UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TERENCE MYREN KUTZNER

Construção de uma Esteira Didática Eletropneumática Inteligente Utilizando Tecnologias de Impressão 3D e Arduino

João Pessoa, Paraíba

Maio, 2024

TERENCE MYREN KUTZNER

Construção de uma Esteira Didática Inteligente Utilizando Tecnologias de Impressão 3D e Arduino

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Lima Junior

Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Departamento de Engenharia Mecânica

João Pessoa, Brasil

Maio, 2024

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

K97c Kutzner, Terence Myren.
Construção de uma Esteira Didática Eletropneumática Inteligente Utilizando Tecnologias de Impressão 3D e Arduino / Terence Myren Kutzner. - João Pessoa, 2024.
57 f. : il.

Orientação: José Carlos de Lima Junior.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Esteira Didática. 2. Impressão 3D. 3. Manufatura Aditiva. 4. Arduino. I. Junior, José Carlos de Lima. II. Título.

UFPB/CT/BSCT CDU 621(043.2)

Elaborado por ONEIDA DIAS DE PONTES - CRB-15/198

TERENCE MYREN KUTZNER

CONSTRUÇÃO DE UMA ESTEIRA DIDÁTICA INTELIGENTE UTILIZANDO TECNOLOGIAS DE IMPRESSÃO 3D E ARDUINO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em João Pessoa, 3 de maio de 2024.

José Carlos de Lima Júnior.

Dr. José Carlos de Lima Júnior
Universidade Federal da Paraíba
Professor orientador

Hernandes

Dra. Halane Maria Braga Fernandes Brito
Universidade Federal da Paraíba
Examinadora

João Bosco de Aquino Silva

Dr. João Bosco de Aquino Silva
Universidade Federal da Paraíba
Examinador

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer Meus pais Hugo e Maria por todo suporte no desenvolvimento do trabalho e da minha jornada acadêmica.

A minhã irmã Janaina, por me inspirar e ser sempre um exemplo a seguir.

Agradeço também a Gisele Fonseca por ser minha inspiração e companheira, além de sempre ter me incentivado a nunca desistir.

Aos meus amigos Igor Cavalcante e João Marcelo por todo o apoio e contribuição para a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. José Carlos, por aceitar ser meu orientador e ter feito a provocação, para construção e desenvolvimento do projeto.

E a Manoel Fidelis por todo apoio no laboratório de pneumática.

Não são nossas habilidades que mostram quem realmente somos, são as nossas escolhas - Albus Dumbledore

RESUMO

As esteiras exercem um papel fundamental no transporte de materiais. Seu conceito foi aprimorado ao longo das revoluções industriais, tornando-as cada vez mais automatizadas e robotizadas. Assim, as esteiras passam a exercer um papel fundamental nos processos produtivos industriais. Nesse quesito, a simulação de sistemas desse tipo, são um processo fundamental no desenvolvimento acadêmico do aluno de engenharia. Uma versão em escala desses processos, não só permitem um primeiro contato com os diversos tipos de tecnologias empregados, mas apresentam de uma forma prática os conhecimentos vistos ao longo do curso de engenharia. Entretanto, quando se analisa o quesito custo, ainda se observam um grande desafio de aquisição pelas instituições de ensino. Dessa forma, buscando alternativas com o emprego de tecnologias que estão cada vez mais acessíveis, como a impressão 3D e Arduino, é proposto o desenvolvimento e construção de uma esteira didática que, ao final, teve um custo bastante inferior quando comparado as opções disponíveis no mercado.

Palavras-chave: Esteira Didática; Impressão 3D; Manufatura Aditiva; Arduino.

ABSTRACT

Conveyors play a fundamental role in material transportation. Their concept has been refined throughout the industrial revolutions, making them increasingly automated and roboticized. Therefore, conveyors come to play a crucial role in industrial production processes. In this regard, simulating systems of this kind is a fundamental process in the academic development of engineering students. A scaled-down version of these processes not only allows for initial exposure to various types of employed technologies but also provides a practical demonstration of the knowledge acquired throughout the engineering course. However, when considering cost, there still exists a significant challenge in acquisition for educational institutions. Therefore, seeking alternatives by leveraging technologies that are becoming increasingly accessible, such as 3D printing and Arduino, the development and construction of an educational conveyor is proposed, which, in the end, had a significantly lower cost compared to the options available on the market.

Keywords: Educational Conveyor Belt, 3D Printing, Additive Manufacturing, Arduino.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma do processo de impressão 3D. 13
Figura 2 – Comparativo de características dos principais filamentos 3D. 14
Figura 3 – Principais parâmetros de impressão 3D. 15
Figura 4 – Fatores de influência na impressão 3D. 16
Figura 5 – Tipos de esteiras. 17
Figura 6 – Elementos de uma roda dentada e descrição da ação cordal. 19
Figura 7 – Variação da velocidade cordal e quantidade de dentes. 20
Figura 8 – Comparativo entre os principais arduinos. 24
Figura 9 – Diagrama de um processo. 25
Figura 10 – Tipos de Sensores Fotorreflexivos. 26
Figura 11 – Tipos de sensores em uma esteira. 27
Figura 12 – Exemplo de atuadores pneumáticos em uma esteira. 29
Figura 13 – Impressora e desumidificadora utilizada. 31
Figura 14 – Comparação do elo da esteira com o elo de uma corrente. 34
Figura 15 – Produção do primeiro lote de testes dos elos da esteira. 34
Figura 16 – Testes dos elos e catraca da esteira. 35
Figura 17 – Geometria da esteira. 37
Figura 18 – Torque do motor de passo 16HD2024N em função das revoluções/min. 38
Figura 19 – Processo de produção das engrenagens. 40
Figura 20 – Motor e controlador. 41
Figura 21 – Modelo do conjunto atuador, rampa e placas. 42
Figura 22 – Diagrama eletropneumático. 43
Figura 23 – Conjunto com rampa e fita de led. 44
Figura 24 – Blocos utilizados na esteira. 45
Figura 25 – Sensores posicionados na esteira. 46
Figura 26 – Diagrama de componentes elétricos. 47
Figura 27 – Componentes elétricos na esteira 48
Figura 28 – Disposição dos componentes elétricos na esteira 49
Figura 29 – Modelo 3D da esteira. 50
Figura 30 – Esteira construída. 50
Figura 31 – Esteira FESTO 52
Figura 32 – Esteira EXTSO XC243 52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo de motor de passo com outros motores. 21
Tabela 2 – Parâmetros gerais de impressão utilizados para PETG e PLA. 31
Tabela 3 – Características do conjunto elo e catraca. 36
Tabela 4 – Parâmetros de impressão do elo e roda dentada. 37
Tabela 5 – Especificações do motor 17HD2024N. 38
Tabela 6 – Características do conjunto de engrenagens. 39
Tabela 7 – Parâmetros de impressão das engrenagens. 39
Tabela 8 – Comparativo entre driver de motor de passo DRV8825 e A4988. 40
Tabela 9 – Velocidades do motor, catraca e esteira 41
Tabela 10 – Características do atuador DSNU-20-100-PPV-A. 42
Tabela 11 – Componentes do sistema eletropneumático. 43
Tabela 12 – Característica do sensor fotorreflexivo difuso E3F-DS10P1. 46
Tabela 13 – Custos dos componentes da esteira. 51

SUMÁRIO

1 Introdução 10
1.1 Objetivo Geral 11
1.2 Objetivos Específicos 11
1.3 Estrutura do Trabalho 12
2 Fundamentação teórica 13
2.1 Manufatura Aditiva 13
2.2 Esteira e Componentes 16
2.2.1 Roda Dentada 17
2.2.2 Mecanismo de Acionamento 20
2.3 Sistema de Detecção e Controle 22
2.3.1 Arduino 22
2.3.2 Sensores de Posição 25
2.3.3 Relés 27
2.3.4 Atuadores Pneumáticos 28
2.4 Conclusão 29
3 Metodologia 30
3.1 Determinação das Restrições 30
3.2 Modelagem 3D e Fabricação das Peças 30
3.3 Instrumentação e Programação 32
4 Resultados e Discussões 33
4.1 Elos, Eixo e Catraca da Esteira 33
4.2 Mecanismo de Acionamento 38
4.3 Acionadores Eletropneumáticos e Rampas 41
4.4 Controladores e sensores 44
4.5 Análise dos custos totais 50
5 Conclusão 53

Referências 54

1 INTRODUÇÃO

Os primeiros registros de esteiras datam de 1795, sendo elas, construídas de forma bastante rudimentar (LAC, 2024). A primeira revolução industrial intensificou as suas aplicações, principalmente para transporte de material para curtas distâncias. O uso das esteiras foi, de fato, emplacado na segunda revolução industrial, que teve como pontos-chave a produção em massa, inovação, redução da locomoção dos operários, padronização das peças e redução do tempo de *setup* das máquinas (SACOMANO et al., 2018). Isso impulsionou o uso de esteiras para locomoção do produto no chão de fábrica, sendo o modelo de produção Fordista o exemplo mais emblemático de sua aplicação.

A partir da terceira revolução industrial, o uso de esteiras tornou-se muito mais amplo e tecnológico. O desenvolvimento de áreas como robótica e automação levaram a um mais amplo emprego das esteiras nos processos industriais. Dessa forma, contribuíram ainda mais para reduzir a manipulação dos produtos de forma manual, reduziram o custo de manejo, bem como a carga de trabalho do operador por meio da automatização do fluxo do produto (MCGUIRE, 2009).

Atualmente, com a quarta revolução industrial, as linhas de produção passam a ser ainda mais automatizadas. Nela atuadores e sensores controlam a linha de produção e passam informações sobre o processamento do pedido e dados de máquinas para uma central, que retransmite estas informações pela internet para sistemas supervisores, que vão atuando nos equipamentos (SACOMANO et al., 2018). Assim as esteiras passam a ser ainda mais automatizadas e inteligentes, no qual o produto passa a ser guiado da forma mais eficiente possível.

Nesse contexto, o entendimento dos processos e tecnologias do ambiente industrial são um ponto-chave no desenvolvimento curricular do

engenheiro e no preparo para o mercado de trabalho. Dessa forma, observar na prática acionamentos pneumáticos, elementos de máquinas, eletrônica e programação contribuem para formá-los com uma visão multidisciplinar dos processos. Assim, o uso de bancadas didáticas, que representam todo o processo em escala, são uma excelente opção. Entretanto, o quesito custo torna-se uma grande barreira para sua aquisição. As bancadas tendem a ser comercializadas por um altíssimo custo, que por muitas vezes torna-se uma barreira para aquisição pelas universidades.

Para viabilizar a construção desse tipo de bancada é possível optar pelo aproveitamento de duas tecnologias, que recentemente ganharam grande espaço. A primeira é a manufatura aditiva, com impressoras 3D, que está cada vez mais acessível. Assim, o uso dessa tecnologia, permite principalmente criar geometrias mais complexas, o que vem facilitando os desenvolvimentos na área de engenharia. O segundo item são os microcontroladores Arduino, que ganharam um grande espaço pelo baixo custo, além da facilidade de desenvolvimento e código-fonte aberto. Dessa forma, propõe-se construir uma esteira didática capaz de identificar os itens por meios de sensores e separá-los com acionadores eletropneumáticos, baseado na altura, simulando dessa forma um processo recorrente nas indústrias.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é viabilizar a construção de uma esteira industrial em escala, para simular processos industriais de seleção de itens.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Analisar os principais desafios técnicos e as soluções no desenvolvimento de uma esteira;

2. Explorar a área de manufatura aditiva, bem como a gama de possibilidades que as impressoras de uso doméstico proporcionam, na solução de problemas de engenharia;

3. Mostrar a facilidade de integração do Arduino em projetos eletrônicos;

4. Construir uma alternativa de baixo custo, quando comparada aos modelos existentes no mercado.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse Trabalho de Conclusão de Curso conta, além desse capítulo introdutório, com outros quatro capítulos:

- No capítulo 2 - Fundamentação Teórica, são apresentados os conceitos necessários para o entendimento do conteúdo deste trabalho;
- No capítulo 3 - Metodologia, é descrita a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho;
- No capítulo 4 - Resultados, os resultados obtidos são apresentados e discutidos;
- No capítulo 5 - Conclusão, são descritas as conclusões obtidas a partir de todo o desenvolvimento deste trabalho.

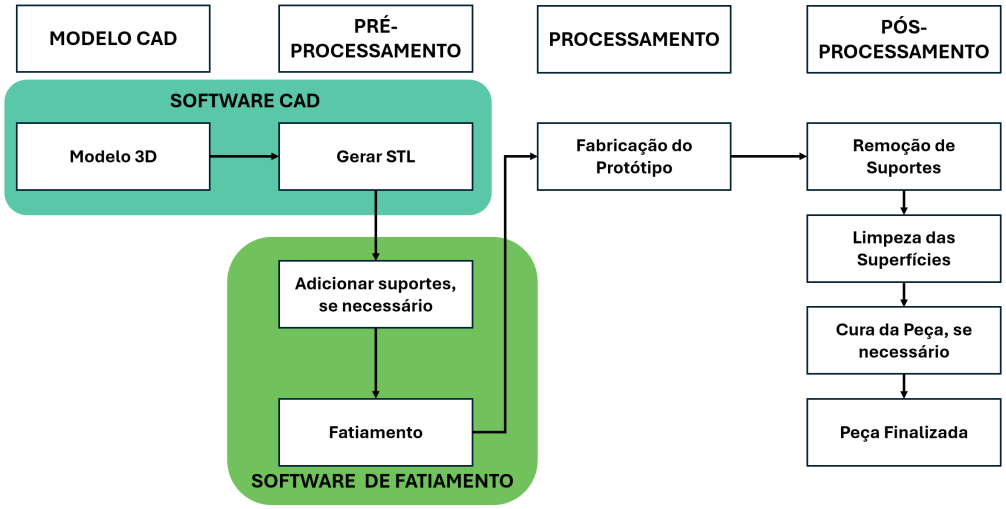
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva consiste na adição sucessiva de material em camadas a partir de uma representação computacional 3D (VOLPATO, 2021). Esses processos, são capazes de construir geometrias complexas, difíceis de obter por outros meios, o que resulta em uma maior liberdade no design de engenharia (CAMPBELL et al., 2011).

Os avanços recentes nas impressoras 3D de código aberto viabilizaram a fabricação aditiva ao nível individual ou doméstico (WITTBRODT et al., 2013). Isso significa que a impressão 3D se tornou muito mais acessível, e pode ser considerado um elemento importante para desenvolvimento de protótipos de engenharia. O processo completo de impressão 3D pode ser dividido em três etapas: *pré-processamento*, que engloba design 3D e fatiamento, *processamento*, com a impressão 3D, e *pós-processamento*, que abrange a limpeza e cura da peça (DIVYATHEJ; VARUN; RAJEEV, 2016). A figura 1 mostra essa divisão das etapas.

Figura 1 – Fluxograma do processo de impressão 3D.



Fonte: Adaptado de (DIVYATHEJ; VARUN; RAJEEV, 2016).

Existem diversas formas de manufatura aditiva. Um dos mais populares é denominado *Fused Deposition Modeling* (FDM). O processo de fabricação FDM consiste em fundir o material bruto e moldá-lo para construir novas formas (KRISTIAWAN et al., 2021). Nele, o material, na forma de filamento, passa por um bico com aquecimento controlado até derretê-lo e deixá-lo em um estado semilíquido. O bico extruda e guia precisamente os materiais em camadas ultrafinas, que resulta no componente desejado.

Entre os materiais mais populares para impressão 3D, podemos citar: Polietileno Tereftalato Modificado com Glicol (PETG), Poliácido Láctico (PLA), Crilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Nylon e Policarbonato (PC) (CICALA et al., 2017). Todos esses materiais, possuem compromissos entre facilidade de impressão, custo, e propriedades mecânicas e térmicas. Um comparativo pode ser observado na figura 2.

Figura 2 – Comparativo de características dos principais filamentos 3D.

