



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

ALLAN MIQUEIAS DE CARVALHO SANTOS

**GARRA ROBÓTICA FLEXÍVEL INTEGRADA A VISÃO COMPUTACIONAL COM
ACIONAMENTO PNEUMÁTICO: APLICAÇÃO DE SOFT ROBOTICS**

PAU DOS FERROS

2024

ALLAN MIQUEIAS DE CARVALHO SANTOS

**GARRA ROBÓTICA FLEXÍVEL INTEGRADA A VISÃO
COMPUTACIONAL COM ACIONAMENTO PNEUMÁTICO:
APLICAÇÃO DE SOFT ROBOTICS**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Petrócio Ricardo Tavares de Medeiros, Prof. Dr. - (UFERSA)

PAU DOS FERROS

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S237g Santos, Allan Miqueias de Carvalho.
Garra robótica flexível integrada a visão
computacional com acionamento pneumático:
aplicação de soft robotics / Allan Miqueias de
Carvalho Santos. - 2024.
56 f. : il.

Orientador: Petrúcio Ricardo Tavares de
Medeiros.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de --Selecione um
Curso ou Programa--, 2024.

1. Soft Robotics. 2. Robô. 3. Visão
Computacional. 4. Modelagem. 5. Impressão 3D. I.
Medeiros, Petrúcio Ricardo Tavares de , orient.
II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ALLAN MIQUEIAS DE CARVALHO SANTOS

GARRA ROBÓTICA FLEXÍVEL INTEGRADA A VISÃO COMPUTACIONAL COM
ACIONAMENTO PNEUMÁTICO: APLICAÇÃO DE SOFT ROBOTICS

Monografia apresentada à Universidade Federal
Rural do Semi-Árido como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel em Enge-
nharia de Computação.

Aprovada em: 25 de Outubro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Petrúcio Ricardo Tavares de Medeiros, Prof. Dr.
(UFERSA)
(Orientador)

Cecilio Martins de Souza Neto, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Adller de Oliveira Guimaraes, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus por ter me proporcionado a possibilidade de traçar mais um objetivo em minha história e vida acadêmica, ter me permitido vencer todas as barreiras e dificuldades que eu tenha enfrentado ao longo desses anos e me permitindo ter coragem, fé e determinação para chegar a reta final do curso logrando sucesso nos meus objetivos.

Agradeço a toda minha família Mãe, Pai e minha irmã, pelo apoio, paciência e empenho em ter me dedicado tempo, espaço e inspiração, para que eu não desanimasse nem existisse em desistir diante de cada momento difícil e que me proporcionou todo o sentido e foco em continuar, não encarando dificuldades mas apenas buscando soluções independentemente da intercorrência que vinha a ocorrer focando em alcançar o melhor resultado possível contornando as dificuldades.

Agradeço em especial a minha esposa Vanessa Oliveira, por todos os momentos que estive ao meu lado me conduzindo a concluir essa jornada, me proporcionando todo o apoio necessário em qualquer situação, se colocando sempre a disposição em me ajudar nos momentos em que eu solicitava seu apoio sem colocar dificuldades, principalmente estando ao meu lado independentemente da condição ou da situação.

Agradeço ao meu orientador por todos os momentos de apoio e de auxílio quando eu solicitava me proporcionando o material necessário para o desenvolvimento do projeto sem colocar qualquer dificuldade, buscando me mostrar as possíveis saídas quando encontrava alguma dificuldade, não medindo esforços, tempo e se dedicando conforme a sua disponibilidade em me repassar também todo seu conhecimento e me guiando nos caminhos a serem seguidos para alcançar os objetivos.

Agradeço a Banca Examinadora por ter se disponibilizado e se dedicado a avaliar e tão bem analisar com propriedade e maestria todas as linhas desse trabalho me mostrando os pontos fracos e pontos fortes, não só como também analisando meu desempenho acadêmico de forma proporcional ao me conduzir à alcançar os objetivos almejados a partir de suas análises.

Agradeço aos meus Amigos e colegas de curso que trilharam ao meu lado todos os momentos bons e ruins e que se colocaram também a disposição em me ajudar em qualquer situação e que compartilharam também de histórias, metas e objetivos afim de logarmos todos juntos exito na carreira acadêmcia.

A todos estes, dedico este texto.

EPIÍGRAFE

“Eu pedi forças e Deus me deu dificuldades para me tornar forte. Eu pedi sabedoria e Deus me deu problemas para resolver. Eu pedi coragem e Deus me deu perigos para superar. Eu pedi amor e Deus me deu pessoas com problemas para ajudar. Eu pedi favores e Deus me deu oportunidades. Eu não recebi tudo que pedi, mas tive tudo de que precisava...”

(Bern Cohen (Rabbi Grossman) no filme Frank vs God.)

RESUMO

Alinhada às novas tecnologias e integrada ao ramo da Robótica, a área de automação industrial tem avançado significativamente, especialmente em processos de alto valor. Dentro desse contexto, a robótica evolui constantemente, incorporando inovações como os Soft Robotics. A adaptação aos avanços tecnológicos e às exigências mínimas do setor de automação, especialmente no segmento industrial, é fundamental. Além disso, essa área também desempenha um papel crucial em setores como a manipulação de substâncias químicas e de objetos altamente perigosos ao contato humano direto. Nessa perspectiva, o uso de robôs, especialmente braços robóticos, traz uma proposta de melhoria para tarefas delicadas, precisas, repetitivas ou exaustivas. A robótica não tem como objetivo principal substituir o ser humano, mas atuar como uma ferramenta para auxiliá-lo, liberando-o para realizar tarefas que as máquinas, por suas limitações, não podem desempenhar, respeitando as necessidades biológicas humanas. Este trabalho propõe a integração de Soft Robotics em braços robóticos, com foco em superar as limitações dos braços robóticos convencionais, que possuem uma estrutura rígida e não conseguem executar tarefas que exijam maior delicadeza ou cuidado. Os Soft Robotics, inspirados em padrões de locomoção de animais, especialmente invertebrados, são capazes de atender a essa demanda, muitas vezes crucial para alcançar resultados promissores e significativos. A impressão 3D surge como uma ferramenta essencial, permitindo a fabricação de peças em diferentes formas e tamanhos, o que facilita o desenvolvimento dessas tecnologias. Além disso, o uso de visão computacional possibilita a manipulação interativa dos Soft Robotics, evitando o contato direto com a área de trabalho do robô. A integração de todas essas tecnologias resulta em aplicações úteis em diversas áreas, como a biomedicina e a automação industrial. Essa combinação permite o desenvolvimento de melhorias e aperfeiçoamentos que podem ser aplicados a novas áreas, desafios e tarefas do cotidiano, podendo ser reutilizadas, parcial ou integralmente, em diferentes contextos.

Palavras-chave: Soft Robotics.Robô.Visão Computacional.Modelagem.Impressão 3D

ABSTRACT

Aligned with new technologies and integrated into the field of Robotics, the industrial automation sector has advanced significantly, especially in high-value processes. Within this context, robotics is constantly evolving, incorporating innovations such as Soft Robotics. Adapting to technological advances and the minimum requirements of the automation sector, especially in the industrial segment, is essential. Furthermore, this field also plays a crucial role in sectors such as the handling of chemical substances and objects that are highly dangerous for direct human contact. From this perspective, the use of robots, especially robotic arms, offers an improvement for tasks that are delicate, precise, repetitive, or exhausting. The primary goal of robotics is not to replace humans, but to act as a tool to assist them, freeing them to focus on tasks that machines, due to their limitations, cannot perform, while respecting human biological needs. This work proposes the integration of Soft Robotics into robotic arms, focusing on overcoming the limitations of conventional robotic arms, which have rigid structures and cannot perform tasks requiring greater delicacy or care. Soft Robotics, inspired by the locomotion patterns of animals, especially invertebrates, are capable of meeting this demand, which is often crucial for achieving promising and significant results. 3D printing emerges as an essential tool, enabling the manufacture of components in various shapes and sizes, facilitating the development of these technologies. Additionally, the use of computer vision allows for interactive manipulation of Soft Robotics, avoiding direct contact with the robot's workspace. The integration of all these technologies results in useful applications in various fields, such as biomedicine and industrial automation. This combination enables the development of improvements and enhancements that can be applied to new areas, challenges, and everyday tasks, and can be reused, partially or fully, in different contexts

Keywords: Soft Robotics.Robot.Computer Vision.Modeling.3D Printing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelagem de peças do controlador da garra.	23
Figura 2 – Molde inferior da garra	24
Figura 3 – Molde superior da garra	25
Figura 4 – Arduino R3	26
Figura 5 – Motor NEMA 17HS	27
Figura 6 – Esquemático Simplificado	28
Figura 7 – Driver DRV8825	29
Figura 8 – Potenciômetro	30
Figura 9 – Silicone em processo de cura	31
Figura 10 – Parte superior sobre a inferior	32
Figura 11 – Controle e acionamento da garra robótica por meio da visão computacional.	33
Figura 12 – Molde em 3D	35
Figura 13 – Soft Robotics	36
Figura 14 – Barra Roscada	36
Figura 15 – Planta de Acionamento	37
Figura 16 – Servo Motor	37
Figura 17 – Braço Robótico	38
Figura 18 – Segunda conexão de ar	39
Figura 19 – Sistema completo: Planta, Braço e SR	40
Figura 20 – Fluxograma da programação	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Estado da arte	14
1.2	Motivações	15
1.3	Objetivos	16
1.3.1	<i>Objetivo Geral</i>	16
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	16
1.4	Metodologia	17
1.5	Organização do texto	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
3	METODOLOGIA DE CONSTRUÇÃO DE GARRA ROBÓTICA MOLE	22
3.1	Modelagem e impressão 3D	22
3.1.1	<i>Sistema de controle da garra robótica</i>	22
3.1.2	<i>Moldes da garra robótica mole</i>	24
3.2	Montagem do circuito de controle	25
3.2.1	<i>Microcontrolador Embarcado</i>	25
3.2.2	<i>Servo Motor Nema 17</i>	26
3.2.3	<i>Driver DRV8825</i>	27
3.2.4	<i>Braço robótico</i>	29
3.2.5	<i>O Soft Robotics</i>	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1	Controle da garra robótica usando visão computacional	33
4.2	Garra robótica usando material flexível	34
4.3	Sistema de acionamento da garra	35
4.4	Funcionamento da garra robótica e testes	36
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
	REFERÊNCIAS	44
	APÊNDICES	46
	APÊNDICE A – Trecho de código visão computacional	46
	APÊNDICE B – Trecho de código tratamento serial Arduino	47
	APÊNDICE C – Pranchas	48

1 INTRODUÇÃO

As novas tecnologias e o avanço da automação no cotidiano das empresas e no âmbito social com impacto mundial, trouxe novos desafios ao ramo da robótica inserida principalmente no meio industrial, com objetivos oriundos da busca pela facilidade em deslocar o ser humano de trabalhos repetitivos, onde na qual, muitos ainda trazem um risco significativo a vida. O avanço da robótica e meios de baixo e alto impacto como por exemplo no ramo da biomedicina, indústria automobilística, operações perigosas como a desativação de bombas resgate em meio de difícil acesso, o avanço e a busca na exploração espacial fez com que a automação fosse cotidiano, até se tornar algo importante para a vida. A robótica tendo como eixo principal a automação em ambientes de trabalho industrial trás como exemplo de impacto significativo os braços robóticos, que por sua vez torna o trabalho preciso, ágil, menos oneroso e mais produtivo. Dessa maneira, um robô industrial pode ser definido como um sistema mecânico articulado que tem como objetivo principal a realização de operações pré-definidas que são realizadas através de um supervisor de controle que deverá especificar o que o manipulador terá que fazer para que o mesmo possa realizar as tarefas especificadas (NETO *et al.*, 2021).

Com a adaptação tecnológica e o protagonismo dos sistemas inteligentes, os mecanismos robóticos e o avanço das ciências e tecnologias impulsionaram uma escalada no crescimento de sistemas inteligentes e autônomos. Todavia, os robôs tradicionais, amplamente utilizados, são majoritariamente fabricados com materiais rígidos, empregando atuadores para a execução de operações ou comandos, com o apoio de sensores para fornecer feedback. Apesar do impacto significativo e do uso desses robôs em diversas aplicações e ambientes, como automação residencial e engenharias, a robótica ainda apresenta limitações devido à rigidez de sua construção, especialmente em cenários que exigem uma ação mais delicada. Em situações que demandam a adaptação ou deformação do robô para realizar operações com mais eficácia, a rigidez dos robôs convencionais pode comprometer o alcance do objetivo.

