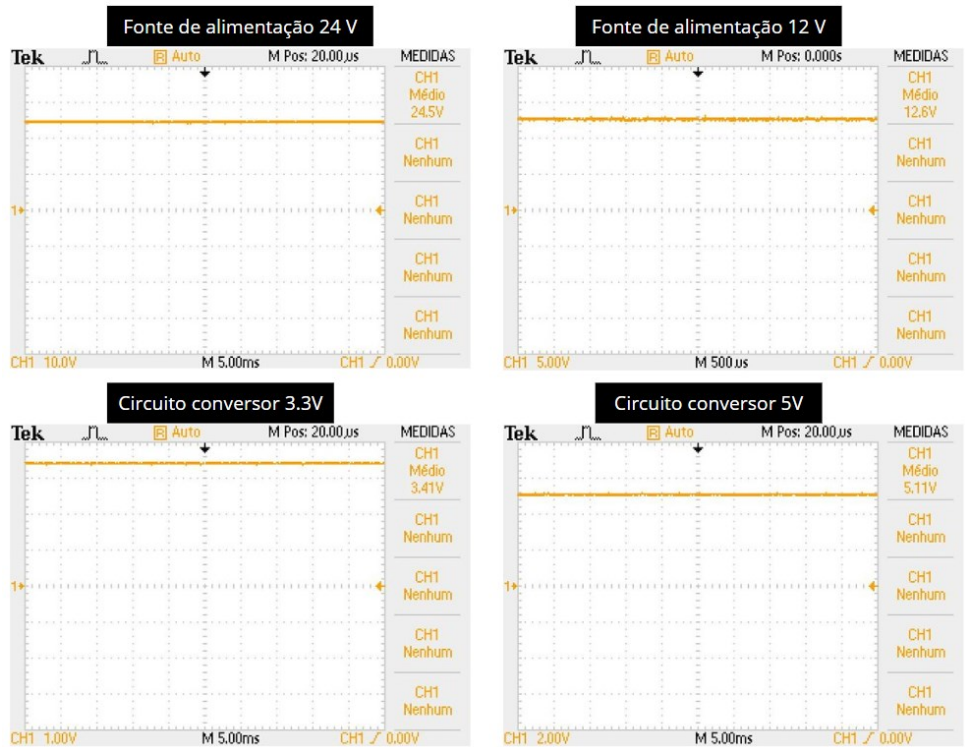
Figura 63 - Equipamentos usados para os testes funcionais.



Fonte: Acervo do autor (2025).

A primeira aferição a ser feita é a de alimentação da placa. As tensões de saídas das fontes foram ajustadas para 12.5 V e 24.5 V e as medidas realizadas, em conjunto com as dos circuitos conversores de tensão de 5 V e 3.3 V, são indicadas na Figura 64.

Figura 64 - Medições níveis de tensão saída das fontes de 12 V e 24 V, circuitos conversores de 5 V e 3.3 V.

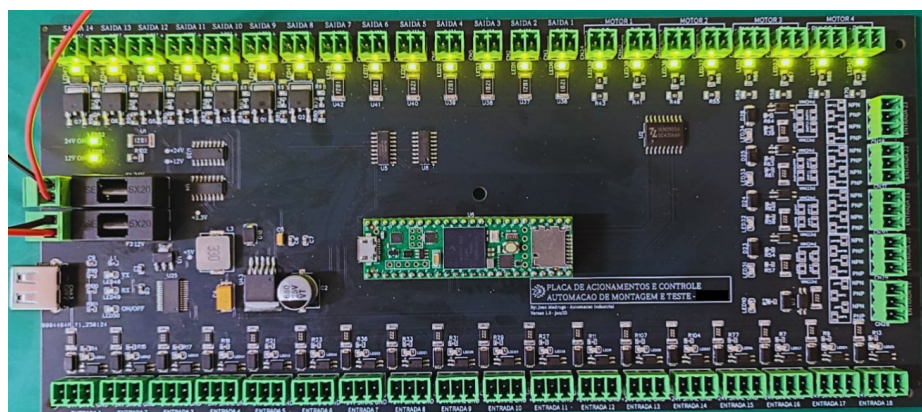


Fonte: Elaboração própria (2025).

Observando os valores medidos apresentados na Figura 64, nota-se que os valores de tensão estão dentro do que se espera, uma vez que as fontes foram ajustadas para um valor 500 mV acima com a finalidade de compensar possíveis quedas de tensão.

O primeiro teste de funcionamento das saídas de sinal foi realizado acionando simultaneamente todas as saídas da placa, e avaliando se os LEDs indicadores acenderiam, conforme indicado na Figura 65.

Figura 65 - Todas as saídas de sinal da placa acionadas.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Conforme é possível notar, todas as saídas foram acionadas como se esperava.