Material	Impressão com câmara aquecida	Temperatura do bico de impressão	Temperatura da mesa de impressão	Deflexão térmica (ISO 75)	Resistência ao impacto Charpy (ISO 179-1)	Resistência a tração (ISO 527-1)	Preço
PLA	Não	185-235°C	50-60°C				
PETG	Não	215-270°C	70-90°C				
Nylon	Sim	230-255°C	95-110°C				
ABS	Sim	270-275°C	100-115°C				
PC	Sim	240-285°C	70-115°C				

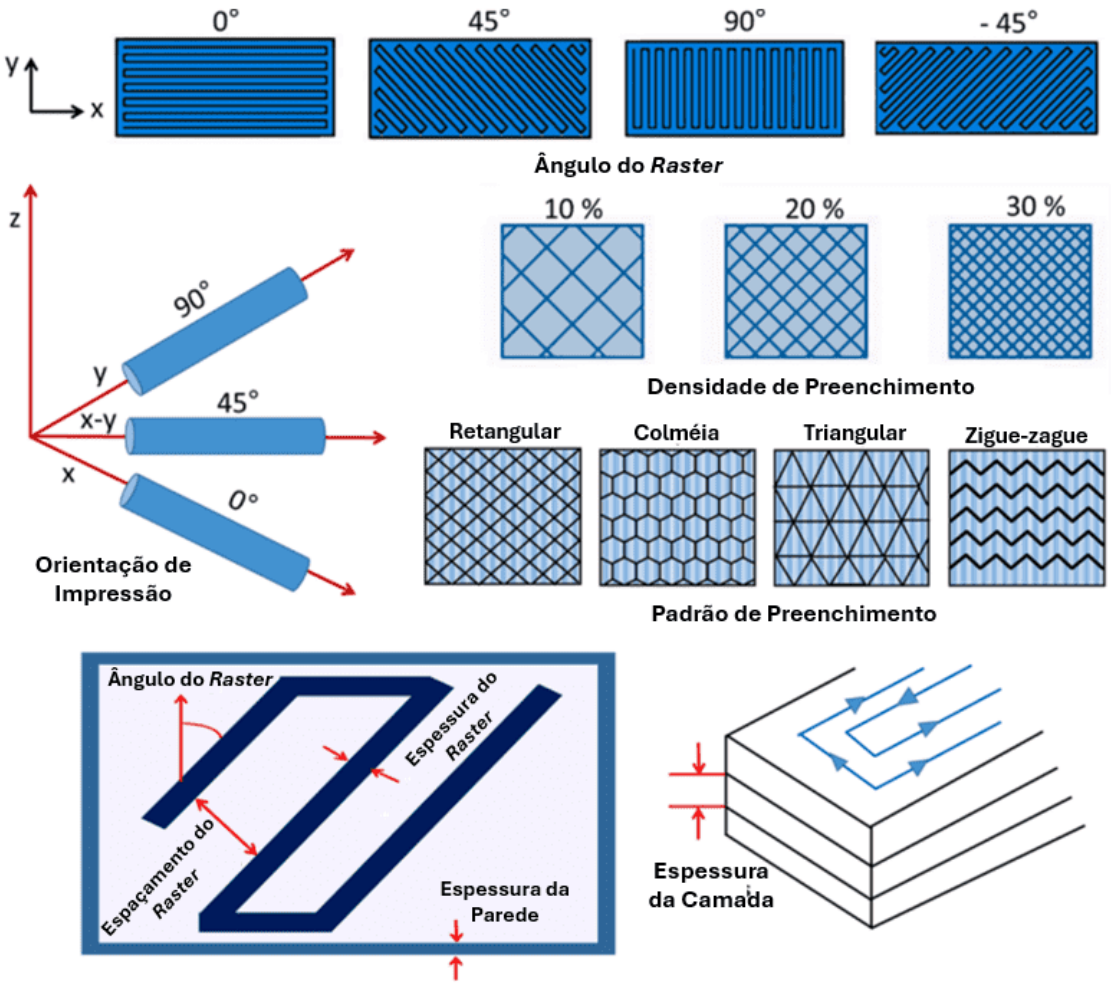
Fonte: Adaptado de (PRUSA, 2024).

O PETG apresenta algumas vantagens sobre o PLA, possui maior resistência à degradação térmica, sendo menos afetado pelas variáveis dos processos de fabricação, e maior flexibilidade, tornando-o útil para aplicações que demandam essa característica. (SANTANA et al., 2018). O ABS apresenta maior resistência à compressão entre os modelos com malha interna, enquanto o PLA é superior em corpos de prova sólidos, com menor deformação visível (MARTINEZ et al., 2019).

As características mecânicas e a qualidade de um componente pro-

duzido em impressão 3D são influenciadas por diversos fatores. Entre eles estão a espessura das camadas, a orientação de impressão, o ângulo do *raster*[1] e o volume de espaço vazio dentro da peça (DIVYATHEJ; VARUN; RAJEEV, 2016). A figura 3 ilustra cada um desses parâmetros.

Figura 3 – Principais parâmetros de impressão 3D.



Fonte: (SHANMUGAM et al., 2021).

Esses fatores constituem os parâmetros específicos de operação. Além desse, tem-se mais 3: *parâmetros específicos da máquina*, *parâmetros específicos do material* e *parâmetros específicos da geometria* (VOLPATO, 2021). A Figura 4 apresenta cada um desses fatores de forma detalhada.

[1] O *raster* se refere ao padrão de deposição do filamento durante cada camada. É o ângulo entre as linhas de deposição do filamento e o eixo X ou Y da impressora.

Figura 4 – Fatores de influência na impressão 3D.

Operação	Máquina	Material	Geometria
Espessura do fatiamento	Diâmetro do bico	Viscosidade	Comprimento do vetor de preenchimento
Largura do filamento depositado	Taxa de alimentação do material (filamento ou granulado)	Rigidez do filamento	Estrutura de suporte
Velocidade do cabeçote	Velocidade dos roletes tracionadores (alimentação com filamento) ou velocidade do parafuso extrusor	Flexibilidade	Quantidade de trechos de *raster*
Temperatura de extrusão	Vazão	Condutividade térmica	Tempo entre deposição de camadas
Temperatura do envelope	Diâmetro do filamento ou dimensão do granulado	Higroscopia	
Padrão de preenchimento	Convecção no interior do envelope	Características do ligante	
		Características do pó (FDC, FDMet)	

Fonte: (VOLPATO, 2021).

2.2 ESTEIRA E COMPONENTES

Esteiras são elementos de transporte de materiais, possuindo como vantagem uma alta capacidade de carga a longas distância, simplicidade de construção, alta confiabilidade aliado a baixo custo de manutenção (ANANTH; RAKESH; VISWESWARAO, 2013). Geralmente, são compostas por uma correia contínua ou uma corrente na qual podem ser fixadas lâminas ou roletes para formar um suporte móvel para os objetos transportados. Esses objetos podem ser impulsionados por um motor acoplado a superfície da esteira ou pela energia potencial gravitacional (BAJI; PATIL, 2023).

Os principais tipo de esteira transportadora são: de correia, de roletes e de corrente. Segundo (GUPTA; ARORA, 2011), cada tipo de esteira possui suas peculiaridades:

- Esteira transportadora de correia: são utilizados para o movimento controlado de uma grande variedade de produtos de diversos formatos, podendo transportar desde cargas leves até pesadas;
- Esteira transportadora de roletes: utilizam uma série de rolos cilíndricos espaçados uniformemente utilizado para mover peças ou paletes.São utilizadas com frequência em linhas de produção automatizadas, sendo flexíveis, robustos e altamente eficiente;
- Esteira transportadora de corrente: é um tipo de transportador composto de ripas horizontais interligadas, formando um suporte em movimento para o objeto que está sendo transportado.

A figura 5 ilustra cada um desses tipos de esteira.

Figura 5 – Tipos de esteiras.

Fonte: Adaptado de (GUPTA; ARORA, 2011) e (ATS, 2024).

Os principais parâmetros para o projeto de uma esteira são velocidade da esteira, largura, potência absorvida, conjunto de engrenagens e eixo da polia (ANANTH; RAKESH; VISWESWARAO, 2013).

2.2.1 RODA DENTADA

Um elemento importante do mecanismo das esteiras de ripas é a roda dentada. Esta desempenha o papel de transmitir o movimento do motor

ou da caixa de engrenagens acopladas ao motor, para os elos da esteira. (BUDYNAS; NISBETH, 2016) define algumas características construtivas importantes para a roda dentada:

- Passo linear (p): distância entre os centros dos roletes da corrente;
- Número de dentes (N): quantidade de dentes na catraca;
- Comprimento da corrente (L): comprimento total da corrente, dado em passos;
- ângulo de articulação ($\frac{\theta}{2}$): ângulo que o elo da corrente oscila a medida que entra em contato com a corrente;
- Diâmetro Primitivo (D_p): ângulo que o elo da corrente oscila a medida que entra em contato com a corrente.

A relação entre esses parâmetros é descrita pela equação 2.1.

$$D_p = \frac{p}{sen(180/N)} \tag{2.1}$$

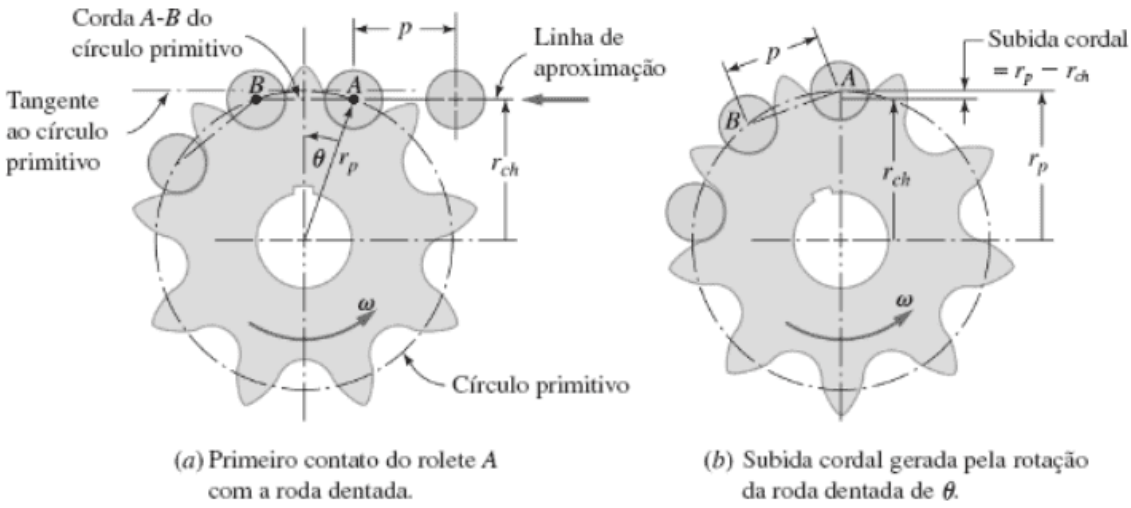
A partir desses parâmetros, pode-se definir a velocidade da corrente. Essa é função da velocidade angular n, em rpm, da quantidade de dentes da roda, N e do passo, sendo calculada por meio da equação 2.2.

$$V = \frac{Npn}{60 \cdot 1000} \tag{2.2}$$

Um fator limitante, diretamente relacionado a velocidade, para o projeto de correia e roda dentada é a ação cordal, que pode limitar o desempenho da corrente, especialmente em altas velocidades (COLLINS, 2006). Ela surge quando um elo da corrente se engata com um dente da roda dentada. A ação cordal é causada pela geometria, onde a linha de aproximação da corrente não é tangente ao círculo primitivo da roda dentada, mas sim colinear com uma corda deste. Resultado disso é que no instante que a linha central da corrente está abaixo da tangente ao círculo

primitivo, resulta em um movimento ascendente e descendente. A figura 6 mostra os principais parâmetros de influência desse fenômeno

Figura 6 – Elementos de uma roda dentada e descrição da ação cordal.



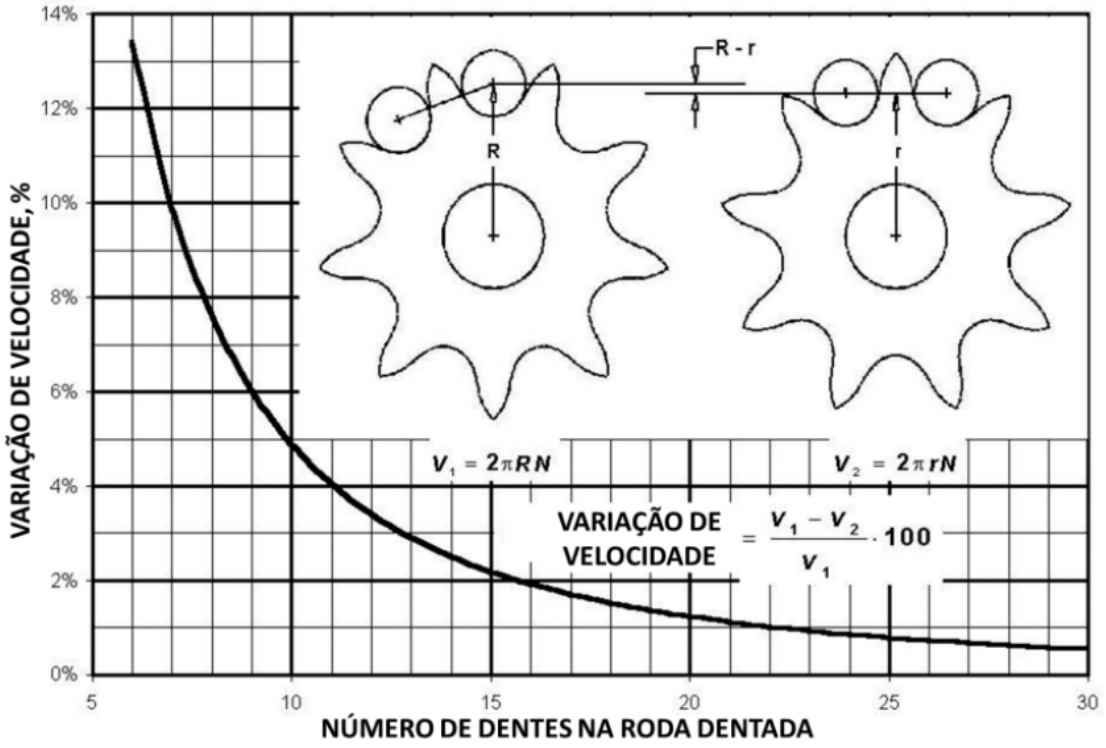
Fonte: (COLLINS, 2006).

A grande implicação da variação da velocidade cordal é que uma baixa variação resulta em uma ação mais suave ao longo da corrente, devido a uma maior uniformidade em sua velocidade (COLLINS, 2006). Embora seja desejável ter um grande número de dentes na roda dentada motora, na prática, é mais vantajoso obter uma roda dentada o mais pequena possível, o que implica ter um menor número de dentes. A figura 7 mostra que o ganho com redução da variação cordal, ao aumentar o número de dentes torna-se consideravelmente baixo após 15 dentes.

Definido as características da corrente e catraca, é necessário calcular a distância entre centros da catraca bem como comprimento total da corrente, o que permite definir o número total de elos necessários. Segundo (MELCONIAN, 2018) a distância entre centros de duas catracas com número de dentes N_1 e N_2, utilizando uma corrente com um número de elos y pode ser calculado pela equação 2.3.

$$C = \frac{p}{4} \cdot \left[y - \frac{N_1 + N_2}{2} + \sqrt{\left(y - \frac{N_1 + N_2}{2} \right)^2 - 8 \left(\frac{N_1 - N_2}{2\pi} \right)^2} \right] \tag{2.3}$$

Figura 7 – Variação da velocidade cordal e quantidade de dentes.



Fonte: Adaptado de (ACA, 2005).

2.2.2 MECANISMO DE ACIONAMENTO

Outro elemento importante no acionamento das esteiras é o motor. Esse desempenha o papel de conversão de energia elétrica em energia mecânica, por meio de campos magnéticos que interagem entre si (PETRUZELLA, 2013). Nesse contexto, existem diversos tipos de motores que podem realizar o acionamento do conjunto, destacando os motores de corrente contínua, motores de passo, servos motores. O motor de passo se destaca como um dispositivo eletromecânico especializado, capaz de traduzir impulsos em movimentos angulares altamente precisos (CHAPMAN, 2013). Eles possuem múltiplas bobinas que ao energizadas em sequência fazem o motor girar, uma quantidade discreta de passos (EARL, 2015).

