

Thiago Fernando Cuevas Mestanza

**Desenvolvimento de um Robô Assistente  
Pessoal para Aprimorar a Autonomia e  
Qualidade de Vida de Idosos com Limitações  
Motoras**

Uberlândia, MG

2024

Thiago Fernando Cuevas Mestanza

**Desenvolvimento de um Robô Assistente Pessoal para  
Aprimorar a Autonomia e Qualidade de Vida de Idosos  
com Limitações Motoras**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Faculdade de Engenharia Elétrica da Univer-  
sidade Federal de Uberlândia como requisito  
parcial para obtenção do título de bacharel  
em Engenharia de Controle e Automação.

Universidade Federal de Uberlândia - UFU  
Faculdade de Engenharia Elétrica - FEELT

Orientador Prof. Dr. Marcelo Barros de Almeida

Uberlândia, MG

2024

Thiago Fernando Cuevas Mestanza

# **Desenvolvimento de um Robô Assistente Pessoal para Aprimorar a Autonomia e Qualidade de Vida de Idosos com Limitações Motoras**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Trabalho aprovado em 26 de abril de 2024.

COMISSÃO EXAMINADORA

---

**Prof. Dr. Marcelo Barros de Almeida**  
Orientador

---

**Professor Dr. Renato Ferreira Fernandes Jr**  
Membro Avaliador

---

**Professor Dr. Keiji Yamanaka**  
Membro Avaliador

Uberlândia, MG  
2024

*Este trabalho é dedicado aos meus pais, Raul Fernando Cuevas Rojas e Maria del Rosário Mestanza Zuñiga, cuja história me inspira a viver a vida com coragem, perseverança e sacrifício. Que esta seja uma retribuição a todo o amor, dedicação e fé depositada em nossa família.*

# Agradecimentos

Agradeço a sociedade brasileira por estruturar, manter e reconhecer a Universidade Pública como um patrimônio a serviço da população. Aos servidores e colaboradores da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT), que compõem e sustentam este importante núcleo de formação profissional. A minha querida família, Raul Fernando, Maria del Rosário e Paulo Enrique por serem meu alicerce e principal incentivo à ciência. A minha companheira Ana Clara Souza, pelo carinho, respeito e apoio na busca pelos meus objetivos. Aos amigos, Rodrigo Santana, Ana Gabriela Caputo, Lucas Araújo e Douglas pelo companheirismo e partilha de conhecimento durante os anos de graduação. Aos amigos Guilherme Balduino, Matheus Mendes, Samuel Ramos, Nalbert Dias, Marcos Paulo Ferreira, João Victor Simino, e em especial, Welesley Sibelson, pelo imenso suporte para o desenvolvimento deste trabalho, além do acolhimento, paciência e apoio que me foram dados no grupo Wisebyte. Aos queridos, Eduardo Leite, Pedro Mendes, Matheus Riguetto, Paulo Victor Silva, Sarah Pereira, Juliana Ugiatti e Sofia Cantarelli pela companhia e apoio incondicional. Ao professor orientador, Marcelo Barros de Almeida, pela atenção, disponibilidade e instrução dada no decorrer desta pesquisa. E por último, ao professor Renato Ferreira Fernandes e todo o grupo do Laboratório de Automação, Sistemas Eletrônicos e Controle (LASEC), por incentivarem e representarem o início de minha carreira científica.

*“Somethin’ keeps him goin’, miles and miles a day  
To find another place to play.”  
(Bread, 1972)*