O primeiro teste individual realizado, foi para as saídas de pulso e direção que vão acionar os *drivers* dos motores. O programa que foi usado no teste é apresentado na Figura 66.

Figura 66 - Programa para teste saída de sinal para controle de pulso e direção dos motores.

```
1 // Definição dos pinos
2 const int pulsePin = 6; // Pino de saída para pulsos (passos)
3 const int dirPin = 7; // Pino de saída para direção
4
5 void setup() {
6 // Configura os pinos como saída
7 pinMode(pulsePin, OUTPUT);
8 pinMode(dirPin, OUTPUT);
9 }
10
11 void loop() {
12 digitalWrite(pulsePin,HIGH);
13 digitalWrite(dirPin,HIGH);
14 delay(50);
15 digitalWrite(pulsePin,LOW);
16 digitalWrite(dirPin,LOW);
17 delay(50);
18 }
```

Fonte: Elaboração própria (2025).

O programa ligará as saídas de pulso e direção por 50ms e desligar por 50ms, gerando um período de 100ms com valor máximo por volta de 12 V. A forma de onda gerada na saída de pulso é apresentada na Figura 67.

Figura 67 - Forma de onda da saída de sinal de pulso 12 V.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Nota-se que a forma de onda gerada é o que se esperava na saída, com um período de 104ms. O valor de pico está em 12.2 V, sendo esse um valor aceitável para acionamento dos *drivers* dos motores.

O teste realizado na sequência foi para as saídas de sinal 24 V, onde tanto essas saídas quanto as de 12 V a MOSFET dependem do funcionamento do circuito com *shift register*. O programa utilizado para teste é apresentado na Figura 68.

Figura 68 - Programa desenvolvido para teste do circuito com *shift register* e saídas de 24 V.

```

1 // Definição dos pinos
2
3 int saida1_24v = 2; // pino saida 24v
4 int saida8_12v = 1; // pino saida 12v
5 #include <MsTimer2.h>
6 #define LATCH 10
7 #define CLK 9
8 #define DATA 8
9
10 boolean saidas[] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
11
12 void atualiza_saida(int saida, boolean estado){
13     saidas[16 - saida] = estado;
14     digitalWrite(LATCH, LOW);
15     delay(1);
16     for(int i=0; i < 16; i++){
17         digitalWrite(CLK, LOW);
18         //delay(1);
19         digitalWrite(DATA, saidas[i]);
20         //delay(1);
21         digitalWrite(CLK, HIGH);
22         //delay(1);
23     }
24     digitalWrite(LATCH, HIGH);
25     delay(1);
26 }
27
28 void zera_saidas(){
29     digitalWrite(LATCH, LOW);
30     delay(1);
31     for(int i=0; i < 16; i++){
32         saidas[i] = 0;
33         digitalWrite(CLK, LOW);
34         delay(1);
35         digitalWrite(DATA, LOW);
36         delay(1);
37         digitalWrite(CLK, HIGH);
38         delay(1);
39     }
40     digitalWrite(LATCH, HIGH);
41     delay(1);
42 }
43
44 void setup() {
45     // Configura os pinos como saida
46     zera_saidas();
47     pinMode(LATCH, OUTPUT);
48     pinMode(CLK, OUTPUT);
49     pinMode(DATA, OUTPUT);
50 }
51
52 void loop() {
53     atualiza_saida(saida1_24v, 1);
54 }

```

Fonte: Elaboração própria (2025).

Passando o *software* para o teensy 4.1, o valor medido referente a saída de sinal 24 V acionada por meio do transistor ULN2003 é apresentada na Figura 69.

Figura 69 - Medições saída de 24 V por meio do transistor ULN2003.