Os motores de passo possuem como principal vantagem o controle de sua posição angular de forma precisa aliada a baixa variação de torque e desgaste, pelo fato de não ser composto por escovas (ROGGIA; FUENTES, 2016). Seu uso é adequado para aplicações onde é necessário controlar o ângulo de rotação, a velocidade, a posição e o sincronismo. Entretanto, esses motores não conseguem atingir nem altas velocidades angulares, nem torques muito elevados. Além disso, esses motores possuem uma pior relação de torque por volume de motor quando comparado com outros motores de corrente contínua de mesmo tamanho (CONSTANDINOU, 2005). A tabela 1 mostra uma comparação das principais características desse motor com outros.

Tabela 1 – Comparativo de motor de passo com outros motores.

Característica	**Motor de Corrente Contínua**	**Motor de Passo**	**Servo-Motor**
Velocidade	Alta	Baixa	Média
Torque	Zero/Alto	Alto/Médio	Baixo/Alto
Facilidade de controle	Fácil	Média	Complexo
Precisão	Nenhuma	Alta	Muito Alta
Durabilidade	Média	Ótima	Média
Requer Manutenção?	Sim	Não	Sim

Fonte: Adaptado de (SANTOS, 2008).

Existem diversas formas de controlar motores de passo, como o comando por vaga, comando por passos completos, comandos por meio passos e comando por micropassos (CONSTANDINOU, 2005). Para seu controle, uma das características mais importantes é o ângulo de passos, que se refere ao total de posições possíveis que o eixo pode ocupar durante uma rotação completa.

Além da escolha do motor, um elemento importante em um mecanismo é a transmissão de potência. Uma das formas mais eficientes de realizar essa transmissão é por meio de engrenagens, correias ou correntes, que podem alterar as relações de torque e velocidade entre os eixos motor e movido conforme necessidade do projeto (BUDYNAS; NISBETH, 2016).

A transmissão de potência por correia é bastante indicada em si-

tuações na qual a distância entre eixos é grande, visto que resultam em uma forma de transmissão mais simples e econômica(COLLINS, 2006). Já transmissão por engrenagem é indicada quando se necessita de um movimento uniforme, livre de deslizamentos, com sincronismo preciso. Para uma transmissão por engrenagens, existem diversos tipos, sendo as de dentes retos, de dentes helicoidais e cônicas as mais comuns. Do ponto de vista da simplicidade e facilidade de construção, a engrenagem de dentes retos é a mais recomendada. Para esse tipo definem-se alguns elementos importantes:

- Passo diametral (P_d): relação entre o número de dentes (N) e seu diâmetro primitivo, em polegadas, (D_p);
- Módulo (m): razão entre o passo diametral, em milímetros, e o número de dentes;
- Relação de transmissão (e): definida pela relação entre o número de dentes da engrenagem motor e movida.

A relação entre o módulo, diâmetro primitivo e número de dentes é dado pela equação 2.4. Já para relação de transmissão definido pela equação 2.5, dependerá da forma como ocorre a transmissão do movimento, sendo definido pela razão do produto do número de dentes das engrenagens motoras, pelo produto do número de dentes das engrenagens movidas.

$$m = \frac{D_p}{N} \tag{2.4}$$

$$e = \frac{\prod_{i=1}^{k} N_{i_{motora}}}{\prod_{j=1}^{k} N_{j_{movida}}} \tag{2.5}$$

2.3 SISTEMA DE DETECÇÃO E CONTROLE

2.3.1 ARDUINO

O Arduino é uma plataforma de código-fonte aberto de fácil utilização e desenvolvimento (ARDUINO, 2005). Essas placas são capazes de ler

entradas e saídas permitindo, por exemplo, a leitura de dados de sensores ou envio de comandos para motores. Fundamentado na família de microcontroladores da ATMEL, o Arduino é essencialmente uma plataforma que padroniza interfaces de hardware, facilitando a programação com acesso fácil e aprendizado simplificado (SILVA; JUNIOR, 2015).

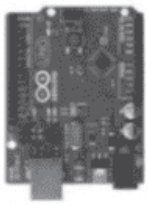
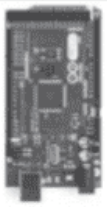
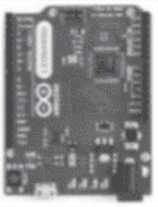
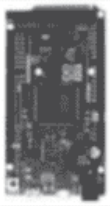
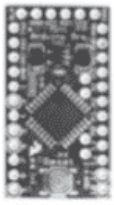
Um Arduino é composto por duas partes: *hardware* e *software*. O hardware, que consiste da placa contendo o microcontrolador, pinos de entrada e saída, entradas de alimentação e dados. Já o software corresponde à parte no qual o código é escrito (LOUIS, 2016).

Existem diversos modelos de Arduino, que funcionam em torno de diferentes microcontroladores. Entre os mais populares, pode-se citar 3:

- Arduino Uno: composto pelo microcontrolador ATmega 328p. Oferece um total de 13 entradas digitais e 6 analógicas;
- Arduino Mega 2560: Composto pelo microcontrolador ATmega 2560. Ele oferece uma quantidade de entradas e saídas bastante superior ao do arduino uno, sendo indicado para projetos que necessitam uma maior quantidade de pinos e memória programável (SILVA; JUNIOR, 2015);
- Arduino Leonardo. composto pelo microcontrolador 32U4. Possui a mesma quantidade de entradas e saídas que um Arduino Uno. Sua principal característica de diferenciação é a capacidade de emular periféricos para computadores.

A figura 8, mostra uma comparação das características dos principais tipos de arduino.

Figura 8 – Comparativo entre os principais arduinos.

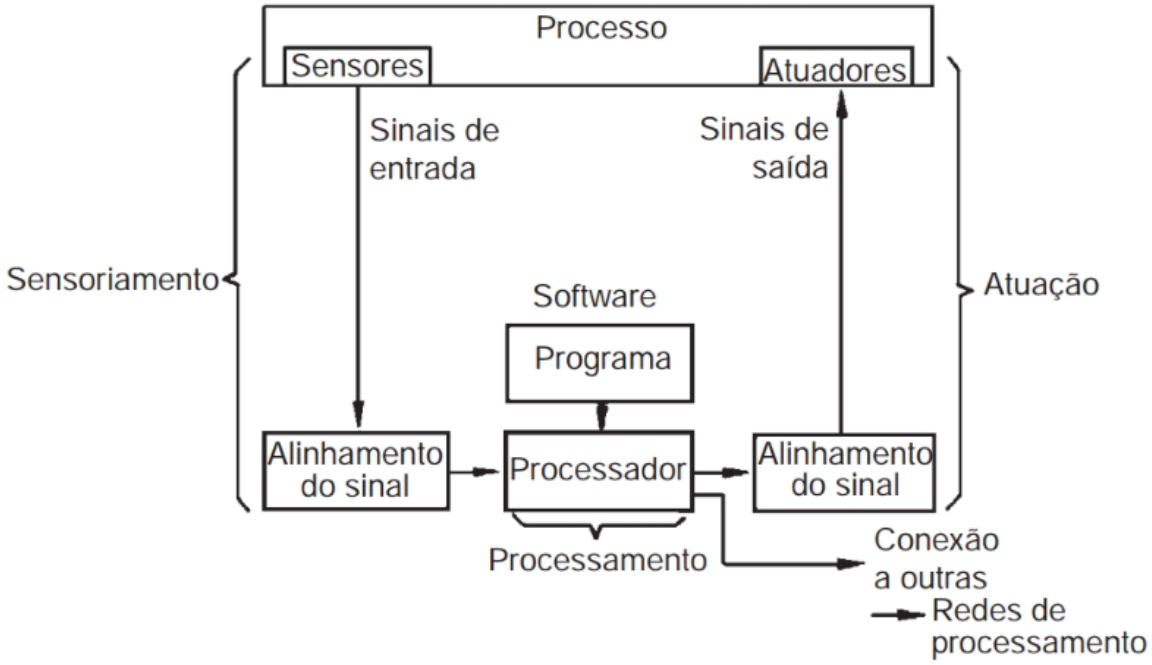
	Arduino Uno	Arduino Mega2560	Arduino Leonardo	Arduino Due	Arduino ADK	Arduino Nano	Arduino Mini
							
Microcontrolador	ATmega328	ATmega2560	ATmega32u4	AT91SAM3X8E	ATmega2560	ATmega168 (versão 2x) ou ATmega328 (versão 3x)	ATmega168
Portas digitais	14	54	20	54	54	14	14
Portas PWM	6	15	7	12	15	6	6
Portas analógicas	6	16	12	12	16	8	8
Memória	32 K (0,5 K usado pelo bootloader)	256 K (8 K usados pelo bootloader)	32 K (4 K usados pelo bootloader)	512 K disponível para aplicações	256 K (8 K usados pelo bootloader)	16 K (ATmega 168 ou 32 K (ATmega328), 2 K usados pelo bootloader	16 K (2 K usados pelo bootloader)
Clock	16 Mhz	16 Mhz	16 Mhz	84 Mhz	16 Mhz	16 Mhz	8 Mhz (modelo 3.3v) ou 16 Mhz (modelo 5v)
Conexão	USB	USB	Micro USB	Micro USB	USB	USB Mini-B	Serial/Módulo USB extemo
Conector para alimentação externa	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Tensão de operação	5 V	5 V	5 V	3,3 V	5 V	5 V	3,3 V ou 5 V, dependendo do modelo
Corrente máxima portas E/S	40 mA	40 mA	40 mA	130 mA	40 mA	40 mA	40 mA
Alimentação	7 - 12 V_{DC}	7 - 12 V_{DC}	7 - 12 V_{DC}	7 - 12 V_{DC}	7 - 12 V_{DC}	7 - 12 V_{DC}	3,35 - 12 V (modelo 3,3) ou 5 - 12 V (modelo 5v)

Fonte: Adaptado de (ARDUINO, 2015).

2.3.2 SENSORES DE POSIÇÃO

Segundo (SOLOMAN; TABOADA, 2012), para realizar com sucesso a automação de um processo, é crucial obter informações sobre o seu estado. Os sensores desempenham um papel fundamental no sistema de controle, sendo responsáveis por coletar e preparar os dados do estado do processo, os quais são então transmitidos a um processador. A figura 9 ilustra esse processo.

Figura 9 – Diagrama de um processo.



Fonte: (SOLOMAN; TABOADA, 2012).

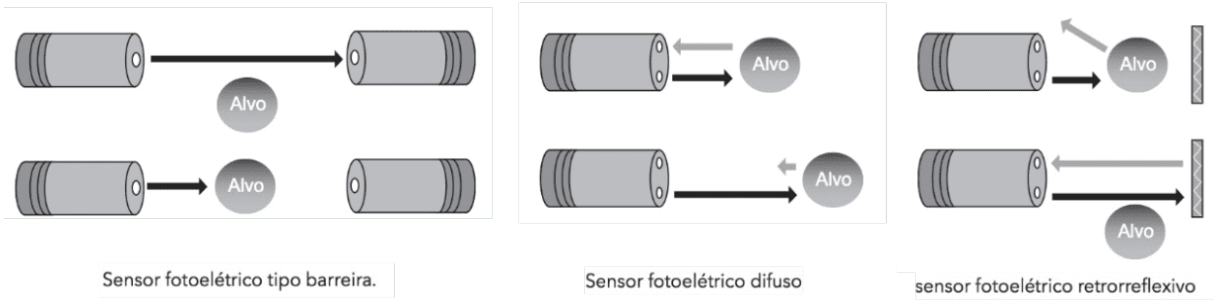
Os sensores de posição podem ser agrupados em 3 grandes grupos: indutivos, capacitivos e fotoelétricos. Sensores indutivos são dispositivos compostos por uma bobina em torno de um núcleo, que geram um campo magnético. Sua detecção está baseada na mudança desse campo quando algum material metálico se aproxima. Os sensores de proximidade capacitivos criam um campo eletrostático e medem a mudança desse campo quando algum objeto se aproxima da área ativa do sensor. Por fim, temos os sensores fotoelétricos que funcionam a partir da emissão e recepção de

um feixe de luz. Segundo (SILVA; JUNIOR, 2015), os sensores fotoelétricos podem ser divididos em 3 tipos:

- Barreira: há um transmissor que emite um feixe de luz e um receptor, que capta esse feixe. O objeto é detectado, quando o feixe é interrompido pelo objeto;
- Difuso: receptor e transmissor estão no mesmo dispositivo. O objeto é detectado quando o feixe do transmissor é refletido e captado pelo receptor;
- Retroreflexivo: receptor e transmissor estão no mesmo dispositivo, e além desse existe um espelho que reflete o sinal do transmissor. O objeto é detectado quando o sinal é interrompido.

A figura 10 mostra o funcionamento de cada tipo de sensor fotorreflexivo.

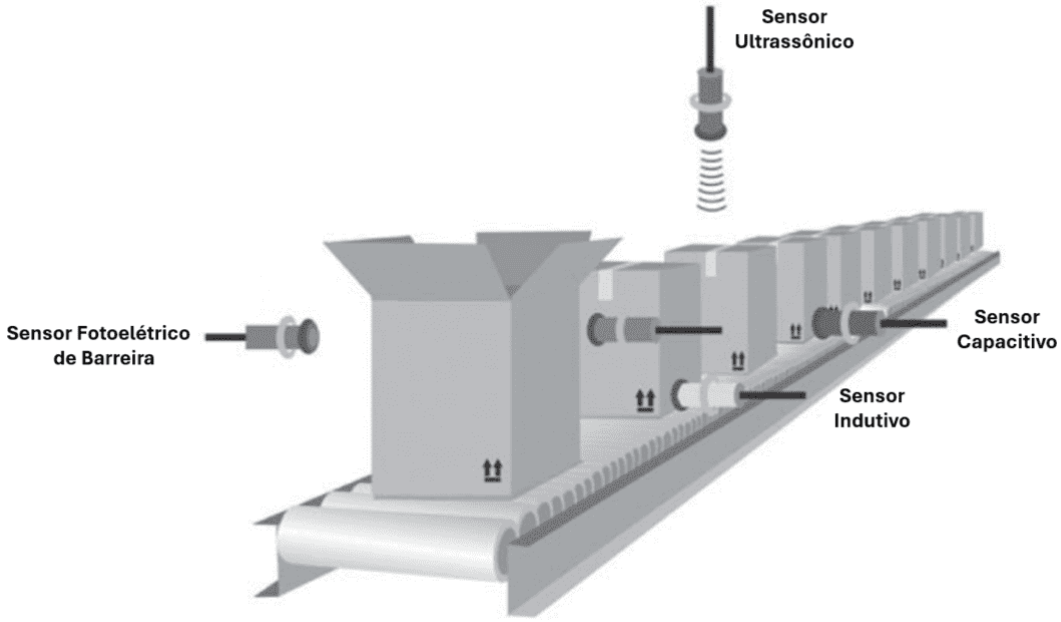
Figura 10 – Tipos de Sensores Fotorreflexivos.



Fonte: adaptado de (SILVA; JUNIOR, 2015).

Os sensores retrorreflexivos oferecem benefícios significativos, incluindo uma maior faixa de detecção em comparação com os sensores indutivos e capacitivos, além de não serem afetados pelo tipo de material que estão detectando (SILVA; JUNIOR, 2015). Todos esses sensores podem ser aplicados de diferentes formas em uma esteira, a depender do tipo de material que se deseja detectar, como mostra a figura 11.

Figura 11 – Tipos de sensores em uma esteira.



Fonte: adaptado de (SILVA; JUNIOR, 2015).

2.3.3 RELÉS

Um relé eletromecânico pode ser descrito como um interruptor controlado por um eletroímã. Quando energizado, o eletroímã desse dispositivo atua para abrir ou fechar os contatos conectados em série com uma carga, permitindo assim ligar ou desligar a carga no circuito (PETRUZELLA, 2013).

