

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS SANTANA MARTOS

**CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ SCARA COLABORATIVO COM  
BASE EM SENSORIAMENTO CAPACITIVO DE BAIXO CUSTO**

SÃO CARLOS  
2024

LUCAS SANTANA MARTOS

**CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ SCARA COLABORATIVO COM  
BASE EM SENSORIAMENTO CAPACITIVO DE BAIXO CUSTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Vitor de Carvalho Fontes

SÃO CARLOS  
2024



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 22/2024/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

LUCAS SANTANA MARTOS

CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ SCARA COLABORATIVO COM BASE EM SENSORIAMENTO CAPACITIVO DE BAIXO CUSTO

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 24 de maio de 2024

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	João Vitor de Carvalho Fontes
Membro da Banca 1	Luis Antonio Oliveira Araujo
Membro da Banca 2	Vitor Ramos Franco



Documento assinado eletronicamente por **Vitor Ramos Franco, Docente**, em 24/05/2024, às 15:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Vitor de Carvalho Fontes, Docente**, em 24/05/2024, às 15:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luis Antonio Oliveira Araujo, Docente**, em 24/05/2024, às 15:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **1471363** e o código CRC **4ED495CC**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.016445/2024-25

SEI nº 1471363

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019

Criado por 709935, versão 4 por 789906 em 24/05/2024 15:39:39.

## AGRADECIMENTOS

Inicialmente, expresso minha gratidão aos meus pais, Wagner Barrionuevo Martos e Angela Santana Martos, pelo incansável esforço e apoio familiar que viabilizaram a conquista desta graduação tão almejada. Também agradeço à minha irmã Ana Clara pela parceria constante ao longo dessa jornada.

Aos meus queridos colegas de curso, Jeferson Lima Santos Andrade, Bernardo Tabatini de Vicente, Pedro Henrique Damasceno Cantelli de Toledo, Giselle Silva Macedo, Felipe Muscionico Furlan, Tatsunari Ishibashi Yamamoto, Lara Fernandes, Sílvio de Oliveira e Silva Júnior, Lucas Ferreira da Silva, Marcelo Cerchi Ribeiro Filho e aos demais amigos companheiros de graduação, agradeço pelas horas incontáveis de estudos, trabalhos em equipe e momentos memoráveis de descontração e convívio.

Expresso minha gratidão aos professores do departamento de Engenharia Mecânica, em especial ao Luis Antônio Oliveira Araújo, pela oportunidade de participar de uma iniciação científica que me permitiu adentrar o campo da robótica.

Por fim, agradeço ao professor João Vitor de Carvalho Fontes pela excelente orientação ao longo do desenvolvimento deste trabalho, demonstrando paciência e determinação ao esclarecer minhas dúvidas e sempre apontando o caminho para superar os desafios deste projeto.

*”A verdadeira criatividade reside na capacidade de combinar ideias, informações e tecnologias de maneiras inovadoras e éticas, visando não apenas resolver problemas, mas também elevar a humanidade como um todo”*

*(Isaac Asimov)*

## RESUMO

O comércio de robôs tem como previsões indicando um crescimento exponencial até 2038. A automação industrial visa substituir a mão de obra por robôs automatizados, impactando empresas de todos os tamanhos, especialmente no mercado asiático em que há grande investimento financeiro e tecnologia disponível. No Brasil, observa-se um aumento na automação, embora pequenas e médias empresas enfrentem desafios significativos. Os robôs colaborativos, também chamados de *cobots*, estão sendo introduzidos para tornar a automação mais acessível, porém o custo dos sensores ainda é uma barreira. Os robôs SCARA destacam-se pela eficiência em tarefas de montagem planar devido à sua estrutura e velocidade. Os *cobots* tem como característica base possuem sensoriameto capaz de lidar com a presença de indivíduos em seu ambiente de trabalho, seja por parada ou ação conjunta, empregando sensores ópticos, de contato, radar, entre diversos outros. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um braço robótico SCARA, enfatizando sua acessibilidade e eficiência para empresas de pequeno e médio porte. A montagem mecânica foi melhorada para reduzir custos e simplificar o processo de fabricação. O sistema eletrônico foi implementado utilizando o microcontrolador Arduino UNO, devido à sua simplicidade e custo acessível, apesar de ser sensível a ruídos. A modelagem matemática com base na cinemática inversa foi fundamental para o controle preciso da posição do braço robótico. O sensoriameto tátil foi abordado de forma econômica, garantindo precisão e confiabilidade na detecção de contatos, inclusive em estruturas metálicas, embora sensíveis a ruídos, o que viabiliza o uso de *cobots* no mercado brasileiro e estimula o crescimento da indústria nacional.

**Palavras-chave:** Braços robóticos. SCARA. Sensoriameto Capacitivo. Robôs colaborativos (*cobots*).

## ABSTRACT

The robotics trade is predicted to experience exponential growth until 2038. Industrial automation aims to replace manual labor with automated robots, impacting companies of all sizes, especially in the Asian market where there is significant financial investment and available technology. In Brazil, there is an observed increase in automation, although small and medium-sized enterprises face significant challenges. Collaborative robots, also known as cobots, are being introduced to make automation more accessible, although the price of sensors remains a barrier. SCARA robots stand out for their efficiency in planar assembly tasks due to their structure and speed. Cobots are characterized by having sensing capabilities to deal with the presence of individuals in their work environment, either by stopping or by joint action, using optical, contact, radar, and various other sensors. This paper presents the development of a SCARA robotic arm, emphasizing its accessibility and efficiency for small and medium-sized enterprises. The mechanical assembly was optimized to reduce costs and simplify the manufacturing process. The electronic system was implemented using the Arduino UNO microcontroller due to its simplicity and affordable cost, despite being sensitive to noise. Mathematical modeling based on inverse kinematics was crucial for precise control of the robotic arm's position. Tactile sensing was addressed economically, ensuring accuracy and reliability in contact detection, even on metallic structures, although sensitive to noise, which makes the use of cobots viable in the Brazilian market and stimulates the growth of the national industry.

**Keywords:** Robotic arms. SCARA. Optimization. Capacitive Sensing. Collaborative robots (cobots).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vendas anuais de braços robóticos por continente entre 1994 e 2038. As barras na cor azul indicam valores históricos. As barras de cor negra são as projeções futuras . . . . .	12
Figura 2 – Braços Robóticos de diferentes fabricantes . . . . .	15
Figura 3 – Alguns tipos de manipuladores . . . . .	20
Figura 4 – Módulo de pouso MER-A [NASA] . . . . .	21
Figura 5 – Espaço de trabalho do robô SCARA fundamentado . . . . .	24
Figura 6 – Cobot exemplificado . . . . .	26
Figura 7 – Cobot esférico . . . . .	26
Figura 8 – Esquema de sensoriamento capacitivo Arduíno . . . . .	27
Figura 9 – CAD previamente executado . . . . .	29
Figura 10 – Desenho técnico da montagem . . . . .	30
Figura 11 – Dimensões do modelo físico . . . . .	30
Figura 12 – Robô SCARA montado . . . . .	31
Figura 13 – Rolamento rígido de esferas SKF61800 . . . . .	32
Figura 14 – Servo MG995 Tower Pro . . . . .	32
Figura 15 – Montagem no robô . . . . .	33
Figura 16 – Acoplamento flexível empregado . . . . .	34
Figura 17 – Caixa de Rolamentos . . . . .	35
Figura 18 – Modelo Arduino UNO . . . . .	35
Figura 19 – Simulação do código de controle . . . . .	36
Figura 20 – Modelagem base para o robô SCARA desenvolvido . . . . .	37
Figura 21 – Sensoriamento por toque . . . . .	39
Figura 22 – Fluxograma de Funcionamento do Robô . . . . .	40
Figura 23 – Montagem Final . . . . .	42
Figura 24 – Coleta de amostras do sensor . . . . .	43
Figura 25 – Interface de inserção de dados pelo monitor serial . . . . .	44



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índice Porte Brasil . . . . .	13
Tabela 2 – Comparativo entre robôs UR10 e KR 10 R1420 . . . . .	16
Tabela 3 – Taxonomia de robôs colaborativos com exemplos de cobots . . . . .	19
Tabela 4 – Tabela de Componentes do Circuito eletrônico . . . . .	36
Tabela 5 – Tabela de Preços dos componentes . . . . .	41

## SUMÁRIO

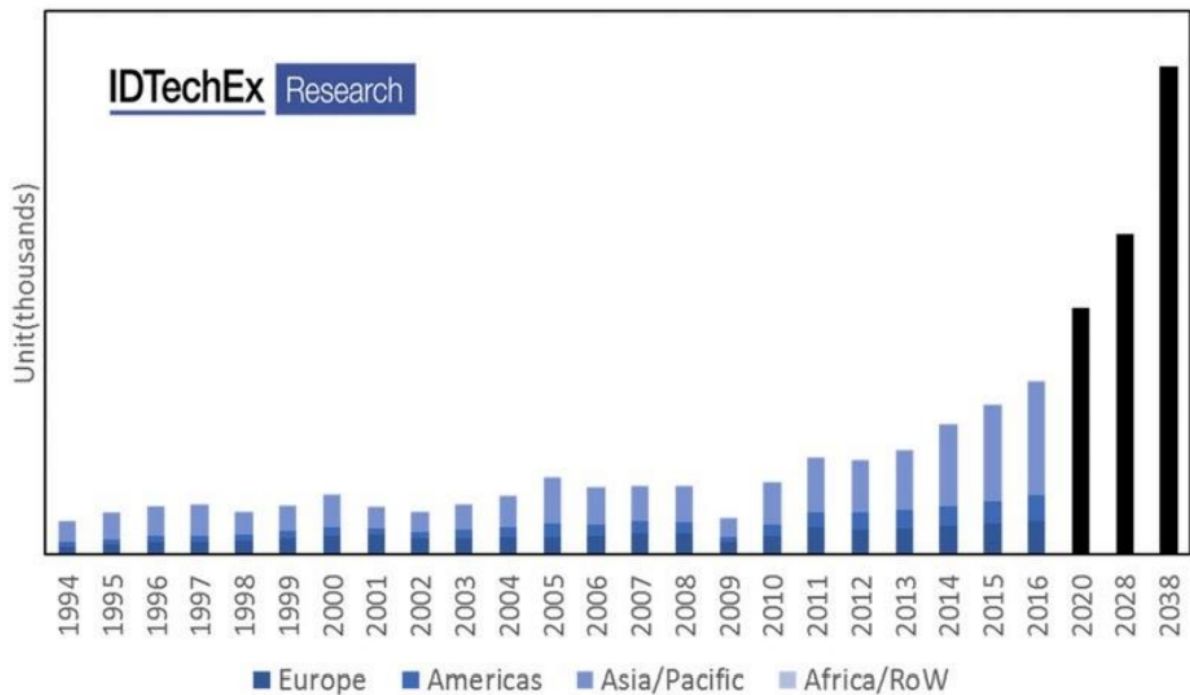
<b>1 – INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>12</b>
1.1 Objetivos . . . . .	16
<b>2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>18</b>
2.1 Características dos robôs colaborativos . . . . .	18
2.2 Tipos de Robôs Industriais . . . . .	19
2.2.1 Robôs Articulados . . . . .	20
2.2.2 Robôs Cartesianos . . . . .	21
2.2.3 Robôs Cilíndricos . . . . .	22
2.2.4 Robôs Esférico . . . . .	22
2.2.5 Robôs SCARA . . . . .	23
2.3 Implementação do Método Colaborativo . . . . .	24
<b>3 – DESENVOLVIMENTO</b> . . . . .	<b>29</b>
3.1 Sistema Mecânico . . . . .	29
3.2 Componentes físicos . . . . .	31
3.2.1 Rolamentos . . . . .	31
3.2.2 Fixadores . . . . .	32
3.2.3 Atuadores . . . . .	32
3.2.4 Transmissões . . . . .	33
3.2.5 Elos e Eixos . . . . .	34
3.2.6 Caixa de Rolamentos . . . . .	34
3.3 Sistema Eletrônico . . . . .	35
3.4 Modelagem Matemática . . . . .	37
3.5 Sensoriamento . . . . .	38
<b>4 – RESULTADOS</b> . . . . .	<b>41</b>
<b>5 – CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>46</b>
<b>Apêndices</b>	<b>50</b>
<b>APÊNDICE A – Código de controle do manipulador SCARA</b> . . . . .	<b>51</b>

APÊNDICE B–Desenhos técnicos do manipulador . . . . .	55
---	----

## 1 INTRODUÇÃO

O comércio de robôs industriais teve enorme queda, atingindo o pior panorama em 2009, com 47% de reduções nas vendas mundiais. Naquele período, diversas empresas envolvidas diretamente e/ou indiretamente com esse tipo de tecnologia, retraíram suas atividades produtivas e projetos ainda em desenvolvimento. No entanto, a recuperação já vem mostrando resultados e, estima-se que esse panorama atinja uma perspectiva de crescimento exponencial em 2038, acima dos patamares anteriores à fase aguda da última crise econômica, como ilustrado na Figura 1 (GHAFFARZADEH, 2018).

Figura 1 – Vendas anuais de braços robóticos por continente entre 1994 e 2038. As barras na cor azul indicam valores históricos. As barras de cor negra são as projeções futuras



Fonte: Ghaffarzadeh (2018).

O crescimento do ramo de robôs industriais segue uma tendência mundial em busca da produtividade e substituição da mão de obra humana. Aliado à essa procura, surgiu uma forte tendência em atingir não somente as grandes empresas, mas também, as pequenas e médias. O poder aquisitivo desse novo nicho de negócios é menor e com algumas limitações operacionais. Essas características apontaram à indústria de automação e robotização um novo caminho, em que os produtos devem ser acessíveis e de grande impacto positivo aos resultados operacionais da empresa. Hoje, o maior mercado com essas demandas é o mercado asiático, em que pequenas e médias empresas estão planejando seus

investimentos, tendo em vista, crescimento produtivo e financeiro (GHAFARZADEH, 2018).

Do ponto de vista das empresas fabricantes de robôs e automação em geral, essas mudanças de panorama comercial implicam em constante pesquisa sobre seus produtos, sendo necessário o desenvolvimento de novos conceitos e concepções, como por exemplo o robô colaborativo, que nasceu com a vantagem de interagir diretamente com o ser humano, não sendo necessários obstáculos protetivos que o confinem. Robôs industriais, ditos “tradicionais” (não colaborativos) demandam o uso de sistemas automáticos periféricos de segurança, de forma a preservar a saúde e segurança das pessoas que transitam ou trabalham com esse tipo de equipamento, não sendo recomendado por norma, o contato direto da pessoa com o robô. No Brasil, a norma NBR 14153 (ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998) funciona como um guia para projeto de partes de sistemas de comando relacionados à segurança. A própria NR 12 (Ministério do Trabalho e Emprego, 2015), uma das principais normas brasileiras de saúde e segurança no trabalho, já contempla a segurança no trabalho em máquinas e equipamentos automatizados. Os robôs colaborativos trabalham em baixas velocidades e se utilizam de sensores detectores de presença de alta confiabilidade, sendo possível criar uma zona de interação direta entre ser humano e robô (VASIC; BILLARD, 2013).

Segundo Universal Robots (2023), conforme pode ser observado na Tabela 1, há o índice de automação (para empresas de pequeno, médio e grande porte, assim como o Brasil todo): uma avaliação que varia de 0 (nenhuma automação nos processos) a 1 (automação completa dos processos da empresa), que calcula médias para os setores de Comércio e Indústria.

Tabela 1 – Índice Porte Brasil

Tamanho de empresa	2017	2018	2019	2020	2021
Pequena	0,20	0,21	0,22	0,21	0,20
Média	0,27	0,30	0,30	0,29	0,30
Grande	0,32	0,36	0,35	0,37	0,37
Brasil	0,22	0,23	0,24	0,22	0,23

Fonte: Universal Robots (2023).

O índice de automação é uma métrica que quantifica o nível de automação de um processo ou sistema. Esse índice pode ser aplicado em diferentes contextos, como na indústria, no desenvolvimento de software, em serviços financeiros, entre outros. Ele serve para avaliar o grau em que tarefas e processos são automatizados, reduzindo a necessidade de intervenção humana.

O Brasil atualmente categoriza-se majoritariamente em um baixo índice de automação

Em comparação com 2021, o Brasil registrou um crescimento de 0.01 , revertendo a queda de 2019 para 2020. Esse avanço foi liderado pela indústria nacional, enquanto o setor de Comércio e Serviços manteve estabilidade nos últimos três anos. Quando observa-se os dados por porte de empresa, fica evidente que as empresas maiores tendem a ter um índice de automação mais alto. No entanto, as pequenas empresas mostraram uma tendência de crescimento antes da pandemia, com 2019 sendo o ano de maior índice, seguido por uma redução devido aos impactos da COVID-19. O surgimento de novas empresas também influencia o índice, já que nem todas começam com alto nível de automação, o que pode diminuir o valor do segmento.

Após 2020, as grandes empresas experimentaram uma recuperação em seus índices, enquanto as pequenas e médias empresas mantiveram os indicadores de 2020. De acordo com Universal Robots (2023), as dimensões que mostraram maior disparidade foram Sistemas, Logística e Fábrica, com diferenças que chegam a ser duas vezes maiores nas grandes empresas em comparação com as pequenas. Isso evidencia um grande desafio na adoção de novas tecnologias pelas pequenas e médias empresas brasileiras, devido em parte à falta de capital para investimento e em parte ao desconhecimento de novas tecnologias e ferramentas de automação. É importante observar que este índice de avaliação não se limita apenas à automação robótica, mas também engloba outros sistemas, softwares e ferramentas que contribuem para a geração de resultados mais otimizados para as indústrias.