# Resumo

O fenômeno global de envelhecimento populacional, responsável pelo aumento expressivo da população idosa no Brasil, demanda a busca por maneiras de lidar com os desafios que afetam a qualidade de vida dos idosos. Entre as características dessa parcela populacional, encontra-se, principalmente, a incidência de deficiências motoras e falta de companhia. Diante dessa realidade, ganham relevância soluções que usam da robótica assistiva (RA), área de pesquisa que explora o uso de robôs para o suporte de usuários humanos, no cuidado de idosos. Nesse sentido, este trabalho propõe o desenvolvimento de um robô assistente pessoal cujo objetivo é oferecer suporte ao cuidado desse segmento populacional dentro do ambiente doméstico. O robô foi projetado para, a partir de comandos de voz, realizar tarefas específicas como seguir um usuário, trazer objetos e responder perguntas, oferecendo uma companhia interativa, além de aliviar esforço físico e prevenir possíveis quedas ou lesões motoras. Para isso, o robô disponibiliza de, além de recursos eletro-mecânicos, aplicações de inteligência artificial, aprendizado de máquina, e computação visual. Os resultados obtidos demonstraram uma interação satisfatória entre o robô e o ambiente, evidenciando a capacidade do sistema de seguir usuários, detectar objetos e fornecer respostas coesas aos comandos de voz. Apesar de dificuldades físicas e estruturais, os resultados coletados ainda sugerem que o robô desenvolvido pode oferecer uma alternativa de suporte aos desafios enfrentados por esse segmento populacional no ambiente doméstico.

**Palavras-chaves:** Robótica; Inteligência Artificial; Aprendizado de Máquina; Computação Visual; Interação Humano-Robô.

# Abstract

The global phenomenon of population aging, responsible for the significant increase in the elderly population in Brazil, demands the search for ways to address the challenges affecting the quality of life of the elderly. Among the characteristics of this population segment, the incidence of motor disabilities and lack of companionship stand out. In the face of this reality, solutions that utilize assistive robotics (AR), a research area exploring the use of robots to support human users in elderly care, become increasingly relevant. In this context, this work proposes the development of a personal assistant robot aimed at providing support for the care of this population segment within the home environment. The robot is designed to perform specific tasks such as following a user, fetching objects, and answering questions through voice commands, offering interactive companionship, as well as alleviating physical strain and preventing potential falls or motor injuries. To achieve this, the robot features not only electromechanical resources but also applications of artificial intelligence, machine learning, and computer vision. The obtained results demonstrated a satisfactory interaction between the robot and the environment, highlighting the system's ability to track users, detect objects, and provide coherent responses to voice commands. Despite physical and structural challenges, the collected results still suggest that the developed robot could offer a supportive alternative to the challenges faced by this population segment in the home environment.

**Keywords:** Robotics; Artificial Intelligence; Machine Learning; Computer Vision; Human-Robot Interaction

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama de pinos de entrada e saída STM32F4x1Cx. . . . .	27
Figura 2 – Placa de desenvolvimento Sipeed Maixduino . . . . .	27
Figura 3 – Diagrama de pinos de entrada e saída presentes no verso da placa Sipeed Maixduino. . . . .	29
Figura 4 – Kit de desenvolvimento Sipeed Maixduino. . . . .	29
Figura 5 – Placa Raspberry Pi 3 . . . . .	30
Figura 6 – Diagrama de pinos de entrada e saída da placa Raspberry Pi 3. . . . .	31
Figura 7 – Webcam Logitech C270 usada para captação de áudio. . . . .	33
Figura 8 – Alto-falantes USB Sp-8900 K-MEX. . . . .	34
Figura 9 – Módulo Conversor de Tensão MP1584. . . . .	34
Figura 10 – Motor DC 9v. . . . .	35
Figura 11 – Módulo TB6612FNG de Canal Duplo. . . . .	35
Figura 12 – Servo Motor 90g. . . . .	36
Figura 13 – Sensor Ultrassônico HC-SR04. . . . .	36
Figura 14 – Voltímetro e Amperímetro Digital. . . . .	36
Figura 15 – Diagrama UML do software implementado na Raspberry Pi. . . . .	37
Figura 16 – Diagrama representativo do funcionamento do sistema YOLO 2. . . . .	39
Figura 17 – Estrutura do Chassi SN2500. . . . .	41
Figura 18 – Wisey-1, robô desenvolvido como resultado deste trabalho. . . . .	42
Figura 19 – Tabela relacionando termos ou expressões específicas reconhecidas pelo sistema, com seu papel ou propósito no sistema, e seus efeitos resultantes na interface-homem-máquina. . . . .	44
Figura 20 – Tela do Display LCD, acoplado à estrutura, mostrando dois objetos reconhecidos pelo MaixDuino, uma garrafa e um carro. . . . .	46
Figura 21 – Tela do Display LCD, acoplado à estrutura, mostrando duas faces reconhecidas. . . . .	47
Figura 22 – Tela do Display LCD, integrado à estrutura, mostrando a mensagem “Waiting command“. . . . .	48
Figura 23 – PCI projetada e fabricada especificamente para este trabalho . . . . .	49
Figura 24 – Estrutura 3D completa do Robô. . . . .	50
Figura 25 – Estrutura 3D da Base projetada no software Fusion360. . . . .	51
Figura 26 – Estrutura 3D da estrutura de sustentação da PCI já acoplada ao modelo da Base. . . . .	51
Figura 27 – Estrutura 3D do suporte para garras e engrenagens em vista individual (à esquerda) e acoplada à Base (à direita). . . . .	52
Figura 28 – Divisória para bateria destacada e acoplada a Base. . . . .	52