A principal vantagem do uso de relés consiste em controlar um circuito com tensão e corrente altas, com um pequeno sinal elétrico(PETRUZELLA, 2013). Segundo (BRAGA, 2017), são definidos os seguintes tipos de relés:

- Contatos Normalmente Abertos (NA): permanecem com o circuito aberto, até o momento em que sua bobina é energizada;
- Contatos Normalmente Fechados (NC): permanecem com o circuito fechado, até o momento em que sua bobina é energizada;

- Reversíveis: é a combinação de um contato normalmente aberto com normalmente fechado, permitindo acionar uma carga enquanto outra está desligada.

2.3.4 ATUADORES PNEUMÁTICOS

Atuadores pneumáticos são dispositivos mecânicos que convertem a energia cinética do ar pressurizado em expansão em movimentos lineares ou rotativos (FIALHO, 2018). Eles apresentam diversas vantagens, como redução de custos, confiabilidade, eficiência energética, além de robustez e facilidade de instalação. Dessa forma, são ideais para operações contínuas e ambientes adversos, como locais com poeira, umidade, corrosão ou risco de explosão. Entretanto, o uso desses atuadores também apresenta algumas limitações. É necessário um cuidadoso tratamento do ar comprimido, há restrições de pressão de trabalho que podem afetar a potência dos atuadores, e existem limitações de velocidade e regulagem.

Os atuadores pneumáticos lineares podem ser de diversos tipos, sendo os mais comuns os de simples efeito e duplo efeito. Suas principais características são:

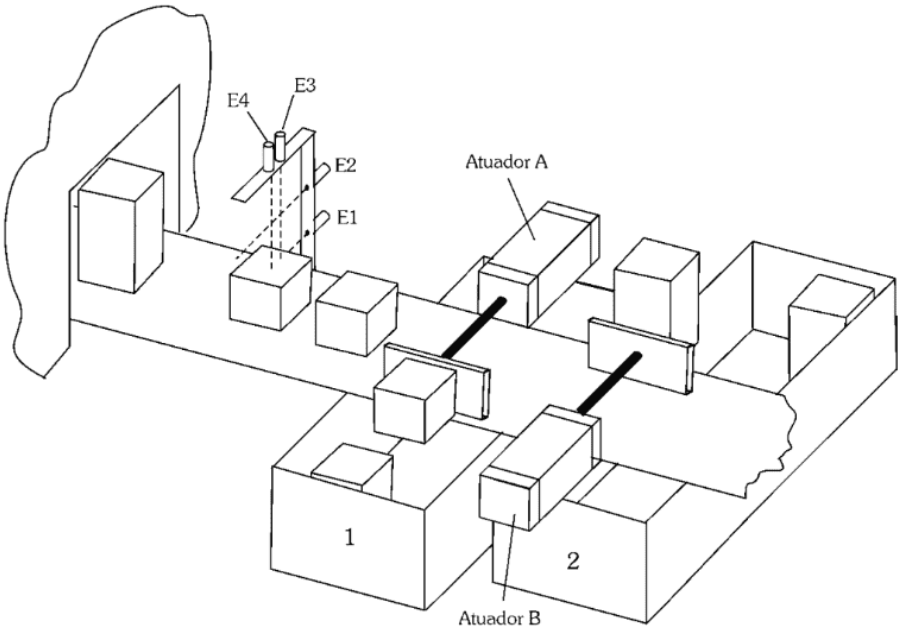
- Simples efeito: possui apenas uma entrada de alimentação para expansão ou contração do cilindro. O retorno a posição inicial acontece por meio da ação da gravidade, mola ou força externa;
- Duplo efeito: alimentação e exaustão acontecem pelas extremidades do atuador, possuindo dessa forma dua câmaras. Quando uma é pressurizada e a outra despressurizada, o cilindro se estende. Quando se inverte a pressurização das câmaras ele retrai.

Para acionamento dos atuadores são utilizadas válvulas distribuidoras de comando mecânico ou elétrico. As de comando mecânico podem ser acionadas por um botão ou rolete. Já as eletroválvula pneumáticas, permitem ativação por meio de corrente elétrica que energiza uma bobina ou solenoide (PRUDENTE, 2000). Essas válvulas são definidas pela quantidade de vias,

ou entradas, e pela quantidade de posições possíveis, sendo o tipo mais comum para acionamento de pistões as 5/2 e 4/2.

Como exemplificado na figura 12, atuadores pneumáticos podem ser utilizados em uma esteira com sensores que identificam a altura do componente, e os atuadores acionam a partir do processamento de dados desses sensores.

Figura 12 – Exemplo de atuadores pneumáticos em uma esteira.



Fonte: adaptado de (FIALHO, 2018).

2.4 CONCLUSÃO

Nesta seção, exploramos os fundamentos do principal método de manufatura aditiva empregado, o *Fused Deposition Modeling* (FDM), além de discutiram-se os elementos essenciais que compõem uma esteira. Junto a isso, analisaram-se detalhadamente os componentes-chave necessários para a construção de uma esteira inteligente, incluindo o Arduino, sensores de posição, relés e atuadores eletropneumáticos. Esse estudo estabelece uma base para as próximas duas seções, nas quais serão apresentados a metodologia e resultados, do desenvolvimento e construção da esteira.

3 METODOLOGIA

A metodologia elaborada para desenvolvimento e construção pode ser segmentada em três fases distintas: (i) Determinação das restrições, (ii) Modelagem 3D e Fabricação das peças, (iii) Instrumentação da esteira e programação.

3.1 DETERMINAÇÃO DAS RESTRIÇÕES

O passo inicial foi estabelecer as restrições iniciais para o desenvolvimento da esteira. Essas restrições foram baseadas principalmente nos recursos disponíveis para construção do projeto:

- Construir o maior número de componentes utilizando impressão 3D;
- Utilização dos conjuntos de acionadores pneumáticos bem como válvulas de acionamento elétrico disponíveis no laboratório da universidade;
- Sistema eletrônico alimentado por uma fonte 24 V;
- Esteira de comprimento entre 1 e 2 metros.

3.2 MODELAGEM 3D E FABRICAÇÃO DAS PEÇAS

Para modelagem 3D dos componentes foi utilizado o software de modelagem *Solidworks*. Adotou-se metodologia de modelagem e fabricação simultânea, ou seja, desenvolvia-se parte do conjunto da esteira, e a medida que as peças ficavam prontas, seguia-se com a sua fabricação. Após modelagem as peças eram convertidas para o formato stl e fatiadas utilizando o software *Ultimaker Cura*. As configurações de fatiamento base para PLA e PETG encontram-se na tabela 2, sofrendo apenas pequenas variações para componentes específicos da esteira.

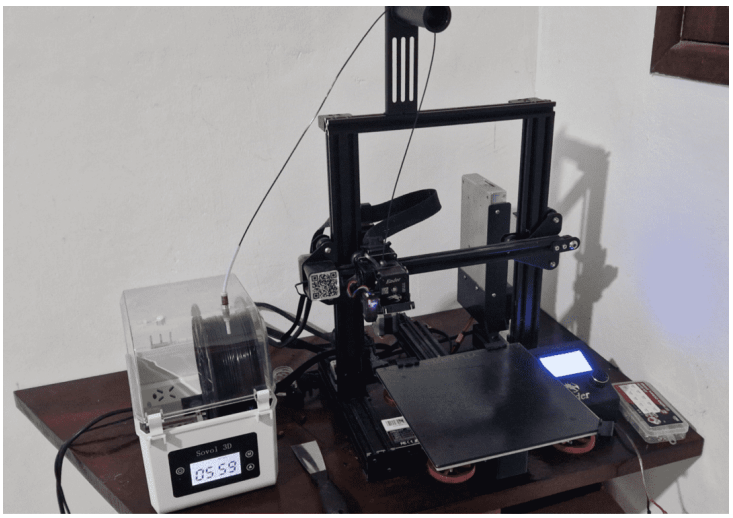
Tabela 2 – Parâmetros gerais de impressão utilizados para PETG e PLA.

Parâmetro de Impressão	**PETG**	**PLA**
Diâmetro do bico	0,6 mm	0,6 mm
Altura da camada	0,2 mm	0,2 mm
Quantidade de paredes	3	3
Preenchimento	10-20%	10-20%
Padrão de preenchimento	triangular	triangular
Velocidade média de Impressão	70 mm/s	70 mm/s
Velocidade ventoinha de resfriamento do bico	40%	40%
Temperatura do bico	240 °C	220 °C
Temperatura da mesa	80 °C	60 °C

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Já para fabricação das peças foi utilizada a impressora *Ender 3 pro*, da fabricante *Creality*. Tal impressora foi modificada ao longo do projeto com duas atualizações em relação ao modelo de fábrica. A primeira foi um segundo eixo Z motorizado para uma melhor estabilidade. A segunda modificação foi uma extrusora de metal com o motor diretamente acoplado ao conjunto. Para uma melhor aderência da peça à mesa de vidro foi utilizado spray de cabelo extra forte. Além disso, antes de todas as impressões o filamento passava por um processo de desumidificação por um período mínimo de 6 horas, a uma temperatura de 50 °C para PETG e 40 °C para PLA. o conjunto impressora e desumidificadora podem ser vistos na figura 13.

Figura 13 – Impressora e desumidificadora utilizada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.3 INSTRUMENTAÇÃO E PROGRAMAÇÃO

A etapa de instrumentação consistiu em instalar todos os sensores e componentes elétricos, bem como crimpagem e soldagem de conectores. Após instalação, sempre que possível verificavam-se os conectores por continuidade e testava-se o funcionamento do componente. Conluída esta etapa, seguiu-se com a programação, que consistiu no desenvolvimento da lógica de programação na linguagem C++, utilizando o *software* Arduino IDE.

A metodologia apresentada demonstra uma abordagem sistemática para o desenvolvimento do projeto. A determinação das restrições proporciona um norte para o desenvolvimento do projeto conceitual. Com auxílio da modelagem 3D e fabricação das peças é possível visualizar esse conceito. Por fim, a instrumentação e programação garantem o funcionamento do projeto final. Os detalhes sobre o desenvolvimento deste projeto estão delineados na seção de resultados e discussões.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

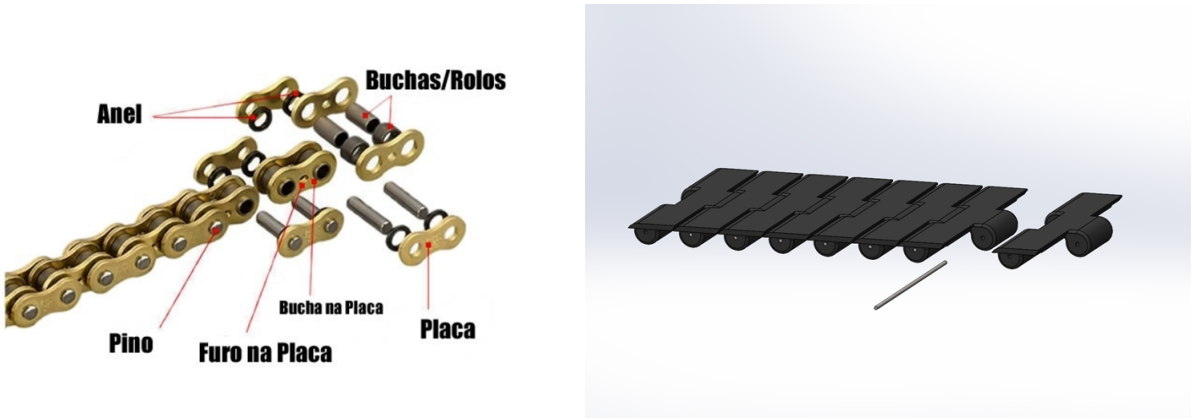
Entres os modelos possíveis de esteira, optou-se pela construção de uma esteira transportadora de ripas. O motivo da escolha deste tipo de esteira foi a facilidade de reprodução de todos os seus elementos utilizando impressão 3D. O fato de produzir os elos de forma independente facilita bastante o processo de manufatura. A esteira transportadora de correias também foi considerada, entretanto, pelo fato da correia transportadora ser dificilmente reproduzida com impressão 3D, no comprimento pretendido de 2 metros, foi descartada. Além dessa, a esteira de roletes também foi desconsiderada, pois seria mais difícil de reproduzir os roletes e o mecanismo de acionamento por corrente, aumentando o nível de complexidade da esteira.

Definido o tipo de esteira, foi possível determinar a geometria de seus elementos básicos: elos da corrente, catraca, eixo e mecanismo de acionamento.

4.1 ELOS, EIXO E CATRACA DA ESTEIRA

Para a geometria básica do elo, tomou-se como referência a estrutura básica de uma corrente, visto as inúmeras semelhanças entre os mecanismos. Assim, buscou-se unir todos os elementos de uma corrente em uma única peça como mostrado na figura 14. Para o passo, é importante o uso de um número par para evitar o uso de um elo especial (BUDYNAS; NISBETH, 2016). Dessa forma, após modelagem 3D de diversos elos, observou-se que um passo de 18 mm resultava tanto em um bom comprimento de elo para impressão 3D de um grande número de componentes, bem como resultava em uma catraca com diâmetro pequeno. Além disso, escolheu-se a largura de 70 mm para o elo.

Figura 14 – Comparação do elo da esteira com o elo de uma corrente.

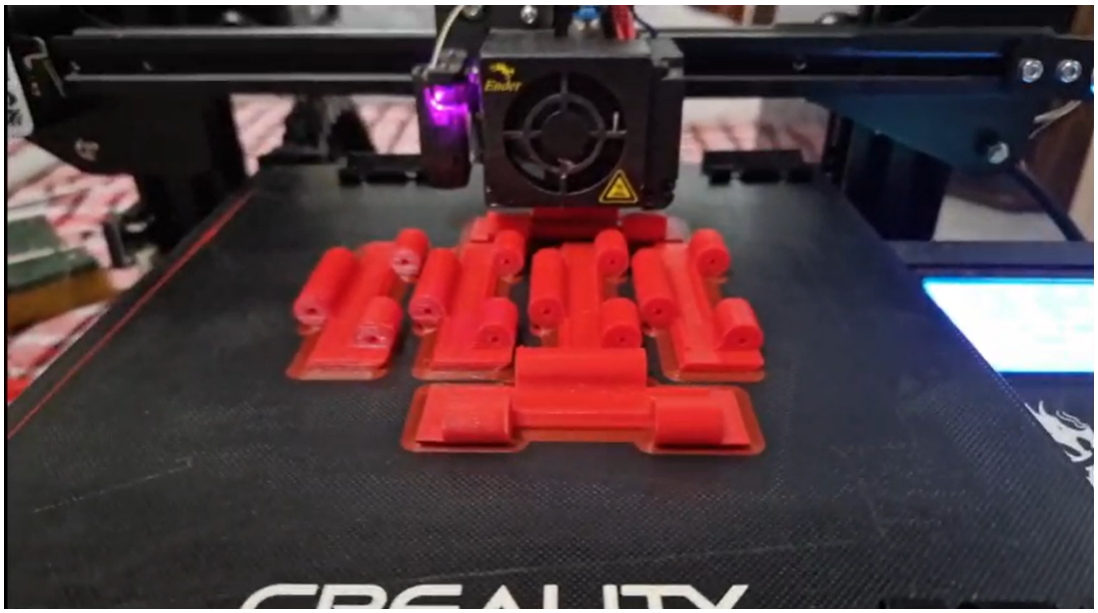


(a) Corrente (b) Esteira

Fonte: (ERTHAL, 2024) e elaborado pelo autor (2024).

Para validação da geometria, foi produzido um pequeno lote de teste como mostra a figura 15. O material escolhido para os elos foi PETG. O principal motivo para essa escolha é a maior elasticidade desse material aliado a uma maior resistência para impactos. Nesse lote foram principalmente verificados se as folgas nos encaixes dos elos estavam adequadas, de forma aos elos nem atritarem muito entre si e nem estarem demasiadamente folgadas.

Figura 15 – Produção do primeiro lote de testes dos elos da esteira.