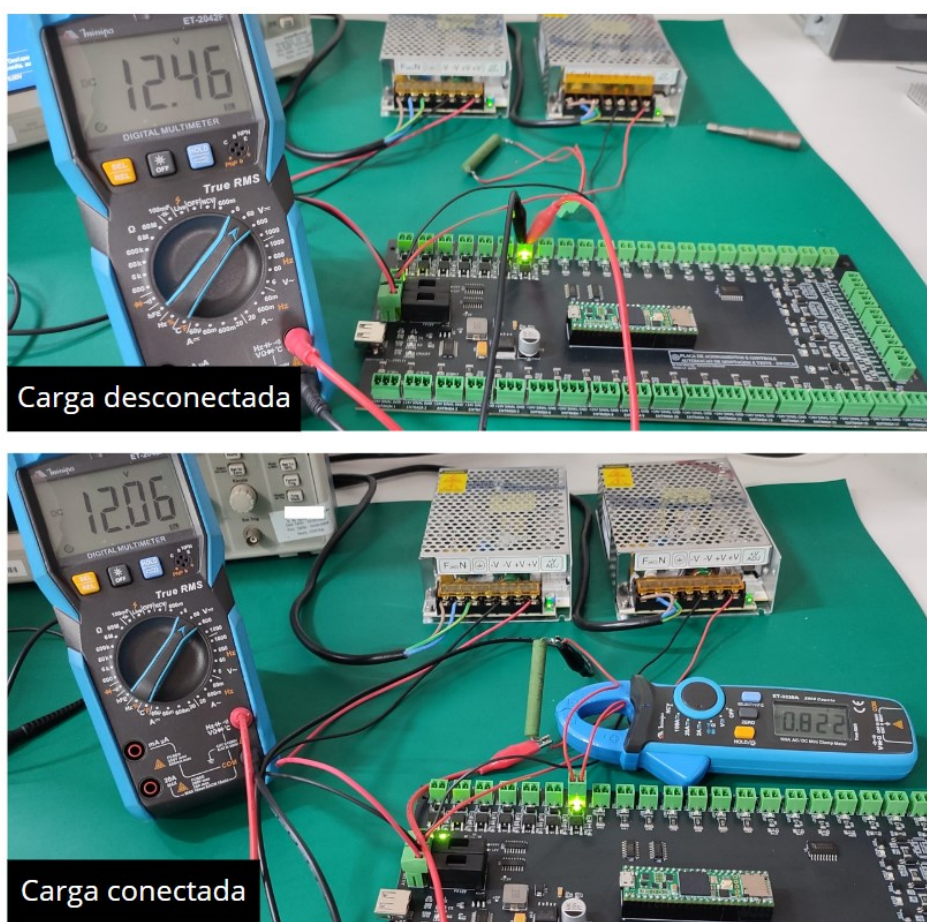


Fonte: Elaboração própria (2025).

É possível perceber através da Figura 69, que o valor medido é exatamente o mesmo da fonte de 24 V, levando em consideração que não existe carga conectada na saída, era o que se esperava.

As saídas de pulso e direção para acionamento dos *drivers* dos motores não vão consumir valores maiores de 20mA, e as saídas 24 V estão limitadas em 500 mA. As saídas reservas acionadas via MOSFET foram projetadas para fornecer valores de corrente até 1A individualmente. Para avaliar a resposta da saída, foi possível realizar testes consumido até 800mA com uma carga de 15ohm e 20w de uma saída individual e monitorando a tensão na saída. O resultado obtido é apresentado na Figura 70.

Figura 70 - Teste de carga na saída de sinal de 12 V acionada via MOSFET.



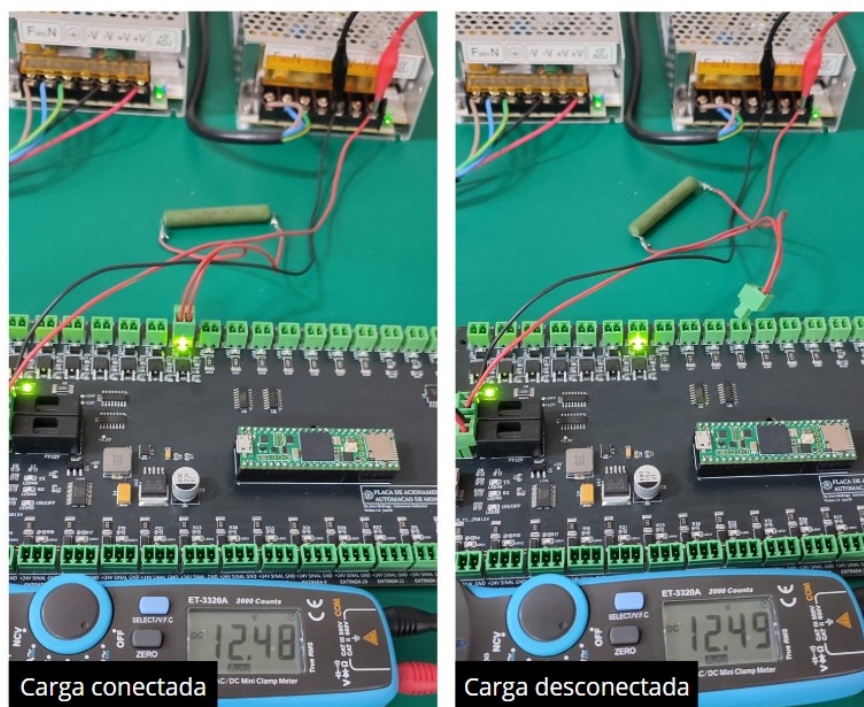
Fonte: Acervo do autor (2025).