A necessidade de atender a exigências que a robótica tradicional, feita com materiais rígidos, não consegue suprir levou ao desenvolvimento de um novo tipo de material utilizado na fabricação de robôs, gerando o que é chamado de *Soft Robotics*, ou popularmente conhecido como robótica flexível. Essa evolução vai além de uma simples tendência. A comunidade científica está empenhada em promover um verdadeiro avanço tecnológico, impulsionado pela necessidade de evoluir para uma robótica mais amigável ao ser humano (SCHMITT *et al.*, 2018). Nesse contexto, o uso dessa nova tecnologia robótica traz grandes progressos em áreas sensíveis

que exigem robôs mais adaptáveis ao ambiente. A bioinspiração, que há muito tempo é um tema controverso na comunidade robótica, é certamente uma das precursoras da robótica flexível. Os sistemas bioinspirados, que imitam as capacidades de animais ou seres humanos, têm sido projetados há muito tempo utilizando, em sua maioria, arquiteturas de corpo rígido associadas a partes flexíveis (SCHMITT *et al.*, 2018).

Com a adaptação tecnológica e o protagonismo dos sistemas inteligentes, os mecanismos robóticos e o avanço das ciências e tecnologias impulsionaram uma escalada no crescimento de sistemas inteligentes e autônomos. Porém, os robôs tradicionais, que são os mais presentes, costumam ser fabricados quase totalmente com materiais rígidos, utilizando atuadores para realizar operações ou executar comandos, com o apoio de sensores para fornecer *feedback*. Apesar de seu impacto e uso em várias aplicações e ambientes, como automação residencial e áreas de engenharia, a robótica, em alguns aspectos, enfrenta limitações devido à sua construção rígida. Isso exige adaptações em ambientes atípicos, bem como em operações que necessitam de uma ação mais delicada, onde robôs rígidos não conseguem atender a esses requisitos. A rigidez compromete a eficiência e o objetivo do robô em cenários onde a adaptação ou a deformação do robô é necessária para realizar operações de forma mais eficaz.

Dentro desse contexto, em que o segmento da robótica está inserido, surge a necessidade de implementar novas tecnologias para serem aplicadas em ambientes de difícil acesso, onde há um alto grau de complexidade devido à fragilidade do material, produto ou objeto a ser manipulado. Isso requer o uso de braços robóticos equipados com garras que, em vez de serem rígidas, sejam flexíveis o suficiente para evitar qualquer dano ao objeto manipulado. Entre as vantagens e desafios do uso de braços robóticos com juntas e elos flexíveis, destacam-se: maior velocidade de operação, redução do consumo de energia, aumento da capacidade de carga e a utilização de atuadores de menor potência (ROSADO; ORLANDO, 2009). A robótica flexível impacta significativamente operações em que o atrito é um fator crucial, como em procedimentos cirúrgicos. Como a principal motivação por trás dos Soft Robotics (SR) está diretamente relacionada ao seu comportamento favorável em contato com o ambiente, é essencial compreender os fenômenos de contato, em especial o atrito (BERTHOLD *et al.*, 2023).

Visando ampliar o campo da robótica e as políticas que implementam os SRs, devido às suas vantagens em "imitar" organismos vivos, a integração da robótica rígida com a robótica flexível traz grandes contribuições para o avanço em áreas onde as limitações se fazem presentes no estado atual da automação. Com o apoio de novas tecnologias, como a visão computacional,

propomos a integração e o aperfeiçoamento de um braço robótico rígido, substituindo sua garra rígida por uma flexível, utilizando SR. Como consequência, para a fabricação dessa garra, partindo de um corpo maleável, foram realizados estudos e pesquisas com o objetivo de identificar o material que melhor se adaptasse às condições de uso, tanto no processo de acionamento quanto no de manipulação de corpos ou objetos.

No contexto da interação humano-robô, a busca por técnicas que proporcionem maior segurança na manipulação robótica é fundamental. Nesse sentido, os *Soft Robotics* (SRs), por não possuírem uma estrutura rígida, oferecem uma segurança significativa nesse processo de interação. Devido à baixa rigidez do material, esses robôs continuamente deformáveis apresentam uma flexibilidade inerente. Especificamente, os SRs são intrinsecamente seguros para uso na interação humano-robô, graças à sua suavidade e conformidade integrada (BERTHOLD *et al.*, 2023). A aplicação de visão computacional adiciona um nível extra de segurança na manipulação desses robôs, uma vez que o operador ou controlador não precisa ter nenhum contato direto, aumentando significativamente a segurança do processo.

Aplicado ao contexto da robótica, com um braço robótico que utiliza SR integrado à visão computacional, este trabalho traz consigo uma visão geral de áreas que se comunicam entre si, apresentando um cenário em que as novas tecnologias implementam avanços no processo de automação em diversas áreas em que a robótica está inserida. A partir da introdução, é apresentado um contexto geral dos conceitos abordados, e ao longo do trabalho será feito um aprofundamento nas ferramentas utilizadas, visando dar continuidade ao uso da robótica mole em áreas ainda inexploradas.

1.1 Estado da arte

No estudo apresentado em (LEE *et al.*, 2017), é realizada uma análise abrangente do funcionamento de robôs macios, assim como uma revisão das pesquisas mais recentes em suas áreas de aplicação. Os autores também categorizam os sistemas de atuação desses robôs, demonstrando que os SRs podem ser divididos em três tipos: tendão de comprimento variável, atuação fluidica e polímero eletroativo (EAP). Além disso, o trabalho compila diversos artigos e pesquisas relacionadas, destacando conceitos baseados nas propriedades deformáveis dos robôs macios, que limitam o uso de muitos sensores rígidos convencionais, como codificadores, medidores de tensão e unidades de medição inerciais. Como resultado, é apresentado um comparativo que elenca os diferentes tipos de SRs, suas propriedades e princípios de funcionamento.

A Tabela 1 resume alguns dos principais trabalhos citados neste trabalho enfatizando a aplicação nesse segmento da robótica, a implementação em baixo custo e se o trabalho foi implementado em robô real ou ambiente de simulação.

Tabela 1 – Trabalhos relacionados

Trabalhos	Aplicação	Baixo Custo	Construção do Robô	
			Real	simulação
(ROSADO; ORLANDO, 2009)	Manipulação Robótica	X	X	X
(GUO <i>et al.</i> , 2021)	Estudo Aplicado		X	
(BERTHOLD <i>et al.</i> , 2023)	Levantamento de casos		X	
(YANG, 2023)	Aplicação Biomédica	X		X
(GOIA; CAMPO, 2018)	Robótica mole	X		
(TONDU, 2012)	Músculo de McKibben	X	X	

Fonte: Autoria própria (2024)

1.2 Motivações

A busca por compreender os princípios de funcionamento de um sistema robótico baseado no processo de automação de uma linha industrial está atrelada ao avanço das novas tecnologias no mundo emergente em que estamos inseridos. No entanto, algumas limitações ainda são encontradas em setores como automação e controle de produtos frágeis, ou até mesmo no deslocamento de materiais de alto valor agregado. Os meios de manipulação que utilizam ferramentas rígidas não permitem o cuidado e a atenção necessários para o material a ser manipulado, devido às possíveis deformações que podem ser causadas.

O desenvolvimento da robótica e a busca por aperfeiçoar os novos meios de tornar os robôs mais adaptados para resolver situações simples, como a manipulação de ovos em uma granja, por exemplo, fazem com que a robótica mole, ou *Soft Robotics* (SRs), ofereça uma alternativa para manter a integridade dos materiais a serem manipulados, integrando a robótica tradicional às novas tecnologias. No entanto, o alto custo na fabricação desses robôs torna-se um obstáculo para acelerar o desenvolvimento de novas ferramentas de automação. Este projeto, por sua vez, apresenta uma alternativa que utiliza ferramentas já existentes no mercado, agregando algo novo que proporcionará maior amplitude e usabilidade das ferramentas e robôs existentes.

Buscando abrir novos horizontes para esse tipo de robótica, a flexibilidade dos *Soft Robotics* permite sua utilização em locais de difícil acesso e em procedimentos em que um braço robótico rígido ou um corpo rígido não conseguem operar. O atuador pneumático, por sua vez, é amplamente utilizado no projeto de robôs macios, devido à sua grande deformação e alta força de saída (GUO *et al.*, 2021). A utilização desses equipamentos, especialmente dessa garra, vem

resolver diversas situações que, à primeira vista, parecem operações complexas, mas que podem ser facilitadas pela adaptação ao ambiente e pela capacidade de moldar-se ao próprio objeto que está sendo manipulado, permitindo a captura de materiais que não possuem uma superfície de fácil contato.

É nessa premissa que a robótica mole, baseada no movimento de organismos vivos, torna os robôs rígidos mais adequados para situações que se assemelham ao uso da mão humana. Além disso, esses robôs podem ser equipados com garras aprimoradas, que proporcionam maior confiança na manipulação, considerando que o contato direto na operação desses braços robóticos não oferece total segurança, especialmente na presença de humanos. Para abordar essa questão, o uso da visão computacional permite que o operador da automação realize suas operações de um local seguro por meio de câmeras e acionamento remoto.

1.3 Objetivos

Com base nas características apresentadas até o momento, foram elencados alguns pontos-chave para esclarecer de forma mais clara o emprego e uso dos SRs. A seguir, apresentamos os objetivos que buscamos alcançar:

1.3.1 Objetivo Geral

Construir uma garra robótica utilizando materiais de composição flexível, acionamento pneumático e controle baseado em visão computacional para realizar manipulação de objetos delicados.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Examinar o progresso da robótica mole através da revisão de trabalhos correlacionados;
- Projetar e construir uma garra robótica considerando os modelos, materiais e flexibilidade existentes e consolidadas na literatura;
- Aprender a programar e manipular uma garra robótica mole com o auxílio de sistemas embarcados;
- Realizar testes e ajustes em ambiente controlado;
- Coletar e analisar resultados dos testes da garra robótica mole.

1.4 Metodologia

Iniciamos o trabalho realizando um levantamento bibliográfico sobre os problemas relacionados ao campo da robótica, além de um levantamento detalhado dos tipos de *Soft Robotics* (SRs) existentes e em uso nas novas tecnologias. O objetivo desta revisão bibliográfica foi entender o funcionamento dos principais tipos de robôs, bem como os passos necessários para a construção e desenvolvimento dos diversos tipos de SRs, seu acionamento, os sensores utilizados e as ferramentas e materiais empregados na fabricação.

Os próximos passos, com base no levantamento bibliográfico e no estudo realizado sobre os mais variados mecanismos de acionamento e funcionamento, foram fundamentais para a escolha de um modelo a ser trabalhado e desenvolvido, representando um divisor de águas para sua aplicação em situações-problema. Com essa decisão, procedeu-se ao desenvolvimento do sistema de acionamento, levando em consideração as características necessárias para que possa ser utilizado não apenas neste tipo de projeto, mas também para se adaptar a outros trabalhos e projetos a serem desenvolvidos em aplicações futuras e em áreas afins.

Nesta etapa do projeto, realizamos a modelagem de um molde para o SR e do sistema de acionamento pneumático utilizando o software CAD 3D ®Autodesk Fusion. Em seguida, cada peça modelada foi fatiada utilizando a ferramenta ®Ultimaker Cura. Posteriormente, realizamos a impressão 3D dessas peças usando a impressora GTMax3D A1V2 disponível no campus de Pau dos Ferros da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). Por fim, realizamos o processo de montagem das peças.

Após a conclusão da impressão e montagem das peças de acionamento e do molde do SR, utilizamos o molde juntamente com o silicone Shore 25 para confeccionar o SR. A escolha desse tipo de silicone será discutida mais adiante. O processo de cura do silicone foi realizado de forma gradual, seguindo rigorosamente as orientações fornecidas pelo fabricante para os componentes A e B. A mistura foi feita na proporção de 1:1, ou seja, foram utilizadas quantidades iguais dos componentes A e B. Vale salientar, que o molde foi untado com gordura para facilitar sua remoção após a cura.

Concluída a confecção do SR e a montagem do sistema de acionamento da garra, integramos esses componentes a um braço robótico com três juntas rotacionais, controlado por um microcontrolador ®Arduino. Esse microcontrolador também é responsável pelo controle da garra, garantindo a operação eficiente e precisa do sistema. Com relação ao controle da garra, realizamos testes aplicando o ar (acionamento pneumático) e a água (acionamento hidráulico)

com intuito de verificar qual apresentaria melhor resultado no controle de fechamento e abertura da garra.

Por fim, realizamos alguns testes finais para coletar dados e informações sobre o desempenho do sistema na captura de diversos materiais, sejam eles rígidos, frágeis ou maleáveis. O objetivo era compreender como os SRs se adaptam ao material e como se fixam a ele, reunindo informações relevantes sobre o funcionamento e o comportamento dos SRs.