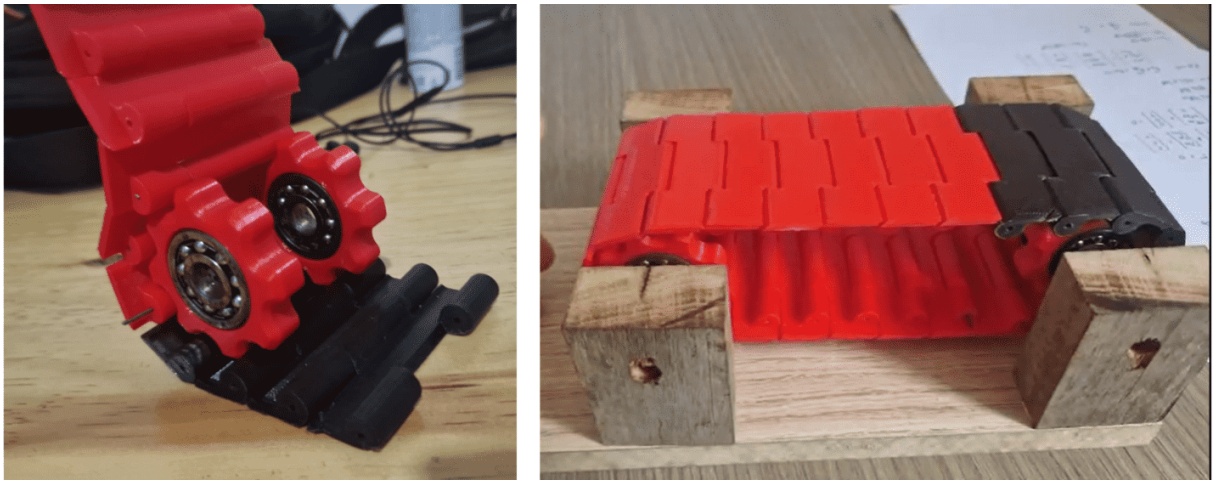


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para ligar os elos, optou-se pelo uso de arame. Entretanto, este é bastante flexível, quando submetido a uma carga, sofrendo deformações. Como solução, optou-se pelo encruamento[1] do arame por meio de torção. Para preparação desse, utilizou-se uma parafusadeira e uma morsa: uma das pontas do arame era fixado na morsa, enquanto a outra era fixado no mandril da parafusadeira. Então, ligava-se a parafusadeira e, após um tempo, media-se o diâmetro ao longo do arame em diversos pontos com um paquímetro até que o diâmetro pretendido fosse alcançado.

Para movimentar os elos da esteira é necessário uma roda dentada. Para esse buscou-se inicialmente um modelo que englobava os rolamentos na própria estrutura da catraca, como mostra a figura 16. Entretanto, após testes, estava-se observando uma deformação permanente nos elos em forma de V, indicando que a força de reação ao tensionar o mecanismo estava muito elevada e concentrada nas pontas. Para solucionar o problema, buscou-se prolongar a polia ao longo de todas a largura da correia. Assim, houve um aumento da área de contato com a correia, resultando em uma melhor distribuição dos esforços ao longo de sua largura.

Figura 16 – Testes dos elos e catraca da esteira.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

[1] O encruamento é um fenômeno que ocorre em materiais metálicos quando são submetidos a deformações plásticas, como torção, dobra ou estiramento. Isso pode resultar em mudanças na estrutura cristalina do metal, tornando-o mais rígido e menos maleável

Outro aspecto importante é o número de dentes da catraca, que segundo (BUDYNAS; NISBETH, 2016) deve ser um número ímpar para evitar o uso de um elo especial. Assim, com o passo de 18 mm já escolhido, buscou-se manter a catraca o mais pequena possível. Chegou-se assim ao número inicial de 8 dentes. Entretanto, devido à variação de velocidade cordal, a esteira estava oscilando bastante, e o engrazamento entre corrente e catraca não estava ocorrendo de forma suave. Assim, seguindo a figura 7 e buscando sempre manter o diâmetro da catraca o menor possível, chegou se ao valor de 14 dentes.

Após definição do conjunto determinou-se a quantidade de elos necessários com os parâmetros escolhidos, bem como se definiu a velocidade pretendida para a esteira utilizando das equações 2.2 e 2.3. Um resumo dos valores obtidos pode ser observado na tabela 3

Tabela 3 – Características do conjunto elo e catraca.

Parâmetro	Valor
Passo linear	18 mm
Largura do elo	70 mm
Número de dentes da catraca	14 dentes
Diâmetro primitivo da catraca	80,9 mm
Quantidade total de elos	150 elos
Distância entre centros da catraca	1224 mm
Velocidade pretendida da catraca	12,5 rpm

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Todos os conjuntos foram impressos, chegando o tempo total de impressão a aproximadamente 200 horas. Os principais parâmetros de impressão são listados na tabela 4.

Para o eixo, optou-se por inicialmente imprimir um eixo em filamento PLA. Entretanto, esse elemento estava sofrendo de deformações ao tensionar a esteira. Dessa forma, foi escolhido um eixo de 10 mm usinado em aço. Para os mancais, Utilizaram-se rolamentos SKF 1200 ETN9, possuindo duas carreiras de esferas, além de serem menos sensíveis ao desalinhamento angular do eixo em relação à caixa de mancal (SKF, 2024). Esses rolamentos

foram inseridos em uma caixa de mancal impresso em PETG, como mostra a figura 17.

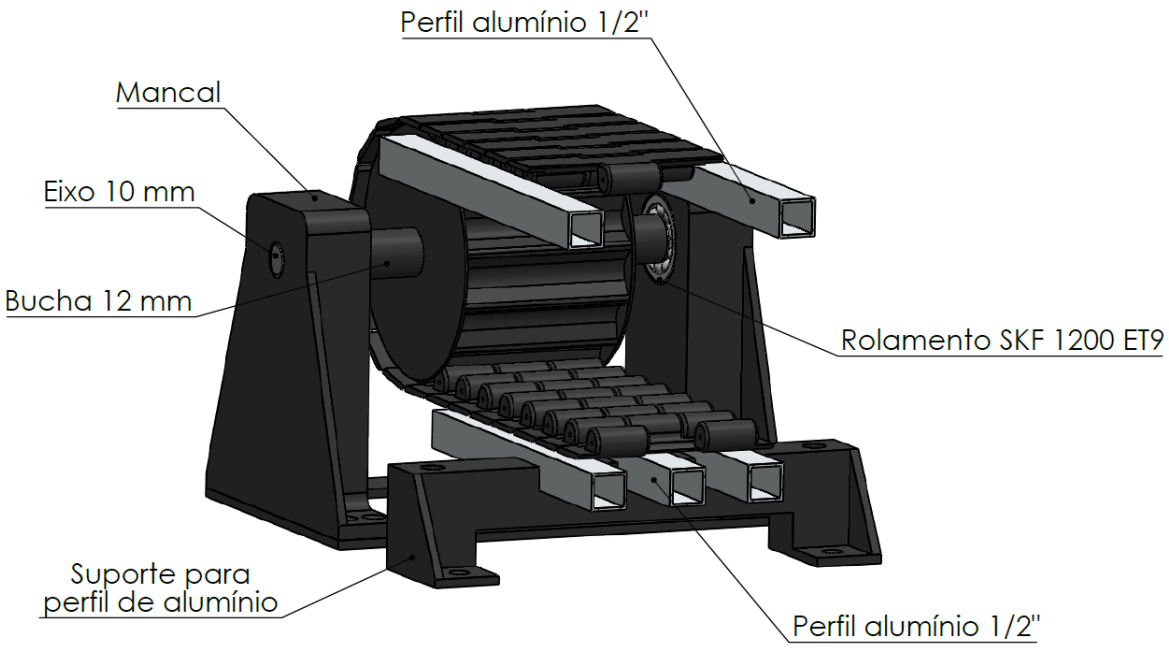
Tabela 4 – Parâmetros de impressão do elo e roda dentada.

Parâmetro de impressão	Elo da esteira	Roda dentada
Material	PETG	PETG
Diâmetro do bico	0,4 mm	0,6 mm
Altura da camada	0,12	0,2
Quantidade de paredes	3	3
Preenchimento	20%	20%
Padrão de preenchimento	triangular	triangular
Velocidade média de impressão	60 mm/s	60 mm/s
Temperatura do bico	240 °C	240 °C
Temperatura da mesa	80 °C	80 °C

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Além disso, para apoio dos elos da esteira, optou-se por um tubo de alumínio quadrado de 1/2 polegada. Esta possui uma superfície suficientemente lisa para que o elo da esteira possa correr. A geometria final do conjunto pode ser vista na figura 17.

Figura 17 – Geometria da esteira.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.2 MECANISMO DE ACIONAMENTO

O motor escolhido para acionamento do mecanismo foi o motor de passo apresentado na tabela 5. Este era anteriormente utilizado na extrusora de uma impressora 3D, e suas características atendiam aos requisitos do projeto.

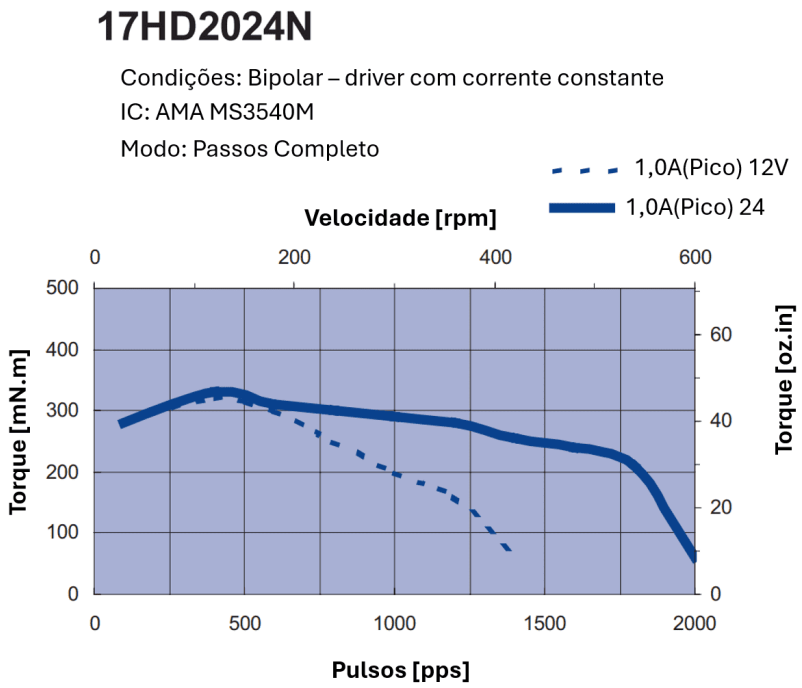
Tabela 5 – Especificações do motor 17HD2024N.

Modelo	Resistência por fase (mΩ)	Indutância por fase (mH)	Corrente nominal (A)	Torque de retenção (m.Nm)	Inércia do rotor (g.cm^2)
17HD2024N	4,1	8,5	1	390	57

Fonte: Adaptado de (17HDN SERIES DATASHEET, 2024).

A figura 18 mostra que, o motor quando acionado por uma fonte de 24 V, é capaz de atingir até 400 rpm, com uma baixa variação de torque nominal. Isso torna o motor ideal, visto que não se necessita de um alto valor de rotação do motor.

Figura 18 – Torque do motor de passo 16HD2024N em função das revoluções/min.



Fonte: (17HDN SERIES DATASHEET, 2024).

Tabela 6 – Características do conjunto de engrenagens.

Característica	Engrenagem Motora	Engrenagem Movida
Dentes	12	48
Passo	6 mm	6 mm
Módulo	2	2
Ângulo de pressão	22,5°	22,5°
Espessura	20 mm	20 mm

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Acoplado ao motor, optou-se por utilizar um conjunto de Engrenagens. Este tipo de acionamento foi escolhido ao invés de um por correia por dois motivos. O primeiro é a distância entre os eixos ser relativamente pequena, impedindo o uso de uma relação de transmissão muito grande. O segundo motivo foi a facilidade construtiva da engrenagem utilizando impressão 3D. Dessa forma, foram definidas as características geométricas das engrenagens, mostradas na tabela 6, buscando uma relação de transmissão de 1:4.

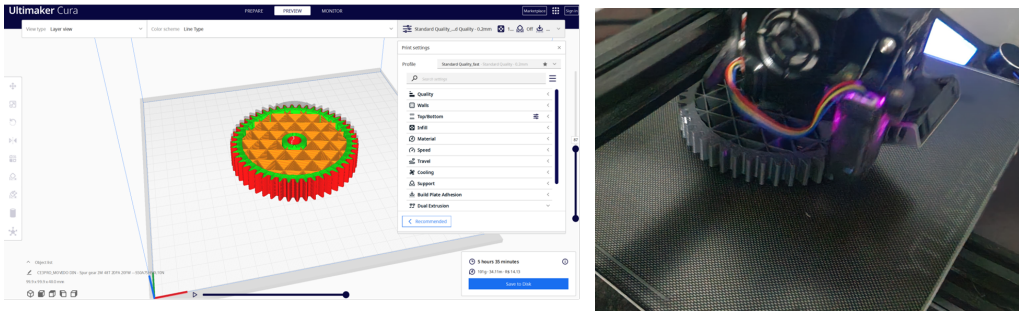
Para os parâmetros de impressão da engrenagem movida, optou-se por aumentar a quantidade de paredes, de forma que a região próxima ao dente ficasse totalmente sólida. O motivo dessa escolha, é devido a maior concentração de esforços ocorrer na região do dente da engrenagem. Na região central optou-se por um preenchimento de 20%. A Engrenagem motora, devido ao tamanho, foi impressa com preenchimento de 100%. A tabela 7 mostra os principais parâmetros empregados na construção das engrenagens e a figura 19 mostra o procedimento de fatiamento e impressão.

Tabela 7 – Parâmetros de impressão das engrenagens.

Parâmetro de Impressão	Engrenagem Motora	Engrenagem Movida
Material	PETG	PETG
Diâmetro do bico	0,6 mm	0,6 mm
Altura da camada	0,2 mm	0,2 mm
Quantidade de paredes	8	8
Preenchimento	20%	100%
Padrão de preenchimento	triangular	-
Velocidade média de impressão	70 mm/s	70mm/s
Temperatura do bico	240 °C	240 °C
Temperatura da mesa	80 °C	80 °C

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 19 – Processo de produção das engrenagens.



(a) Fatiamento (b) Impressão 3D

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para controle dos motores, foi necessário utilizar um driver específico para motores de passo. Para tal, recorreu-se a dois principais modelos disponíveis no mercado: DRV8825 e A4988. A tabela 8 apresenta um comparativo das principais características desses dos controladores. A decisão do driver utilizado se baseou em 2 parâmetros, a tensão máxima de alimentação e corrente máxima sem resfriamento externo. Visto que a corrente nominal do motor utilizado é 1 A e a tensão de alimentação 24 V, optou-se pelo DRV8825. Assim, assegura-se uma maior margem de segurança quanto aos limites operacionais do controlador.

Tabela 8 – Comparativo entre driver de motor de passo DRV8825 e A4988.

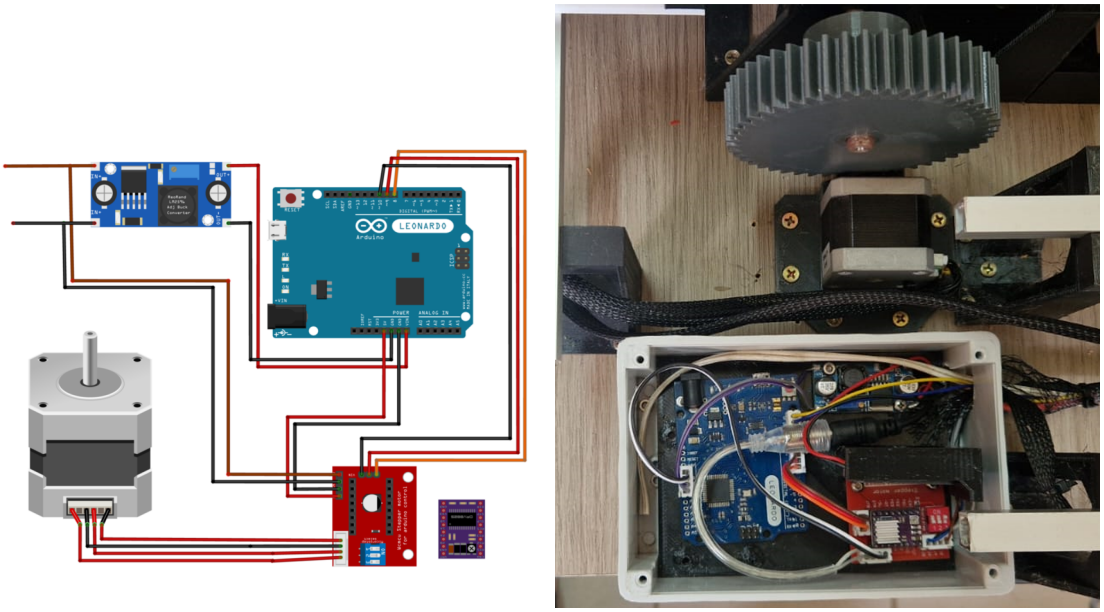
Característica	**DRV8825**	**A4988**
Micropassos	1/32 passo	1/16 passo
Tensão máxima de alimentação	45 V	35 V
Corrente máxima sem resfriamento externo	1,5 A por bobina	1 A por bobina

Fonte: Adaptado de (POLULU, 2024).