Algumas normas definem e regem a aplicação do robô colaborativo do ponto de vista da segurança. A NBR ISO 10218-1 (ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018a) e 10218-2 (ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018b), definem o robô colaborativo como um equipamento projetado para interação direta com os seres humanos em um espaço colaborativo definido. O espaço colaborativo, por sua vez, é definido com um espaço protegido, em que um robô e um humano podem realizar tarefas simultaneamente durante o processo de produção.

A norma que fundamenta a segurança para a cooperação entre humanos e robôs é a ISO 15066 (ISO, International Organization for Standardization, 2016), citando: parada de segurança monitorada, guia manual, controle de torque e velocidade, limitação de força, etc.

O custo da integração de um robô industrial tradicional em sua indústria pode ser de dezenas ou mesmo centenas de milhares de dólares. Em comparação, os custos iniciais da implementação de um robô colaborativo estão dentro do intervalo do salário anual de um operário. Ao avaliar o custo do robô, é importante considerar todos os aspectos de sua aplicação, como infraestrutura adicional necessária, itens de segurança, licenças de software, mão de obra especializada, manutenção e reparos (Universal Robots, 2020).

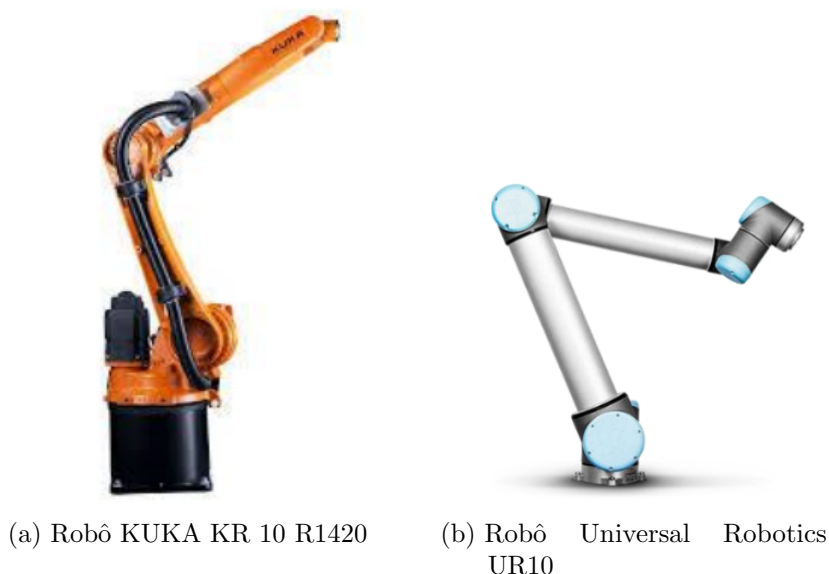
Universal Robots (2023), fabricante de robôs industriais, cita que a robótica no Brasil, com ênfase nos cobots (robôs colaborativos), tem ganhado destaque desde a

apresentação do primeiro cobot pela Universal Robots em 2005, com a primeira unidade instalada em 2008. O objetivo desses robôs é tornar a automação industrial mais acessível e inteligente, integrando e automatizando processos normalmente realizados por humanos. Isso libera os trabalhadores para tarefas mais significativas e de maior valor para a linha de produção, promovendo a satisfação profissional. Segundo o relatório *World Robotics Report 2021* da *International Federation of Robotics*, o Brasil ainda segue um ritmo lento na adoção de robótica industrial, com uma diminuição de 13% nas instalações de novos robôs em 2021, totalizando 1595 novas unidades. Comparado a 2015, isso representa um crescimento anual de apenas 3%. Diversos fatores contribuem para esse ritmo mais lento, incluindo a desvalorização cambial, a abundância de mão de obra e incertezas políticas. A Universal Robots reconhece esses desafios e se compromete a auxiliar a indústria brasileira na jornada rumo à automação inteligente, implementando uma equipe dedicada no país em 2020 e promovendo casos de sucesso em diversas fábricas brasileiras.

Como exemplo das pesquisas em robótica voltadas à adequação do mercado são os produtos da empresa dinamarquesa *Universal Robotics* que tem foco no oferecimento de robôs manipuladores colaborativos, cujas características fundamentais são: o baixo custo para aquisição, baixa complexidade para instalação (conceito de “*Plug and Play*” ou “*Plug and Production*”), massa reduzida e mecanismos de segurança diferenciados às concepções atuais (MAKRIS, 2012).

É possível exemplificar através da Figura 2 dois robôs de diferentes fabricantes (Universal Robotics e KUKA), como comparação visual.

Figura 2 – Braços Robóticos de diferentes fabricantes



Fonte: KUKA (2024) e Universal Robots (2024).

É observado na Tabela 2 uma comparação entre um robô da Universal Robotics e

um robô da empresa alemã Kuka, para efeito de verificação das diferenças entre conceitos diferentes de robôs.

Tabela 2 – Comparativo entre robôs UR10 e KR 10 R1420

Fabricante Modelo	Raio de Alcance	Capacidade manipulação	Espaço mínimo de instalação	Peso do equipamento
Universal Robotics UR10	1300 mm	10 Kg	$\phi$ 190 mm	28,9 Kg
Kuka KR 10 R1420	1420 mm	10 Kg	333,5 x 307 mm	160 Kg

Fonte: KUKA (2024) e Universal Robots (2024).

Quanto à categoria SCARA, Angeles, Morozov e Navarro (2000) discorre sobre sua seleção ampla para aplicações que exigem alta velocidade e precisão. Ela é composta por duas ou três juntas rotacionais paralelas e, em alguns casos, uma junta prismática para translação, permitindo movimento e orientação em um plano horizontal ou em um volume alinhado ao horizonte.

Esses manipuladores são amplamente utilizados em tarefas planares de montagem e como sua estrutura permite abrigar atuadores das primeiras juntas na base (não havendo tantos esforços na junta mais distante da base, decorrentes do peso próprio), suportam atuadores maiores, e consequentemente possuem velocidades superiores às outras classes, garantindo maior eficiência na indústria (SOUZA, 2020).

## 1.1 Objetivos

Fica evidente que a robótica industrial investe em pesquisa constantemente, objetivando inovações, melhorias e novos mercados. Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um protótipo de robô SCARA, com características construtivas econômicas, e de 2 graus de liberdade, a partir de estudos anteriores que chegaram na fase de projeto conceitual, empregando sensoriamento capacitivo para aplicar o conceito colaborativo. Foram desenvolvidas atividades de projeto detalhado, fabricação, construção e testes do protótipo, reunindo a maior parte das características colaborativas de um robô comercial.

Complementando o objetivo geral do trabalho, os seguintes objetivos específicos podem ser destacados:

- Refino, adaptação do projeto anterior e construção de um protótipo de um robô modelo SCARA;
- Implementação do controle do manipulador e lógica de interrupção;



- Pesquisa e desenvolvimento de um método de sensoriamento de baixo custo que seja aplicado para o modelo colaborativo;
- Validação do funcionamento do sensoriamento de parada e do robô;
- Uso do manipulador para fins didáticos e de instrução em robótica, empregando programação acessível, além de facilitar oportunidades para projetos futuros nessa área.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para conceber o projeto de um manipulador robótico, é imprescindível compreender suas características e os conceitos fundamentais de modelagem, visando a elaboração de um modelo matemático. Esse modelo é essencial, pois será aplicado diretamente no controlador responsável do robô para avaliar os resultados das ações propostas no projeto. Neste capítulo, serão abordados os principais conceitos e considerações utilizados no desenvolvimento do trabalho, incluindo definições de manipuladores robóticos colaborativos, além do sensoriamento empregado para aplicar o conceito colaborativo.

### 2.1 Características dos robôs colaborativos

De acordo com CIM Automação (2019), no contexto da automação industrial, a integração de máquinas e trabalhadores humanos já se tornou uma realidade palpável. Nos últimos anos, esse cenário tem se expandido no Brasil, impulsionado pelo surgimento de ferramentas que aceleram essa transformação, especialmente os robôs colaborativos, conhecidos como "cobots".

Um robô colaborativo, é um tipo de robô projetado para interagir de forma segura e próxima com humanos em tarefas compartilhadas. Esses robôs são capazes de colaborar diretamente com humanos em espaços e tempos compartilhados, o que requer características técnicas, organizacionais e sociais específicas para garantir a segurança e eficiência das interações.

Uma característica fundamental dos robôs colaborativos, como apontado em Necula, Câmpean e Morar (2022), é a capacidade de realizar tarefas complexas de forma autônoma, incluindo a tomada de decisões baseadas em sensores e em seu ambiente. Isso significa que esses robôs não apenas executam movimentos pré-programados, mas também podem reagir e se adaptar a situações dinâmicas durante a colaboração com humanos.

Além disso, os robôs colaborativos diferem de robôs tradicionais por sua capacidade de interagir de forma mais direta e próxima com humanos em tarefas compartilhadas. Conforme destacado em Peshkin e Colgate (1999), essa interação pode variar de uma colaboração ativa, em que o robô trabalha em estreita cooperação com humanos, até uma colaboração passiva, em que o robô apenas fornece suporte ou restrições de movimento para garantir a segurança.

Outra característica importante dos robôs colaborativos é sua capacidade de se adaptar a diferentes contextos e aplicativos, como discutido em Peshkin *et al.* (2001). Isso inclui a possibilidade de reutilização de robôs industriais para tarefas colaborativas, ampliando as capacidades e flexibilidade dos sistemas robóticos em ambientes de trabalho diversificados.

Uma sumarização pode ser visualizada na Tabela 3, referenciando e dando exemplos dos tipos de interação entre robôs e humanos por nível de automação.

Tabela 3 – Taxonomia de robôs colaborativos com exemplos de cobots

Nível de autonomia	Nível de interação entre humano e robô			
	Separado Fisicamente	Coexistência	Cooperação	Colaboração
Completamente autônomo	robô de forma independente executa a tarefa definida e reage a problemas, por ex. drones autônomos	robô autônomo trabalhando distante de humanos, por ex. empilhadeiras autônomas; logística de armazéns; robôs de limpeza “Roomba”	robôs autônomos trabalhando próximos a humanos, por ex. cobot agrícola autônomo “Burro”	robôs autônomos trabalhando em contato próximo com humanos, por ex. atendimento ao paciente “Moxi”; “Pimenta”
Semi-autônomo com entrada do usuário	o robô executa de forma semi-autônoma uma tarefa definida, com a entrada humana esperada., por ex. teleoperação com atrasos na transferência, Mars Rover	o robô executa de forma semi-autônoma um determinado programa, por ex. robôs de cozinha “Moley”, “Flippy 2”	o cobot navega de forma semi-autônoma e trabalha em espaço compartilhado, por ex. servindo cobot “botHUB”, cirurgia cobótica “Da Vinci”	O cobot opera de forma semi-autônoma em estreita proximidade com humanos, por ex. “iCat”, “Lely Astronauta”
Ativo & guiado / programado por humano	o robô é totalmente controlado /programado por humanos, por ex. robô de fabricação programado off-line tradicional, teleoperação simples	O robô é totalmente controlado por humanos e opera principalmente em espaços não compartilhados, por ex. robôs de guarda, “robô de segurança Justus”	robô totalmente controlado opera em espaço compartilhado com humanos, por ex. cobots avatar, robôs de telepresença.	O cobot totalmente controlado opera em contato direto com um ser humano, por ex. reabilitação. cobôs; “ANBOT”, exoesqueletos Ottobock;
Passivo e guiado / programado por humano	robô passivo restringe o movimento ou operação de objetos, por ex. avançado à prova de falhas	o robô passivo restringe o movimento ou operação de objetos, por ex. robôs de preensão passiva para segurar peças	O cobot passivo restringe o movimento ou operação de objetos em espaço compartilhado, por ex. pegar e segurar objetos	o cobot passivo restringe diretamente o movimento humano, por ex. reabilitação simples. cobot, o cobot do Colgate

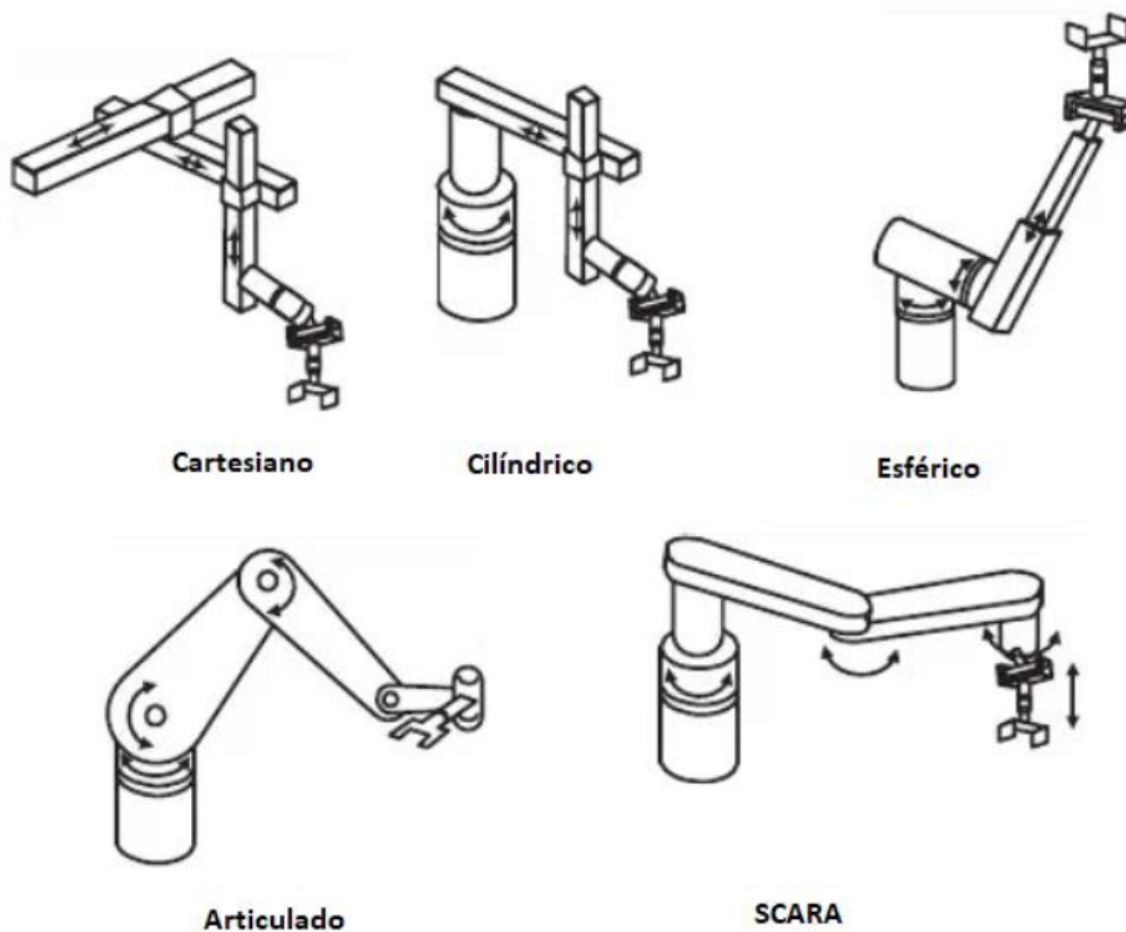
Fonte: Guertler *et al.* (2023)

Por fim, a definição e classificação precisa dos robôs colaborativos, como proposto em Guertler *et al.* (2023), são essenciais para orientar o desenvolvimento, implementação e uso seguro desses sistemas. Uma taxonomia clara que leve em consideração o nível de interação humano-robô e o grau de autonomia do robô pode ajudar a identificar diferentes tipos de robôs colaborativos e seus respectivos requisitos de segurança e aplicação.

## 2.2 Tipos de Robôs Industriais

Niku (2013) explica que as configurações dos robôs são definidas por uma sequência de identificadores, sendo as articulações prismáticas representadas pela letra P e as articulações rotacionais pela letra R. Cinco dos tipos de manipuladores robóticos baseados em seu sistema de coordenadas podem ser representados pela Figura 3:

Figura 3 – Alguns tipos de manipuladores



Fonte: Niku (2013)

### 2.2.1 Robôs Articulados

Os braços robóticos articulados são manipuladores, geralmente programáveis, que funcionam de maneira semelhante ao braço humano. Uma cadeia cinemática pode ser obtida conectando os atuadores usando o que são chamados de “elos” para construir o braço robótico. A extremidade manipuladora do sistema de cadeia é chamada de “efetadores finais”. Para a maioria das aplicações de braços robóticos, os efetadores finais são referidos como “garras”. Os atuadores são chamados de “articulações” do braço robótico, variando de 2 a 10. Os braços robóticos são amplamente utilizados em indústrias automobilísticas, de microeletrônica, químicas, agrícolas e biomédicas, defesa, manuseio de materiais e soldagem, entre outros, conforme prescrito por Oslon (2000).

A maior vantagem do uso de braços robóticos é que eles podem operar em áreas perigosas ou em áreas inacessíveis para o braço humano. Um exemplo de tal aplicação de braço robótico é o Spirit da MER-A e o Opportunity da MER-B da NASA, disponível em Gunter's Space Page (2023), que são operados remotamente da Terra para explorar a superfície e a geologia de Marte.

Figura 4 – Módulo de pouso MER-A [NASA]



Fonte: Gunter's Space Page (2023)

Como exemplificado por Gillespie e Colgate J. E.; Peshkin (2001), foram desenvolvidas muitas variantes de braços robóticos, como controle por teclado, controle por voz e controle por gestos, entre outros. No entanto, a maioria dos robôs industriais ainda é programada usando o processo de ensino típico, que é uma tarefa tediosa e demorada que requer experiência técnica. Portanto, há uma necessidade de novas e mais fáceis formas de programar os robôs.