1.5 Organização do texto

O presente trabalho está dividido em 5 Capítulos cuja organização e descrição é apresentado a seguir:

- No Capítulo 1, apresentamos a introdução, na qual são discutidos o tema, referências a trabalhos correlacionados, os objetivos a serem alcançados e a metodologia que será utilizada;
- No Capítulo 2, oferece um referencial teórico sobre os principais tipos de *Soft Robotics* (SRs), suas áreas de aplicação, a importância da robótica em nosso cotidiano e a necessidade de integrar novas tecnologias robóticas;
- No Capítulo 3, descreve a metodologia adotada, detalhando o desenvolvimento do trabalho, desde o processo de modelagem e a cura para a fabricação do SR até a montagem da planta integrada ao braço robótico;
- No Capítulo 4, apresentamos os resultados obtidos, analisando o funcionamento da visão computacional integrada ao acionamento da garra manipulada pelo braço robótico, além de revisar os conceitos discutidos nos capítulos 1 e 2;
- No Capítulo 5, concluímos o trabalho com uma análise geral dos resultados alcançados com a aplicação da visão computacional e a integração das partes, além de sugestões para pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

As novas tecnologias e o avanço da automação no cotidiano das empresas e no âmbito social com impacto mundial, trouxeram novos desafios ao ramo da robótica, especialmente no setor industrial. O principal objetivo da robótica tem sido facilitar a substituição do ser humano em tarefas repetitivas, muitas das quais ainda representam um risco significativo à vida. A palavra “robô” resulta da combinação das palavras tchecas *rabota*, que significa “trabalho obrigatório”, e *robotnik*, que significa “servo” (MATARIC *et al.*, 2014). O progresso da robótica abrange tanto áreas de baixo quanto de alto impacto, como a biomedicina, indústria automobilística, operações perigosas como a desativação de bombas, resgate em meio de difícil acesso e a exploração espacial. Esse avanço fez da automação parte do cotidiano, tornando-a indispensável para vida moderna.

A robótica tendo como eixo principal a automação em ambientes de trabalho industrial trás como exemplo de impacto significativo os braços robóticos, que por sua vez torna o trabalho preciso, ágil, menos oneroso e mais produtivo. Dessa maneira, um robô industrial pode ser definido como um sistema mecânico articulado que tem como objetivo principal a realização de operações pré-definidas que são realizadas através de um supervisor de controle que deverá especificar o que o manipulador terá que fazer para que o mesmo possa realizar as tarefas especificadas (NETO *et al.*, 2021).

É de suma importância compreender que os sistemas robóticos oferecem melhor adaptação a ambientes insalubres para o trabalho humano, como siderúrgicas e metalúrgicas. Além disso, existem áreas de acesso limitado, com estruturas complexas e sensíveis, como nas cirurgias no campo da biomedicina. Em (MARANHÃO *et al.*, 2023), é apresentado um exemplo de aplicação de um braço robótico na medicina, especificamente em cirurgias colorretais, incluindo cirurgias multiquadrante. O estudo também destaca alguns desafios que a robótica tradicional, através de braços robóticos, ainda enfrenta, resultando em atrasos nos procedimentos cirúrgicos. Mesmo com as limitações atuais, o avanço tecnológico e o protagonismo dos sistemas inteligentes têm impulsionado o crescimento de sistemas robóticos autônomos e inteligentes, ampliando o escopo de suas aplicações.

Os robôs mais utilizados na indústria costumam ser fabricados com materiais rígidos em quase sua totalidade, utilizando atuadores para realizar operações ou comandos, com o apoio de sensores como um feedback. Um exemplo desse tipo de robô na indústria é apresentado em (FREITAS; ALCALÁ; BARBOSA, 2019), que descreve um sistema automatizado de baixo custo

e fácil operação, desenvolvido para separar caixas com defeito de pintura utilizando um braço robótico, demonstrando assim o uso de sistemas robóticos na indústria.

Apesar de seu impacto e uso em diversas aplicações e ambientes, como automação residencial e áreas de engenharia, a robótica, em alguns aspectos, apresenta limitações devido à sua construção, exigindo adaptações para ambientes atípicos. Em operações que demandam ações mais delicadas, os robôs rígidos não conseguem atender adequadamente a esses requisitos. Além disso, em cenários onde a adaptação ou deformação do robô é necessária para uma operação mais eficaz, o cumprimento do objetivo pode ser comprometido pela rigidez do sistema.

A necessidade de atender a demandas que a robótica tradicional, feita com materiais rígidos, não consegue suprir, impulsionou o desenvolvimento de novos materiais, dando origem ao que é conhecido como *Soft Robotics* ou, popularmente, robótica flexível. Essa evolução vai além de uma simples tendência; representa um verdadeiro avanço tecnológico, motivado pela busca de uma robótica mais amigável ao ser humano (SCHMITT *et al.*, 2018). Nesse contexto, o uso dessa nova tecnologia robótica traz grandes avanços em áreas sensíveis que requerem robôs mais adaptáveis ao ambiente ou aos objetos manipulados, proporcionando uma automação mais eficiente.

Um dos principais objetivos deste trabalho é o estudo e a análise dos *Soft Robotics* (SRs), seus mecanismos e a forma como podem ser utilizados em diversas aplicações. A bioinspiração, que há muito tempo gera debates na comunidade de robótica, os tipos de movimentos dos seres vivos as técnicas a serem usadas, os meios de acionamento e locomoção conectados a robótica mole, é certamente uma das precursoras da robótica flexível. Os sistemas bioinspirados, que imitam as capacidades animais ou humanas, têm sido projetados há muito tempo com arquiteturas predominantemente rígidas, associadas a partes macias (SCHMITT *et al.*, 2018). Esses sistemas podem ser aplicados em diversas áreas para superar as limitações da automação rígida. Em seu trabalho, (YANG, 2023) destaca um exemplo da expansão de suas aplicações no campo biomédico, mostrando o potencial dos SRs em resolver desafios em ambientes complexos.

A área da medicina, como já discutido em outros momentos, é um fator preponderante que destaca a importância da robótica e da automação em procedimentos cirúrgicos em diversas especialidades médicas. Devido às características específicas das aplicações biomédicas, os robôs macios podem ser categorizados em *in vivo* e *in vitro*. Robôs macios *in vivo* (ou seja, robôs funcionalizados dentro do corpo humano) foram desenvolvidos para auxiliar em operações biomédicas desafiadoras e na substituição de partes do corpo humano por órgãos artificiais

(YANG, 2023). Robôs leves *in vitro*, também conhecidos como dispositivos vestíveis, próteses e equipamentos auxiliares, exigem cargas úteis niveladas ao corpo humano que materiais responsivos a estímulos ambientais dificilmente podem fornecer (YANG, 2023).

A vários meios de acionamento dos robôs leves conhecidos na literatura, alguns por sua vez, são específicos a aplicação a qual o SR estará sendo empregado, portanto, a maioria dos robôs leves *in vitro* são acionados por entradas mecânicas, como fio, motor e método de acionamento pneumático. Uma das grandes trabalhos que demonstra de forma significativa a forma de acionamento por meio de sistema pneumático é o músculo de *McKibben*, (TONDU, 2012) em seu trabalho trás um estudo detalhado sobre o princípio de funcionamento desse músculo, suas origens, contexto histórico e funcionamento. Dentro dessa premissa, objetivando realizar uma junção de sistemas robóticos de corpo rígido a robótica mole, o método de acionamento escolhido como um desafio a ser colocado e realizado o desenvolvimento de uma garra robótica acionada através de meios pneumático, mais conhecidos também por, (*pneunets*) é um dos desafios a serem realizados neste trabalho.

3 METODOLOGIA DE CONSTRUÇÃO DE GARRA ROBÓTICA MOLE

O sistema desenvolvido neste projeto integrou diversas áreas da tecnologia, estabelecendo uma correlação entre modelagem 3D, conceitos de expressão gráfica e desenho técnico, além de visão computacional, que envolve sistemas inteligentes utilizados para detecção de imagens. Além disso, realizamos a integração com sistemas embarcados por meio do uso do Arduino, aplicando-o ao acionamento de motores do tipo NEMA 17, mais dados sobre esse motor podem ser vistos no seu *datasheet* (TECHMAKERS, 2024).

3.1 Modelagem e impressão 3D

Com foco nos diferentes tipos de *Soft Robotics* (SRs), este projeto selecionou um modelo específico devido às suas características que favorecem a aplicabilidade em tarefas cotidianas, além de sua abordagem inovadora para compreender o conceito e a estruturação dos SRs. A seguir, serão detalhados o desenvolvimento do projeto e os principais aspectos relacionados à modelagem, ao processo de fabricação da planta, à cura da garra e à manipulação do braço robótico.

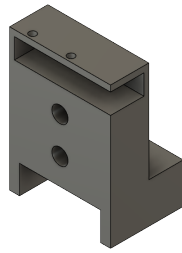
3.1.1 Sistema de controle da garra robótica

O processo de modelagem das peças foi impulsionado pela necessidade de criar um mecanismo capaz de manipular uma seringa, que funcionaria como um pistão para a compressão do ar nas garras desenvolvidas em silicone. O modelo base para o acionamento da garra foi inspirado no protótipo inicial descrito no trabalho (FLORIAN, 2017), que apresenta um mecanismo denominado bomba de seringa, projetado para ser utilizado em ambientes hospitalares. O uso deste tipo de bomba é mais difundido em unidades neonatais e terapia intensiva, em virtude de garantirem alta exatidão, fluxo contínuo para pequenos volumes (até 100 ml), e taxas de infusão de 0,1 a 99,9 ml/h. Também são usadas em aplicações onde são exigidas infusões de medicamentos por um longo período de tempo.

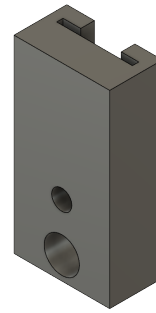
Com a base desenvolvida, procedeu-se à modelagem das peças utilizando um software adequado, o que possibilitou a impressão em 3D de cada componente. Para isso, foram extraídas imagens em 3D a partir do software CAD Fusion 360, e as representações estão em escala reduzida e apresentada na Figura 1.

A peça mostrada na Figura 1a tem o objetivo de proteger a interface de acoplamento

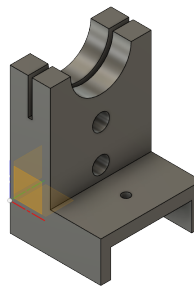
Figura 1 – Modelagem de peças do controlador da garra.



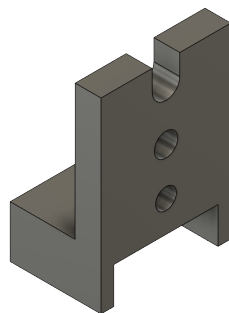
(a) Proteção de parada e sensor fim de curso



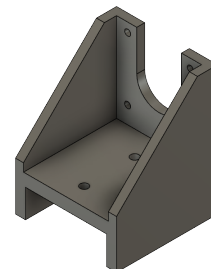
(b) Manipulador do êmbolo



(c) Apoio da seringa



(d) Apoio para o bico



(e) Base para o motor

Fonte: Autoria própria (2024)

entre o motor e o conjunto, evitando contato direto e estabelecendo a conexão com o sensor de fim de curso, que impede que o êmbolo saia completamente do corpo ou cilindro da seringa. A peça da Figura 1b atua como o componente central da planta, sendo responsável pelo processo de controle da garra robótica, com a base do êmbolo fixada e conectada ao fuso por meio de uma porca, enquanto a manipulação é realizada pela rotação do fuso, acionada pelo torque do motor NEMA 17. O objeto representado na Figura 1c serve para acoplar a flange da seringa, proporcionando melhor sustentação durante o movimento gerado pelo motor. Já a peça da Figura 1d efetua a última conexão com a seringa, funcionando como suporte para o bico que conecta a mangueira responsável pela transferência de ar ou líquido para o sistema robótico (SR). Por

fim, a última peça da planta de acionamento, descrita na Figura 1e, é utilizada para fixar o motor NEMA no conjunto, garantindo a estabilidade e o funcionamento adequado do sistema.

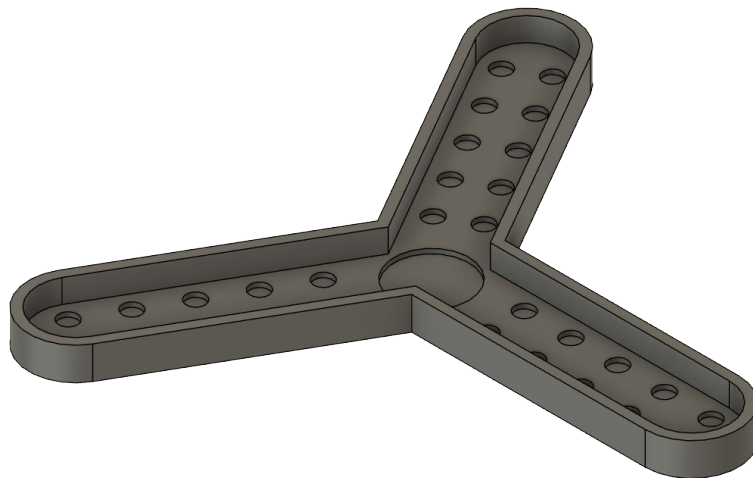
No apêndice ??, pode ser visualizado um esboço em um documento do tipo prancha em que apresenta as dimensões em cota de todas as peças que foram modeladas para impressão através da impressora 3D, algumas vistas foram representadas para melhor identificação do leitor a cerca da peça que se é exibida.