Para controlar o driver DRV8825, utilizou-se um Arduino Leonardo. O motivo pela escolha deste foi a simples disponibilidade do microcontrolador, sendo qualquer um dos microcontroladores apresentados na tabela 8 adequados. Além destes elementos, adicionou-se uma placa auxiliar ao controlador DRV8825, que, além de facilitar a ligação com o Arduino e possuir o capacitor necessário, permite uma fácil escolha do moto de controle. Optou-se pela escolha do modo de 1/16 micropassos, para obter acelerações

e desacelerações mais suaves do motor. A figura 20 mostra o diaragrama e o conjunto real.

Figura 20 – Motor e controlador.



(a) Diagrama (b) Real

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com todo o conjunto acionador definido, bem como seu controlador e geometria da esteira, determinou-se velocidade final da esteira utilizando a partir das relações de transmissão. Os valores obtidos encontram-se na tabela 9.

Tabela 9 – Velocidades do motor, catraca e esteira

Parâmetro	Valor
Velocidade no eixo do motor	50,0 rpm
velocidade da catraca	12,5 rpm
Velocidade linear da esteira	0,05 m/s

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.3 ACIONADORES ELETROPNEUMÁTICOS E RAMPAS

Para seleção dos itens na esteira foram utilizados atuadores de duplo efeito, pelo fato de poder acioná-los e retraí-los de forma rápida e eficaz. A tabela 10 apresenta as principais características do atuador utilizado. Entre

essas, a mais importante é o curso, sendo ele capaz de varrer toda a largura da esteira.

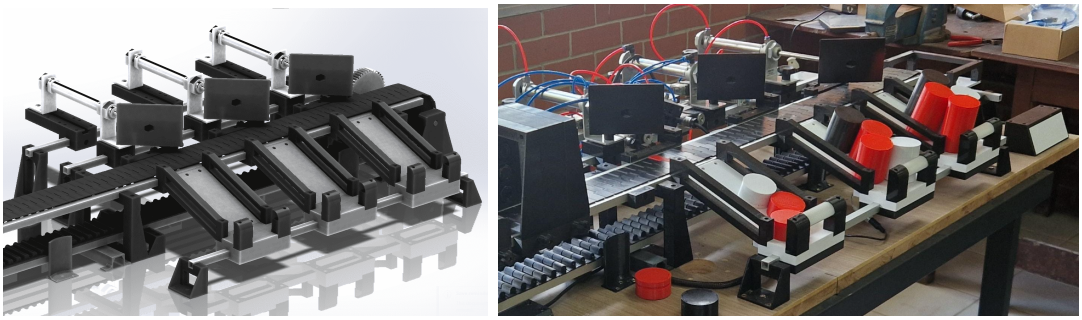
Tabela 10 – Características do atuador DSNU-20-100-PPV-A.

Característica	Valor
Curso	100 mm
Diâmetro do atuador	20 mm
Rosca da biela	M8
Pressão operacional	0,1 - 1 MPa
Modo de funcionamento	Dupla ação
Força teórica em 6 bar, retração	158,5 N
Força teórica em 6 bar, avanço	188,8 N

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Acoplada ao atuador, foi desenvolvida uma placa fabricada por impressão 3D, com a função de impulsionar o objeto sobre a esteira quando o atuador é ativado. A figura 21 mostra o conjunto atuador, rampa e placas.

Figura 21 – Modelo do conjunto atuador, rampa e placas.



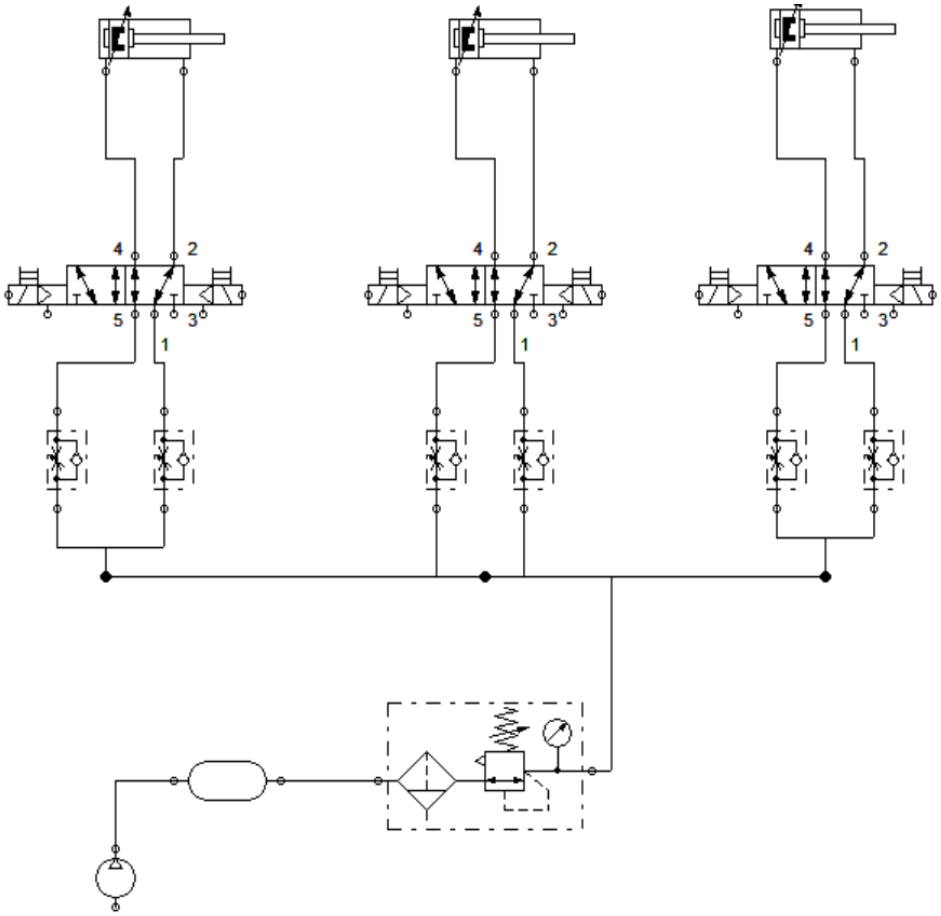
(a) 3D (b) Real

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para controle dos atuadores foram utilizadas eletroválvulas 5/2 da fabricante FESTO. Conforme o fabricante, as válvulas solenóides podem operar com tensão de 24 V e 48 V. O Arduino, por sua vez, possui um nível lógico de 5 V, sendo dessa forma impossível acionar as válvulas diretamente com suas portas de saída. Dessa forma, foram utilizados relés reversíveis, que permitem com um único relé acionar as válvulas para mover o atuador, acionando o solenóide de uma das pontas enquanto o outro é

desligado. O diagrama eletropneumático pode ser observado na figura 22 e os componentes utilizados na figura 11.

Figura 22 – Diagrama eletropneumático.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 11 – Componentes do sistema eletropneumático.

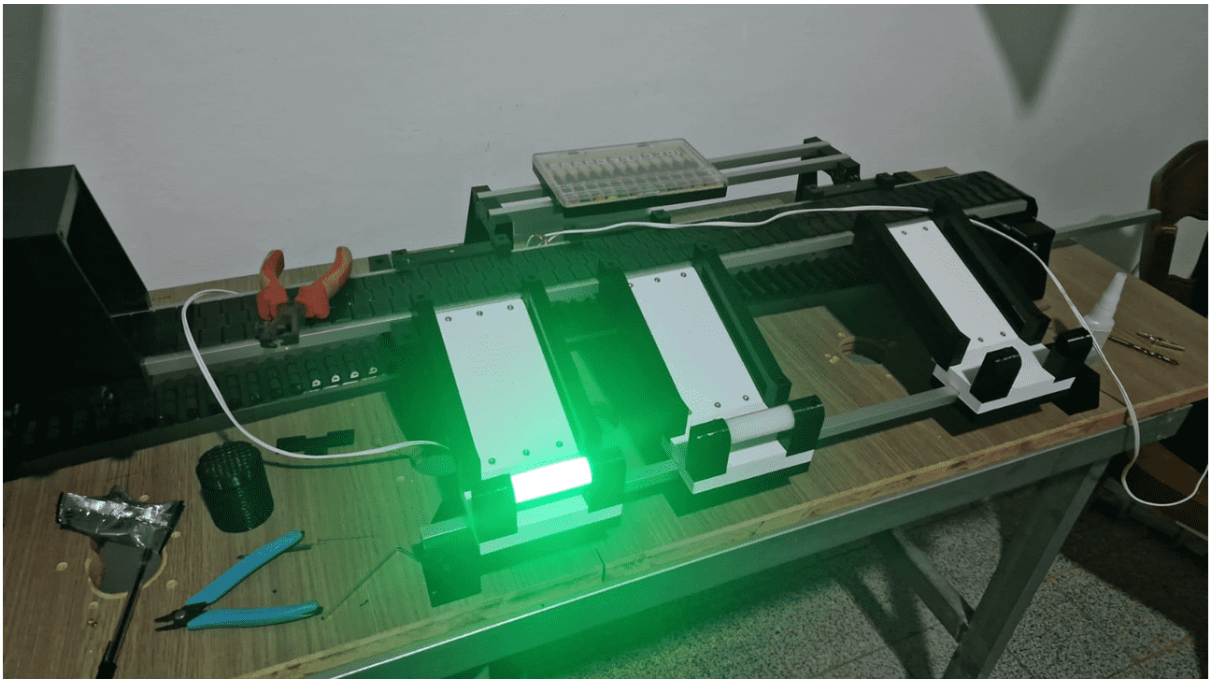
Quantidade	Componente	Fabricante	Modelo
3	Atuador de dupla ação	FESTO	DSNU-20-100-PPV-A
3	Válvula solenóide 5/2	FESTO	JMFH-5-1/4
6	Acionadores solenóides	FESTO	MSFG-24/42-50/60
3	Válvula reguladora de fluxo unidirecional	FESTO	GR-1/8-B
1	Bloco distribuidor	FESTO	FR-8-1/8
1	Unidade de tratamento de ar	FESTO	MSB4-1/4-FRC5:J1M1

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Quando ocorre o acionamento do atuador pneumático, os blocos caem sobre a rampa. Para ela, optou-se por projetá-la com componentes ligados

por meio de parafusos. Dessa forma, foi possível imprimir a superfície no qual o bloco desliza, com face voltada para impressora 3D, conferindo um acabamento liso e com baixa rugosidade, além de não haver necessidade de suportes para impressão da peça. Para o ângulo de inclinação da rampa adotou-se 20°. Outro elemento, incorporado ao componente, foi a presença de uma fita de led com a finalidade de fornecer um sinal luminoso, no instante de leitura do componente, indicando assim o destino final do item selecionado. A figura 23 mostra o conjunto.

Figura 23 – Conjunto com rampa e fita de led.



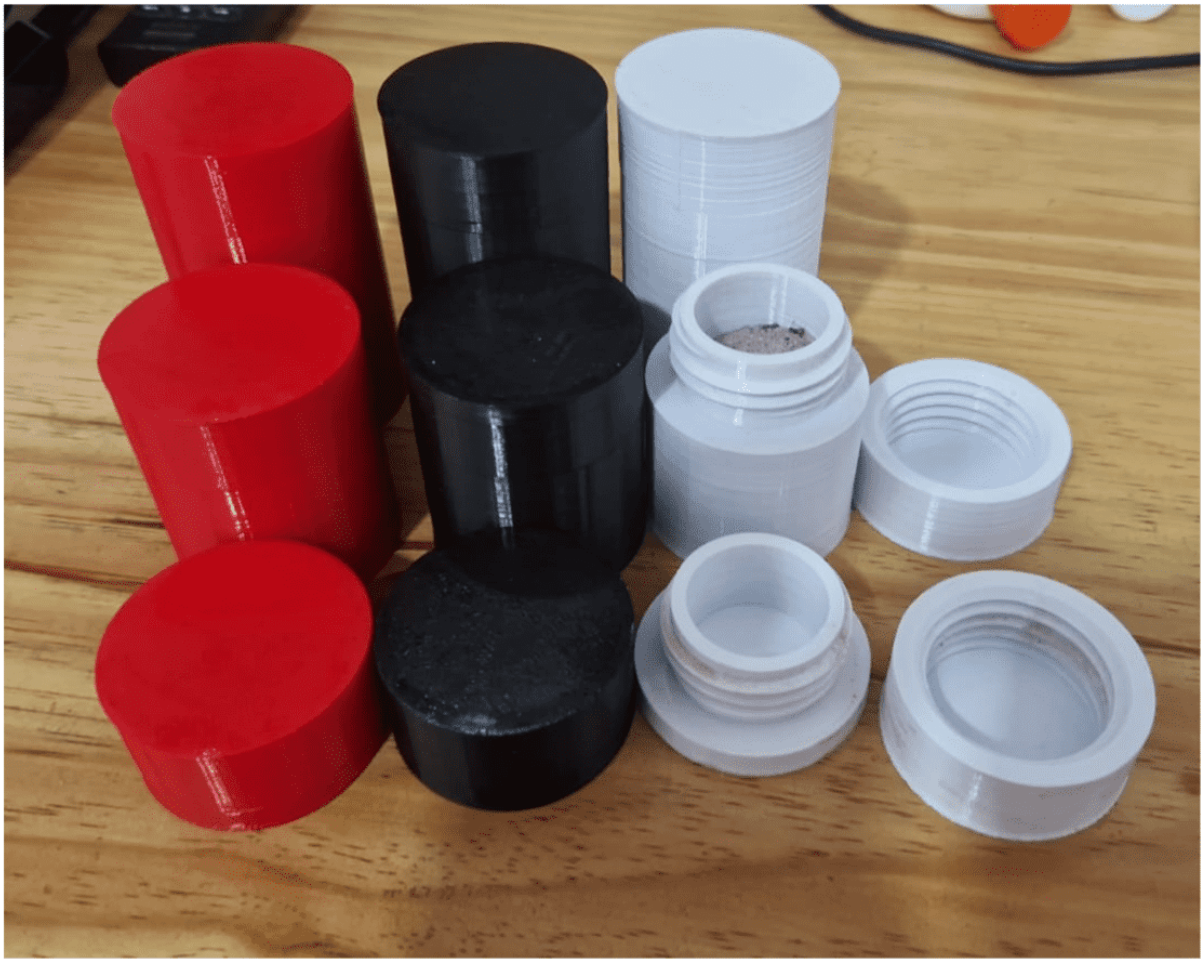
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.4 CONTROLADORES E SENSORES

Para escolha do tipo de sensor, foi importante determinar inicialmente o material a ser detectado. Devido à facilidade do uso de impressão, optou-se pela impressão de blocos cilíndricos com 3 alturas diferentes: 27 mm, 60 mm e 85 mm. Além disso, esses blocos foram projetados para serem ocos no interior, como mostra a figura 24. Isso, viabiliza o seu preenchimento com outros materiais, como areia ou metal. Para preenchimento, definiu-se o uso

de areia, o que fez com que sensores do tipo indutivo fossem descartados. Comparando os sensores fotorreflexivos e capacitivos, optou-se pelo primeira opção por uma maior simplicidade e menor custo.