### 2.2.2 Robôs Cartesianos

De acordo com Kelly, Santibanez e Loria (2005), os robôs cartesianos representam uma classe fundamental de manipuladores mecânicos utilizados em uma variedade de aplicações industriais e especializadas. Eles são caracterizados por operar em um sistema de coordenadas cartesianas, movendo-se ao longo de três eixos ortogonais (X, Y e Z) de forma linear e independente. Essa estrutura oferece precisão e repetibilidade nas operações, sendo essencial em tarefas que exigem movimentos em linha reta ou em padrões pré-definidos.

Tsai (1999) e Spong, Hutchinson e Vidyasagar (2006) exemplificam situações em que esses robôs são empregados em operações de montagem, soldagem, corte a laser, inspeção e manipulação de materiais. Sua configuração mecânica simplificada em comparação com outros tipos de manipuladores permite uma implementação eficiente e econômica em ambientes de produção. Além disso, sua capacidade de movimento ao longo de eixos cartesianos facilita a integração com sistemas de visão computacional e sensores para operações mais complexas e precisas.

Essa classe de robôs é especialmente valorizada em ambientes industriais devido à sua capacidade de realizar movimentos precisos e repetitivos, contribuindo para a automação de processos e aumentando a eficiência e a qualidade dos produtos fabricados.

### 2.2.3 Robôs Cilíndricos

Os robôs cilíndricos são um tipo de robôs que se destacam por sua configuração e funcionalidades específicas. Conforme mencionado por Rosário (2010), este tipo de robô tem uma capacidade de trabalho superior à do robô cartesiano, porém sua rigidez é um tanto reduzida e seu controle é mais desafiador devido aos movimentos executados através das juntas em rotação.

Eles são parte de um grupo maior de robôs que operam automaticamente, sendo programados para realizar diversas tarefas, muitas vezes comparando suas habilidades com o trabalho humano, como exemplificado em Sonia *et al.* (2020) empregando um robô com espaço de trabalho como uma estrutura de barril. Esses robôs têm um design que permite movimentos em direções de translação ou rotação, o que é determinado pela disposição das articulações que formam sua cadeia cinemática, funcionando até mesmo em situações como as de Lee e Jeon (2015), desenvolvendo um robô dessa categoria com fibra de carbono.

Em sua estrutura, os robôs cilíndricos são projetados para realizar atividades de montagem e manipulação em máquinas, como soldagem e operações de fundição como em Kumar, Verma e Sharma (2020). Sua arquitetura cilíndrica permite movimentos precisos e controlados, sendo úteis em ambientes industriais e de fabricação. Eles geralmente consistem em uma coluna vertical e um braço deslizante que pode se mover ao longo dessa coluna, proporcionando movimentos radiais em relação ao eixo central.

Em resumo, os robôs cilíndricos representam uma parte importante da tecnologia robótica, oferecendo soluções eficientes e precisas para uma variedade de aplicações industriais e de fabricação, impulsionando continuamente a inovação nesse campo.

### 2.2.4 Robôs Esférico

Essa configuração possui uma junta de torção entre o braço e a base, além de combinar duas juntas rotativas e uma junta linear conectando os elos. Conhecidos também como robôs esféricos, têm um alcance espacial significativo e são úteis em operações que exigem movimentos fora do plano de obstáculos. Rosário (2010) descreve que esses sistemas de manipulação possuem uma capacidade operacional mais ampla em comparação com os modelos cilíndricos, embora tenham uma menor rigidez e demandem um controle mais intrincado devido às suas rotações em múltiplos eixos.

O sistema descrito por Hofer e D'Andrea (2020), por exemplo, combina dois graus de liberdade rotacionais em uma única junta esférica. Essa configuração permite não apenas o controle preciso do movimento em várias direções, mas também a capacidade de ajustar a rigidez da junta conforme necessário. Essa flexibilidade é crucial em muitas aplicações, especialmente aquelas que exigem interação segura com humanos ou manipulação precisa de objetos em espaços complexos.

### 2.2.5 Robôs SCARA

A configuração do SCARA, possui três juntas rotativas em paralelo (permitindo que ele se mova e se oriente em um plano), com uma quarta junta prismática para mover o efetuador final normal ao plano. A principal vantagem é que as três primeiras juntas não precisam suportar o peso do manipulador ou da carga, ou seja, não se encontram no plano de rotação do movimento dos atuadores. Além disso, o elo em contato com a base pode facilmente abrigar os atuadores para as duas primeiras juntas. Os atuadores podem ser feitos com maior dimensão, resultando numa maior velocidade angular (CRAIG, 2005).

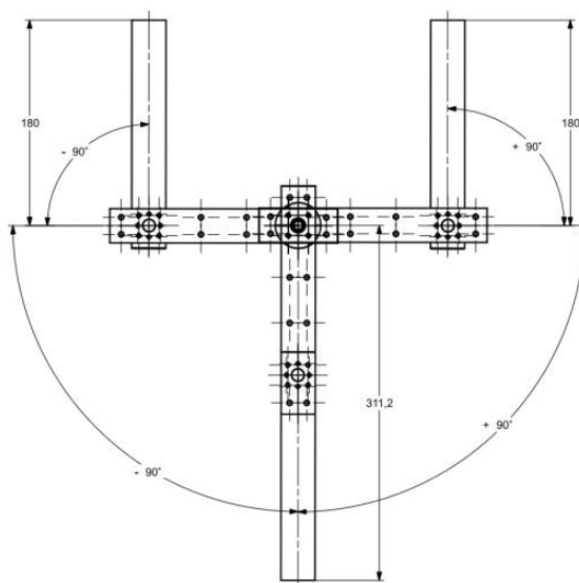
O robô SCARA apresenta diversas vantagens que o tornam uma escolha valiosa em aplicações industriais e de pesquisa. Uma de suas principais vantagens é o layout de articulação com eixos paralelos, que oferece alta precisão e eficiência em movimentos X-Y, essenciais para tarefas de montagem, manipulação e posicionamento de objetos segundo Angeles, Morozov e Navarro (2000). Além disso, sua rigidez na direção Z proporciona estabilidade durante operações de alta velocidade, contribuindo para a precisão e repetibilidade das tarefas executadas. A capacidade de alcançar áreas confinadas e a flexibilidade para dobrar-se fora do caminho também são vantagens significativas, especialmente em ambientes de produção com espaço limitado.

Embora o robô SCARA tenha muitas vantagens, também apresenta algumas limitações. Uma das principais desvantagens é sua capacidade limitada em realizar movimentos tridimensionais complexos, devido à sua arquitetura de articulação paralela focada em movimentos X-Y, conforme Angeles, Morozov e Navarro (2000). Isso pode restringir suas aplicações em tarefas que exigem uma ampla gama de movimentos em múltiplos planos, como algumas operações de soldagem ou montagem mais complexa. Além disso, a complexidade de programação para garantir a sincronização precisa dos movimentos também pode ser um desafio em certos contextos, conforme Zens (2005).

O robô SCARA é amplamente utilizado em uma variedade de aplicações industriais devido às suas características únicas. Uma das principais aplicações é em linhas de montagem automatizada, em que sua precisão e velocidade são aproveitadas para realizar montagens repetitivas com alta eficiência, exemplificado por Zens (2005). Ele também é utilizado em operações de embalagem, manipulação de materiais e seleção de peças em linhas de produção, contribuindo para melhorias significativas em termos de produtividade e qualidade. Além disso, sua capacidade de alcançar áreas confinadas e sua estabilidade durante operações de alta velocidade o tornam adequado para diversas outras tarefas industriais que exigem precisão e confiabilidade, exemplificado por Angeles, Morozov e Navarro (2000).

Portanto, o robô SCARA é uma ferramenta versátil e eficiente em ambientes industriais, oferecendo um equilíbrio entre precisão, velocidade e capacidade de manipulação em uma ampla gama de aplicações, sendo por consequência o robô selecionado para o trabalho, possuindo o espaço de trabalho representado pela Figura 5.

Figura 5 – Espaço de trabalho do robô SCARA fundamentado



Fonte: Souza (2020)

### 2.3 Implementação do Método Colaborativo

A implementação bem-sucedida do método colaborativo entre humanos e cobots é crucial para garantir a segurança e eficiência nas interações industriais. Um dos principais desafios encontrados é a definição clara do que realmente diferencia um cobot de um robô industrial tradicional, conforme Guertler *et al.* (2023). A confusão nesse aspecto pode levar a uma aplicação inadequada dos cobots, colocando em risco a produtividade e a segurança dos trabalhadores.

Um ponto-chave na implementação segura de cobots é o entendimento correto da sua natureza colaborativa e das capacidades de interação próxima com humanos. Guertler *et al.* (2023) explica que isso inclui considerar não apenas a tecnologia subjacente, mas também as implicações sociais e organizacionais de sua integração em ambientes de trabalho diversificados. Por exemplo, o uso de sensores externos é fundamental para garantir a detecção confiável de humanos próximos e evitar acidentes durante a operação conjunta, exemplificado em Peshkin *et al.* (2001).

Além disso, a implementação do método colaborativo muitas vezes envolve a adaptação de robôs industriais para tarefas colaborativas, descrito por Guertler *et al.* (2023). Essa adaptação não se limita apenas à tecnologia, mas também à consideração cuidadosa dos tipos de tarefas que os cobots podem desempenhar de forma segura e eficaz em conjunto com os humanos. Aspectos como a capacidade de movimento, os tipos de interação física permitidos e os requisitos de segurança são cruciais nesse processo.

Craig (2005) descreve a importância da programação de robôs em relação à interação com sensores. É essencial que o sistema seja capaz de consultar sensores de toque e força, usar as respostas em estruturas de decisão condicional e monitorar transições em



segundo plano. A integração com sistemas de visão permite que o robô receba coordenadas de objetos de interesse, como identificar suportes em uma esteira. Além disso, aborda a necessidade de controlar forças ativas, descrevendo como isso pode ser feito através de estratégias de força especificadas pelo usuário. Essas estratégias são parte integrante do sistema de controle do manipulador, enquanto a linguagem de programação do robô atua como uma interface para essas capacidades.

Embora a literatura não forneça uma lista restrita de sensores específicos para robôs colaborativos, é conhecido que esses sistemas empregam uma variedade de sensores para garantir interações seguras e eficientes com humanos e ambientes. Alguns exemplos comuns de sensores incluem:

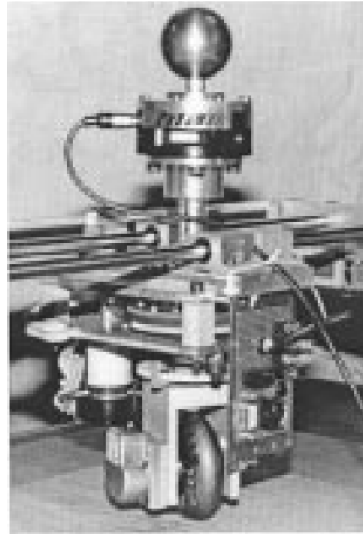
- Sensores de proximidade: como sensores ultrassônicos, infravermelhos ou ópticos, utilizados para detectar a presença de objetos ou pessoas próximas ao robô, como executado por Curty e Marchi (2019).
- Sensores de força e torque: para medir e controlar a força aplicada durante interações físicas, permitindo movimentos mais suaves e seguros, como o robô Colaborativo ASSISTA da Mitsubishi Electric (2024).
- Câmeras e sistemas de visão: para identificar objetos, reconhecer gestos ou movimentos humanos e navegar de forma autônoma em ambientes complexos, como o KAPPABOT da empresa Acta Robots (2024).
- Sensores táteis: que fornecem feedback sobre o toque ou contato físico, auxiliando na detecção de colisões e na manipulação delicada de objetos, como executado por Curty e Marchi (2019).

Guertler *et al.* (2023) entre um de seus exemplos, exemplifica a interface de um cobot simplificado usado como modelo para descrever os comportamentos essenciais de cobots. Um cobot básico pode ser representado por uma única roda em contato com uma superfície plana de rolagem, possuindo um espaço de trabalho 2-D cartesiano.

A interface com o operador humano inclui um suporte com sensor de força para medir as forças aplicadas. O sistema de direção do cobot é controlado por um motor que não causa movimento no espaço de trabalho, permitindo um desacoplamento entre a ação de direção e o movimento do cobot. Guertler *et al.* (2023) menciona também a presença de um sistema ferroviário para manter o cobot em pé e restrito ao seu espaço de trabalho 2-D, equipado com codificadores para medir sua posição e a velocidade de rotação da roda. Uma foto do cobot pode ser observada pela Figura 6.

Um exemplo claro de aplicação de sensoriamento capacitivo foi o executado por Curty e Marchi (2019), no qual foram impressas em 3D as peças de um robô articulado antropomórfico, enquanto se empregavam sensores de baixo custo do tipo radar (pro-

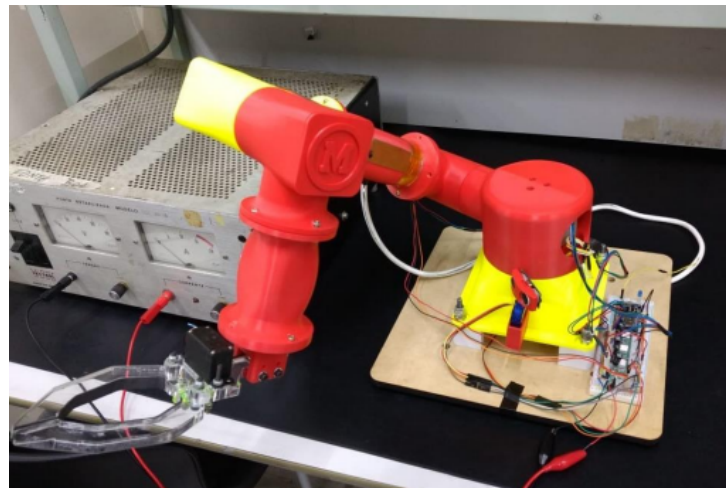
Figura 6 – Cobot exemplificado



Fonte: Guertler *et al.* (2023)

ximidade) e capacitivos (tátil). O sensor tátil empregado consistiu-se em uma camada condutora de cobre em torno de um dos elos do robô, possibilitando a leitura de contato. O robô pode ser visualizado pela Figura 7

Figura 7 – Cobot esférico

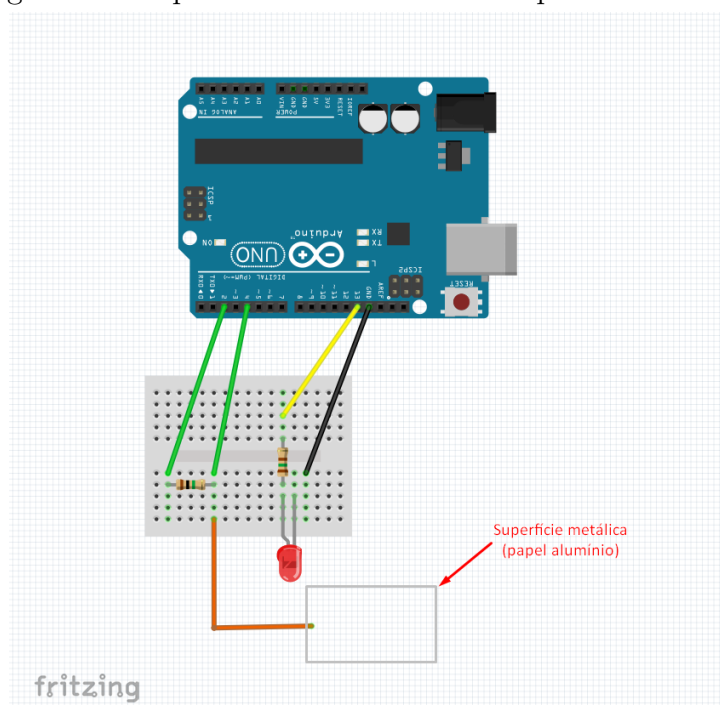


Fonte: Curty e Marchi (2019)

Conforme descrito por Puers (1993), um sensor capacitivo opera como uma antena que produz um campo elétrico. Quando um objeto se aproxima da antena, ele altera a capacitância desse campo. O microcontrolador percebe essa mudança e determina a proximidade do objeto. Com essa tecnologia, é viável transformar qualquer objeto condutor em um sensor.

Seguindo na proposta de sensores de toque, para construir um sensor tátil em uma placa Arduino (microcontrolador tomado para o robô), é necessário ter uma resistência, um cabo e/ou uma tinta condutiva ou similar, tomando-se nesse trabalho o papel alumínio como condutor, feito inicialmente por Squids (2021). A resistência conecta o pino de medição ao pino de referência, enquanto o cabo vai do pino de medição até a folha de alumínio. O valor da resistência influencia a sensibilidade do sensor e a montagem do circuito pode ser observada pela Figura 8. Quanto maior o valor, maior será a capacidade do sensor de detectar objetos à distância.

Figura 8 – Esquema de sensoriamento capacitivo Arduino



Fonte: Squids (2021)

Por ser um sensoriamento extremamente simples e barato foi escolhido para ser empregado na construção do robô SCARA, entretanto como vai ser discutido mais à frente no tópico de resultados, houve a necessidade de se executar algumas adaptações por conta de ruídos na carcaça metálica do robô.