Figura 29 – Cobertura Intermediária do robô em vista individual (à esquerda), e acoplada aos demais componentes citados abaixo dela (à direita). . .	53
Figura 30 – Parte do suporte que serve como cobertura para as garras e base para o motor. . . . .	53
Figura 31 – Suporte do motor (à esquerda) e sua cobertura protetora (à direita). .	54
Figura 32 – Suporte para o sensor ultrassônico. . . . .	54
Figura 33 – Camada final da Estrutura. . . . .	55
Figura 34 – Camada final da Estrutura com suportes a alto-falantes e display LCD integrados. . . . .	55
Figura 35 – Modelo 3D de todas as peças que compõem o robô em vista frontal (no canto superior esquerdo), vista traseira (no canto inferior esquerdo), vista lateral esquerda (no canto inferior direito) e vista lateral direita (no canto superior direito). . . . .	56
Figura 36 – Diálogos obtidos através do modo de operação Conversation Mode. . .	57
Figura 37 – Wisey I percebendo um rosto sentado em um sofá (A), se afastando de um rosto cuja distância ultrapassa o limite de segurança (B) e seguindo o rosto de um usuário sentado no chão (C). . . . .	58
Figura 38 – Rosto apontado para câmera, em um ambiente com baixa iluminação e não conseguindo ser identificado pelo sistema. . . . .	59
Figura 39 – Sistema não sendo capaz de identificar a figura de um carro posicionado à sua frente. . . . .	60
Figura 40 – Sistema identificando a figura de um carro, porém a curta distância. .	60

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Ficha técnica STM32F411CEU6 . . . . .	26
Tabela 2 – Ficha técnica Maixduino . . . . .	28
Tabela 3 – Ficha técnica Raspberry Pi . . . . .	30

# Lista de abreviaturas e siglas

IA	Inteligência Artificial
IHR	Interação Humano-Robô
ISO	International Organization for Standardization
RA	Robótica Assistiva
RNA	Redes Neurais Artificiais
SLAM	Visual Self-Localization And Mapping
TA	Tecnologia Assistiva
ML	Machine Learning
DL	Deep Learning
USB	Universal Serial Bus
TFT	Thin Film Transistor
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
PCI	Placa de Circuito Impresso