Figura 24 – Blocos utilizados na esteira.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O sensor descrito na tabela 12 atende aos critérios de distância de detecção, visto que a distância máxima necessária é de 70 mm. Além disso, o sensor atende aos requisitos de tensão, sendo adequado para operar com 24 V. Entretanto, para leitura dos sinais dos sensores pelo Arduino, é necessário que o sinal seja de no máximo 5 V. Como solução utilizou-se um optoacoplador, que viabiliza a transmissão de um sinal elétrico entre dois circuitos isolados por meio de um LED e um dispositivo fotossensível. Dessa forma, é possível que o Arduino leia os dados dos sensores.

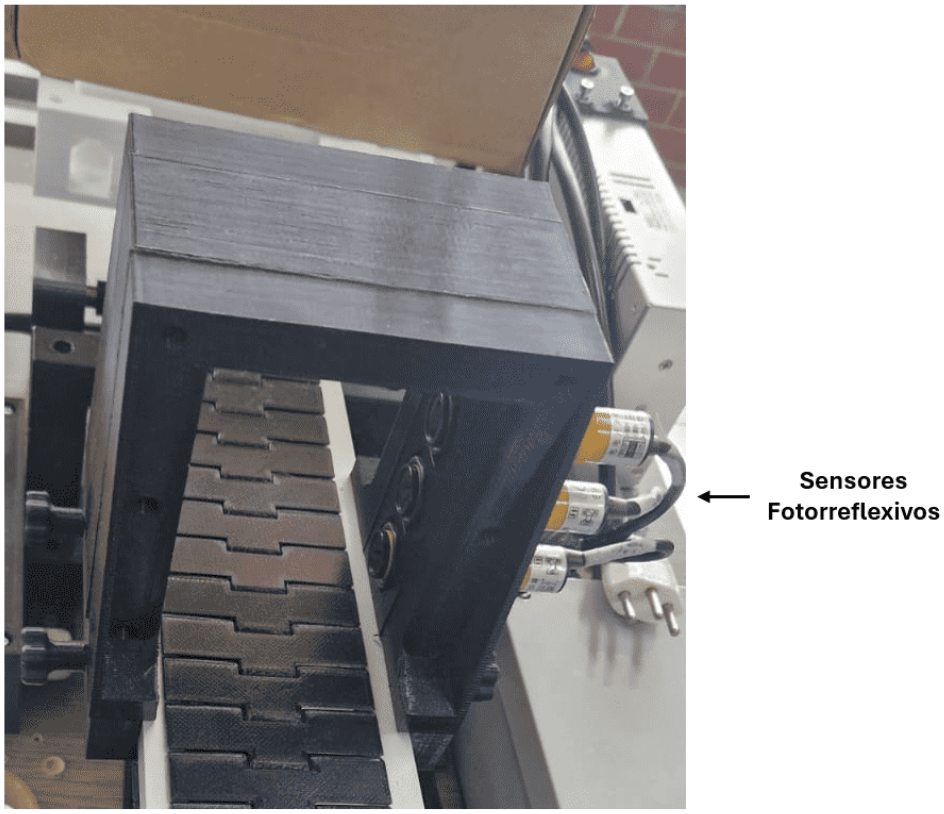
Tabela 12 – Característica do sensor fotorreflexivo difuso E3F-DS10P1.

Parâmetros	**Valor**
Tensão de Operação	6 - 36 V
Tipo de Saída	PNP
Distância de Detecção	0 - 10 cm

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para leitura das alturas das peças, utilizou-se uma configuração de 3 sensores posicionados em alturas diferentes, conforme mostra a figura 25. A depender do sensor acionado, determina-se a altura do bloco.

Figura 25 – Sensores posicionados na esteira.



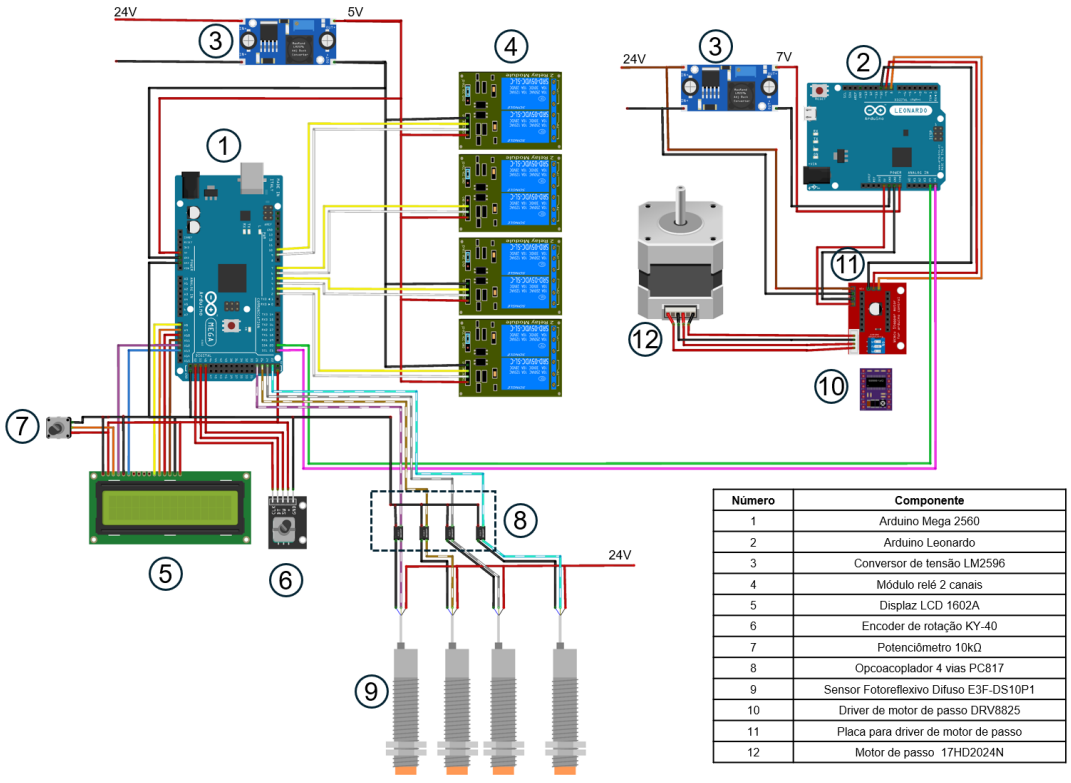
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Como forma de simplificar a interação do usuário com a esteira, foram incluídos um display LCD e um encoder de rotação. Dessa forma, foi possível programar uma interface de usuário capaz de definir parâmetros como velocidade de rotação do motor. O controlador escolhido para leitura dos sensores e comando do display foi o Arduino Mega 2560. O motivo para

escolha deste foi o número de entradas e saídas necessárias para controlar todos os elementos do sistema, além de permitir implementações futuras de novos elementos. Para alimentar todo o sistema, utilizou-se um fonte de 24 V e 15 A. Essa fonte também foi escolhida com o intuito de permitir atualizações. Visto que o Arduino não suporta a tensão de entrada de 24 V, utilizou-se o conversor de tensão LM2596, que passa a regular a tensão para 5 V.

Esse Arduino, irá comunicar-se com o Arduino Leonardo por meio de um protocolo de comunicação chamado I2C. Esse protocolo, permite a comunicação com múltiplos dispositivos utilizando apenas dois barramentos de dados. Assim o Arduino mega envia a informação de velocidade desejada para o outro, que interpreta o sinal e envia o comando para o controlador do motor de passo. A figura mostra uma representação de todos os elementos do sistema elétrico 26.

Figura 26 – Diagrama de componentes elétricos.

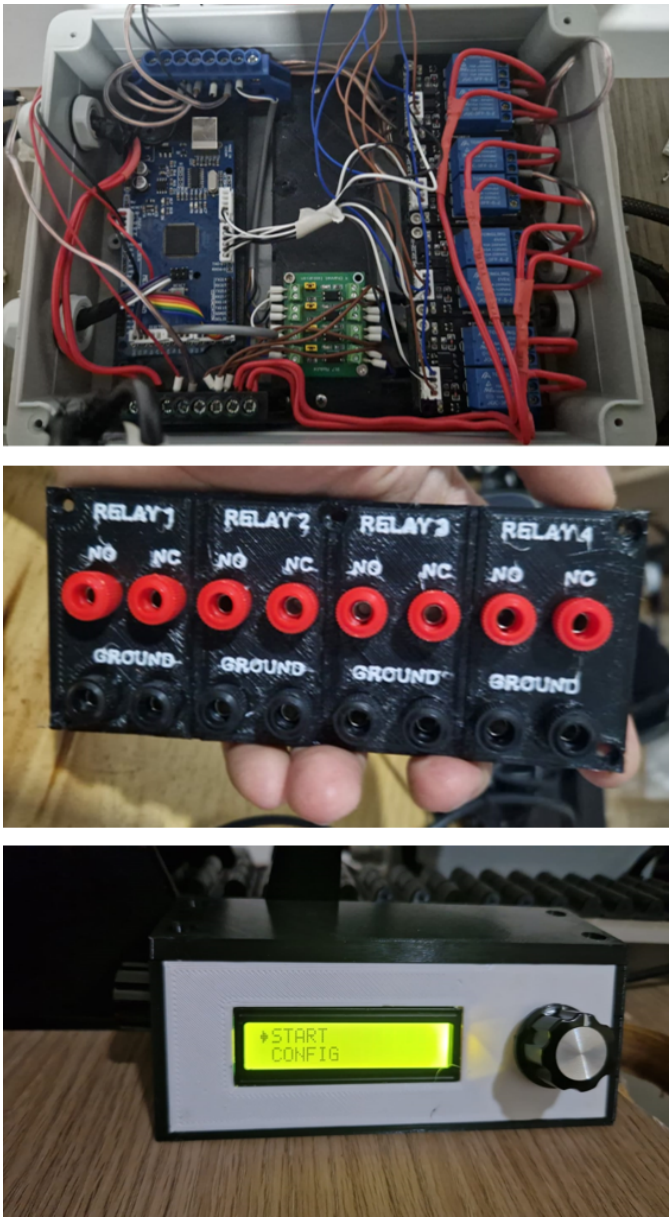


Número	Componente
1	Arduino Mega 2560
2	Arduino Leonardo
3	Conversor de tensão LM2596
4	Módulo relé 2 canais
5	Displaz LCD 1602A
6	Encoder de rotação KY-40
7	Potenciômetro 10kΩ
8	Opcoacoplador 4 vias PC817
9	Sensor Fotoreflexivo Difuso E3F-DS10P1
10	Driver de motor de passo DRV8825
11	Placa para driver de motor de passo
12	Motor de passo 17HD2024N

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

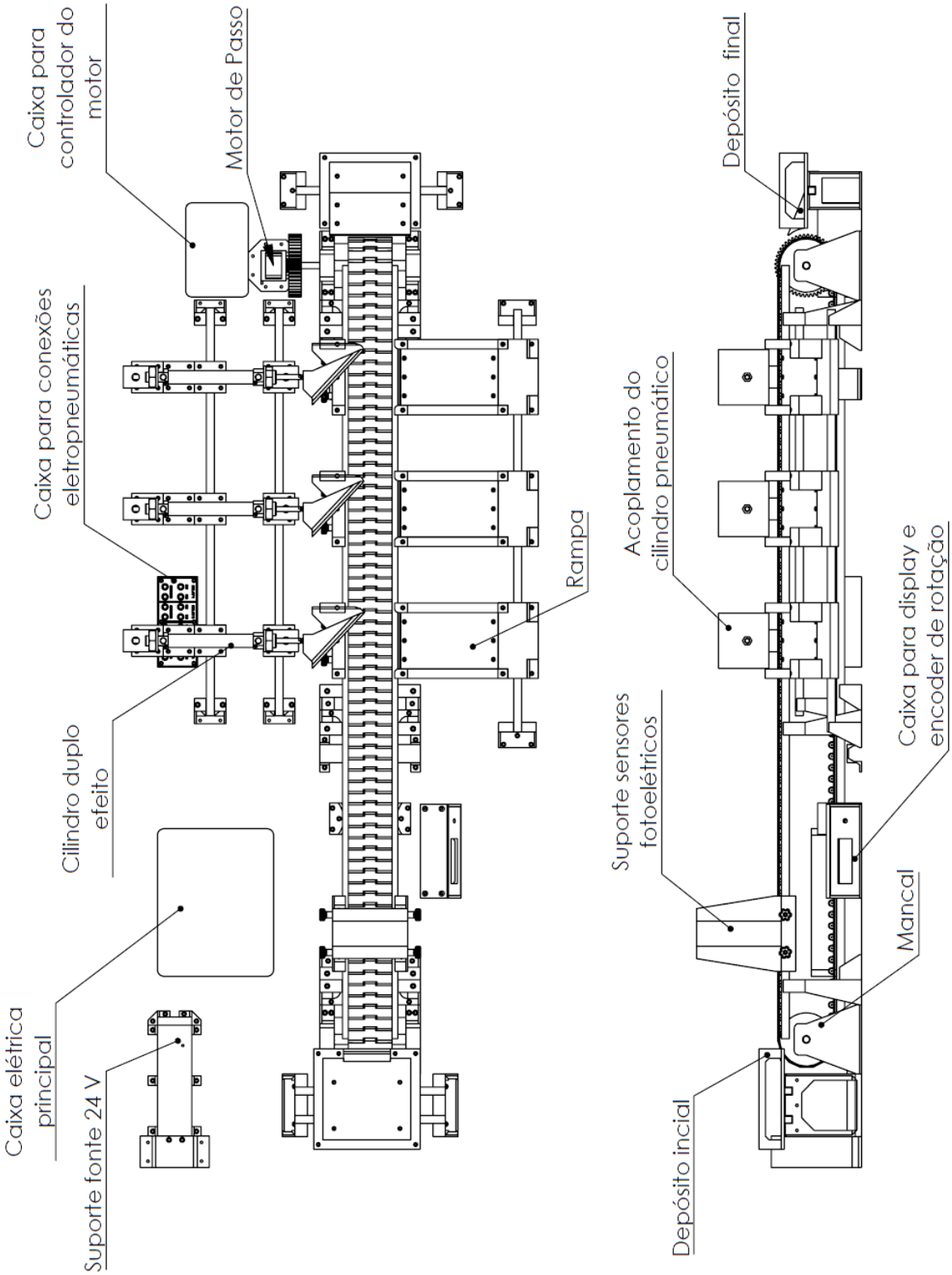
A maior parte dos componentes foram ligados utilizando conectores do tipo JST de 2.54 mm, que foram crimpados conforme necessidade. Para todos os cabos expostos na bancada, ou seja, que não estão no interior de alguma caixa de proteção, foi utilizado uma manga de nylon para proteção. Além disso, para conexão das válvulas solenóides aos relés foram usados conectores de engate rápido, assim permitindo mudar a ordem do acionamento dos pistões. A figura 27 mostra alguns dos elementos do sistema elétrico e a figura 28 mostra sua disposição na esteira.