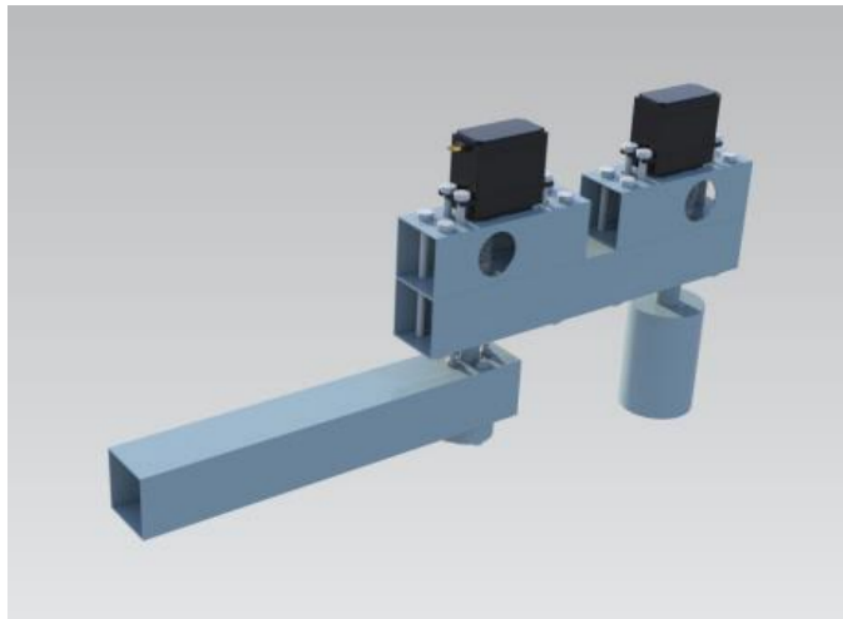
### 3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo, são detalhados os aspectos do desenvolvimento do manipulador SCARA, abordando o sistema mecânico, o sistema eletrônico, a modelagem matemática e o sensoriamento.

#### 3.1 Sistema Mecânico

O sistema mecânico do manipulador SCARA é baseado em um projeto conceitual previamente desenvolvido por Souza (2020), o qual foi adaptado para permitir a fabricação por usinagem, tornando-a mais acessível e escalável em comparação à impressão 3D. A representação final do manipulador pode ser observada na Figura 9.

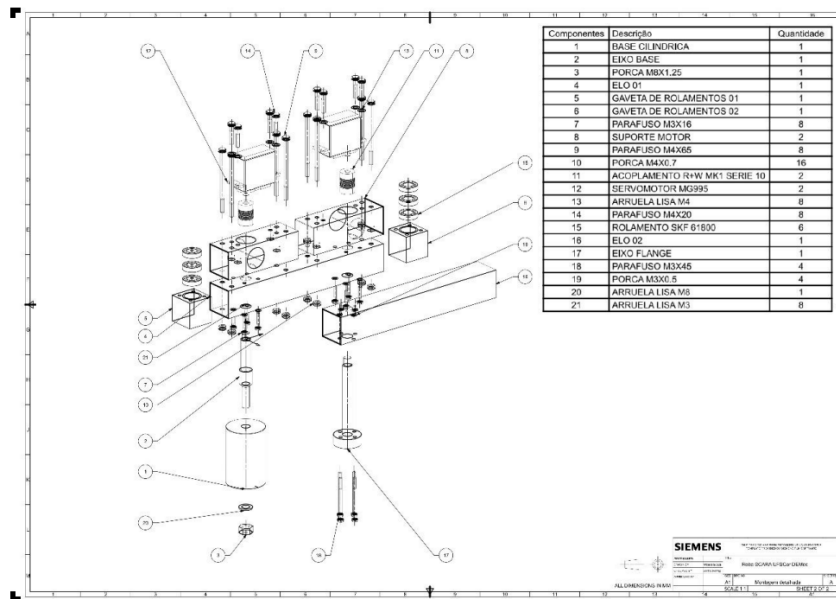
Figura 9 – CAD previamente executado



Fonte: Autor (2024).

O desenho técnico detalhado executado por Souza (2020) da montagem do robô SCARA pode ser observado por meio da Figura 10, verificando-se os componentes necessários na montagem.

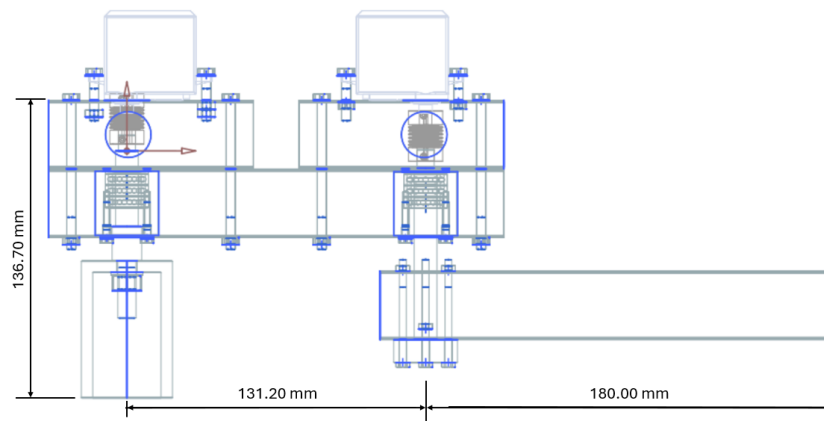
Figura 10 – Desenho técnico da montagem



Fonte: Souza (2020)

Também é possível observar as dimensões finais do modelo através da Figura 11, observado-se a altura do robô (desconsiderando os motores) de 136.70 mm, distância considerada para o elo base de 131.20 mm e para o elo braço de 180.00 mm, tomadas para a programação do robô.

Figura 11 – Dimensões do modelo físico



Fonte: adaptado de Souza (2020)

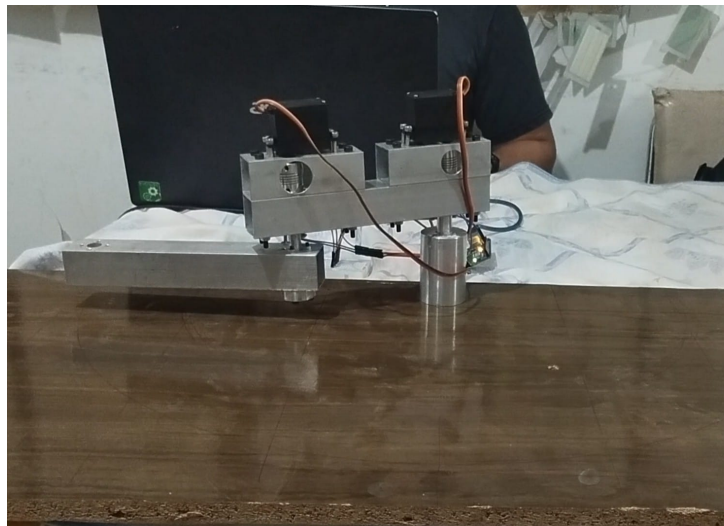
Foram executadas alterações no projeto de Souza (2020) para facilidade de instalação e substituição de componentes. tais mudanças podem ser listadas como:

- Modificação da base, se tornando completamente sólida, para auxiliar no balanço do robô;

- Acoplamento da base com o eixo do servo-motor do primeiro elo, conforme visualizado no Apêndice B;
- Acoplamento da base para se manter firme estabilizada em uma superfície usando um parafuso, conforme visualizado no Apêndice B;
- Nova seleção de acoplamentos flexíveis, por questões de disponibilidade;
- Criação de uma caixa de rolamentos via impressão 3D, evitando fresamento;
- Modificação no eixo flange, dividindo-o em duas peças para facilitar manufatura, visualizado Apêndice B.

A versão construída, já com os componentes eletrônicos e elétricos instalados, pode ser visualizada na Figura 12

Figura 12 – Robô SCARA montado



Fonte: Autor (2024).

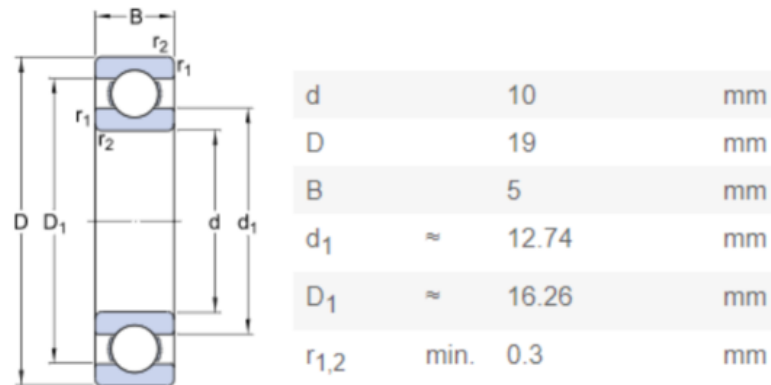
## 3.2 Componentes físicos

Nessa seção serão descritos os componentes comerciais tomados para a manufatura do manipulador robótico, tomando como base o projeto conceitual desenvolvido por Souza (2020).

### 3.2.1 Rolamentos

Mantendo-se a linha do projeto conceitual anterior, continuou-se com a seleção dos rolamentos rígidos de esferas SKF61800, com diâmetro suficiente para os eixos internos. É possível verificar as dimensões do rolamento conforme a Figura 13

Figura 13 – Rolamento rígido de esferas SKF61800



Fonte: SKF (2024).

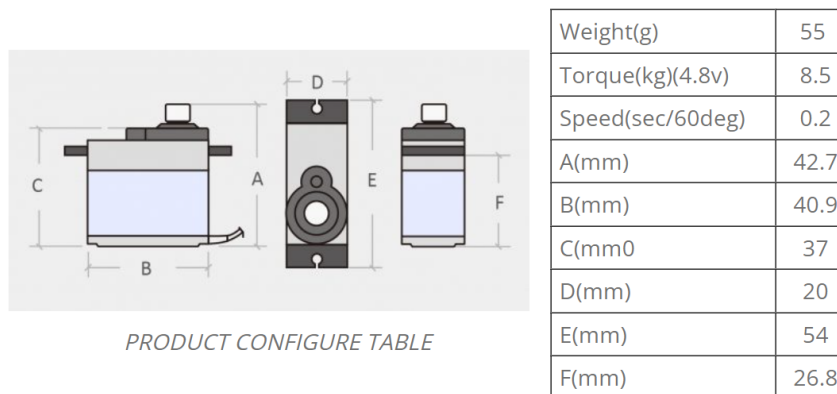
### 3.2.2 Fixadores

A fixação dos componentes continuou sendo executada por uniões roscadas, conforme inicialmente idealizado por Souza (2020), seja pela utilização de conjuntos parafuso, porca e arruela, parafusos em furos cegos e eixo roscado para base.

### 3.2.3 Atuadores

Conforme Souza (2020) havia previamente selecionado, foi empregado na montagem o servo-motor MG995 da Tower Pro, que possui faixa de rotação de 180°, capaz de aplicar 13kgf.cm de torque, tendo sua visualização e propriedades especificadas através da Figura 14, assim como pode ser observado na montagem através da Figura 15.

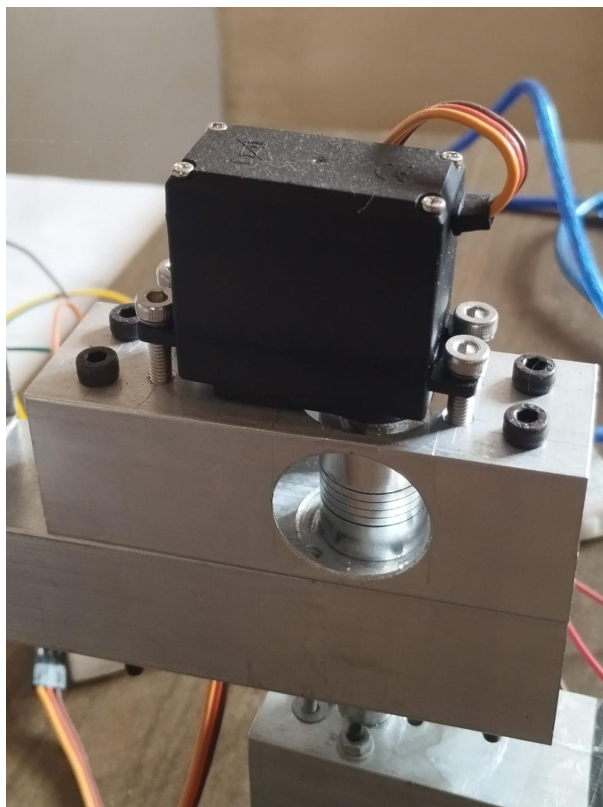
Figura 14 – Servo MG995 Tower Pro



Fonte: TowerPro (2019).



Figura 15 – Montagem no robô



Fonte: Autor (2024).

#### 3.2.4 Transmissões

O único componente comercial por questões de disponibilidade trata-se do acoplamento entre os servo-motores e os eixos do robô.

Selecionou-se, um acoplamento compatível com os eixos de entrada e saída e com torque resistido superior ao transmitido pelos servos. O novo acoplamento tem resistência de até 10 kgf.cm, aproximando a 1 Nm (torque resistido do acoplamento selecionado por Souza (2020)), e pode ser visualizado na Figura 16

Figura 16 – Acoplamento flexível empregado



Fonte: Magalu (2024).

A utilização de um acoplamento flexível, para aplicações de alta performance, pode influenciar no posicionamento através de sua própria distorção. Por ser um robô protótipo de bancada, em contra partida, foi empregado para a finalidade de redução de custos.

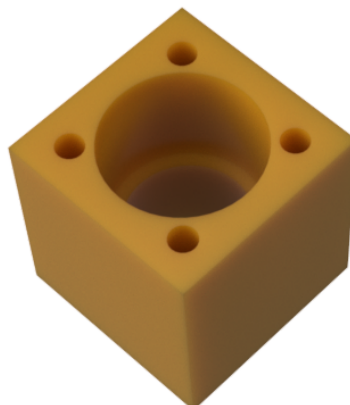
### 3.2.5 Elos e Eixos

Tomando como base o emprego de estruturas de alumínio para não ocorrer a oxidação e diminuição do peso, comprou-se tubos de perfil quadrado com altura e largura de 30 mm, assim como tarugos de alumínio para usinagem dentro do laboratório.

### 3.2.6 Caixa de Rolamentos

Pensando em evitar o processo de usinagem via fresa e por necessitar de uma peça pequena, foi realizada a impressão 3D da caixa de rolamentos em PETG, visualizada na Figura 17.

Figura 17 – Caixa de Rolamentos



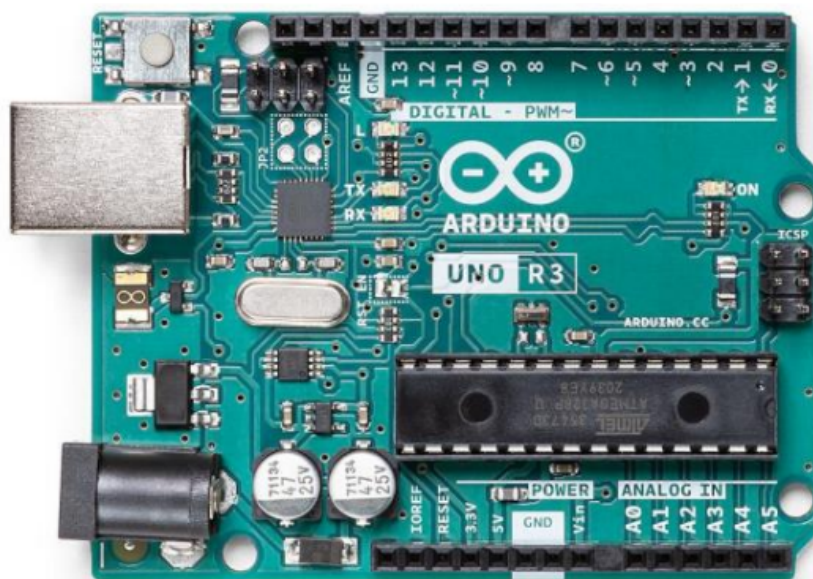
Fonte: Autor (2024).

As tolerâncias dimensionais foram compensadas através do uso do acoplamento flexível, lidando com os desvios gerados, assim como foi possível executar a sua fixação através da parafusação das caixas na estrutura, conforme idealizado inicialmente por Souza (2020).

### 3.3 Sistema Eletrônico

Para o sistema eletrônico, optou-se pelo uso do microcontrolador Arduino UNO, visualizado na Figura 18, devido à sua simplicidade e custo acessível, embora não seja recomendado para ambientes industriais devido à sensibilidade a ruídos.