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativas</b>	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>17</b>
1.2.1	Objetivos Específicos	17
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Robôs</b>	<b>19</b>
<b>2.2</b>	<b>Interação Humano-Robô</b>	<b>19</b>
2.2.1	Interação Humano-Robô centrada no robô	20
2.2.2	Interação Humano-Robô centrada no humano	20
2.2.3	Interação Humano-Robô centrada na cognição	20
<b>2.3</b>	<b>Tipos de Robôs</b>	<b>20</b>
2.3.1	Robôs Movéis	21
2.3.2	Robôs Sociais	21
2.3.3	Robôs Companheiros	22
<b>2.4</b>	<b>Inteligência Artificial</b>	<b>22</b>
2.4.1	Machine Learning	23
2.4.2	Deep Learning	23
<b>2.5</b>	<b>Visão Computacional</b>	<b>24</b>
<b>2.6</b>	<b>Sistemas Embarcados</b>	<b>25</b>
2.6.1	STM32	25
2.6.1.1	STM32F411CEU6	25
2.6.2	Maixduino	27
2.6.3	Raspberry Pi 3	29
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>Estudo de Requisitos de Hardware</b>	<b>32</b>
3.1.1	Sistemas Embarcados	32
3.1.2	Periféricos e Componentes Complementares	33
3.1.2.1	Dispositivos de entrada e saída de áudio	33
3.1.2.2	Módulos Conversores de Tensão CC	34
3.1.2.3	Motores	34
3.1.2.4	Sensores, Indicadores e Alimentação	36
<b>3.2</b>	<b>Desenvolvimento de Firmwares</b>	<b>37</b>
3.2.1	Firmware Rasperry Pi 3	37
3.2.2	Firmware Maixduino	38

3.2.3	Firmware STM32 . . . . .	39
<b>3.3</b>	<b>Validação e Integração dos Firmwares . . . . .</b>	<b>40</b>
<b>3.4</b>	<b>Desenvolvimento da PCI . . . . .</b>	<b>40</b>
<b>3.5</b>	<b>Desenvolvimento da Estrutura 3D . . . . .</b>	<b>41</b>
<b>3.6</b>	<b>Testes Finais . . . . .</b>	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>42</b>
<b>4.1</b>	<b>O robô . . . . .</b>	<b>42</b>
4.1.1	Modos de Operação . . . . .	43
4.1.2	Aspectos Funcionais de Software . . . . .	43
4.1.2.1	Detecção de comandos de voz e Interatividade . . . . .	43
4.1.2.2	Finder Mode . . . . .	45
4.1.2.3	Follow Mode . . . . .	46
4.1.2.4	Conversation Mode . . . . .	47
4.1.2.5	Considerações Gerais . . . . .	47
4.1.3	Aspectos Funcionais de Hardware . . . . .	48
4.1.4	Aspectos Estruturais . . . . .	49
4.1.4.1	Chassi . . . . .	49
4.1.4.2	Estrutura 3D . . . . .	50
4.1.4.3	Base . . . . .	50
4.1.4.4	Suporte para as Garras . . . . .	52
4.1.4.5	Divisória para a Bateria . . . . .	52
4.1.4.6	Cobertura Intermediária . . . . .	53
4.1.4.7	Suporte para o motor das Garras . . . . .	53
4.1.4.8	Suporte para o sensor ultrassônico . . . . .	54
4.1.4.9	Camada Superior . . . . .	55
4.1.4.10	Estrutura Completa . . . . .	56
<b>4.2</b>	<b>Testes Finais . . . . .</b>	<b>56</b>
4.2.1	Testes Conversation Mode . . . . .	56
4.2.2	Testes Follow Mode . . . . .	58
4.2.3	Testes Finder Mode . . . . .	59
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS . . . . .</b>	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>64</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>65</b>
	<b>ANEXO A – IMAGENS WISEY-I . . . . .</b>	<b>70</b>

<b>ANEXO B – FLUXOGRAMA DO FUNCIONAMENTO GERAL DO ROBÔ WISEY - I . . . . .</b>	<b>71</b>
<b>ANEXO C – DIAGRAMA DE RELAÇÃO ENTRE OS FIRMWARES IMPLEMENTADOS . . . . .</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO D – CAMADA DE ROTEAMENTO FRONTAL DA PLACA .</b>	<b>74</b>
<b>ANEXO E – CAMADA DE ROTEAMENTO POSTERIOR DA PLACA</b>	<b>75</b>
<b>ANEXO F – ESQUEMÁTICO ELÉTRICO DO CIRCUITO DA PCI .</b>	<b>76</b>

# 1 Introdução

Desde a metade do século XX, a população mundial vem experimentando um processo de envelhecimento, isto é, um aumento na proporção de pessoas idosas em relação a população total (ONU, 2013). No Brasil, este processo é evidenciado pelo aumento de mais de 4% do contingente de idosos entre os anos de 2012 a 2022, fazendo desse segmento populacional o que mais cresce segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2022). Esse crescimento representa um incremento médio de mais de um milhão de pessoas idosas ao ano, e corrobora com projeções feitas pelo Ministério da Saúde que apontam que, em 2040, o contingente de idosos representará cerca de 30% da população brasileira (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2022).