Percebe-se através da Figura 70, que a corrente de saída, com a carga conectada, está em torno de 822 mA e a tensão de saída 12.06 V. Sem carga, a saída disponibiliza 12.46 V. Nota-se que ocorreu uma queda de tensão na saída de 400mV que equivale a aproximadamente de 3.2%, que possível ocorre devido a largura das

trilhas que foram usadas no projeto de 0,254mm. Trilhas maiores iriam oferecer uma resistência menor, porém a critério de projeto, esse valor de queda de tensão não é preocupante.

Como a fonte que alimenta a carga é a mesma que fornece tensão para os circuitos conversores, foi avaliado o impacto no valor da queda de tensão devido a inserção da carga. A Figura 71, apresenta os valores de tensão medidos na saída da fonte de 12 V, com e sem carga na saída de sinal de 12 V acionada via MOSFET.

Figura 71 - Valores de tensão medidos na saída da fonte de 12 V, com e sem carga na saída de sinal de 12 V acionada via MOSFET.

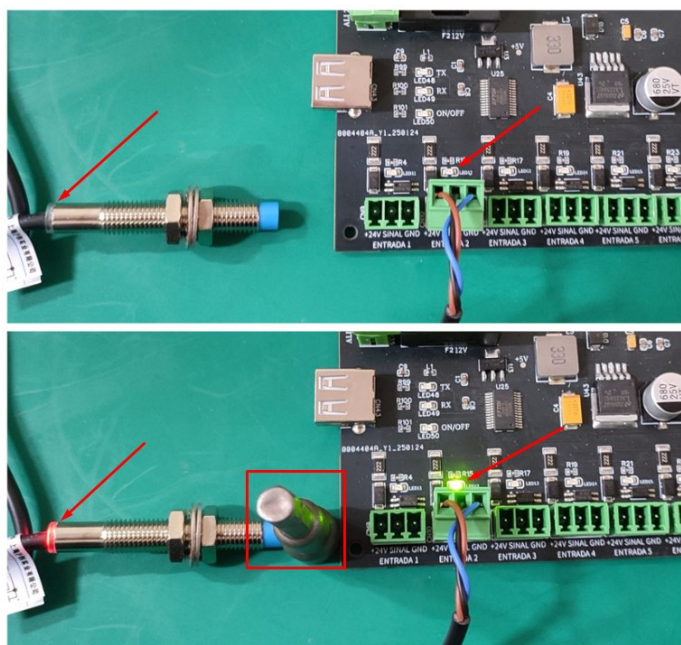


Fonte: Acervo do autor (2025).

De acordo com os resultados obtidos, é possível notar que mesmo a saída de sinal consumindo um valor considerável de corrente com a carga, a fonte apresentou uma queda de tensão de 0,01 V, o que não gera preocupações referente a operação da placa.

O teste para entrada de sinal foi realizado com chaveamento NPN através de um sensor indutivo que será utilizado no projeto. A Figura 72 apresenta o resultado do teste.

Figura 72 – Teste prático com sensor indutivo para validação da entrada de sinal com optoacoplador.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Por meio da Figura 72, nota-se que o acionamento do optoacoplador ocorre quando o sensor detecta a peça metálica, como o esperado.

5.4 Testes funcionais – Placa de controle esteiras tracionadas

A placa de controle da esteira tracionada foi testada estando instalada no dispositivo. Conforme exibido na Figura 73, as conexões elétricas e a placa eletrônica ficaram instaladas internamente na esteira para otimizar o espaço e minimizar a quantidade de fios.

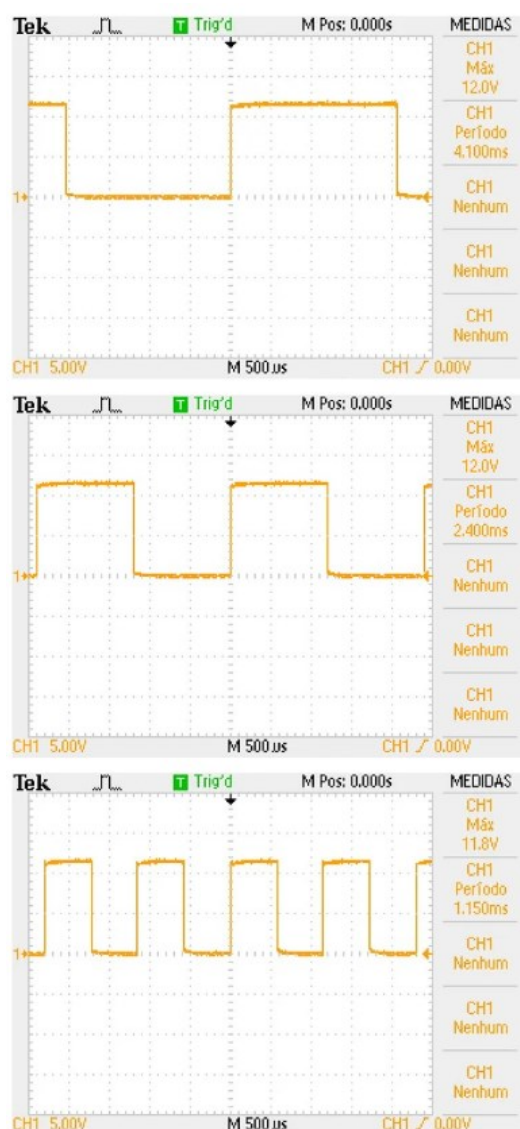
Figura 73 - Conexões elétricas esteira tracionada.