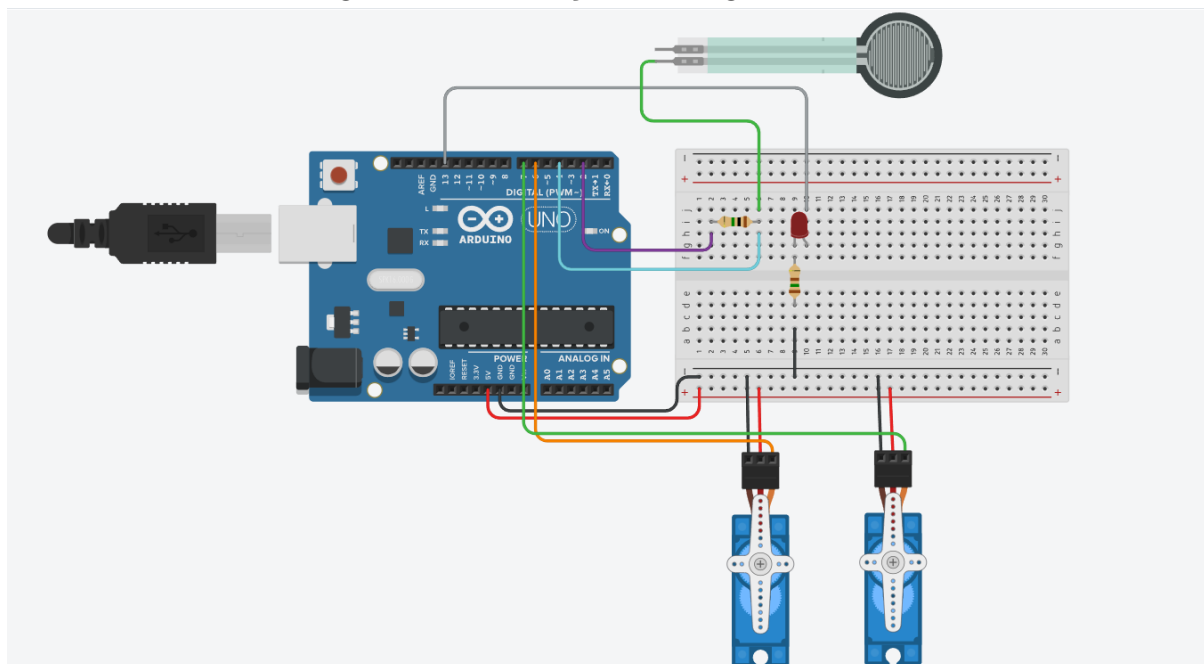
Figura 18 – Modelo Arduino UNO



Fonte: Arduino (2024).

A representação do circuito eletrônico e suas conexões pode ser visualizada através da Figura 19, consistindo num circuito teste executado na plataforma TinkerCAD para validar o funcionamento do código enquanto não se possuía o modelo físico montado. A lista de componentes pode ser representada pela Tabela 4

Figura 19 – Simulação do código de controle



Fonte: Autor (2024).

Tabela 4 – Tabela de Componentes do Circuito eletrônico

Componente	Quantidade
Arduíno UNO	1
Servo MG995 Tower Pro	2
Resistor 1M $\Omega$	1
Resistor 150 $\Omega$	1
Placa de Ensaio	1
Fios	15
Led	1
Papel Alumínio	1

Fonte: Autor (2024).

No que diz respeito ao circuito, é necessário apontar algumas observações:

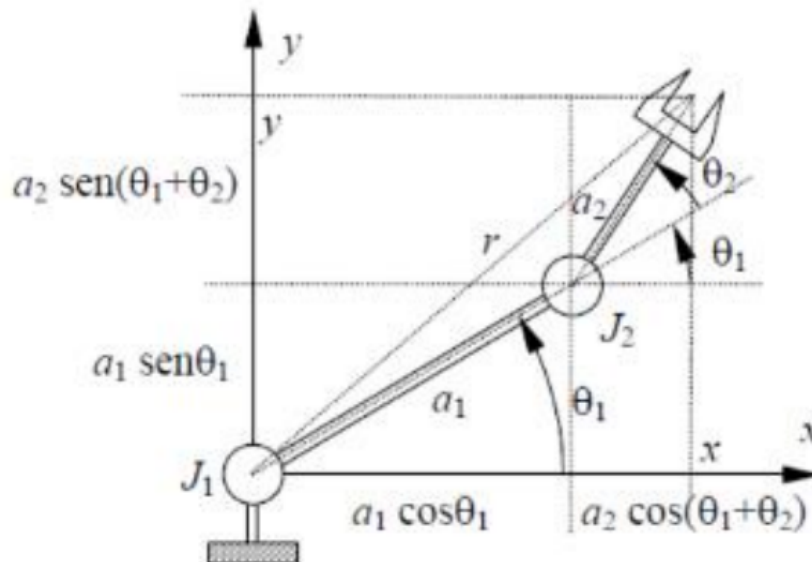
- Os servo-motores selecionados podem ser alimentados diretamente com o Arduino, não necessitando de fonte externa;
- O LED empregado tem a função apenas de informar para o usuário de maneira visual detecção do usuário pelo robô, mas também há esse tratamento na interface usada para programação.

A inserção de coordenadas se dá empregando a IDE Arduino, usando o monitor serial. São inseridas as coordenadas  $x$  e  $y$  referentes à posição à qual a ponta do manipulador deverá alcançar. No código disposto no apêndice A, há o tratamento da leitura do sensor, a verificação da distância à ser alcançada e os comandos referentes à Interface Homem-Máquina (IHM).

### 3.4 Modelagem Matemática

Para controlar a posição do braço robótico, foi utilizada a cinemática inversa conforme apresentado por Carrara (2015) e visualizado na Figura 20. Os parâmetros necessários para a modelagem incluem as coordenadas cartesianas desejadas ( $x$  e  $y$ ), o comprimento dos elos ( $a_1$  e  $a_2$ ), e os ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_2$  dos servomotores.

Figura 20 – Modelagem base para o robô SCARA desenvolvido



Fonte: Carrara (2015).

Apresentando então os dados necessários para a modelagem:

- $x$  (posição cartesiana objetivada em  $x$ )
- $y$  (posição cartesiana objetivada em  $y$ )
- $a_1 = 131.20$  mm (comprimento do primeiro elo do robô)

- $a_2 = 180.00$  mm (comprimento do segundo elo do robô)
- $\theta_1$  (ângulo formado pelo elo 1 em relação ao eixo cartesiano x para inserção no servomotor)
- $\theta_2$  (ângulo formado pelo elo 2 em relação ao eixo do elo 1 para inserção no servomotor)

As equações finais para calcular  $\theta_1$  e  $\theta_2$  são dadas por:

$$\theta_2 = \pm \arccos \left( \frac{x^2 + y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2 \cdot a_1 \cdot a_2} \right) \quad (1)$$

$$\theta_1 = \arctan 2 \left( \frac{y \cdot (a_1 + a_2 \cdot \cos \theta_2) - x \cdot a_2 \cdot \sin \theta_2}{x \cdot (a_1 + a_2 \cdot \cos \theta_2) - y \cdot a_2 \cdot \sin \theta_2} \right) \quad (2)$$

Essas equações garantem o posicionamento correto do braço robótico, levando em consideração as duas possíveis soluções para  $\theta_2$  e a função  $\arctan 2$  para determinar o quadrante correto de  $\theta_1$ .

Devido à existência de duas soluções possíveis para cada posicionamento especificado, o critério utilizado foi simplesmente selecionar o conjunto de ângulos em que o primeiro elo se desloca em menor quantidade, justamente porque o servo motor da base é mais exigido entre os dois.

### 3.5 Sensoriamento

O sensoriamento por toque foi implementado de forma econômica usando apenas um resistor e uma superfície condutora, como ilustrado na Figura 21.

Ao contrário do que foi proposto por Curty e Marchi (2019), não era possível somente realizar o recobrimento de uma camada de cobre no robô, assim como utilizar a própria estrutura para isso, se devendo à condução da camada em relação aos servo-motores e ao próprio movimento do manipulador.

Para garantir a precisão e confiabilidade do sensoriamento, foi necessário recobrir a superfície condutora com material isolante e condutor, como papel alumínio sobre uma camada de fita isolante. Esse método evita ruídos e interferências que poderiam gerar leituras inconsistentes durante o funcionamento do robô.

Por fim, o fluxograma referente ao princípio de funcionamento do robô atrelada à programação executada pode ser visualizado na Figura 22.

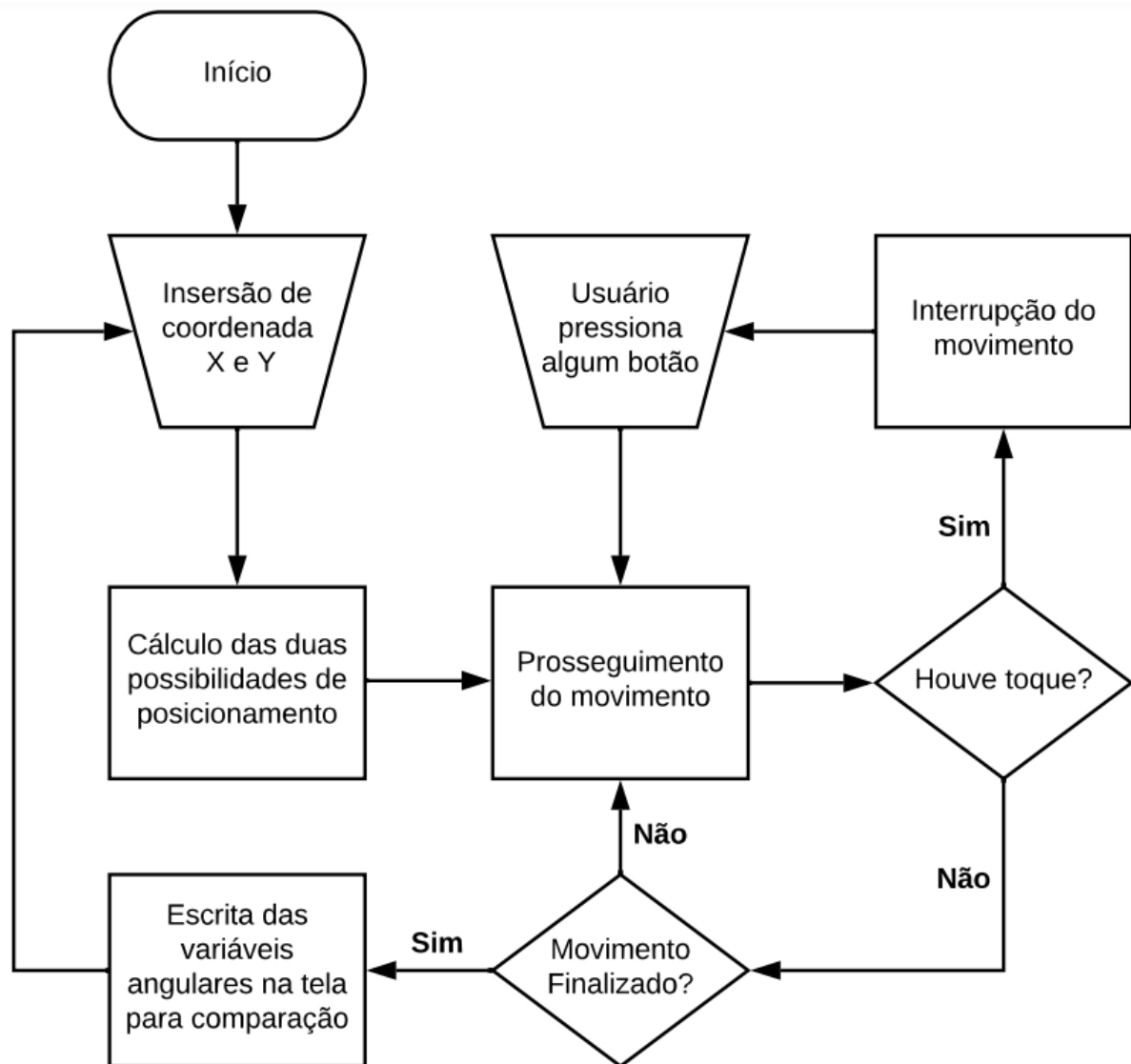
A programação executada consiste em um laço de repetição infinito, pedindo e se movendo às coordenadas estipuladas, não compreendendo uma sequência de posições a serem pré selecionadas.

Figura 21 – Sensoriamento por toque



Fonte: Autor (2024).

Figura 22 – Fluxograma de Funcionamento do Robô



Fonte: Autor (2024).



## 4 RESULTADOS

Nessa seção serão abordados os custos de fabricação do protótipo, para finalidade comparativa, observações sobre a precisão do robô, tomada de decisão para inserção do sensoriamento, os dados coletados pelo sensoriamento juntamente da tomada de decisão do valor a ser inserido no filtro,

Os custos dos componentes significativos do SCARA podem ser encontrados na Tabela 5, podendo-se visualizar que o robô possui um preço relativamente acessível.

Tabela 5 – Tabela de Preços dos componentes

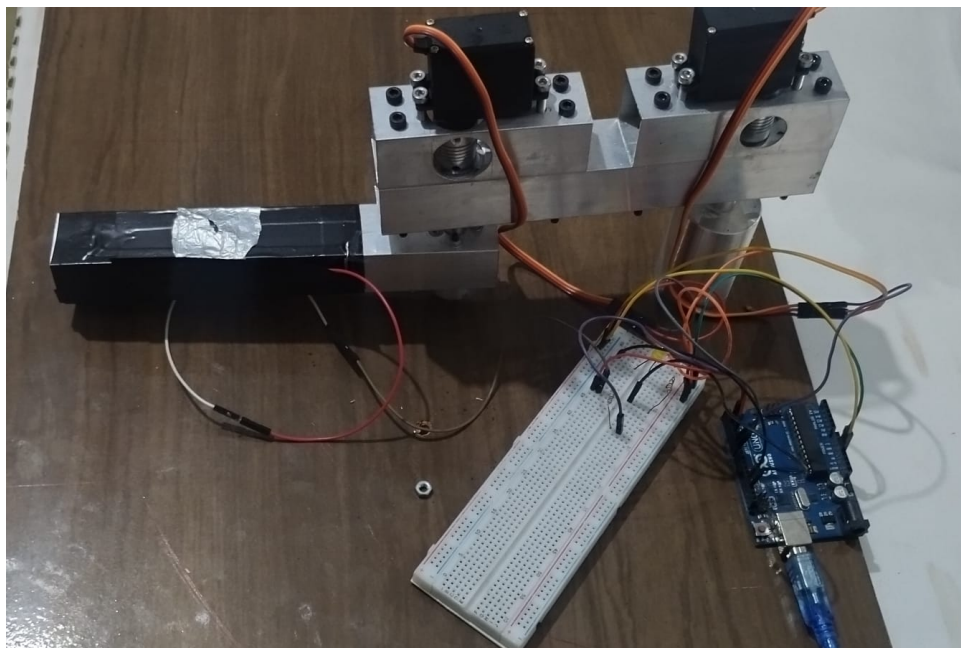
Item	Quantidade	Preço
Porca M3	1 pacote	R\$ 11,90
Porca M4	2 pacotes	R\$ 28,40
Arruela M3	1 pacote	R\$ 21,99
Arruela M4	1 pacote	R\$ 12,99
Tarugo alumínio 7/8” 500mm	1 unidade	R\$ 78,90
Parafuso M3x16mm	1 pacote	R\$ 14,99
Rolamento SKF61800	2 unidades	R\$ 80,00
Tubo quadrado alumínio	3 unidades	R\$ 119,70
Servo MG995	2 unidades	R\$ 79,68
Parafuso M4x20mm	1 pacote	R\$ 13,90
Acoplamento Flexível	2 unidades	R\$ 28,50
Para fuso M3x45mm	1 pacote	R\$ 49,00
Tarugo alumínio 2” 100mm	1 unidade	R\$ 47,90
Parafuso M4x70mm	1 pacote	R\$ 49,54
Caixa de Rolamentos	2 unidades	R\$ 10,00
Arduíno UNO	1 unidade	R\$ 44,90
Placa de Ensaio	1 unidade	R\$ 19,45
Rolo papel alumínio	1 unidade	R\$ 7,00
Total		R\$ 718,74

Fonte: Autor (2024).

No custo de manufatura desse robô, entretanto, não está incluso a mão de obra da usinagem realizada pelos técnicos do departamento. O que chama atenção, de fato, é que o sensoriamento do robô se dá apenas pelo uso do microcontrolador, cabos, resistores (preço unitário ínfimo) e papel alumínio, sendo um sensoriamento extremamente barato de se implementar.

Pode-se também visualizar a versão montada juntamente do sensoriamento capacitivo através da Figura 23.

Figura 23 – Montagem Final



Fonte: Autor (2024).

Por ser um manipulador de baixo custo, a precisão da posição final se mostrou completamente dependente da precisão dos servo-motores empregados. Isso acarreta, por consequência, em pequenos erros ao final do posicionamento.

Além disso, devido às conexões simplistas do modelo empregado, assim como o uso da placa de ensaio, os motores usados se mostraram suscetíveis à ruídos, alterando e modificando sua posição algumas poucas vezes.

Quanto ao sensoriamento empregado, inicialmente executou-se um teste usando a própria estrutura de alumínio do robô como sensor condutor, entretanto devido aos ruídos provenientes dos motores e da interferência da própria estrutura em seu movimento, esse método se mostrou inutilizável.

Como resultado, foi feita uma isolamento da ponta do segundo elo do robô através de fita isolante para se empregar uma camada de papel alumínio exemplo.

O tamanho do papel alumínio empregado influencia apenas no valor a ser empregado no filtro do microcontrolador (executado via código, uma vez que se trata da média das amostras), justamente por conta do princípio capacitivo descrito por Puers (1993), detectando a aproximação do toque do operador independente da região.

Sabendo disso, para a finalidade de testes e facilidade de montagem, separou-se apenas uma pequena região do elo para exemplificar a parada do robô.

Para executar a validação dos resultados, é possível observar pela Figura 24 os valores retidos da leitura do sensor em relação às amostras coletadas:

Figura 24 – Coleta de amostras do sensor




Fonte: Autor (2024).

É possível se visualizar no gráfico as amostras obtidas ao longo do período de movimentação do robô, onde o eixo y representa a média das cinco amostras coletadas, no parâmetro de milissegundos entre o envio do pulso pelo pino 2 do Arduino e seu recebimento pelo pino 4. Observa-se que nos momentos em que houve contato com o sensor de parada, os valores registrados ultrapassaram os 80 milissegundos, sendo este o critério utilizado para identificar o toque. O intervalo de tempo empregado como critério varia conforme a geometria do contato, assim como a superfície utilizada.