Nesse contexto, ganham evidência importantes características demográficas que dizem respeito a esse emergente segmento populacional. Uma delas é a forte relação entre faixas etárias e a prevalência de deficiências (SNPD, 2012). De acordo com o Censo Demográfico, realizado em 2010, a deficiência motora é a segunda que mais acomete os brasileiros, atingindo 7% da população, e 2,33% em graus severos. O mesmo estudo ainda aponta que 23,9% dos brasileiros possui algum tipo de deficiência visual, auditiva, motora ou intelectual, sendo o grupo de pessoas com 65 anos ou mais responsável por 67,73% dessa estatística (SNPD, 2012).

Diante disso, é evidente que os idosos compõem um dos grupos que mais necessita de suporte e atenção, sobretudo durante sua rotina doméstica diária. O aumento desse segmento populacional, aliado à limitada disposição de profissionais treinados para o cuidado especializado de idosos, faz imprescindível a busca por novas alternativas para lidar com essa realidade, a fim de proporcionar aos idosos a possibilidade de viver de forma independente por mais tempo e com a maior qualidade de vida possível (SAWIK et al., 2023).

Uma relevante ferramenta para atingir estes objetivos é o uso da chamada tecnologia assistiva (TA). A TA é uma área de pesquisa de caráter interdisciplinar que abrange o desenvolvimento de produtos, recursos, metodologias, estratégias e serviços que buscam promover a funcionalidade relacionada à atividade e participação de pessoas com deficiência, incapacidades ou mobilidade reduzida, visando sua autonomia, qualidade de vida e inclusão social (CAT, 2007).

Dentre as várias disciplinas que compõem a TA, está a robótica e o conceito de robótica assistiva (RA). Robôs assistivos são definidos como aqueles capazes de dar suporte a usuários humanos, e podem ser destinados a uma variedade de ambientes, incluindo escolas, hospitais e domicílios (FEIL-SEIFER; MATARIC, 2005). Exemplos de robôs

assistivos são: cadeiras de rodas robóticas, robôs manipuladores, robôs educacionais, robôs de reabilitação, entre outros.

Recentemente, os avanços na área de Inteligência Artificial (IA) combinados com recursos de sensoriamento avançados, como o da visão computacional, amplificaram o potencial de impacto dos robôs, tornando-os capazes de interagir de forma mais completa com o ambiente e desempenhar tarefas cada vez mais complexas. Um dos resultados dessa combinação de recursos é o desenvolvimento de robôs móveis assistivos, que também são sociais, isto é, que interagem com os humanos através de gestos, expressões e comandos de voz. Estas características se tornam relevantes quando aplicadas ao contexto de pessoas com limitações motoras, uma vez que podem significar uma redução de esforço físico e conseqüentemente, prevenir quedas ou lesões motoras.

Nesse sentido, este trabalho buscou o desenvolvimento de um robô assistente pessoal voltado para o suporte no cuidado doméstico de idosos e pessoas com limitações motoras. O robô proposto deve ser capaz de, sob comandos de voz, executar tarefas específicas, servindo como um aliado no auxílio às atividades diárias dessas pessoas.