3.1.2 Moldes da garra robótica mole

Para o desenvolvimento da garra, que utiliza o silicone como material principal, foi decisivo entender como os sistemas robóticos suaves (SRs) poderiam ser acionados, considerando os modelos disponíveis na literatura. Neste projeto, foi adotado o princípio dos *pneunets*, tomando como base o músculo de *McKibben*, visto em (TONDU, 2012). Com base nesse modelo, a construção da garra envolveu a criação de um molde que unisse duas partes, com um canal central para a passagem de ar ou líquido, permitindo a compressão e, consequentemente, o acionamento da garra. Isso possibilitou que a garra se envolvesse nos materiais ou objetos a serem manipulados.

A Figura 2 ilustra a parte inferior do molde da garra, que entra em contato direto com o material. Este molde requer uma quantidade maior de silicone e uma rigidez superior, a fim de evitar deformações e movimentos indesejados, tais como, movimentos laterais ou apenas inflando com efeito bexiga.

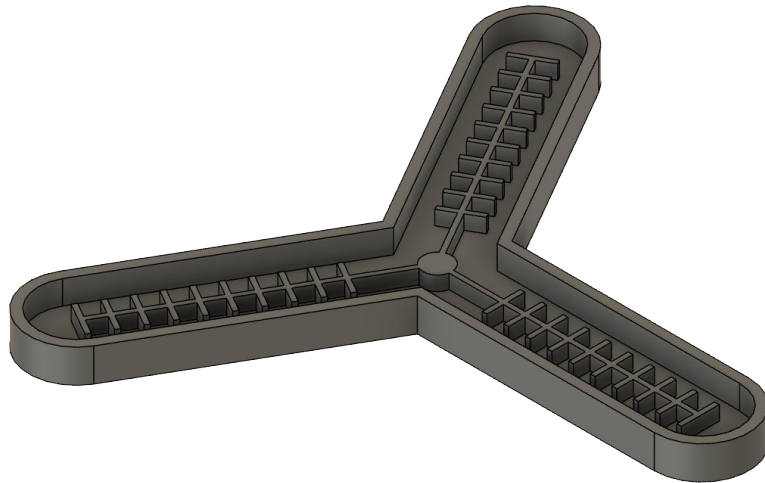
Figura 2 – Molde inferior da garra



Fonte: Autoria própria (2024)

A segunda etapa da fabricação da garra é ilustrada na Figura 3, que apresenta o molde superior da garra. Após um período de cura de até 8 horas, o silicone é retirado do molde e posicionado sobre a peça da base, que ainda está em processo de cura. Esse procedimento garante que, após a cura completa, a peça esteja totalmente fabricada.

Figura 3 – Molde superior da garra



Fonte: Autoria própria (2024)

3.2 Montagem do circuito de controle

Para o desenvolvimento e operação de todo o projeto, incluindo os mecanismos, é essencial contar com um microcontrolador que atue de forma central, coordenando todas as funções do sistema. Essa integração é crucial para o funcionamento harmonioso do braço robótico em conjunto com a garra, assim como para a implementação da visão computacional. A seguir, descreveremos em detalhes cada componente utilizado e sua importância no sistema.

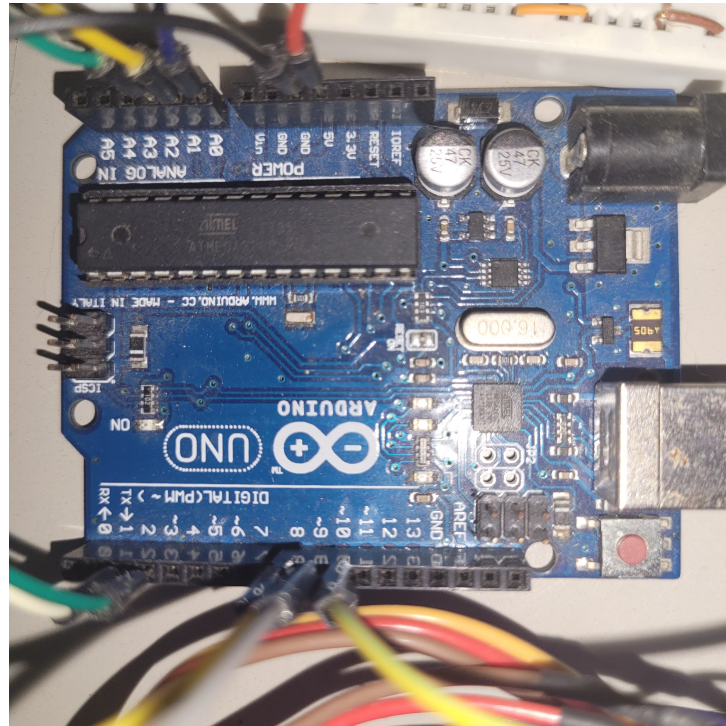
3.2.1 *Microcontrolador Embarcado*

A plataforma @Arduino tem se desenvolvido significativamente ao longo dos anos, evoluindo desde suas primeiras placas até uma variedade impressionante de dispositivos embarcados disponíveis atualmente, como o Pro Micro, Nano, Leonardo, Uno R3 e R4, Mega, *Lilypad*, entre outros. Para este projeto, utilizamos a placa @Arduino Uno R3, que é baseada no microcontrolador ATmega328P. Essa placa possui 14 pinos que podem ser usados para entrada e saída de dados digitais, dos quais 6 são compatíveis com saídas PWM, além de 6 entradas analógicas.

Operando em uma frequência de 16 MHz, a comunicação com o computador é realizada através de uma interface USB, que também permite alimentar a placa. Além disso, o Uno R3 possui um conector de alimentação AC-DC que permite alimentar a placa quando desconectada do computador e um botão de reset, que possibilita reiniciar a programação interna da placa.

Por ser uma placa de fácil manuseio e programação, ela se torna uma excelente escolha por apresentar um ótimo custo/benefício, com uma ótima quantidade de portas disponíveis e uma vasta compatibilidade com outras plataformas e sistemas. Além disso, sua programação é realizada através do *software* de código aberto Arduino IDE. Uma apresentação gráfica da placa pode ser vista na Figura 4, bem como a sua organização e localização de cada conexão e porta do microcontrolador utilizado.

Figura 4 – Arduino R3



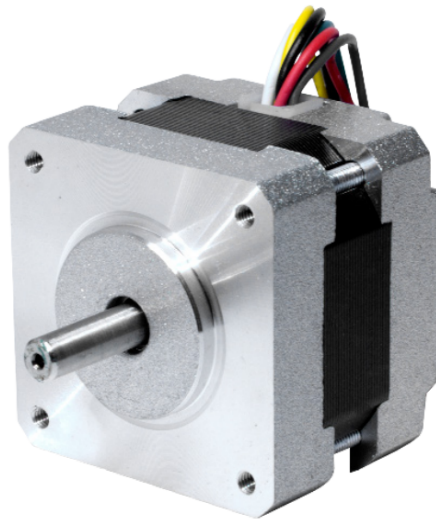
Fonte: Autoria própria (2024)

3.2.2 Servo Motor Nema 17

Para o deslocamento do êmbolo da seringa, foi necessário um mecanismo que proporcionasse um torque significativo, devido à pressão exercida pelo ar dentro do sistema. Os servo motores variam amplamente, desde modelos simples como o SG90 de 9g, com um alcance de 180° e torque de 1,6 Kgf.cm, até os mais potentes, como o NEMA 43HS da série Size 110mm

(1,8 grau) com um alcance de 360. Para este projeto, considerando a relação custo-benefício, a eficiência e o torque apresentado, optou-se pelo NEMA 17HS. As informações necessárias para atender aos requisitos básicos do projeto foram extraídas de seu datasheet. O NEMA 17 é amplamente utilizado em projetos de CNC. Na Figura 5, apresentamos um exemplo desse motor, que foi conectado na configuração bipolar, utilizando seus quatro fios de conexão, onde cada par de fios corresponde a uma de suas bobinas.

Figura 5 – Motor NEMA 17HS



Fonte: (TECHMAKERS, 2024)

3.2.3 Driver DRV8825

Para realizar o controle preciso do motor de passo e integrá-lo ao Arduino, é importante considerar que o microcontrolador fornece apenas uma tensão contínua de 5 volts em suas portas de saída, enquanto o motor requer uma tensão superior a 8,9 V para operar adequadamente. Nessas condições, a necessidade de uma alimentação externa para o motor tornou-se essencial, e o uso de um driver para o controle do motor se mostrou apropriado para seu funcionamento. Com o objetivo de desenvolver um projeto acessível, levando em conta o custo dos drivers disponíveis no mercado, o DRV8825 foi escolhido como a melhor opção. Esse driver se destacou por seu preço acessível, facilidade de controle e integração com a plataforma Arduino, além de atender aos requisitos necessários para o projeto.

O funcionamento do driver é relativamente simples, pois seus pinos de conexão são intuitivos. O dispositivo possui duas pontes H e um indexador de *microstepping*, sendo projetado para acionar um motor de passo bipolar (TEXAS INSTRUMENTS, 2014). Informações técnicas

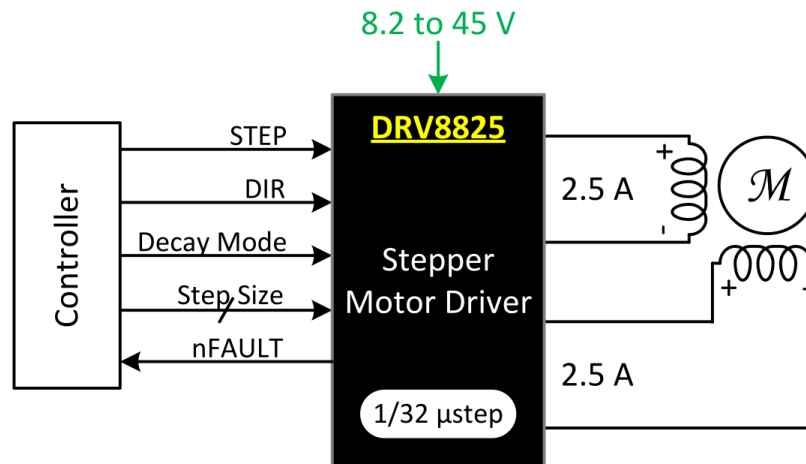
mais detalhadas foram extraídas do datasheet do fabricante. No entanto, um aspecto crucial para o bom funcionamento é a tensão que o driver entrega a cada bobina, pois isso afeta diretamente a corrente do motor de passo, que não pode exceder o limite de corrente especificado para cada bobina. Para ajustar a tensão, utiliza-se a equação 3.1 que fornece o valor da tensão com base nas referências do datasheet do motor NEMA.

Em um motor de passo, a corrente de fundo de escala definida (IFS) é a corrente máxima conduzida através de qualquer enrolamento. Esse a quantidade depende da tensão analógica $xVREF$ e do valor do resistor de detecção (R_{SENSE}) (TEXAS INSTRUMENTS, 2014).

$$I_{FS}(A) = \frac{xVREF(V)}{A_v \cdot R_{SENSE}(\Omega)} = \frac{xVREF(V)}{5 \cdot R_{SENSE}(\Omega)} \quad (3.1)$$

Na figura 6, apresenta um esquemático simplificado das conexões necessárias para garantir o funcionamento básico do driver, que está vinculado a um microcontrolador e ao motor de configuração bipolar.