Para esse teste, apenas se inseriu 2 coordenadas a serem alcançadas enquanto eram obtidos os valores resultantes da leitura do sensor capacitivo, sendo acionado em duas ocasiões.

Atualmente, o robô conta com uma Interface Homem-Máquina (IHM) através do monitor serial da plataforma Arduino, permitindo inserir coordenadas para o robô seguir, conforme pode ser observado na Figura 25. No entanto, é totalmente possível programar uma sequência de movimentos temporizados diretamente no Arduino, ampliando as possibilidades de controle e automatização do sistema.

Figura 25 – Interface de inserção de dados pelo monitor serial



```
COM7
|
Determine as coordenadas x e y (em mm)
x:100.00
y:200.00

ângulo servo-base    10.00
ângulo servo-arm     0.00

Determine as coordenadas x e y (em mm)
x:-300.00
y:0.00

ALGUÉM TOCOU NO ROBÔ!!

Pressione qualquer tecla para continuar

ângulo servo-base    162.00
ângulo servo-arm     59.00

Determine as coordenadas x e y (em mm)
x:300.00
y:0.00

ângulo servo-base    18.00
ângulo servo-arm     121.00

Determine as coordenadas x e y (em mm)
x:
```

Fonte: Autor (2024).

Para a finalidade de teste, foi inserida uma parada simples, apenas sendo necessário o apertar de um botão para dar continuidade ao movimento do SCARA. A parada do robô foi programada para acontecer somente durante o movimento do manipulador, à fim de apenas ser exemplificada.

## 5 CONCLUSÃO

O objetivo deste projeto foi desenvolver um braço robótico com sensoriamento de baixo custo que atendesse aos requisitos de um robô colaborativo, visando explorar seu potencial na indústria brasileira, especialmente para empresas de pequeno e médio porte, devido à sua possível contribuição significativa para a automação e eficiência dos processos industriais.

Um dos objetivos do projeto era utilizar uma linguagem de programação acessível, possibilitando o uso do robô em disciplinas de graduação e em projetos futuros. Esse objetivo foi alcançado com sucesso devido ao controlador empregado, o Arduíno UNO, que é amplamente difundido e fácil de programar, tornando-o adequado para fins educacionais e de pesquisa.

Em um cenário ideal, é importante o uso de um microcontrolador detentor de 2 processadores, como o ESP32, para fazer um laço de análise constante da leitura do sensor e evitar possíveis atrasos ou acidentes.

Quanto ao seu uso industrial, se devidamente isolado o sensor capacitivo empregado, ele será capaz de detectar o contato com o indivíduo, demonstrando a possibilidade de operar com esse nível de sensoriamento de baixo custo.

Nesse segmento, já não são recomendados microcontroladores como Arduíno e ESP32, mas sim o uso de um mais robusto como Raspberry Pi, capaz de resistir de maneira mais promissora aos ruídos industriais, assim como o uso de motores compatíveis.

Para melhorar ainda mais o robô construído e avançar nos estudos sobre robôs colaborativos, algumas recomendações de pesquisas futuras são:

- Desenvolvimento de um sensor de torque de baixo custo para medir a força nos servo-motores, permitindo um controle mais preciso e seguro das operações do robô.
- Criação de uma IHM personalizada para a programação do robô, oferecendo uma interface mais intuitiva e específica para as necessidades do usuário.
- Implementação de um mecanismo de garra ou outra ferramenta de manipulação para o braço robótico (dado que o foco do trabalho era verificar a viabilidade do sensoriamento), ampliando suas capacidades e possibilitando a realização de diferentes tarefas na indústria.

Essas recomendações representam oportunidades importantes para aprimorar o robô e explorar novas funcionalidades que podem ser úteis em diversos contextos industriais e educacionais.

## REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Segurança de máquinas - Partes de sistemas de comando relacionadas à segurança - Princípios gerais para projeto**. 1998. Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/10908/nbr14153-seguranca-de-maquinas-partes-de-sistemas-de-comando-relacionadas-a-seguranca-classificacao-por-categorias-de-seguranca>>.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Robôs e dispositivos robóticos - Requisitos de segurança para robôs industriais Parte 1: Robôs**. 2018. Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/12228/nbriso10218-1-robos-e-dispositivos-roboticos-requisitos-de-seguranca-para-robos-industriais-parte-1-robos>>.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Robôs e dispositivos robóticos - Requisitos de segurança para robôs industriais Parte 2: Sistemas robotizados e integração**. 2018. Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/12229/nbriso10218-2-robos-e-dispositivos-roboticos-requisitos-de-seguranca-para-robos-industriais-parte-2-sistemas-robotizados-e-integracao>>.

Acta Robots. **Automação Robótica para Logística**. 2024. Disponível em: <<https://actarobotics.com/>>.

ANGELES, J.; MOROZOV, A.; NAVARRO, O. A novel manipulator architecture for the production of scara motions. **Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation**, 2000.

ARDUINO. **Arduino Uno Rev3**. 2024. Disponível em: <<https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>>.

CARRARA, V. **INTRODUÇÃO À ROBÓTICA INDUSTRIAL**. 2015. Disponível em: <<http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/08.25.14.16/doc/publicacao.pdf>>.

CIM Automação. **O que são robôs colaborativos?** 2019. Disponível em: <<https://blog.cimautomacao.com.br/o-que-sao-robos-colaborativos/#:~:text=Rob%C3%B4s%20colaborativos%2C%20como%20o%20nome,trabalho%20da%20equipe%20da%20f%C3%A1brica.>>

CRAIG, J. **Introduction to Robotics: Mechanics and Control**. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005. ISBN 9780201543612.

CURTY, C. M.; MARCHI, G. H. D. **DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ COLABORATIVO DE BAIXO CUSTO APLICADO À INDÚSTRIA 4.0**. [S.l.], 2019.

GHAFFARZADEH, K. **Industrial robotic arms: how long will the growth supercycle continue?** 2018. Disponível em: <<https://www.idtechex.com/research/articles/industrial-robotic-arms-how-long-will-the-growth-supercycle-continue-00013835.asp>>.

GILLESPIE, R.; COLGATE J. E.; PESHKIN, M. A. A general framework for robot control. In: **Probabilistic self-localization for mobile robots**. [S.l.: s.n.], 2001. v. 17, n. 4, p. 391–401.

GUERTLER, M. *et al.* When is a robot a cobot? moving beyond manufacturing and arm-based cobot manipulators. **Proceedings of the Design Society**, v. 3, p. 3889–3898, 2023.

Gunter's Space Page. **Mars Exploration Rover A, B (MER A, B / Spirit / Opportunity)**. 2023. Disponível em: <[https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/mars\\_exploration\\_rover.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/mars_exploration_rover.htm)>.

HOFER, M.; D'ANDREA, R. Design, fabrication, modeling and control of a fabric-based spherical robotic arm. **Mechatronics**, v. 68, p. 102369, 2020. ISSN 0957-4158. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957415820300490>>.

ISO, International Organization for Standardization. **Robôs e dispositivos robóticos - Robôs Colaborativos**. 2016. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:ts:15066:ed-1:v1:en>>.

KELLY, R.; SANTIBANEZ, V.; LORIA, A. Control of robot manipulators in joint space. In: HEIDELBERG, N. Y.; KONG, L. H.; MILAN, P. T. (Ed.). **Springer-Berlin**. Heidelberg: Springer, 2005. p. 3–4.

KUKA. **Página Inicial**. 2024. Disponível em: <<https://www.kuka.com/>>.

KUMAR, R.; VERMA, S. K.; SHARMA, V. K. **Performance enhancement analysis of triangular solar air heater coated with nanomaterial embedded in black paint**. Materials Today: Proceedings, 2020.

LEE, J.; JEON, K. A development of the lightweight wearable robot with carbon fiber composite. v. 28, p. 81–88, 2015.

MAGALU. **Acoplamento / Acoplador Flexível 5x8mm 19/25mm até 10 Kgf.cm Torque para CNC, Impressora 3D - Casa da Robótica**. 2024. Disponível em: <<https://www.magazineluiza.com.br/acoplamento-acoplador-flexivel-5x8mm-19-25mm-ate-10-kgf-cm-torque-para-cnc-impressora-3d-casa-da-robotica/p/bakfab18c1/fs/armr/>>.

MAKRIS, S. e. a. Cooperating robots for reconfigurable assembly operations: review and challenges. In: **Procedia CIRP**. [S.l.: s.n.], 2012. v. 3, p. 346–351.

Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 12 – Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos**. 2015. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-12-atualizada-2022-1.pdf>>.

Mitsubish Electric. **Robô Colaborativo - ASSISTA**. 2024. Disponível em: <[https://www.mitsubishielectric.com/fa/br\\_pt/products/rbt/robot/items/assista/index.html](https://www.mitsubishielectric.com/fa/br_pt/products/rbt/robot/items/assista/index.html)>.

NECULA, M.; CÂMPEAN, E.; MORAR, L. Defining the characteristics needed for the cobots design used for the supply of cnc machines defining the characteristics needed for the cobots design used for the supply of cnc machines. **ACTA TECHNICA NAPOCENSIS - Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and ENGINEERING**, v. 65, n. 1S, 2022. ISSN 2393–2988. Disponível em: <<https://atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/1748>>.

NIKU, S. B. **Introdução à Robótica: Análise, Controle, Aplicações**. [S.l.]: Grupo Editorial Nacional LTC, 2013.

- OSLON, C. Robotics and automation, iee transactions on. In: **Probabilistic self-localization for mobile robots**. [S.l.: s.n.], 2000. v. 16, n. 1, p. 55–66.
- PESHKIN, M.; COLGATE, J. E. Cobots. **Industrial Robot: An International Journal**, v. 26, n. 5, p. 325–341, 1999.
- PESHKIN, M. A. *et al.* Cobot architecture. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, p. 377, 2001.
- PUERS, R. Capacitive sensors: When and how to use them. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 37-38, p. 93–105, 1993. ISSN 0924-4247. Proceedings of Eurosensors VI. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/092442479380019D>>.
- ROSÁRIO, J. M. **Robótica Industrial I: Modelagem, Utilização e Programação**. 1. ed. São Paulo: Baraúna: [s.n.], 2010.
- SKF. **Rolamento rígido de esferas SKF 61800**. 2024. Disponível em: <<https://www.skf.com/br>>.
- SONIA, P. *et al.* **Effect of cryogenic treatment on mechanical properties and microstructure of aluminium 6082 alloy**. Materials Today: Proceedings, 2020.
- SOUZA, V. d. S. **ROBÔ SCARA UFSCAR DEMEC. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica**. São Carlos, São Paulo: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos, 2020.
- SPONG, M. W.; HUTCHINSON, S.; VIDYASAGAR, M. Robot modeling and control. In: **Inc. / Chichester / Weinheim / Brisbane / Singapore / Toronto. , 76**. New York: John Wiley & Sons, 2006. p. 5–6.
- SQUIDS. **M01 - Aprenda a fazer um sensor de toque de 4 teclas com Arduino**. 2021. Disponível em: <<https://www.squids.com.br/arduino/projetos-maker/arduino-maker/326-m01-aprenda-a-fazer-um-sensor-de-toque-de-4-teclas-com-arduino>>.
- TOWERPRO. **Servo MG995 TowerPro**. 2019. Disponível em: <<https://www.towerpro.com.tw/product/mg995/>>.
- TSAI, L.-W. **Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators**. John Wiley & Sons, Inc: NY, 1999.
- Universal Robots. **CUSTOS E BENEFÍCIOS DA IMPLANTAÇÃO DE UM BRAÇO ROBÓTICO INDUSTRIAL**. 2020. Disponível em: <<https://www.universal-robots.com/br/blog/custos-e-benef%C3%ADcios-da-implantac%C3%A3o-de-um-braco-rob%C3%B3tico-industrial/>>.
- Universal Robots. **ROBÓTICA NO BRASIL: CONHEÇA A HISTÓRIA E O CENÁRIO ATUAL DO SETOR NO PAÍS**. 2023. Disponível em: <<https://www.universal-robots.com/br/blog/rob%C3%B3tica-no-brasil-conheca-a-hist%C3%B3ria-e-o-cen%C3%A1rio-atual-do-setor-no-pa%C3%ADs/>>.
- Universal Robots. **Página Inicial**. 2024. Disponível em: <<https://www.universal-robots.com/br/>>.



VASIC, M.; BILLARD, A. Safety issues in human-robot interactions. In: \_\_\_\_\_. **Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on**. [S.l.]: IEEE, 2013. p. 197–204.

ZENS, R. G. **Assembly – Guided by vision: Vision Guided Robotics**. [S.l.]: Abacus Automation, Bennington VT, 2005.

## Apêndices

## APÊNDICE A – Código de controle do manipulador SCARA

```

#include <Servo.h> //include the library about servo
#include <math.h>

const byte sendPin = 2;
const byte receivePin = 4;
const byte ledPin = 13;

// Variável para armazenar o valor lido no sensor
unsigned int valor;
int def = 80;

Servo servo_base; //Nomeia o servo base
Servo servo_arm; //Nomeia o servo braço

const float a1 = 131.2, a2 = 180, pi=3.14159265359; //variáveis constantes a1=base, a2=braço
float x = 0, y = 0, a, b, c; //x e y são as coordenadas inseridas, a e b variáveis
float Theta1pos = 0, Theta1neg = 0, Theta2pos = 0, Theta2neg = 0; // Todos os possíveis Thetas
float pos = 0, pos1 = 0, post=0, post1=0, x_, y_; //Variáveis usadas para a posição final do SCARA
int flag=0; //flag para interrupção
const int tempo=20;

//void Parada(){ //Função interrupção Externa (só é acionada durante o movimento do braço)
//    //flag=1; //habilita a flag
//}

void serialFlush(){ //Função para zerar o buffer do serial
    while(Serial.available() > 0) {
        char t = Serial.read();
    }
}

byte sensorCapacitivo(byte amostras) {
    unsigned long sum = 0;
    unsigned long tempo = 0;
    // Executa função 'amostras' vezes
    for (int i = 0; i < amostras; i++) {
        digitalWrite(sendPin, LOW);
        // Coloca o pino do sensor como saída para garantir nível baixo
        pinMode(receivePin, OUTPUT);
        digitalWrite(receivePin, LOW);
        delayMicroseconds(100); // Delay para estabilidade
        // Atera o modo do pino do sensor para entrada
        pinMode(receivePin, INPUT);
    }
}

```

```

    // Inicia carga do sensor
    digitalWrite(sendPin, HIGH);
    // Aguarda pino atingir nível alto (aproximadamente 2.5V)
    while (digitalRead(receivePin) == LOW) {
        tempo++; // Acumula tempo para atingir nível alto
    }
    // Acumula valor para média
    sum += tempo;
}

// Realiza média e retorna valor lido
return (unsigned int)sum/amostras;
}

void setup() {
    pinMode(ledPin, OUTPUT);
    pinMode(sendPin, OUTPUT);
    pinMode(receivePin, INPUT);
    servo_base.attach(6); //seta o pino 9 para o servo base
    servo_arm.attach(7); //seta o pino 10 para o servo braço
    pinMode(6, OUTPUT);
    pinMode(7, OUTPUT);
    servo_base.write(90); //seta os braços para o ângulo 0
    servo_arm.write(90);
    post=90;
    post1=90;
    Serial.begin(9600); //Começa o monitor serial
    //digitalWrite(2,HIGH); //Seta o pino da Interrupção Externa como sinal alto
    //attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2),Parada,LOW); //Caso o pino tenha sinal baixo, é acion
}

void loop() {
    Serial.print(" Determine as coordenadas x e y (em mm)\n x:"); //Printa na tela
    while (!Serial.available()); //Enquanto o monitor não receber os dados não faz nada
    x=Serial.parseFloat(); //Atribui o valor digitado no monitor serial à variável x
    Serial.print(x); //Printa x na tela
    serialFlush(); //Chama a função para zerar o buffer do serial
    Serial.print("\n y:"); //Printa na tela
    while (!Serial.available()); //Enquanto o monitor não receber os dados não faz nada
    y=Serial.parseFloat(); //Atribui o valor digitado no monitor serial à variável y
    Serial.print(y); //Printa y na tela
    serialFlush(); //Chama a função para zerar o buffer do serial
    a=sqrt(pow(x,2)+pow(y,2)); //tamanho do braço da coordenada
    b=a1+a2; //máximo comprimento possível em linha reta
    c=sqrt(pow(a1,2)+pow(a2,2)); //tamanho mínimo do braço (por conta da limitação de ângulos)
    flag=0;
    //Calcula-se os dois cenários possíveis de ângulos