## 1.1 Justificativas

Reduções na capacidade física frequentemente requerem que pessoas idosas realizem mudanças em seus ambientes de vida, seja adaptando sua residência atual ou mudando para um ambiente mais favorável (PERRY; ANDERSEN; KAPLAN, 2013). Ao decidir onde morar, pessoas idosas frequentemente veem suas casas ou comunidades como espaços fundamentais para manter um senso de conexão, segurança e familiaridade (WILES et al., 2011). Essa busca por ambientes que promovam bem-estar é essencial, de tal forma que o direito de pessoas com limitações funcionais viverem e serem incluídas em sua comunidade foi um ponto central na Convenção das Nações Unidas sobre os Direitos das Pessoas com Deficiência (ONU, 2006).

Em uma realidade em que os ambientes institucionais, como asilos ou centros de cuidados, são ocasionalmente vistos como desumanizadores, e até mesmo interpretados como barreiras estruturais e culturais de interações sociais (BONIFAS et al., 2014), tem-se como resposta política comum ao envelhecimento populacional, o incentivo do que é conhecido como envelhecimento no lar, isto é, a possibilidade de pessoas idosas viverem e envelhecerem em suas próprias casas ou comunidades de forma segura, autônoma e confortável, independentemente da idade, renda ou nível de capacidade intrínseca (WHO, 2015).

Nesse sentido, de acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), as tecnologias assistivas à saúde para cuidados de longo prazo, como monitoramento remoto e cuidadores robóticos, têm ganhado evidência e representam hoje um dos meios mais

promissores para melhorar a capacidade funcional de pessoas idosas, e de tornar o objetivo do envelhecimento no lar ainda mais alcançável (WHO, 2015).

A criação de ambientes e tecnologias adaptadas à idade não apenas facilita a mobilidade, permitindo que pessoas idosas participem ativamente de suas atividades básicas, mas também contribui significativamente para a melhoria da qualidade de vida dessas pessoas e de seus cuidadores (WHO, 2015). Além disso, vale ressaltar que as tecnologias assistivas, ao proporcionarem esses benefícios, apresentam potencial para reduzir custos individuais e sociais, fomentando, assim, o envelhecimento no lar de maneira sustentável e favorável (SCHULZ et al., 2014).

Essa perspectiva se alinha também com a legislação brasileira de inclusão, na qual o artigo 74 da Lei nº 13.146 garante à pessoa com deficiência acesso a produtos, recursos, estratégias, práticas, processos, métodos e serviços de tecnologia assistiva que maximizem sua autonomia, mobilidade pessoal e qualidade de vida (BRASIL, 2015).

Dessa forma, a proposta deste trabalho e o consequente emprego de tecnologias assistivas vai de encontro não apenas com os princípios de envelhecimento no lar propostos pela OMS, mas também promove a inclusão e a melhoria significativa na vida daqueles com limitações funcionais regida pela lei brasileira.

## 1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema robótico assistivo para auxiliar no cuidado de pessoas idosas e portadoras de limitações motoras no ambiente doméstico. O robô disponibilizará de recursos de *hardware* e *software* compatíveis com aplicações de inteligência artificial e visão computacional para navegar no ambiente e, a partir de comandos de voz, performar três tarefas: encontrar e entregar objetos, seguir indivíduos, e fornecer informações.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

- Desenvolvimento de um *firmware* embarcado em uma placa Raspberry Pi 3, responsável por controlar a interface de interação do usuário com o sistema, incluindo o processamento de comandos de voz, controle de LED's e envio de informações via UART para os demais componentes embarcados do sistema.
- Desenvolvimento de um *firmware* embarcado em um Kit Maixduino, integrado a modelos de inteligência artificial e visão computacional projetados para detecção de objetos e reconhecimento facial. A implementação também deve contar com um sistema de recebimento e envio de informações via UART.

- 
- Desenvolvimento de um *firmware* embarcado em um microcontrolador STM32 responsável por, através de comandos recebidos via UART da placa Maixduino, controlar três motores, um sensor ultrassônico e um *buzzer*.
  - Desenvolvimento de uma Placa de Circuito Impresso (PCI) alinhada às demandas específicas de design e *hardware* do sistema proposto.
  - Desenvolvimento de uma estrutura e acabamento do robô feita em impressão 3D, projetada para ser compatível tanto com a Placa de Circuito Impresso (PCI) quanto com o chassi do sistema robótico.