Fonte: Acervo do autor (2025).

As medições realizadas foram feitas no terminal de saída do sinal que aciona o *driver* do motor de passo. Como pode ser visto na Figura 74, através da variação do período do sinal, o ajuste com o *trimpot* funcionou como esperado e possibilitou que a esteira operasse de forma satisfatória.

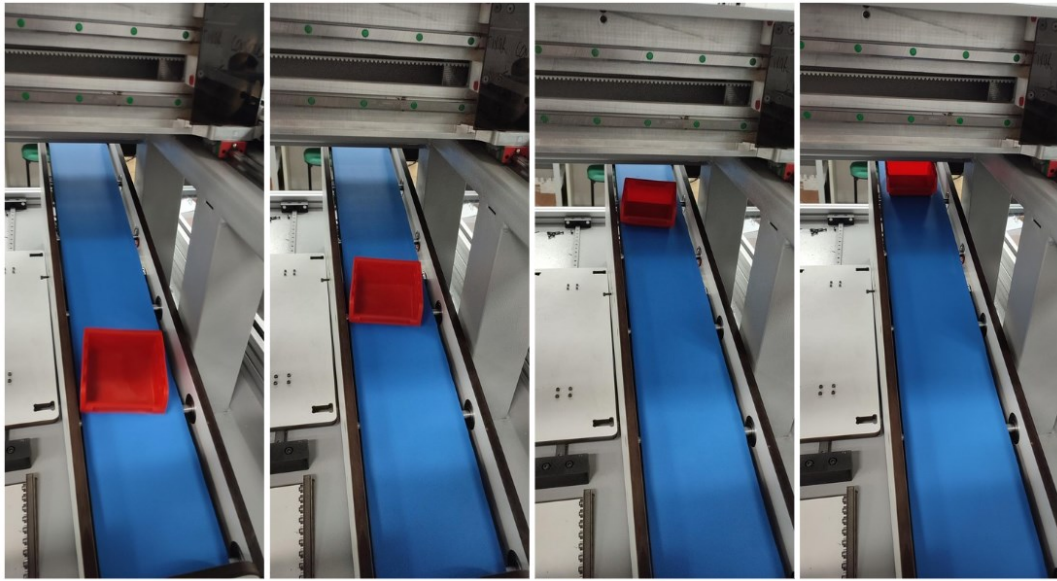
Figura 74 - Medidas sinal de controle *driver* motor de passo.



Fonte: Elaboração própria (2025).

A forma de onda com período de 1.150 ms, apresentada na Figura 74, é o sinal usado para esteira trabalhar, com uma velocidade de aproximadamente 17 cm/s. Na Figura 75, tem-se uma breve demonstração da esteira em operação.

Figura 75 - Esteira tracionada em operação.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Como teste de operação, o dispositivo ficou por dois dias seguidos ligado e operou conforme se esperava não apresentando anomalias.

5.5 Montagem painéis e integração da placa de controle principal com a máquina

Após a realização dos testes em bancada, com base no diagrama elétrico da máquina feito pelos integrantes do time, realizou-se a montagem do painel elétrico com as fontes e dispositivos de segurança, como é possível observar na Figura 76.

Figura 76 - Painelelétrico com as fontes de alimentação e dispositivos de segurança.



Fonte: Acervo do autor (2025).

A placa de controle principal foi instalada em outro painel com os *drivers* de controle dos motores, conforme exibido na Figura 77.

Figura 77 - Painel elétrico com a placa de controle principal e os *drivers* de controle dos motores.