```

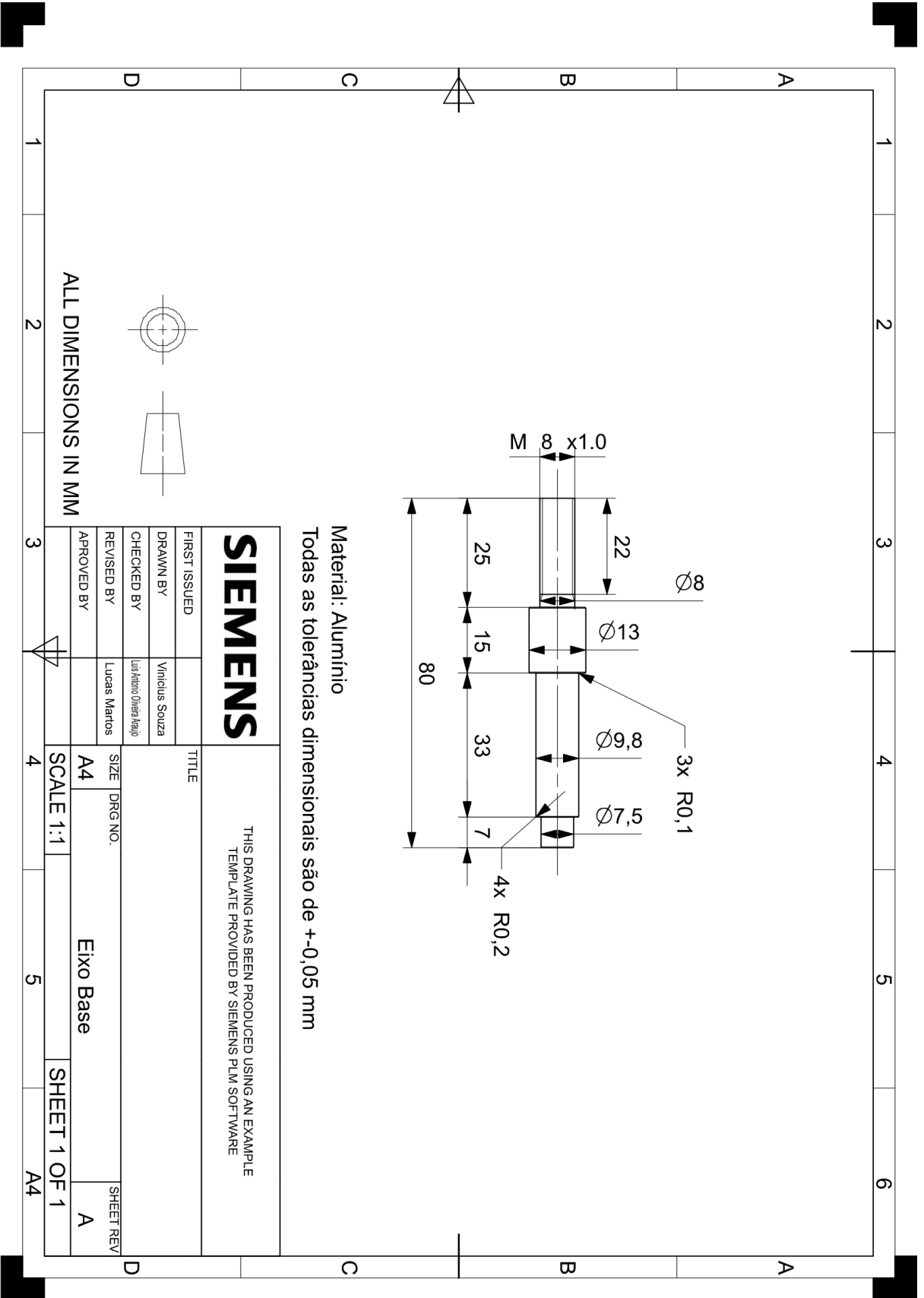
```

Theta2pos= acos((pow(x,2)+pow(y,2)-pow(a1,2)-pow(a2,2))/(2*a1*a2));
Theta2neg= -acos((pow(x,2)+pow(y,2)-pow(a1,2)-pow(a2,2))/(2*a1*a2));
Theta1pos= atan2((y*(a1+a2*cos(Theta2pos))-x*a2*sin(Theta2pos)),(x*(a1+a2*cos(Theta2pos))+y*a2*sin(Theta2pos)));
Theta1neg= atan2((y*(a1+a2*cos(Theta2neg))-x*a2*sin(Theta2neg)),(x*(a1+a2*cos(Theta2neg))+y*a2*sin(Theta2neg)));
if((abs(Theta1pos-pos))<=(abs(Theta1neg-pos))and((Theta1pos)>=(0))or((Theta2neg+90)<0)){ //O ângulo atual é menor que o ângulo desejado
  pos = round(Theta1pos*180/pi);
  pos1 = round(-Theta2pos*180/pi+90);
}else{
  pos = round(Theta1neg*180/pi);
  pos1 = round(-Theta2neg*180/pi+90);
}
if((a>=b)or(a<c)or(pos<0)or(pos>180)or(pos1<0)or(pos1>180)){ //Compara se a nova posição é possível
  Serial.print("\n O robô não consegue alcançar essa coordenada!\n");
  Serial.print("\n\n");
}else{
  if(pos1>=post1){ //se o Theta 2 novo for maior que o último registrado
    for(int j=post1;j<=pos1;j++){ //Função para incrementar o valor de Theta 2 lentamente
      servo_arm.write(j); //Escreve cada incremento no servo motor
      valor = sensorCapacitivo(5);
      if (valor > def) {
        digitalWrite(ledPin, HIGH);
        Serial.print("\n ALGUÉM TOCOU NO ROBÔ!!\n");
        Serial.print("\n Pressione qualquer tecla para continuar\n");
        while (!Serial.available());
        serialFlush();
      } else {
        digitalWrite(ledPin, LOW);
      }
      delay(tempo);
    }
  }else{ //se o Theta 2 novo for menor que o último registrado
    for(int j=post1;j>=pos1;j--){ //Função para decrementar o valor de Theta 2 lentamente
      servo_arm.write(j); //Escreve cada decremento no servo motor
      valor = sensorCapacitivo(5);
      if (valor > def) {
        digitalWrite(ledPin, HIGH);
        Serial.print("\n ALGUÉM TOCOU NO ROBÔ!!\n");
        Serial.print("\n Pressione qualquer tecla para continuar\n");
        while (!Serial.available());
        serialFlush();
      } else {
        digitalWrite(ledPin, LOW);
      }
      delay(tempo);
    }
  }
  if(pos>=post){ //se o Theta 1 novo for maior que o último registrado

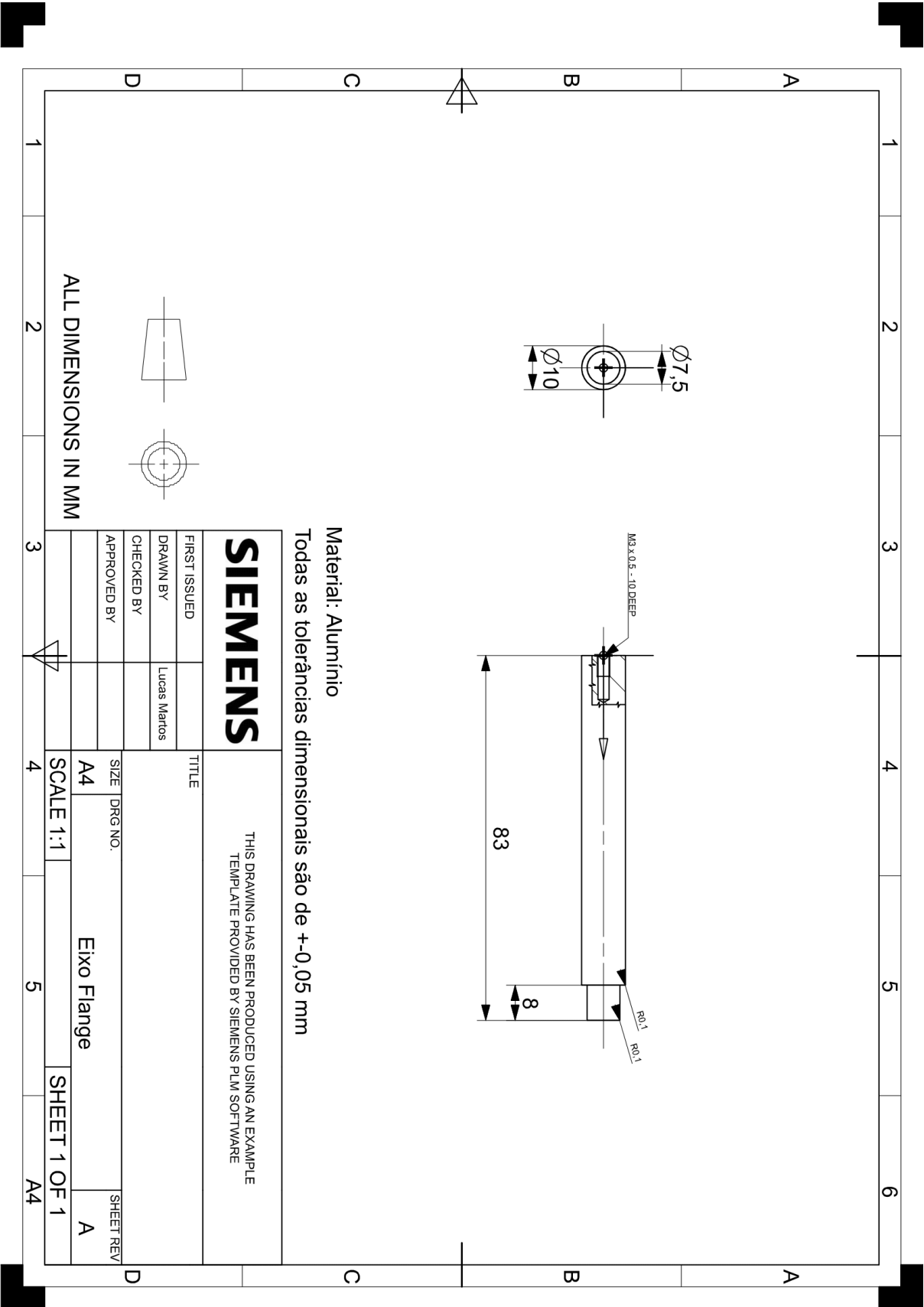
```

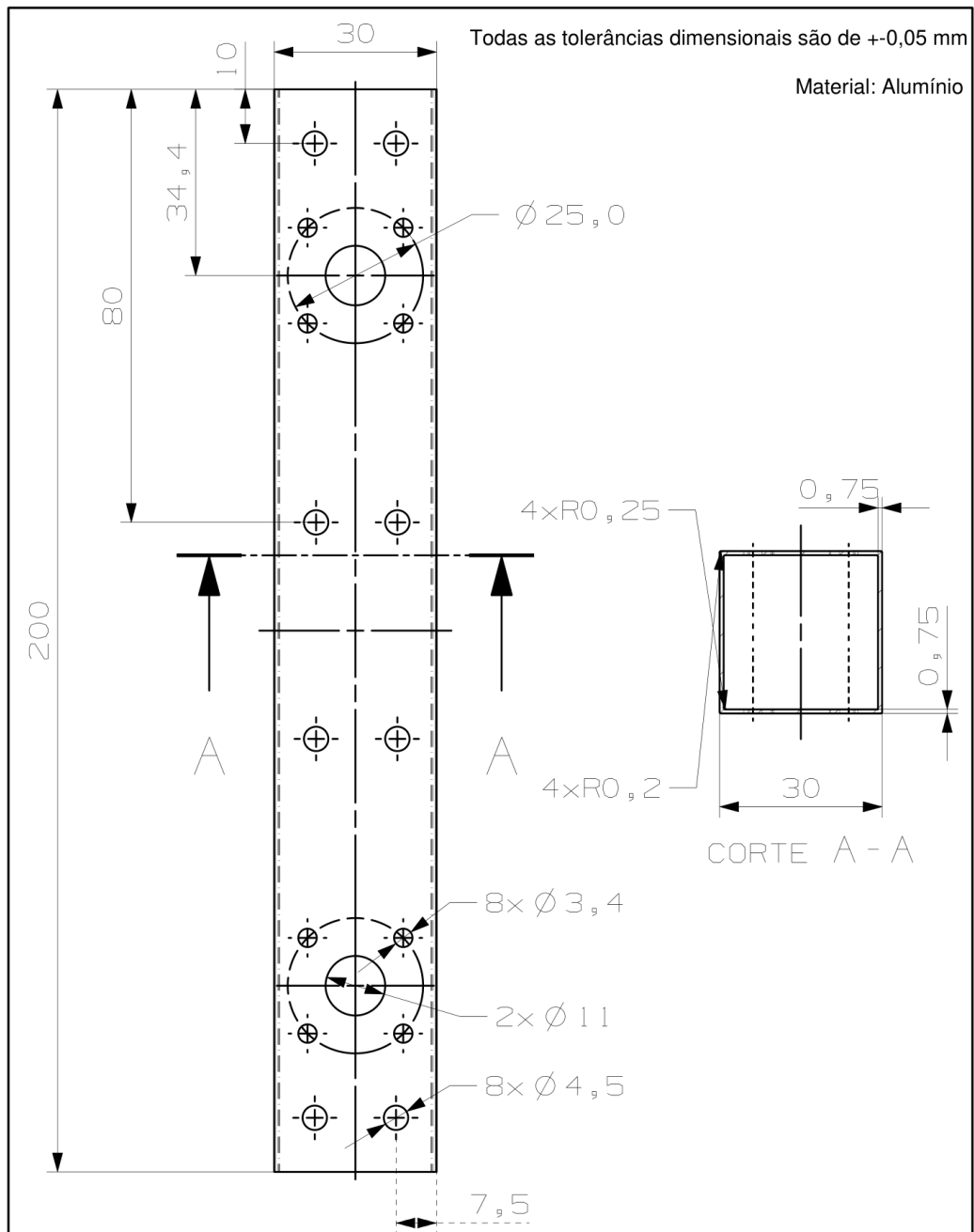
```
for(int i=post;i<=pos;i++){ //Função para incrementar o valor de Theta 1 lentamente
servo_base.write(i); //Escreve cada incremento no servo motor
valor = sensorCapacitivo(5);
if (valor > def) {
    digitalWrite(ledPin, HIGH);
    Serial.print("\n ALGUÉM TOCOU NO ROBÔ!!\n");
    Serial.print("\n Pressione qualquer tecla para continuar\n");
    while (!Serial.available());
    serialFlush();
} else {
    digitalWrite(ledPin, LOW);
}
delay(tempo); //Delay para deixar o incremento lento
}
}else{ //se o Theta 1 novo for menor que o último registrado
for(int i=post;i>=pos;i--){ //Função para decrementar o valor de Theta 1 lentamente
servo_base.write(i); //Escreve cada decremento no servo motor
valor = sensorCapacitivo(5);
if (valor > def) {
    digitalWrite(ledPin, HIGH);
    Serial.print("\n ALGUÉM TOCOU NO ROBÔ!!\n");
    Serial.print("\n Pressione qualquer tecla para continuar\n");
    while (!Serial.available());
    serialFlush();
} else {
    digitalWrite(ledPin, LOW);
}
delay(tempo);
}
}
servo_base.write(pos); //Finaliza ajustando o ângulo exato no servo motor
servo_arm.write(pos1); //Finaliza ajustando o ângulo exato no servo motor
post=pos; //armazena o a última posição da base
post1=pos1; //armazena o a última posição do braço
Serial.print("\n servo-base    "); // Printa na tela
Serial.print(pos); // Printa a posição angular da base
Serial.print("\n servo-arm    "); // Printa na tela
Serial.print(pos1); // Printa a posição angular do braço
Serial.print("\n\n");
}
}
```



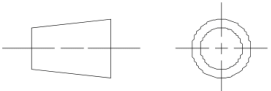
## APÊNDICE B – Desenhos técnicos do manipulador