## 2 Referencial Teórico

Para uma compreensão mais abrangente deste trabalho, é crucial estabelecer uma base conceitual que englobe os aspectos técnicos considerados para o desenvolvimento desta pesquisa. A necessidade de definir alguns termos-chave e conceitos fundamenta-se na natureza interdisciplinar da robótica e em sua característica dinâmica e constante de evolução. Ao esclarecer esses elementos, busca-se proporcionar uma compreensão mais profunda dos fundamentos teóricos do projeto, contribuindo não apenas para composição de uma análise objetiva do sistema proposto, mas também para uma interpretação mais fundamentada sobre as contribuições deste trabalho na área da robótica.

### 2.1 Robôs

O termo “robô”, derivado da palavra checa “robot”, significa trabalho forçado (SHANMUGAVEL; T; R, 2018). Segundo a norma ISO - 8373:2021, um robô é um mecanismo programável, com determinado grau de autonomia, que é capaz de se locomover em um ambiente e realizar tarefas designadas (ISO, 2021). Outra forma de definir um robô é como uma máquina capaz de realizar um conjunto de tarefas em uma classe de ambientes com algum grau de autonomia e robustez, integrando vários componentes, como atuadores, sensores e computadores que juntos garantem as funções de movimentação, manipulação, percepção, comunicação e tomada de decisão (MARQUIS; PARDE; PAPINI, 2020).

A ciência que estuda e projeta robôs é conhecida como Robótica (SUJATHA, 2021). A robótica tem como objetivo projetar máquinas capazes de perceber, mover-se e interagir com seu ambiente para a realização de tarefas úteis e específicas. Trata-se de um campo de pesquisa interdisciplinar que reúne conhecimentos de disciplinas como teoria de controle, engenharia mecânica, engenharia elétrica e ciência da computação, e tem como propósito criar e aprimorar sistemas robóticos capazes de executar funções de maneira eficiente e autônoma (MARQUIS; PARDE; PAPINI, 2020).

### 2.2 Interação Humano-Robô

Dentro da robótica existem várias subáreas com ênfases, abordagens e aplicações diferentes, uma delas é a Interação Humano-Robô (IHR) ou *Human Robot Interaction*. A IHR é uma área de pesquisa cujo foco é o desenvolvimento de habilidades comunicativas inteligentes aplicadas à robôs (D’ONOFRIO; SANCARLO, 2023). Por se tratar de uma área que investiga a comunicação e o comportamento social em sistemas de inteligência artificial, é também uma área altamente interdisciplinar, situada na interseção da robótica,

engenharia, ciência da computação, psicologia, linguística, etologia e outras disciplinas (DAUTENHAHN, 2007).

Diferentemente da engenharia e da robótica tradicional, a interação verbal ou não verbal com pessoas, é um elemento central e intrínscio à IHR (DAUTENHAHN, 2007). A pesquisa nessa área, segundo Dautenhahn (2007), pode ser categorizada em três abordagens, não mutuamente exclusivas.

### 2.2.1 Interação Humano-Robô centrada no robô

A abordagem centrada no robô enfatiza a visão de um robô como uma criatura, ou seja, uma entidade autônoma que persegue seus próprios objetivos com base em suas motivações, impulsos e emoções. Nesse sentido, a interação com pessoas cumpre o papel de atender à necessidades específicas dos robôs, isto é, demandas identificadas pelo projetista do robô e modeladas pela arquitetura de controle interna (DAUTENHAHN, 2007).

### 2.2.2 Interação Humano-Robô centrada no humano

A IHR centrada no humano se preocupa em como um robô pode cumprir uma tarefa específica dentro de um padrão aceitável e confortável para os humanos. Nessa abordagem, pesquisa-se como as pessoas reagem e interpretam a aparência ou o comportamento de um robô, desconsiderando sua arquitetura interna ou os processos cognitivos que ocorrem dentro do robô (DAUTENHAHN, 2007).