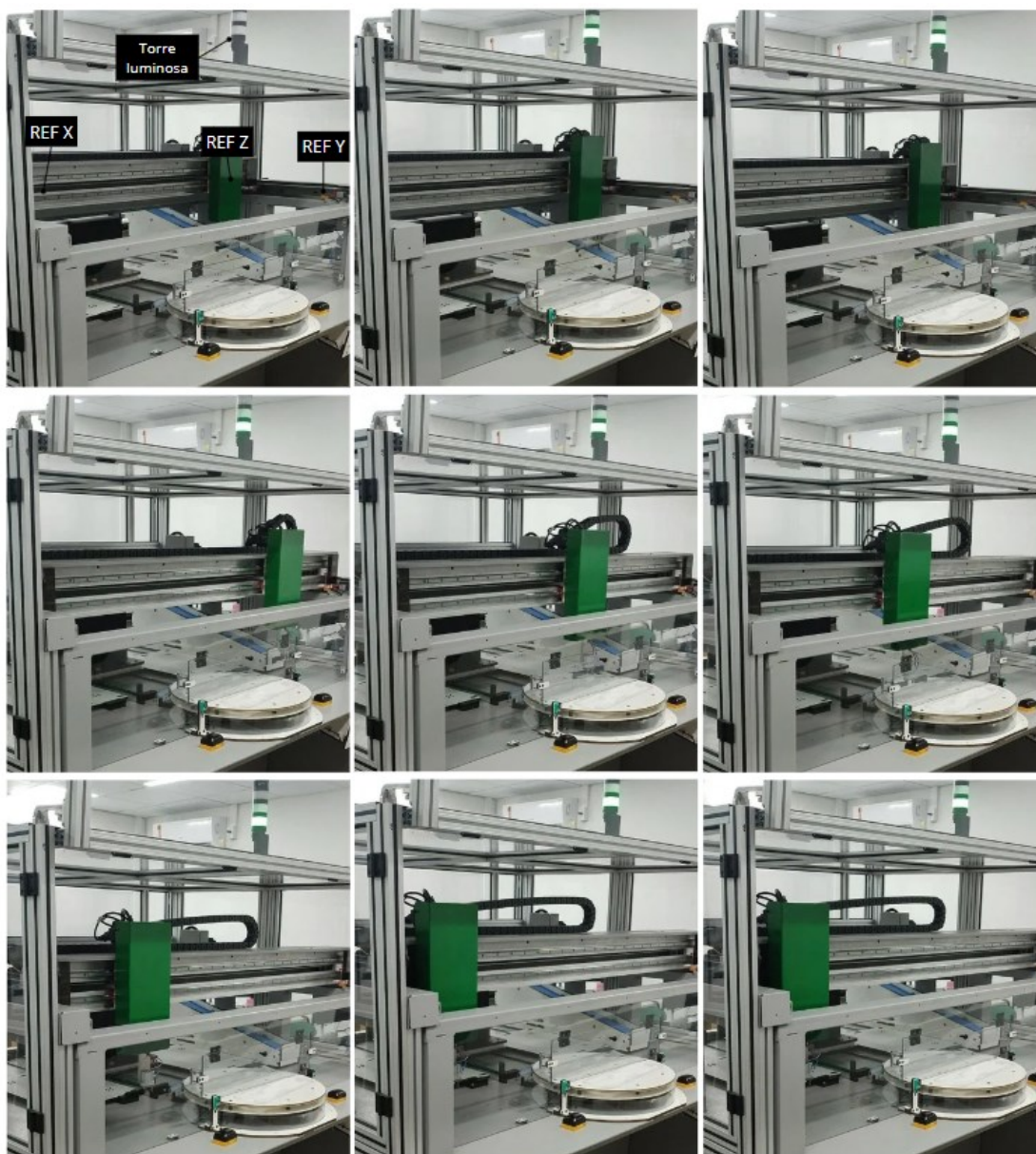
Fonte: Acervo do autor (2025).

As conexões que foram realizadas na placa têm o propósito de colocar a máquina em operação apenas para testes. Por esse motivo, alguns terminais não estão conectados.

5.6 Teste funcional da máquina – *Home position*

Após as instalações, com a finalidade de testar a máquina, elaborou-se um programa de teste para que a máquina executasse uma rotina de *home position*. Com base nesse teste, foi possível avaliar o funcionamento dos circuitos projetados. Durante a execução, a máquina foi programada para que cada eixo se movimentasse individualmente e com uma velocidade baixa de forma que o movimento só se encerraria assim que os sensores posicionados nas posições de referência fossem acionados. A execução desse processo é apresentada na Figura 78.

Figura 78 - Máquina executando *home position*.



Fonte: Acervo do autor (2025).

De acordo com a rotina programada, a máquina funcionou como se esperava. A placa de controle principal em conjunto com os atuadores e sensores operaram de forma satisfatória, apresentando precisão no controle dos motores, monitoramento nas entradas de sinal e nenhum tipo de anomalia.

Os testes realizados com a placa e com o sistema de controle foram satisfatórios. Para uma avaliação completa da operação da máquina em conjunto com

o sistema de controle, é necessário que o *software* de operação seja desenvolvido, sendo esse o próximo desafio da equipe técnica.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento dos elementos eletrônicos de *hardware* que compõem o sistema de controle de uma máquina voltada para um processo de fabricação. Inicialmente, foram analisados e compreendidos em detalhes os requisitos funcionais da máquina. Em seguida, foram projetados os circuitos eletrônicos responsáveis pelo controle, os quais compõem a placa de controle do sistema. Após o projeto, a placa foi confeccionada e validada em conjunto com a estrutura mecânica da máquina.