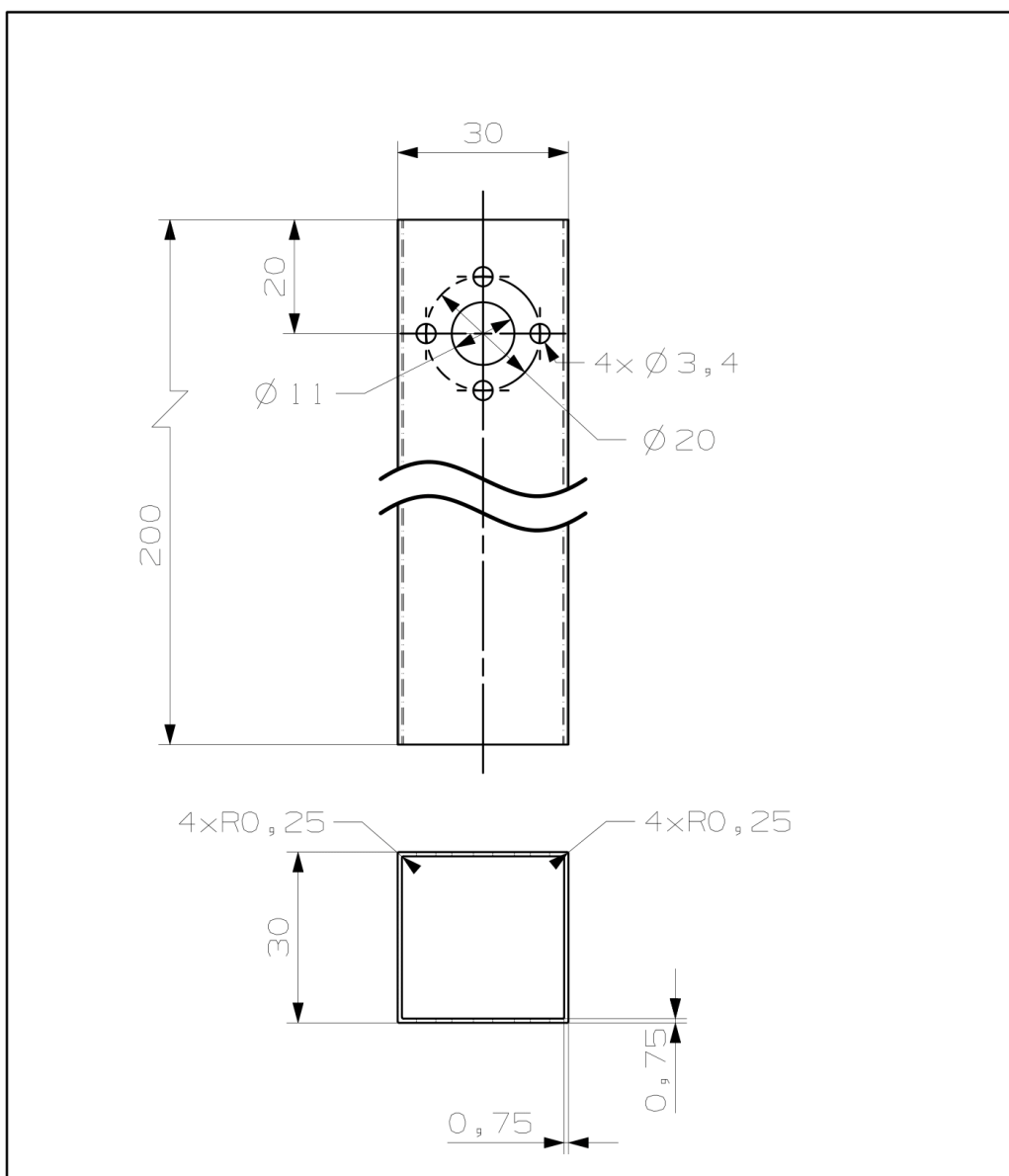








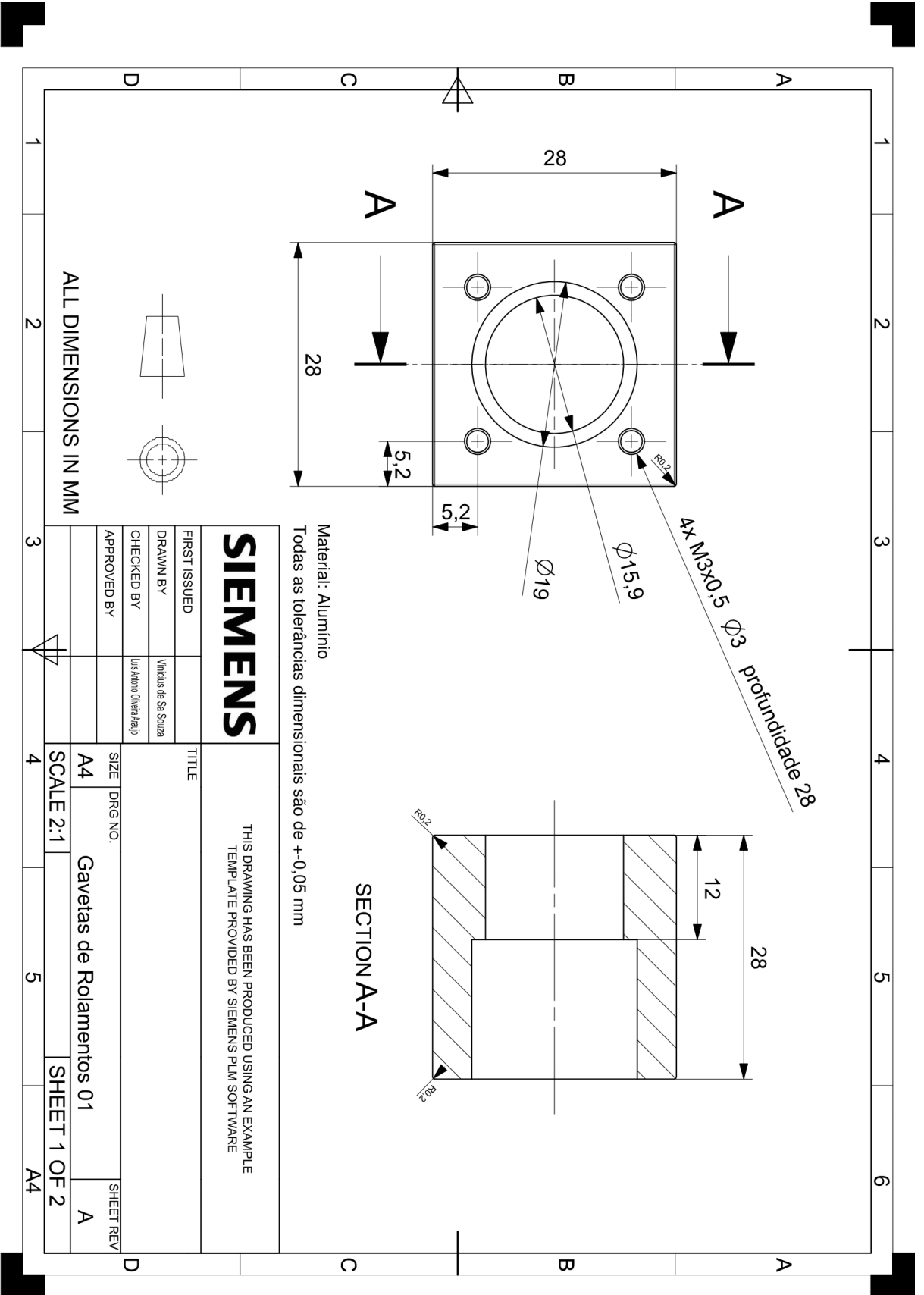
 		ENGENHARIA MECANICA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SAO CARLOS DEMec-CCET-UFSCAR	
DESENHADO POR	Vinicius Souza	TITULO	
CONFERIDO POR	Luis Araujo	Robo SCARA UFSCar DEMec	
APROVADO POR		TAM	REV
		DESENHO	A
		A4	Elo 01
		ESCALA 1:1	FOLHA 1 DE 1

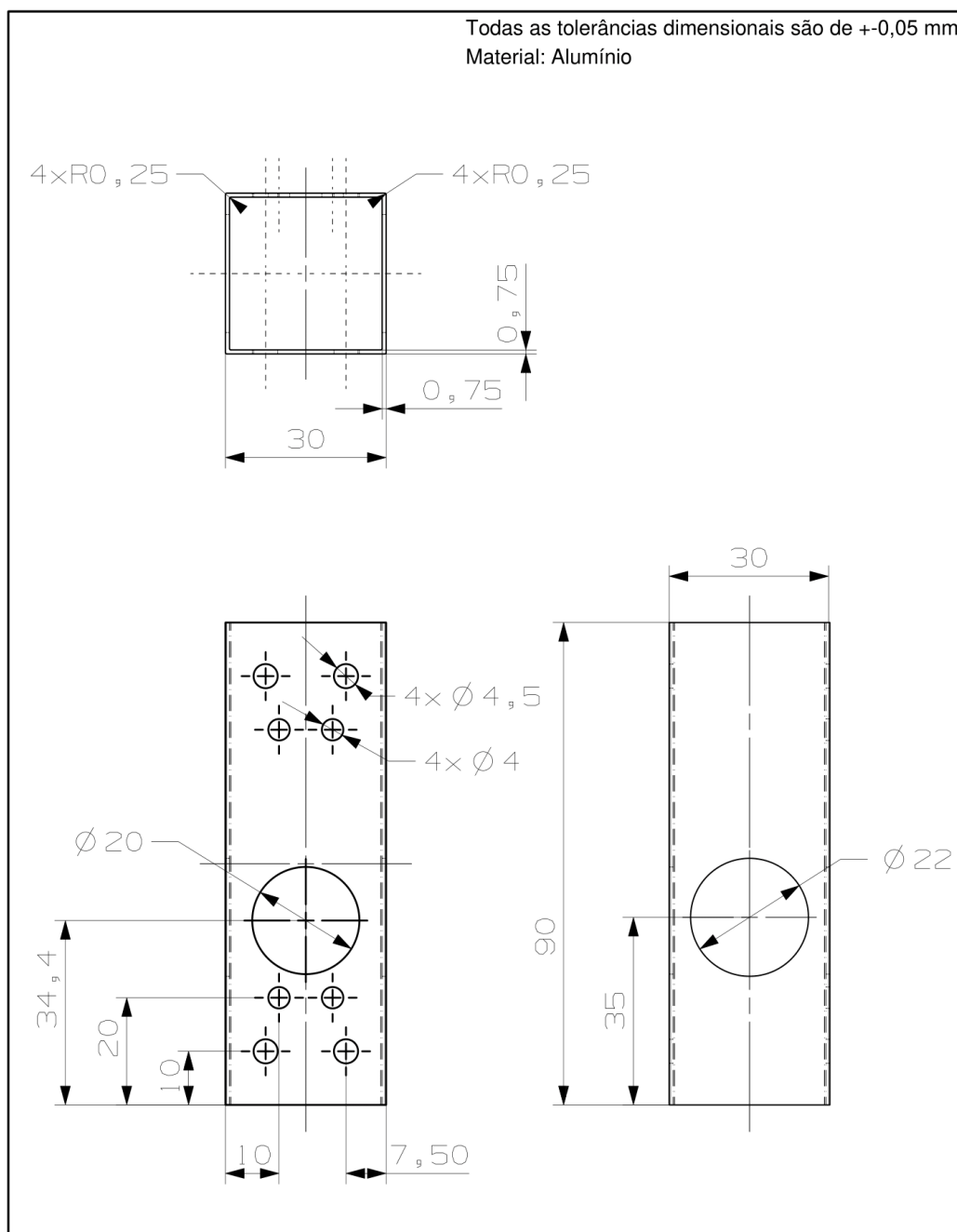




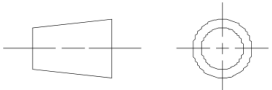
Material: Alumínio

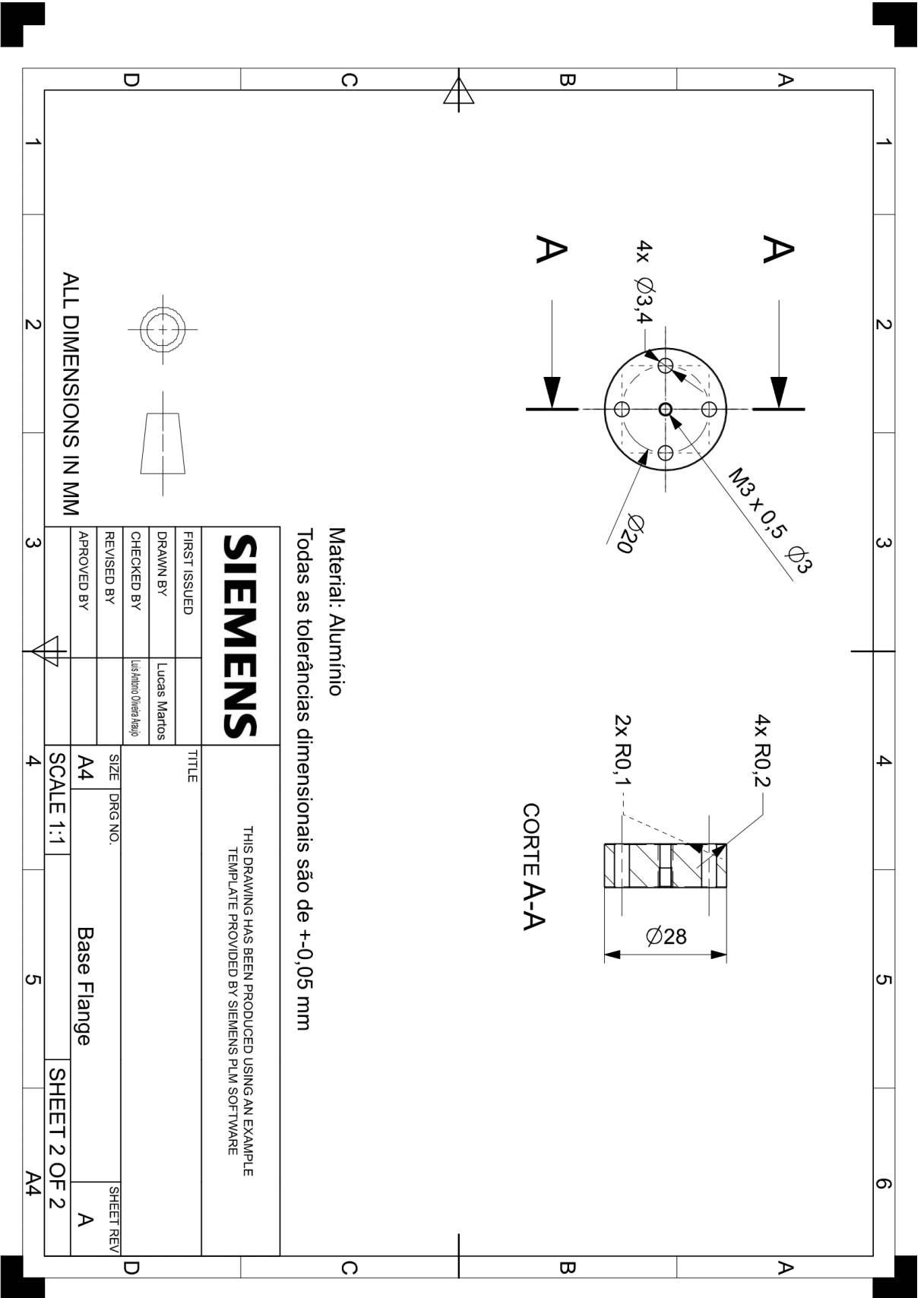
Todas as tolerâncias dimensionais são de  $\pm 0,05$  mm

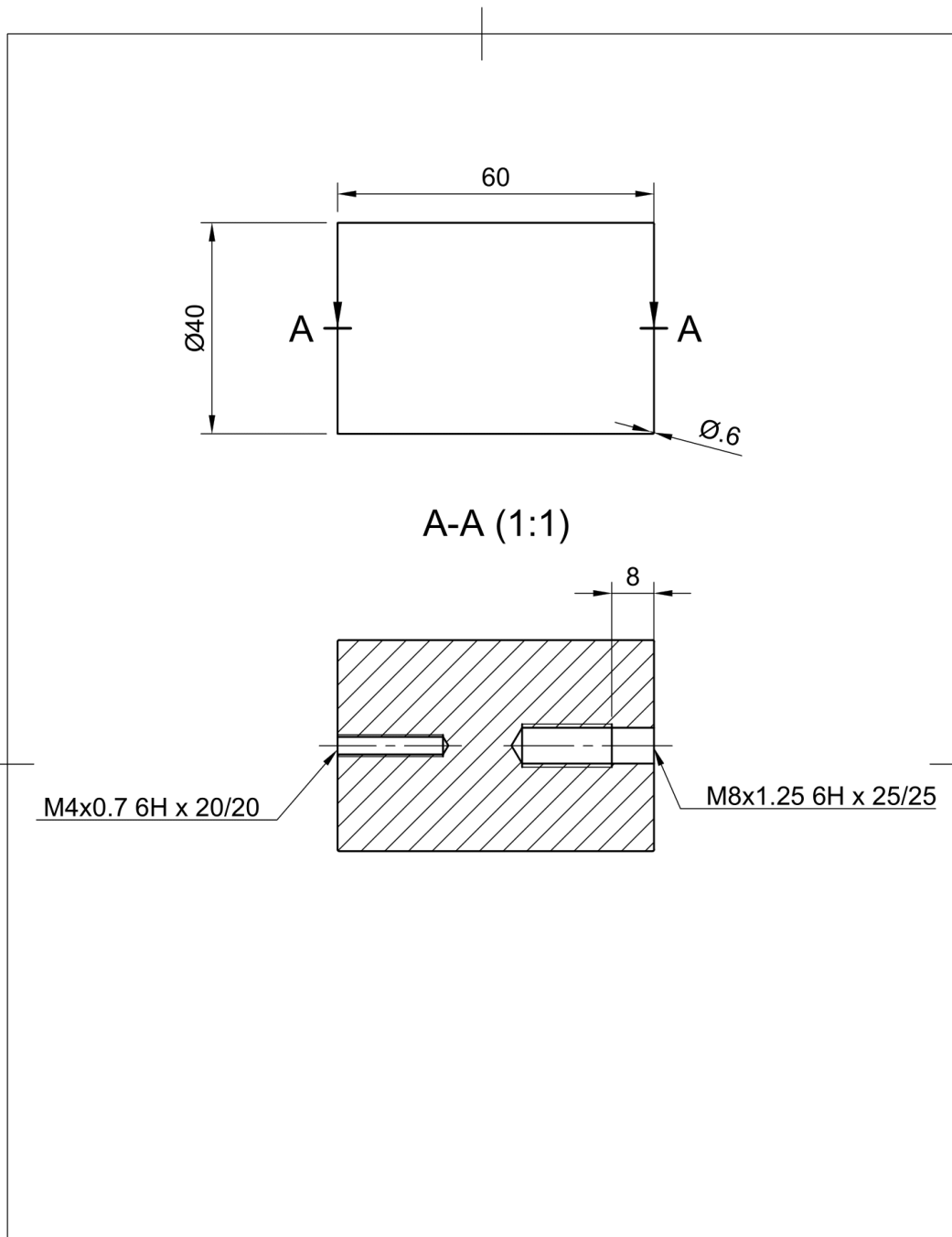
 		ENGENHARIA MECANICA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SAO CARLOS DEMec-CCET-UFSCAR	
DESENHADO POR	Vinicius Souza	TITULO	
CONFERIDO POR	Luis Araujo	Robo SCARA UFSCar DEMec	
APROVADO POR		TAM	REV
		DESENHO	A
		A4	E10 02
		ESCALA 1:1	FOLHA 1 DE 1





 		ENGENHARIA MECANICA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SAO CARLOS DEMec-CCET-UFSCAR	
DESENHADO POR	Vinicius Souza	TITULO	
CONFERIDO POR	Luis Araujo	Robo SCARA UFSCar DEMec	
APROVADO POR		TAM	REV
		A4	A
		DESENHO	
		Suporte do Motor	
		ESCALA 1:1	FOLHA 1 DE 1





Dept.	Technical reference	Created by Lucas Santana Martos 15/01/2024	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Montagem_SCARA_base cilindrica	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet 1/1