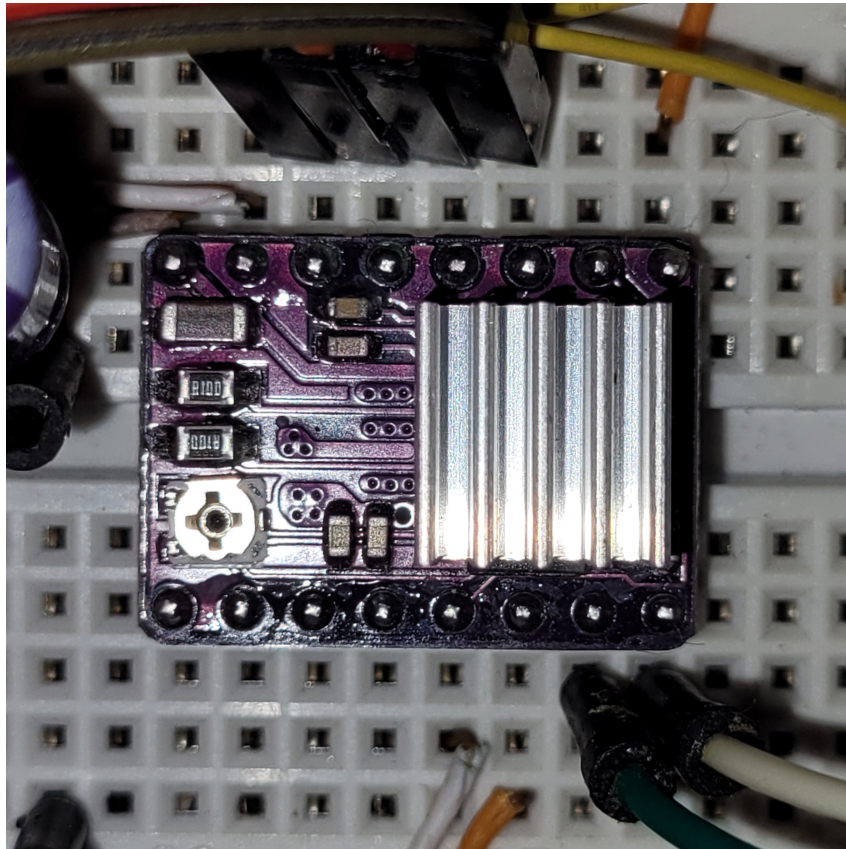
Figura 6 – Esquemático Simplificado



Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2014)

O driver é conectado a uma placa que funciona como um módulo, facilitando seu uso e integração em circuitos e em placas de prototipagem, como as protoboards. Na Figura 7, é apresentada a montagem do driver soldado à placa, juntamente com a representação de seus pinos de conexão e as ligações correspondentes.

Figura 7 – Driver DRV8825



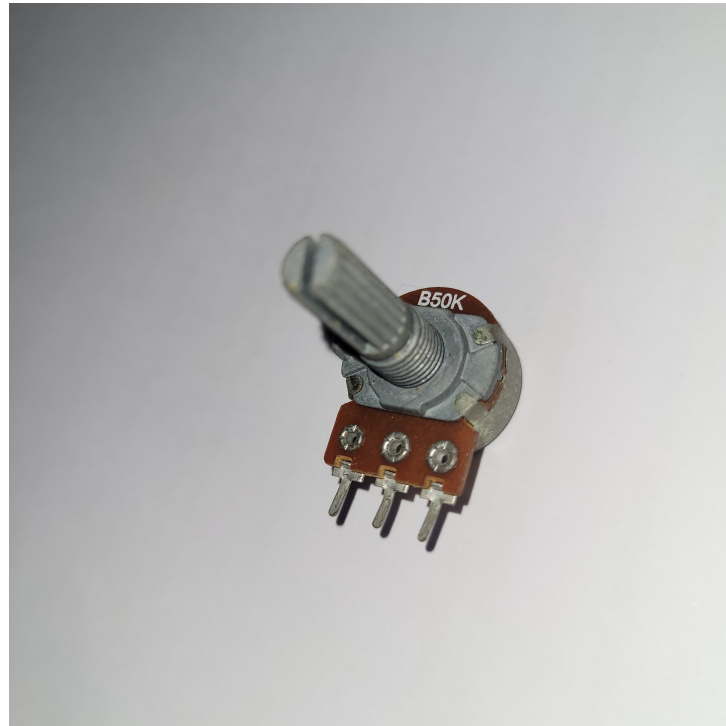
Fonte: Autoria própria (2024)

3.2.4 Braço robótico

Assim como as peças da planta e os moldes do SR, o braço robótico também seguiu um processo semelhante em sua fabricação, sendo desenvolvido por meio de modelagem e impresso em uma impressora 3D. Para mais detalhes sobre seu desenvolvimento, emprego e funcionamento, consulte o trabalho (ALBUQUERQUE, 2024).

O controle do braço robótico foi realizado através de potenciômetros B50K, conforme ilustrado na figura 8. O braço robótico é composto por três juntas rotacionais e três elos que conectam essas juntas, permitindo uma ampla gama de movimentos. Os potenciômetros são utilizados para ajustar o ângulo de cada junta. A programação de controle foi desenvolvida no código do arduino, que está integrado a todo o mecanismo de funcionamento. O braço robótico, já acoplado à garra proposta neste trabalho, pode ser visto na figura 17 na página 38.

Figura 8 – Potenciômetro



Fonte: Autoria própria (2024)

3.2.5 *O Soft Robotics*

Um dos principais elementos deste projeto, que dá sentido a toda a estrutura montada e representa o foco central deste trabalho, é a garra de silicone Shore 25, que está conectada ao braço robótico. Para sua fabricação, utilizando moldes impressos em 3D, foi necessário realizar um estudo aprofundado sobre a manipulação das duas componentes que formam o silicone, a fim de obter um corpo mais sólido por meio do processo de cura espontânea que ocorre com a mistura das partes A e B. Ambas as componentes precisaram ser adicionadas de forma proporcional, garantindo que a superfície de manipulação permanecesse a mais limpa possível, sem a contaminação de corpos estranhos.

Durante o processo de mistura, foi fundamental garantir a homogeneidade das duas componentes do silicone. Uma vez obtida essa uniformidade, a mistura foi cuidadosamente inserida nos moldes. Após o tempo mínimo de cura necessário, uma nova pequena quantidade da mistura foi aplicada sobre a superfície da parte que estava sendo curada no molde, conforme ilustrado na Figura 2. Em seguida, a parte do SR que se encontrava no molde da Figura 3 foi retirada e colocada sobre a parte inferior mostrada na Figura 2, que ainda continha silicone em processo de cura. Após essa operação, aguardou-se a conclusão total do processo de cura, que durou 24 horas. Somente após esse período, as peças foram completamente retiradas dos moldes

e estavam prontas para serem colocadas em operação.

O processo de cura ocorre de maneira gradual, com ambas as partes realizando a cura simultaneamente. Isso ajuda a evitar deformações, má formações ou falhas na junção das peças. Na Figura 9, ambas as partes estão em processo de cura, com o silicone ainda em sua forma líquida, recém-inserido no molde. É importante ressaltar que a presença de bolhas de ar durante a cura do silicone deve ser evitada, pois podem comprometer a elasticidade, a resistência à tração e o processo de contração sob ar comprimido.

Figura 9 – Silicone em processo de cura



Fonte: Autoria própria (2024)

junção das duas partes é realizada com a aplicação de uma fina camada de silicone ainda na forma líquida. Essa camada deve ser adicionada em até 15 minutos após a mistura das componentes, sobre o silicone que já passou por um processo de cura de, no máximo, 8 horas, o que permite a retirada segura da peça contida na Figura 3 do molde. A Figura 10 ilustra ambas as partes unidas durante o processo final de cura, que requer um tempo mínimo de 24 horas.

Figura 10 – Parte superior sobre a inferior



Fonte: Autoria própria (2024)

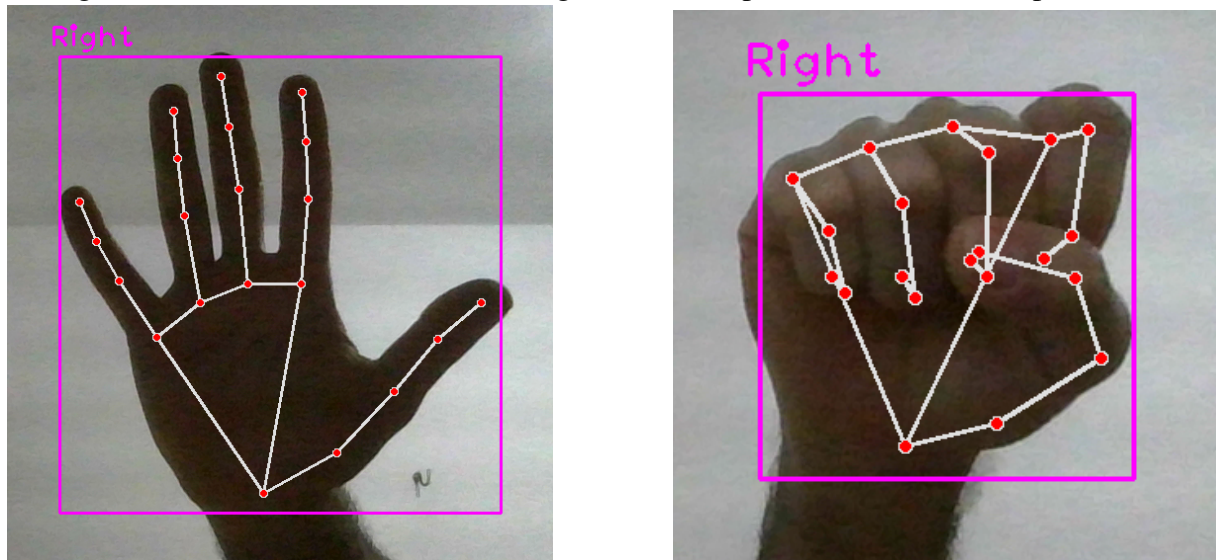
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, apresentamos os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do projeto, assim como uma análise crítica dos dados coletados e das implementações realizadas.

4.1 Controle da garra robótica usando visão computacional

A integração de novas tecnologias para a interação com robôs possibilitou a realização de manipulações não invasivas. Nesse contexto, a visão computacional desempenhou um papel fundamental, pois permite operar o robô utilizando a mão para inflar e desinflar, evitando qualquer contato direto. A implementação dessa solução foi realizada por meio da linguagem de programação Python, em conjunto com a biblioteca OpenCV, que é uma ferramenta de código aberto amplamente disponível para aplicações acadêmicas e comerciais. Essa abordagem possibilitou a captura de imagens pela câmera do computador, incluindo a detecção da mão do usuário. A Figura 11 ilustra essa funcionalidade, demonstrando a capacidade de abrir e fechar a mão livremente, evidenciando a eficácia da manipulação por visão computacional.

Figura 11 – Controle e acionamento da garra robótica por meio da visão computacional.



(a) Mão Aberta 5 dedos

(b) Mão fechada 0 dedos

Fonte: Autoria própria (2024)

Quando a imagem é processada, o comando correspondente é enviado ao Arduino através da conexão serial, onde a comunicação é estabelecida ao endereçar a porta do Arduino e definir a

taxa de transmissão. Os comandos enviados para a garra robótica são baseados na quantidade de dedos capturados pela câmera. Neste trabalho, propomos a inclusão dos três comandos abaixo:

- mão fechada - Giro do motor no sentido Horário;
- 3 dedos levantados - Parada da rotação do motor em qualquer um dos sentidos de rotação (horário ou anti-horário);
- 5 dedos levantados - Giro do motor no sentido anti-horário.

Um dos techos mais importantes do código de visão computacional podem ser vistos no apêndice A, no qual representa o processo de conexão entre o arduino e o código de visão computacional com os parâmetros de comunicação descritos bem como o tratamento de dados e envio das informações para o arduino através da porta serial. Concatenando com um caracter de "quebra de linha" `\n`, para que a informação pude-se assim ser melhor tratada pelo arduino ao ser recebida em seu código.

4.2 Garra robótica usando material flexível

A garra robótica desenvolvida neste trabalho foi fabricada com silicone do tipo Shore 25. O molde para a criação do sistema robótico, também produzido por impressão 3D, é ilustrado na Figura 12. Para a impressão, utilizamos filamento do tipo ABS, o mesmo material empregado nas demais peças que compõem o sistema de acionamento, conforme mostrado na Figura 15.

A garra robótica já removida dos moldes pode ser observada na Figura 13. Na garra robótica, há um tubo destinado à inserção do ar comprimido, que é responsável pelo controle da abertura e fechamento da garra. É importante destacar que essa garra está acoplada à extremidade do braço robótico. Para a fabricação da garra, é fundamental considerar alguns parâmetros como requisitos básicos, entre os quais:

- Manipular as componentes do silicone com recipiente totalmente limpo;
- Não permitir ficar nenhuma bolha de ar no silicone;
- É essencial respeitar o tempo de cura de maneira adequada, removendo as peças dos moldes apenas após a conclusão de cada etapa do processo;
- A superfície que fará contato entre ambas as partes para realizar a união com a fina camada de silicone não pode conter nenhuma marca de contato, poeira, óleo ou outro material que possa agir como isolante;
- Quanto mais fina for a camada melhor será o resultado final, porém não pode deixar

Figura 12 – Molde em 3D



Fonte: Autoria própria (2024)

nenhuma parte sem está preenchida com silicone líquido;

Para conectar o duto que injetará ar comprimido no interior da garra, alguns desafios precisaram ser superados. Um dos principais foi evitar perfurações com material da mesma espessura da ponta do duto. Para isso, foi utilizado um material mais fino, como uma agulha. Além disso, uma fina camada de silicone não foi suficiente para garantir a vedação; ao injetar ar, a pressão interna comprometia a conexão, resultando em vazamentos. Portanto, foi necessário envolver a conexão com um molde de plástico e preencher com silicone líquido, garantindo que a maior área de contato possível entre a garra e o duto de ar fosse coberta. Isso não apenas evitou a expansão da região, mas também melhorou a rigidez e a fixação.