O projeto gerou muitos aprendizados. O desenvolvimento da automação de um processo é constituído de muitos detalhes, onde é necessário pensar em todas as operações e situações. O envolvimento com todas as áreas interessadas é fundamental para garantir que o que está se desenvolvido faz sentido para o processo, para as pessoas que vão utilizar o dispositivo e até mesmo o planejamento estratégico da empresa.

Do ponto de vista técnico, o presente projeto contou com a colaboração de uma equipe extremamente capacitada nas áreas de mecânica, eletrônica, elétrica e programação. A união e interação entre todas as frentes técnicas foi fundamental para o progresso do projeto. No próximo tópico estão listados alguns aprendizados e resumo dos resultados. Por fim, tem-se sugestão para trabalhos futuros.

6.1 Conclusões gerais do projeto: Resumo dos resultados obtidos e lições aprendidas

Um dos principais fatores que garantiram uma execução bem-sucedida foi o detalhamento minucioso de cada parte constitutiva da máquina. Tratar cada componente como um sistema independente, observando todos os pré-requisitos de operação, mostrou-se uma prática eficiente. O principal critério do projeto era a conclusão e a validação do *hardware* de controle. Como mencionado durante o desenvolvimento do trabalho, escolhas de componentes técnicos que atendiam a aplicação, foram feitas conforme disponibilidade no local e familiaridade da equipe técnica. Do ponto de vista técnico, facilitou de forma considerável o entendimento do

que se esperava de cada *hardware* escolhido/projetado. Toda a etapa de levantamento das informações foi feita de forma minuciosa e envolvendo toda a equipe técnica, que colaborou para idealizações, testes e montagens.

Os circuitos projetados apresentaram o desempenho esperado. As entradas com optoacopladores proporcionaram versatilidade, como foi no caso dos circuitos reserva, e segurança ao sistema devido ao isolamento que o componente oferece. Já os transistores ULN2003 e ULN2803, são conhecidos de outros projetos e sempre entregam uma resposta funcional. Contudo, em aplicações que exijam o acionamento de cargas com maior demanda de corrente, é necessário considerar configurações alternativas.

O teensy 4.1 em conjunto com o *shift registers* 74HC595D proporcionam uma combinação versátil e funcional. No entanto, o presente projeto possivelmente poderia ter sido utilizado apenas um *shift register*, com uma melhor alocação das aplicações para cada pino do teensy 4.1. Os circuitos conversores de tensão operaram de forma satisfatória e o LM2596S funcionou muito bem na regulação da tensão em conjunto com o circuito projetado.

Em relação a placa de controle principal, para facilitar o projeto, seria interessante ter feito a placa com mais camadas. Isso permitiria maior flexibilidade no *layout*, reduzindo o número de trilhas. Outra necessidade percebida após a conclusão do projeto é proteção para os circuitos de alimentação da placa. Caso seja trocado a alimentação de 12 V com a de 24 V, alguns componentes serão danificados. Ainda sobre a placa, para ocupar menos espaço, seria interessante projetar um outro formato de *layout* que otimizasse o posicionamento dos componentes, como, por exemplo, utilizando o lado *bottom* da placa para inserir componentes.

No geral, o projeto apresentou resultados muito positivos. Trouxe muito aprendizado não apenas na parte técnica, mas também em aspectos como análise de processos de fabricação, planejamento e levantamento de requisitos operacionais, além de proporcionar uma interação eficaz entre diferentes perfis técnicos em prol de um mesmo objetivo.

Para máquina operar de forma definitiva, a equipe agora tem o desafio de desenvolver o *software* de rotina que irá integrar todas as partes da máquina e que

será responsável por realizar todas as movimentações dos motores e acionamento dos atuadores. Além disso, também existe a necessidade da realização do projeto do sistema de segurança conforme a NR 12 e por fim a instalação na linha de produção.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

A aplicação do teensy 4.1 no controle de uma máquina demonstrou-se funcional e versátil. Tradicionalmente, máquinas industriais utilizam CLPs como principal elemento de controle. Diante disso, sugere-se um estudo comparativo entre a aplicação de um microcontrolador e um CLP na automação e controle de máquinas industriais, a fim de avaliar vantagens, limitações e viabilidade técnica de cada solução.