Figura 27 – Componentes elétricos na esteira



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 28 – Disposição dos componentes elétricos na esteira

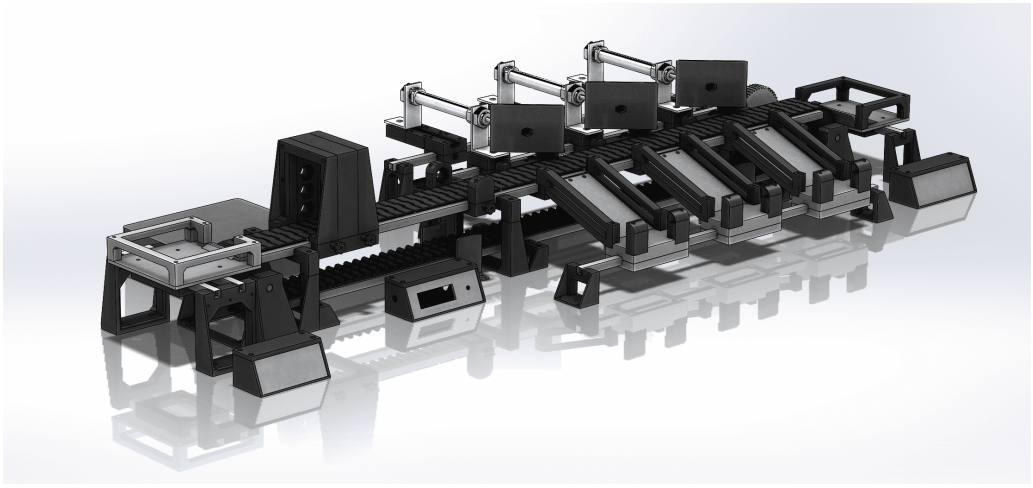


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.5 ANÁLISE DOS CUSTOS TOTAIS

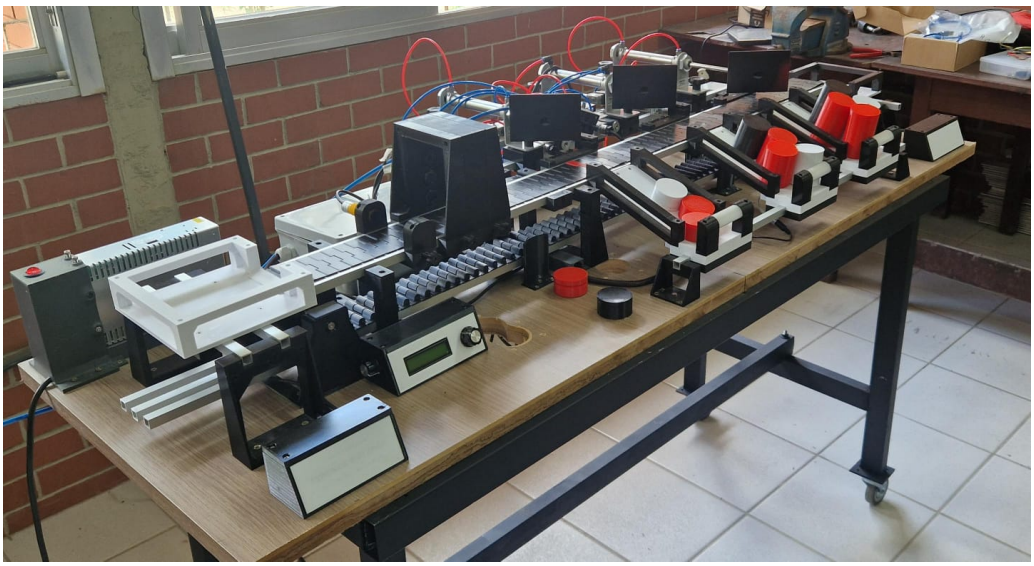
Desenvolveu-se uma esteira eletropneumática capaz de selecionar itens por tamanho, como demonstrado no vídeo disponibilizado no Youtube[2]. Para sua construção estima-se que no total foram gastos aproximadamente 400 horas de impressão e gastos 12 kg de filamento de impressão, sendo 6 kg de PETG e 6 kg de PLA. O modelo 3D e real da esteira são mostrados nas figuras 29 e 30.

Figura 29 – Modelo 3D da esteira.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 30 – Esteira construída.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

[2] https://www.youtube.com/watch?v=cdKI-ev5YRc

Para análise dos custos totais, foram considerados os principais elementos da construção da bancada, isso inclui gasto com material de impressão e dispositivos elétricos. Todos os elementos eletropneumáticos, como pistões e válvulas, não foram incluídos, visto que já estavam disponíveis no Laboratório de Acionamentos e Comandos Hidropneumáticos do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPB. Um resumo de todo o cálculo pode ser visto na tabela 13.

Tabela 13 – Custos dos componentes da esteira.

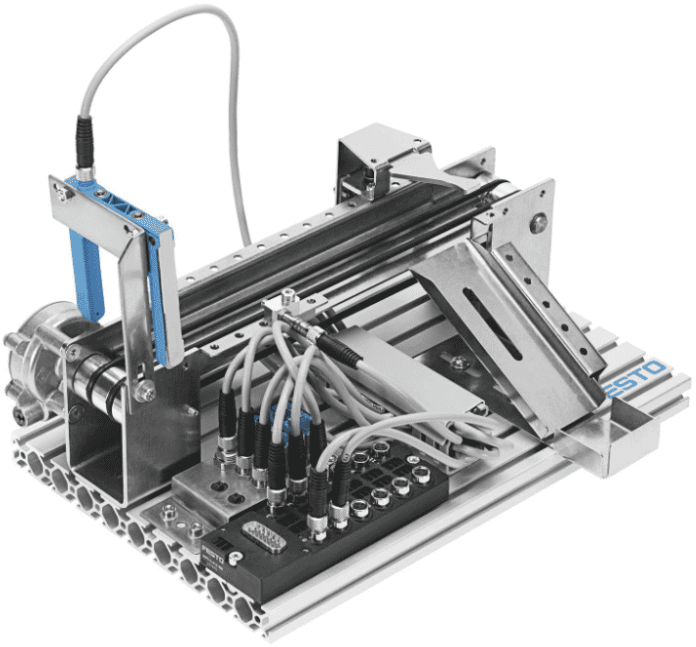
Item	**Quantidade**	**Custo Unitário**	**Custo Total**
PETG	6 kg	R$ 109,00	R$ 654,00
PLA	6 kg	R$ 109,00	R$ 654,00
Perfil alumínio quadrado 1/2- 6 m	12 m	R$ 40,00	R$ 80,00
Arduino Mega 2560	1 un.	R$ 70,00	R$ 70,00
Arduino Leonardo	1 un.	R$ 40,00	R$ 40,00
Optoacoplador PC817	1 un.	R$ 20,43	R$ 20,43
Relés 2 canais	4 un.	R$ 8,30	R$ 33,20
Motor de passo nema 17	1 un.	R$ 86,00	R$ 86,00
Driver de motor de passo	1 un.	R$ 23,00	R$ 23,00
Placa para driver de motor de passo	1 un.	R$ 16,00	R$ 16,00
Encoder de rotação KY-40	1 un.	R$ 2,00	R$ 2,00
Display LCD 16x2 - 1602A	1 un.	R$ 10,00	R$ 10,00
Sensores fotorreflexivos E3F-DS10P1	4 un.	R$ 15,04	R$ 60,16
Regulador de tensão	2 un.	R$ 12,00	R$ 24,00
Fita de led COB 24 V - 1m	1 m	R$ 20,00	R$ 20,00
Condutores AWG24 - 50 m	1 un.	R$ 100,00	R$ 100,00
Manga de nylon para condutores - 50 m	1 un.	R$ 50,00	R$ 50,00
Conectores elétricos diversos	-	R$ 100,00	R$ 100,00
Fonte 24 V 15 A	1 un.	R$ 120,90	R$ 120,90
Parafusos M3 x 30 mm	60 un.	R$ 0,25	R$ 12,50
Parafusos M3 x 25 mm	60 un.	R$ 0,20	R$ 10,00
Parafusos M3 x 15 mm	60 un.	R$ 0,18	R$ 9,00
Parafusos M3 x 10 mm	60 un.	R$ 0,18	R$ 9,00
Parafusos M4 x 10 mm	10 un.	R$ 0,18	R$ 1,80
Porcas M3	240 un.	R$ 0,08	R$ 19,20
Porcas M4	10 un.	R$ 0,10	R$ 1,00
Parafusos Chipboard 4 x 16 mm	60 un.	R$ 0,05	R$ 3,24
Rolamentos SKF 1200 ET9N	4 un.	R$ 50,00	R$ 200,00
Eixo 10 mm usinado	2 un.	R$ 50,00	R$ 100,00
TOTAL	-	-	**R$ 2.529,43**

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A fim de comparação, buscou-se no mercado por esteiras construídas

com mesma finalidade. A figura 31 expõe uma esteira produzida pelo fabricante FESTO e possui custo de R$ 7.762,67.

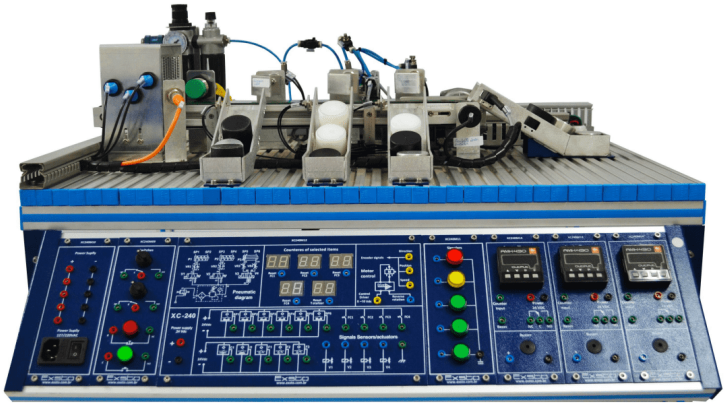
Figura 31 – Esteira FESTO



Fonte: (FESTO, 2024).

Um segundo modelo analisado é do fabricante EXTSO modelo XC243, figura 32. Esta possui funcionalidades similares ao construído neste trabalho, apresentando custo total de R$ 21.000,00.

Figura 32 – Esteira EXTSO XC243



Fonte: (EXTSO, 2024).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho atingiu os objetivos de concepção e contração de uma esteira didática. Esta, além de apresentar de uma forma prática a simulação de um processo na indústria, seja de transporte por esteira, quanto de seleção de itens, permite ver outros elementos em prática como o uso de atuadores pneumáticos e controles eletromecânicos, bem como interface com eletrônica e lógica de programação.

Foi possível fabricar grande parte dos elementos, com impressão 3D, mostrando dessa forma um novo papel que a manufatura aditiva vem desempenhando. Esta não só está cada vez mais acessível, mas mostra-se como um elemento importante para construção e desenvolvimento de protótipos de engenharia.

Além disso, o uso da plataforma de código-fonte aberta Arduino permitiu um fácil desenvolvimento de todos os elementos elétricos do sistema. É possível ler dados de sensores, processá-los e enviar comandos aos relés. Esses por sua vez enviam dados aos solenóides e acionam os pistões necessários. Junto a isso, sempre que necessário existe um amplo mercado de sensores, atuadores compatíveis, isso torna fácil encontrar elementos para uma aplicação específica.

Do ponto de vista financeiro, a construção da esteira apresentou um custo baixo, quando comparada as soluções existentes no mercado. Além disso. destaca-se também que o fato da esteira ser baseada em impressão 3D, ela torna-se bastante modular. Dessa forma, a implementação e acoplamento de novos módulos torna-se bastante simples.

Por fim, para trabalhos futuros, recomenda-se conduzir uma análise de fadiga e desgaste dos elos da esteira. Adicionalmente, sugere-se a implementação de um sensor de cor para selecionar os itens baseados nessa característica.

REFERÊNCIAS

17HDN SERIES DATASHEET. *17HDN Series Datasheet*. 2024. Disponível em: <https://datasheetspdf.com/mobile/977515/ETC/17HD2024N/1>. Acesso em: 1 de Jan. de 2024.

AMERICAN CHAIN ASSOCIATION. *Standard Handbook of Chains: Chains for Power Transmission and Material Handling, Second Edition*. [S.l.]: CRC Press, 2005. (Series Editor: Lynn Faulkner).

ANANTH, K. N. S.; RAKESH, V.; VISWESWARAO, P. K. Design and selecting the proper conveyor-belt. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, v. 4, n. 2, p. 43–49, 2013.

ARDUINO. *Arduino UNO R3*. 2005. Disponível em: https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/. Acesso em: 3 de abril de 2024.

BAJI, A.; PATIL, U. Study of different types of conveyor system and their use according to the various needs of different industries. In: . [S.l.: s.n.], 2023.

BRAGA, N. C. *Relés: Circuitos e aplicações*. [S.l.]: Editora Newton C. Braga, 2017.

BUDYNAS, R. G.; NISBETH, J. K. *Elementos de Máquinas de Shigley-10ª Edição*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2016.

CAMPBELL, T. et al. Could 3d printing change the world. *Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing, Atlantic Council, Washington, DC*, JSTOR, v. 3, n. 1, p. 18, 2011.

CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de máquinas elétricas*. [S.l.]: AMGH editora, 2013.

CICALA, G. et al. Engineering thermoplastics for additive manufacturing: A critical perspective with experimental evidence to support functional applications. *Journal of applied biomaterials & functional materials*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 15, n. 1, p. 10–18, 2017.

COLLINS, J. *Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas. LTC*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006.

CONSTANDINOU, T. G. Tudo sobre motores de passo. *Santa Maria: UFSM*, 2005.

DIVYATHEJ, M.; VARUN, M.; RAJEEV, P. Analysis of mechanical behavior of 3d printed abs parts by experiments. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, v. 7, n. 3, p. 116–124, 2016.

EARL, B. All about stepper motors. *What Is a Stepper Motor?/ All About Stepper Motors/ Adafruit Learning System*, 2015.

ERTHAL, J. *Correntes de rolos*. 2024. Notas de aula. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC038/Prof.Jorge_Erthal/Slides/5-1-Correntes%20de%20Rolos.pdf. Acesso em: 1 de Abr. de 2024.

FIALHO, A. B. *Automação pneumática–Projetos, dimensionamento e análise de circuitos*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2018.

GUPTA, A. K.; ARORA, S. K. *Industrial automation and robotics*. [S.l.]: Laxmi publications, 2011.

KRISTIAWAN, R. B. et al. A review on the fused deposition modeling (fdm) 3d printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*, De Gruyter, v. 11, n. 1, p. 639–649, 2021.

LOGISTIC AUTOMATION. *The History Of Conveyors*. 2024. Disponível em: https://www.lacconveyors.co.uk/the-history-of-conveyors/. Acesso em: 10 de Abr. de 2024.

LOUIS, L. working principle of arduino and u sing it. *International Journal of Control, Automation, Communication and Systems (IJCACS)*, v. 1, n. 2, p. 21–29, 2016.

MARTINEZ, A. C. P. et al. Avaliação do comportamento mecânico dos polímeros abs e pla em impressão 3d visando simulação de desempenho estrutural. *Gestão & Tecnologia de Projetos*, v. 14, n. 1, p. 125–141, 2019.

MCGUIRE, P. M. *Conveyors: application, selection, and integration*. [S.l.]: CRC Press, 2009.

MELCONIAN, S. *Elementos de Máquinas-Edição revisada, atualizada e ampliada*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2018.

PETRUZELLA, F. *Motores Elétricos e Acionamentos: Série Tekne*. [S.l.]: Bookman Editora, 2013.

POLULU. *Pololu DRV8825 Stepper Motor Driver Carrier, High Current*. 2024. https://www.pololu.com/product/2133. Acesso em: 14 abr. 2024.

PRUDENTE, F. *Automação industrial pneumática: Teoria e Aplicações*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.

PRUSA. *Prusa Material Table*. 2024. Disponível em: https://help.prusa3d.com/materials. Acesso em: 1 de Jan. de 2024.

ROGGIA, L.; FUENTES, R. C. Automação industrial. *Santa Maria: E-tec Brasil*, 2016.

SACOMANO, J. B. et al. *Indústria 4.0*. [S.l.]: Editora Blucher, 2018.

SANTANA, L. et al. Estudo comparativo entre petg e pla para impressão 3d através de caracterização térmica, química e mecânica. *Matéria (Rio de Janeiro)*, SciELO Brasil, v. 23, p. e12267, 2018.

SANTOS, V. P. de A. Motor de passo. 2008.

SHANMUGAM, V. et al. Fatigue behaviour of fdm-3d printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials. *International Journal of Fatigue*, Elsevier, v. 143, p. 106007, 2021.

SILVA, R. A.; JUNIOR, S. L. S. *Automação e Instrumentação Industrial com Arduino-Teoria e Projetos*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2015.

SKF. *SKF - Rolamentos autocompensadores de esferas*. 2024. https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/ball-bearings/self-aligning-ball-bearings/productid-1200%20ETN9. Acesso em: 14 abr. 2024.

SOLOMAN, S.; TABOADA, S. G. *Sensores E Sistemas de Controle Na Indústria* . [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2012.

VOLPATO, N. *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. [S.l.]: Editora Blucher, 2021.

WITTBRODT, B. T. et al. Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-d printers. *Mechatronics*, Elsevier, v. 23, n. 6, p. 713–726, 2013.