4.3 Sistema de acionamento da garra

Para a montagem da planta, todas as peças foram impressas em 3D, sendo utilizada uma barra de ferro roscada M8 × 1.25 mm, cujas especificações detalhadas podem ser encontradas em (McMaster-Carr, 2024). A barra foi lubrificada apenas na área de deslocamento para garantir um movimento suave e eficiente. Como estrutura principal para a fixação das peças e montagem do

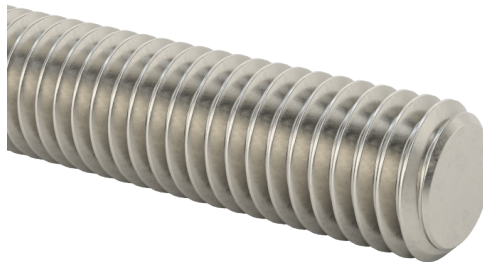
Figura 13 – Soft Robotics



Fonte: Autoria própria (2024)

conjunto, utilizou-se uma barra de alumínio, cujo tamanho foi ajustado conforme as dimensões da seringa quando completamente expandida. Na Figura 15, pode ser visto as peças em sua devida ordem, montadas sobre a barra de alumínio e a seringa acoplada.

Figura 14 – Barra Roscada

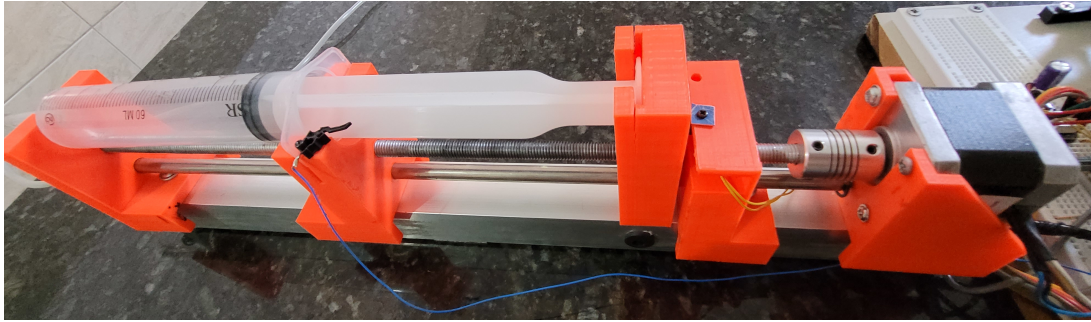


Fonte: (McMaster-Carr, 2024)

4.4 Funcionamento da garra robótica e testes

Toda a estrutura e o conjunto funcionaram de forma satisfatória, com a planta de acionamento realizando o movimento da garra robótica ao comprimir o ar em seu interior por meio

Figura 15 – Planta de Acionamento



Fonte: Autoria própria (2024)

da seringa, que era acionada pela rotação do motor NEMA. Paralelamente, os servomotores deslocavam o braço robótico conforme os ajustes dos potenciômetros, levando a garra até o local desejado. O movimento de abrir e fechar a garra, controlado por visão computacional, enviava comandos pela porta serial ao Arduino, que controlava o motor NEMA de maneira rápida e precisa. A cada mudança na posição da mão, o sistema respondia com um tempo de resposta máximo de 1 segundo, alterando o comportamento do motor conforme o comando enviado, garantindo precisão e eficiência.

Para a manipulação precisa do braço robótico, foram utilizados potenciômetros que permitiram o controle dos três graus de liberdade, com a garra acoplada por meio de um tubo de silicone para a injeção de ar. Em cada junta do braço, foi acoplado um servomotor do tipo MG995 para controle, conforme mostrado na Figura 16. A Figura 17, ilustra o braço robótico, que demonstrou um comportamento satisfatório e precisão no acionamento dos potenciômetros, garantindo o deslocamento e movimentação adequados.

Figura 16 – Servo Motor



Fonte: Autoria própria (2024)

Um aspecto importante a ser considerado é a compressão do ar nos ambientes pressuriza-

Figura 17 – Braço Robótico



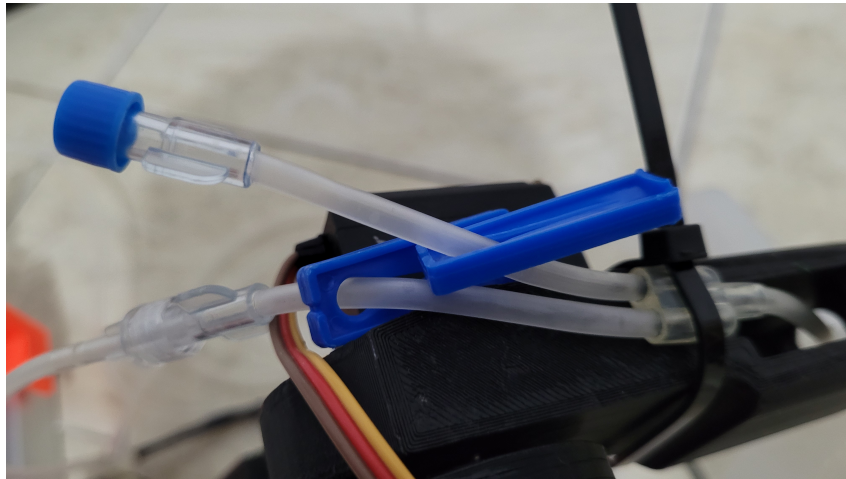
Fonte: Autoria própria (2024)

dos. Para garantir uma resposta mais rápida do motor NEMA na movimentação da garra robótica, foi necessário manter uma certa compressão de ar já presente nos dutos. Como solução para essa questão, foi adicionada uma segunda via de acoplamento, conforme mostrado na Figura 18, que permite a conexão de uma segunda seringa. Dessa forma, a compressão do ar pode ser realizada manualmente antes do acionamento, evitando o desperdício de rotações do motor e reduzindo o tempo de resposta da garra.

Outra situação observada durante o acionamento da garra foi o ângulo de posicionamento para agarrar os objetos. Como a área de trabalho do braço robótico é limitada, e um de seus elos possui um comprimento reduzido, foi necessário ajustar a posição da garra. Para corrigir essa questão, a garra foi deslocada entre 2 a 3 centímetros em relação ao braço robótico, permitindo que ela atuasse como um pêndulo. Esse ajuste melhorou o seu posicionamento, facilitando a atuação em um ângulo de 90°.

Testes iniciais utilizaram água como meio de acionamento hidráulico da garra, com a expectativa de obter uma resposta eficiente devido à incompressibilidade do líquido. No entanto, os resultados não foram satisfatórios, pois a água gerou uma resistência elevada ao deslocamento da seringa durante a compressão, impedindo o motor de girar com a força necessária para

Figura 18 – Segunda conexão de ar



Fonte: Autoria própria (2024)

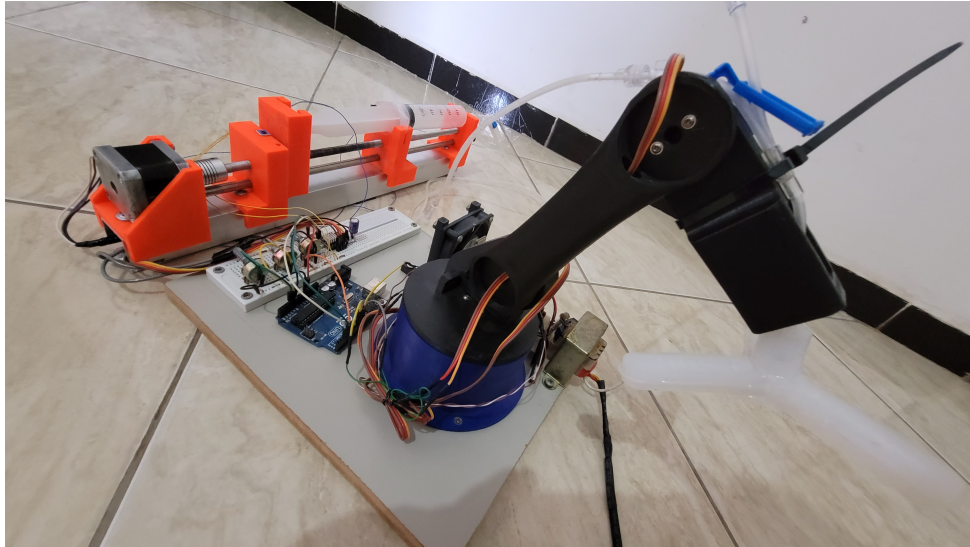
um funcionamento adequado. Diante disso, optou-se por utilizar ar comprimido como meio de acionamento, já que este apresentou menor resistência, permitindo um deslocamento mais eficiente e uma rotação satisfatória do motor NEMA.

Alguns dos testes que foram realizados podem ser visualizados através de vídeos que podem ser acessados clicando [aqui](#), neles trazem a garra segurando um recipiente com algumas bolas dentro aumentando o seu peso, em outro pode ser visto o acionamento da barra pela planta comprimindo o ar em seu interior.

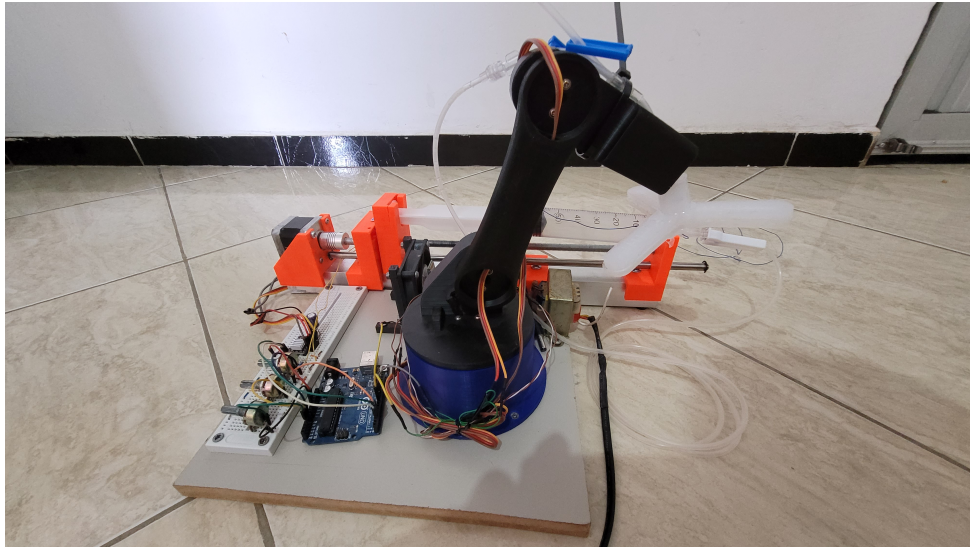
A estrutura completa montada pode ser vista na Figura 19, onde apresenta todas partes conectadas e devidamente aptas a funcionamento. É importante destacar que a conexão do duto de ar, responsável por injetar o ar dentro da garra, pode ser facilmente substituída, assim como a garra pode ser acoplada e desacoplada da estrutura sem grandes dificuldades, permitindo ajustes futuros. A planta como um todo foi projetada para ser desmontada e remontada com facilidade, garantindo flexibilidade para manutenção ou modificações conforme necessário.