Uma outra sugestão para trabalhos futuros é a confecção de uma placa genérica para atender aplicações de automação industrial. Como foi possível observar com base no projeto do trabalho em questão, os componentes eletrônicos ofertam muita versatilidade. O desenvolvimento de uma placa genérica para projetos de automação industrial oferece maior flexibilidade ao permitir sua adaptação a diferentes aplicações, reduzindo a necessidade de projetar circuitos específicos para cada sistema. Isso otimiza o tempo e os custos de desenvolvimento, tornando a implementação de novas soluções mais ágil e acessível. Além disso, a padronização do *hardware* facilita a manutenção e a substituição de componentes, contribuindo para a confiabilidade dos sistemas automatizados.

REFERÊNCIAS

BATES, David; MALVINO, Albert. **Eletrônica volume 1**. Porto Alegre: McGraw Hill Education e Bookman, 2016.

BOYLESTAD, Robert; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos Eletrônicos e teoria de circuitos**. São Paulo: Pearson, 2013.

CRUZ, Eduardo; CHOUERI, Salomão. **Eletrônica aplicada**. 2ª edição. São Paulo: Érica Ltda, 2013.

DISTEFANO, Joseph; STUBBERUD, Allen; William, Ivan. **Sistemas de controle segunda edição**. São Paulo: Bookman Editora LTDA, 2014.

FLOYD, Thomas; BUCHLA, David; **Electronics fundamentals circuits, devices and applications**. [S.I.]: Pearson, 2014.

GROVER, Mikell. **Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing 4 edição**. Upper Saddle River New Jersey, 2015.

GUPTA, A; ARORA, S; WESTCOTT, JEAN. **Industrial automation and robotics**. [S.I.]: Mercury learning and information, 2017.

KILIAN, Christopher. **Modern Control Technology**. Delmar Thomson Learning, 2000.

LAMB, Frank. **Automação industrial na prática**. Porto Alegre: AMGH editora Ltda, 2015.

MAINI, Anil. **Digital Electronics principles, devices and applications**. Chichester: Jhon Wiley & Sons Ltd, 2007.

MANESIS, Stamatios; NIKOLAKOPOULOS, George. **Introduction to industrial automation**. Boca Raton: CRC Press, 2018.

NANOTEC. *Closed Loop technology*. Medlfor: Nanotec, 2012. Disponível em: https://www.nanotec.com/fileadmin/files/Application_Notes/Closed_Loop/2012_06_21_nanotec_whitepaper_ClosedLoop_en.pdf?1656012519 Acesso em: 31 jan. 2025.

NISE, Norman. **Control Systems Engineering 7 edição**. California: Wiley, 2015.
OMRON. *Technical explanation for general-purpose relays*. [S.I.]: OMRON, [2015?]. Disponível em: https://www.ia.omron.com/data_pdf/guide/36/generalrelay_tg_e_10_4.pdf Acesso em: 30 jan. 2025.

ORIENTAL MOTOR GENERAL. *An Introduction to Stepping Motors*. [S.I.]: ORIENTAL MOTOR GENERAL, 2019. Disponível em: <http://orientalmotor.com/downloads/catalog-archive.html> Acesso em: 31 jan. 2025.

PINTO, Fábio. **Sistemas de automação e controle**. Vitória: Senai, 2005.

PREDKO, Myke. **Digital electronics demystified**. [S.I.]: McGraw-Hill, 2005.

S.A. **JM 608 Industrial Automation**. Negeri Sembilan, Malásia: Politeknik Port Dickson, 2013.

SCHWAB, Klaus. **A quarta revolução industrial**. São Paulo: Edipro, 2016.

SOLOMAN, Sabrie. **Sensors handbook. Second Edition**. [S.I.]: McGraw-Hill, 2010.

TEXAS INSTRUMENTS. *Fundamentals of microcontrollers for Embedded Systems*. [S.I.]: Texas Instruments, [2022?]. Disponível em: <http://www.ti.com/>. Acesso em: 15 jan. 2025.

TEXAS INSTRUMENTS. *Introduction to Opto-Emulators*. Dallas: Texas Instruments, 2023. Disponível em: <https://www.ti.com>. Acesso em: 29 jan. 2025.

THEORYCIRCUIT. *555 timer stepper motor controller circuit*. Disponível em: <https://theorycircuit.com/ic-555-ic-741/555-timer-stepper-motor-controller-circuit/>. Acesso em: 13 fev. 2025.

TOCCI, Ronald; WIDMER, Neal; MOSS, Gregory. **Sistemas digitais princípios e aplicações 11 edição**. São Paulo: Pearson Education Brasil, 2011.

TOOLEY, Mike. **Eletronic Circuits fundamentals and applications third edition**. Oxford: Elsevier, 2006.

VALDES-PEREZ, Fernando; PALLAS-ARENY, Ramon. **Microcontrollers fundamentals and applications whit pic**. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009.

ZAINON, Maslan; SALIM, Syed. **Control Systems Engineering**. Malaca: Pernerbit, 2010.