Foram empregadas diversas técnicas no Arduino para garantir o funcionamento síncrono entre as diferentes partes do projeto. Em sistemas embarcados, como o utilizado neste trabalho, que envolvem placas de prototipagem, um código bem estruturado é fundamental para garantir respostas eficientes no controle de sensores e atuadores. Um dos desafios enfrentados no Arduino foi o tratamento adequado da entrada de dados via porta serial, onde foi necessário evitar o envio de informações indesejadas, como valores 'lixo'. Um problema comum era o envio involuntário de um valor 0 após o recebimento de um comando pela porta serial, o que interferia no funcionamento correto do sistema. Por exemplo, ao enviar o comando para o

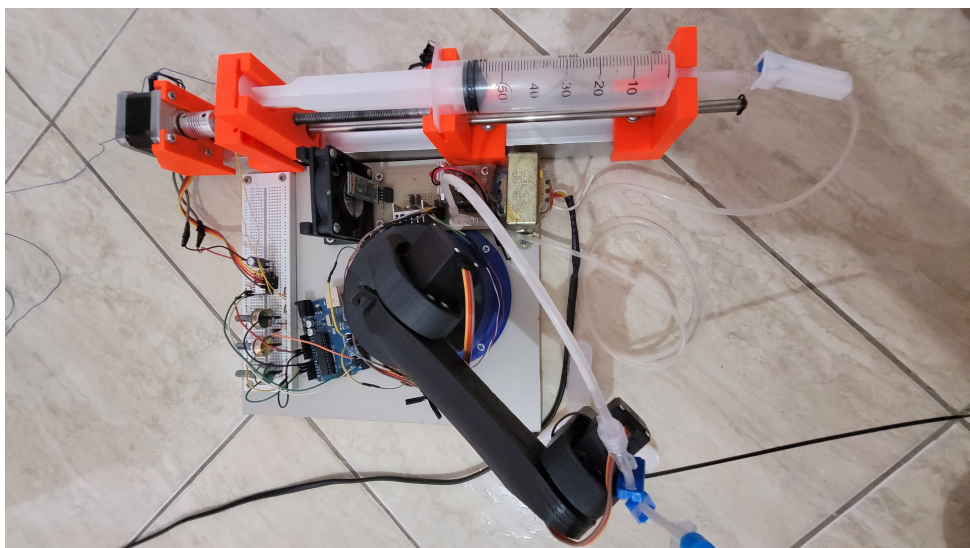
Figura 19 – Sistema completo: Planta, Braço e SR



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria própria (2024)

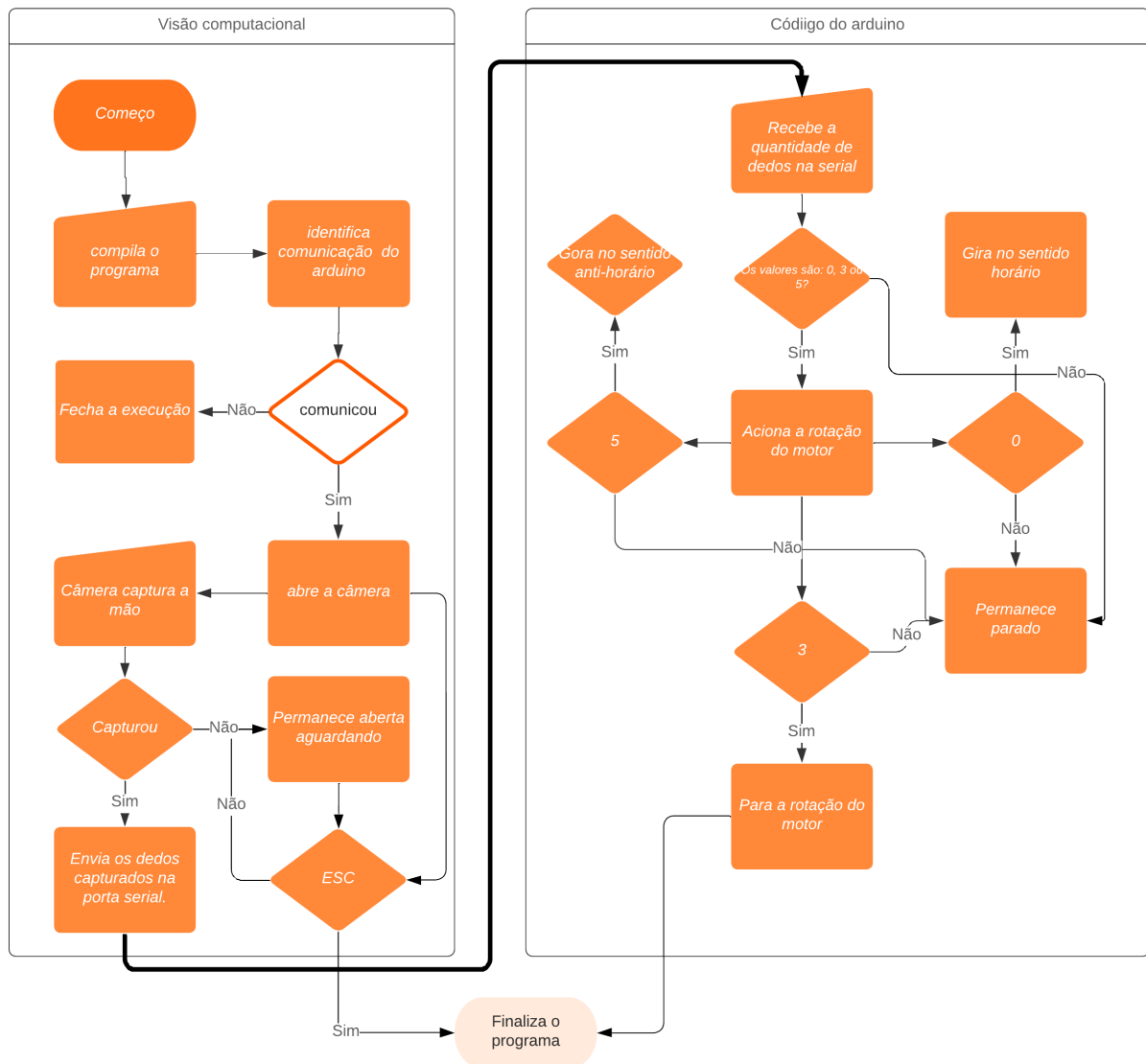
motor rotacionar com base na detecção de 5 dedos levantados, o valor 0 era enviado logo em seguida, o que mantinha o motor em rotação contínua, independentemente do comando dado. Esse comportamento negativo foi corrigido para garantir a precisão do controle.

Para resolver essa questão, foi codificada uma função responsável pelo tratamento das informações recebidas pela porta serial. Essa função verifica continuamente se há dados relevantes na porta, considerando apenas aqueles que foram enviados corretamente e descartando operações ou comandos inválidos. O código dessa função pode ser encontrado no apêndice B. Ele valida cada entrada da serial e armazena os dados em variáveis, que são então manipuladas e processadas nas demais funções para garantir respostas corretas.

Algumas outras situações precisaram ser observadas no código do Arduino. O uso da função *delay* para o funcionamento dos servomotores resultou em uma resposta inesperada nas rotações do motor NEMA, fazendo com que ele realizasse apenas um passo em cada sentido de rotação. Para solucionar essa questão, as funções *delay* foram removidas, pois essa função bloqueia o processamento de outras tarefas pelo microcontrolador. Em seu lugar, foram implementadas as funções *millis* para o controle dos servomotores e *micros* para o controle do motor de passo NEMA 17, considerando suas respectivas formas de operação e condições de rotação.

Na figura 20, trás um fluxograma que representa melhor todo o funcionamento do código da visão computacional e da programação do controle da planta através do arduino, bem como os comandos e o fluxo que se segue em cada etapa de controle em conjunto com a intergração de ambos.

Figura 20 – Fluxograma da programação



Fonte: Autoria própria (2024)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As execuções realizadas ao longo do processo de análise de cada *Soft Robotics*, desde os primeiros desenvolvidos com base nas movimentações biológicas de seres vivos, representam um marco significativo para a compreensão de novas tecnologias e formas inovadoras de implementar robôs no cotidiano. A integração da visão computacional com robôs utilizados em operações industriais gera um impacto considerável, promovendo maior autonomia e precisão nas tarefas executadas, além de melhorar o tempo de resposta em condições ambientais extremas, independentemente das situações enfrentadas.

O uso de sistemas embarcados é amplamente presente em nosso dia a dia, encontrado em diversas linhas de automóveis, dispositivos digitais, automação residencial e, em especial, na indústria. A computação gráfica, em conjunto com a modelagem de objetos, desempenha um papel crucial em projetos importantes, não apenas para testes, mas também para a produção. Isso marca um avanço significativo no desenvolvimento de novas aplicações, permitindo a fabricação de peças em uma variedade de modelos, formas e tamanhos, embora as dimensões da impressora imponham algumas restrições, ao mesmo tempo em que oferecem uma vasta gama de possibilidades para criação de peças e objetos.

Este trabalho abordou diversos requisitos essenciais adquiridos ao longo da graduação, apresentando conceitos que vão desde automação e utilização de sensores para instrumentação até controle de motores e acionamento por meio de sistemas de controle embarcado, enfatizando a importância da resposta e das operações em tempo real. Além disso, foram explorados conceitos relacionados à comunicação entre aplicações afins, bem como a aplicação de linguagens de programação para o desenvolvimento das codificações necessárias ao funcionamento do *hardware*. Isso demonstra que *software* e *hardware* caminham juntos no campo das engenharias e áreas correlatas.

Os objetivos estabelecidos no início deste trabalho foram, de fato, alcançados. Desde a proposta de compreender o funcionamento dos *Soft Robotics* (SRs) até a implementação e os testes realizados, os resultados atenderam satisfatoriamente às expectativas. Contudo, ainda há espaço para melhorias, como a incorporação de um motor mais robusto na planta de acionamento e um controle mais dinâmico para o braço robótico. Além disso, seria interessante integrar a visão computacional para atuar em conjunto com o acionamento da garra, permitindo que o sistema se assemelhe ainda mais ao movimento de uma mão humana ao executar operações simples ou complexas.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, M. R. E. de. **Desenvolvimento de um sistema embarcado para controle manual e automático de um manipulador robótico**. 37 p. Dissertação (Bachelor's thesis) — Curso de Engenharia de Computação, Universidade Federal Rural do Semi-Árido., Pau dos Ferros, 2024.
- BERTHOLD, R.; BURGNER-KAHR, J.; WANGENHEIM, M.; KAHMS, S. **Investigating frictional contact behavior for soft material robot simulations**. 2023. 2165 - 2176 p.
- FLORIAN, D. **Syringe Pump**. 2017. Acesso em: 14 de agosto de 2024. Disponível em: <https://www.drdflo.com/pages/Projects/Syringe-Pump.html#collapseThree>.
- FREITAS, M. G. D.; ALCALÁ, S. G. S.; BARBOSA, T. M. G. d. A. **Aplicação de um Braço Robótico e Redes Neurais Artificiais para a Classificação e Separação de Objetos Defeituosos numa Esteira Transportadora Automatizada**. 2019. - p.
- GOIA, L. S.; CAMPO, A. B. Desenvolvimento de molde e análise dinâmica de uma garra robótica mole. In: **VI CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFSP ITAPETININGA-ISSN 2318-311X**. [S.l.: s.n.], 2018.
- GUO, Y.; LIU, L.; LIU, Y.; LENG, J. Review of dielectric elastomer actuators and their applications in soft robots. **Advanced Intelligent Systems**, Wiley Online Library, v. 3, n. 10, p. 2000282, 2021.
- LEE, C.; KIM, M.; KIM, Y. J.; HONG, N.; RYU, S.; KIM, H. J.; KIM, S. Soft robot review. **International Journal of Control, Automation and Systems**, Springer, v. 15, p. 3–15, 2017.
- MARANHÃO, M. M.; SOUZA, E. L. Q. d.; CODES, L. M. G. d.; FIDELIS, F. d. C. R.; MARQUES, T. C. S.; MELO, R. A. A.; BOUDOUX, S. Q. S. B.; FILHO, E. d. M. A. Cirurgia robótica em adenocarcinoma de Ângulo esplênico: Docagem customizada para uma cirurgia de multiquadrantes. p. –, 2023.
- MATARIC, M. J.; FILHO, H. F.; SILVA, J. R.; ALVES, S. F. d. R. **Introdução à robótica**. São Paulo: Ed Unesp, 2014.
- McMaster-Carr. **Browse Catalog: 94185A160**. 2024. Acesso em: 20 de julho de 2024. Disponível em: <https://www.mcmaster.com/94185A160/>.
- NETO, L. J. de B.; BATISTA, J. G.; LIMA, M. A. F.; LEITE, J. R.; SILVA, A. N. da. Desenvolvimento, modelagem matemática e simulação de um braço robótico acionado por clp. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, v. 3, n. 2, p. 105–115, 2021.
- ROSADO, G.; ORLANDO, V. **Contribuições na modelagem dinâmica e no controle neural de um braço robótico com elos flexíveis**. 2009. - p.
- SCHMITT, F.; PICCIN, O.; BARBÉ, L.; BAYLE, B. Soft robots manufacturing: A review. **Frontiers in Robotics and AI**, Frontiers Media SA, v. 5, p. 84, 2018.
- TECHMAKERS. **Produtos para automação motor de passo nema 17**. [S.l.], 2024. Rev. 3.
- TEXAS INSTRUMENTS. **DRV8825 Stepper Motor Controller IC**. [S.l.], 2014. Rev. 1.2.

TONDU, B. Modelling of the mckibben artificial muscle: A review. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 23, n. 3, p. 225–253, 2012.

YANG, P. J. Y. **Nanomaterials and nanotechnology for biomedical soft robots**. 2023. 100338–100338 p.

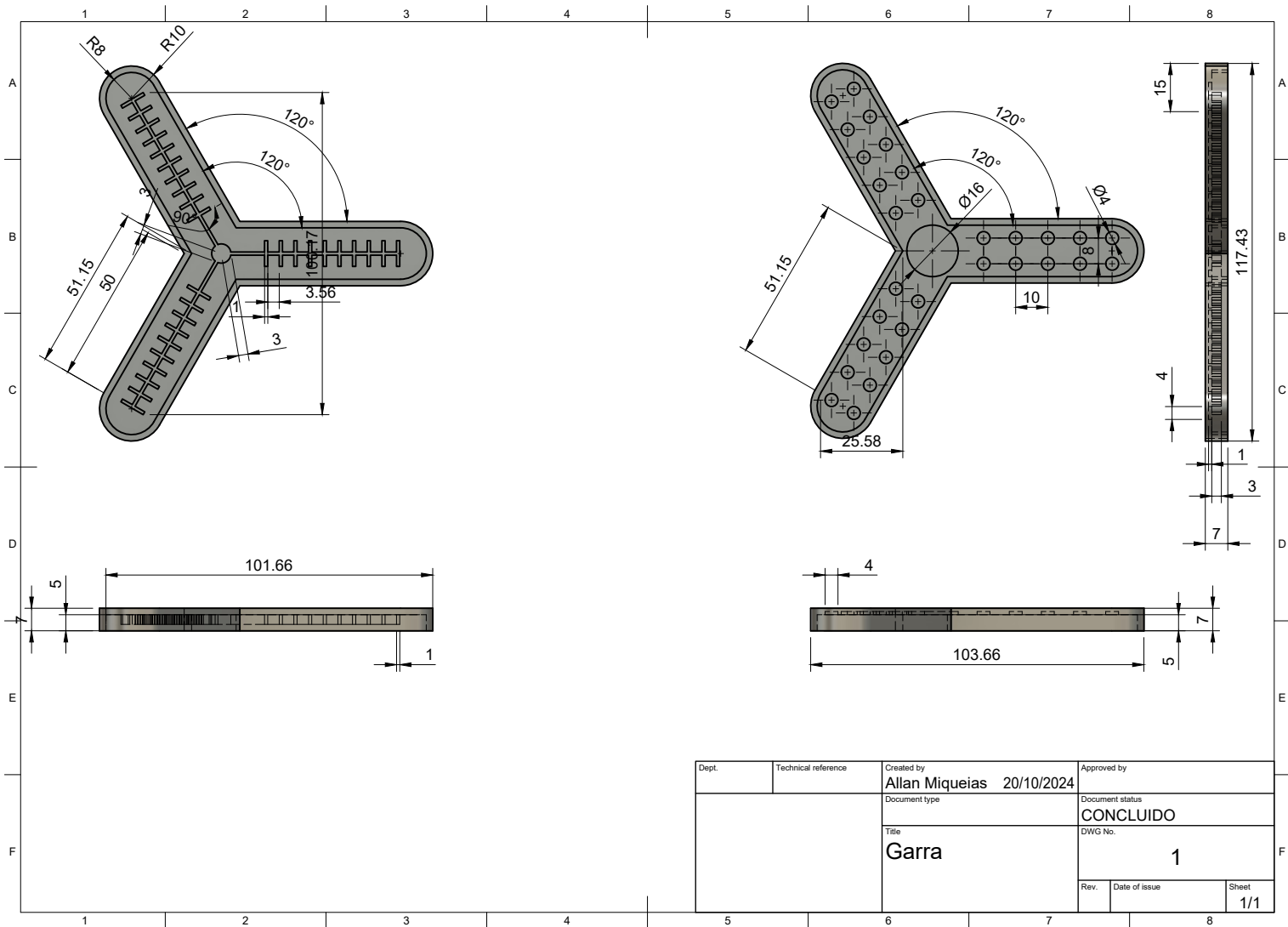
APÊNDICE A – TRECHO DE CÓDIGO VISÃO COMPUTACIONAL

```
1 # Parametros da porta serial
2 porta_serial = "/dev/ttyACM2"
3 taxa_baudrate = 115200
4 try:
5     arduino = serial.Serial(porta_serial, taxa_baudrate,
6                             timeout=0.5) #Inicializa a comunicacao com o
7     arduino.
8     conectado = True
9 except serial.SerialException:
10     print("Erro ao conectar. Verifique a porta serial ou
11         religue o Arduino")
12
13     ...
14
15 while True:
16     success, img = cap.read()
17     hands, img = detector.findHands(img)
18     if len(hands) == 1:
19         list_fingers = detector.fingersUp(hands[0])
20         #print(list_fingers)
21         total_fingers = sum(list_fingers)
22         #print(total_fingers)
23
24     if total_fingers != prev_fingers:
25         arduino.write((str(total_fingers) + '\n').encode())
26         prev_fingers = total_fingers
27         print("Quantidade de dedor: ", total_fingers)
28
29     ...
```

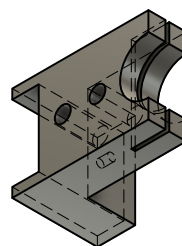
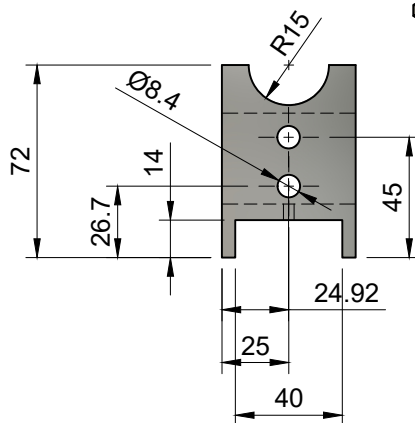
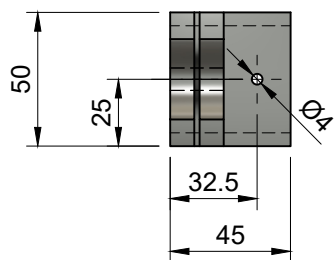
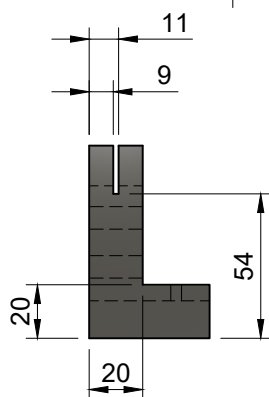
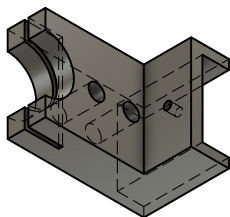
APÊNDICE B – TRECHO DE CÓDIGO TRATAMENTO SERIAL ARDUINO

```
1 void serialEvent(){
2     while (Serial.available()){
3         char fingerCount = (char)Serial.read();
4         if(fingerCount == '\n'){
5             serialStrReady = true;
6         }else{
7             serialStr += fingerCount;
8         }
9     }
10 }
```

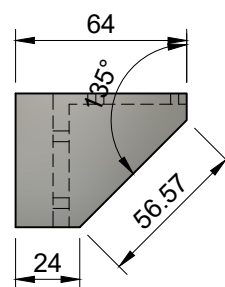
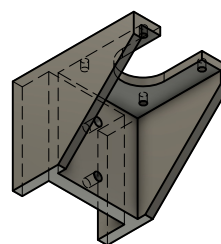
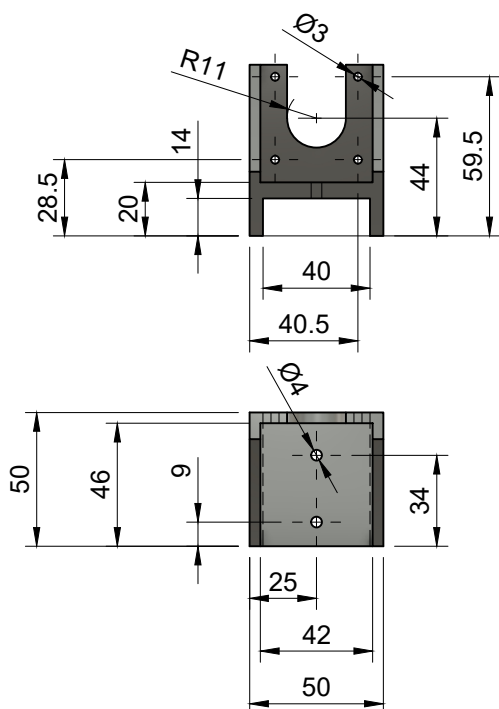
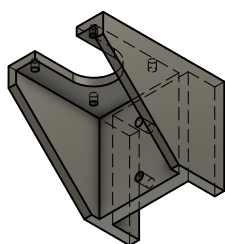
APÊNDICE C – PRANCHAS



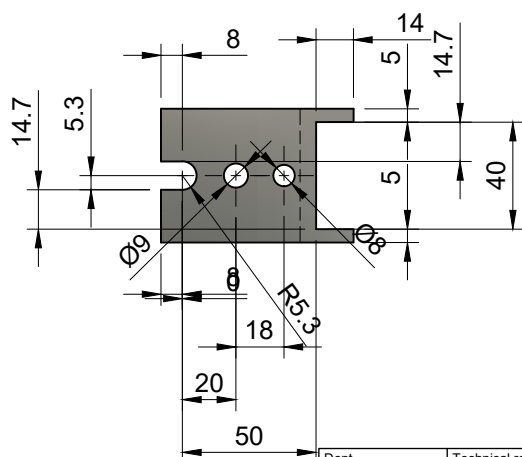
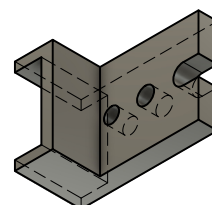
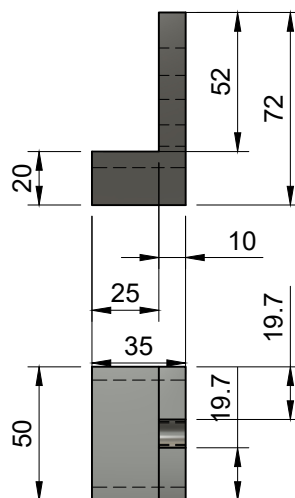
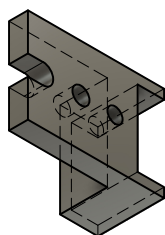
Dept.	Technical reference	Created by Allan Miqueias 20/10/2024	Approved by		
		Document type	Document status CONCLUIDO		
		Title Garra	DWG No. 1		
			Rev.	Date of issue	Sheet 1/1



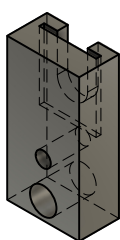
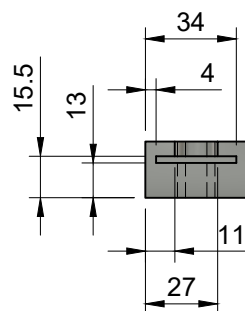
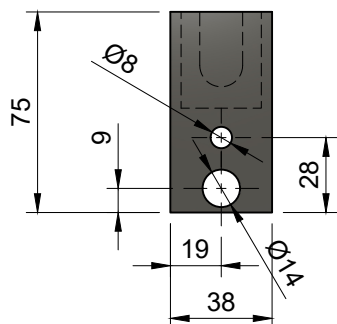
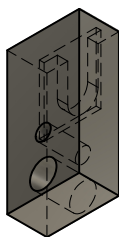
Dept.	Technical reference TCC	Created by Allan Miqueias 20/10/2024	Approved by		
		Document type DESENHO TÉCNICO	Document status CONCLUÍDO		
		Title APOIO DA SERINGA	DWG No. 1		
			Rev.	Date of issue	Sheet 1/5



Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
	TCC	Allan Miqueias 20/10/2024	
		Document type	Document status
		DESENHO TÉCNICO	CONCLUIDO
		Title	DWG No.
		BASE PARA O MOTOR	1
		Rev.	Date of issue
			Sheet
			2/5



Dept.	Technical reference TCC	Created by Allan Miqueias 20/10/2024	Approved by	
		Document type DESENHO TÉCNICO	Document status CONCLUIDO	
		Title APOIO PARA O BICO	DWG No. 1	
		Rev.	Date of issue	Sheet 3/5



Dept.	Technical reference TCC	Created by Allan Miqueias 20/10/2024	Approved by		
		Document type DESENHO TÉCNICO	Document status CONCLUIDO		
		Title MANIPULADOR DO ÊMBOLO	DWG No. 1		
			Rev.	Date of issue	Sheet 4/5