Os desafios nessa área estão em: encontrar um design equilibrado e consistente de comportamento e aparência do robô; projetar um comportamento robótico socialmente aceitável; desenvolver novos métodos e metodologias para estudos e avaliação de interações e identificar as necessidades de indivíduos e grupos de sujeitos aos quais um robô poderia se adaptar e responder (DAUTENHAHN, 2007).

### 2.2.3 Interação Humano-Robô centrada na cognição

A IHR centrada na cognição enfatiza o robô como um sistema inteligente, ou seja, uma máquina que toma decisões por conta própria e resolve problemas que enfrenta como parte das tarefas que precisa realizar em uma determinada aplicação. Questões específicas dessa área de pesquisa são: o desenvolvimento de arquiteturas cognitivas de robôs, aprendizado de máquina e resolução de problemas (DAUTENHAHN, 2007).

## 2.3 Tipos de Robôs

O fato da tecnologia robótica proporcionar a execução de atividades repetitivas e perigosas de maneira mais rápida, econômica e precisa do que os seres humanos (ERINLE;

OLADEBEYE; ADEMILOYE, 2022), fez com que, atualmente, os robôs desempenhem uma variedade de funções em diversos campos, resultando em um progressivo aumento na quantidade de tarefas atribuídas a eles (SHANMUGAVEL; T; R, 2018). Dessa forma, considerando a variedade de robôs produzidos, a melhor maneira de classifica-los é por meio da divisão com base em suas aplicações e características (SHANMUGAVEL; T; R, 2018). É pertinente destacar que as definições apresentadas a seguir, muitas vezes se sobrepõem, o que permite que um robô seja categorizado em mais de um tipo com base em suas diferentes propriedades e capacidades.

### 2.3.1 Robôs Móveis

Robôs móveis são sistemas robóticos capazes de moverem-se de acordo com sua função e tarefa (RENDYANSYAH, 2022). Podem ser controlados manualmente ou de maneira autônoma, sendo os autônômicos caracterizados pela capacidade de navegar por um ambiente geralmente desconhecido, ao mesmo tempo em que realizam a tarefa para a qual foram projetados (CEBOLLADA et al., 2021).

Os robôs móveis são essencialmente equipados com sensores que coletam dados do ambiente pertinentes para a execução das tarefas designadas a eles. (CEBOLLADA et al., 2021). Uma variedade de métodos tem sido propostos em relação às técnicas de processamento e tratamento das informações sensoriais coletadas, incluindo ferramentas baseadas em inteligência artificial (IA), sendo essa, uma opção cada vez mais adotada nos trabalhos de robótica móvel (CEBOLLADA et al., 2021).

Em termos de design, robôs móveis podem ser classificados de acordo com o sistema de movimento ou pelo tipo de mobilidade (MORENO et al., 2016). Concentrando-se no aspecto mecânico, robôs móveis terrestres podem ter locomoção com rodas, pernas, esteiras, ou combinações híbridas desses princípios (BRUZZONE; NODEHI; FANGHELLA, 2022).

### 2.3.2 Robôs Sociais

Robôs sociais são agentes artificiais capazes de realizar performances sociais que, na perspectiva de usuários humanos, possam elevá-los de instrumentos a interlocutores (KAPLAN et al., 2001). Esses robôs, socialmente interativos, desempenham papéis como parceiros, colegas ou assistentes, exigindo um grau de adaptabilidade e flexibilidade para conduzir interações com seres humanos (FONG; NOURBAKHS; DAUTENHAHN, 2003).

A variedade de formas e funções desses robôs inclui desde aqueles cujo único propósito é engajar as pessoas em interações sociais, até os projetados para seguir normas sociais e realizar tarefas em ambientes habitados por humanos (FONG; NOURBAKHS; DAUTENHAHN, 2003).

O estudo no campo de robôs sociais reconhece, portanto, como característica intrínseca: a capacidade de performar comportamentos sociais e, em particular, de demonstrar uma “presença social” crível, definida como a capacidade do robô em proporcionar ao usuário a “sensação de estar com outro” ou o sentimento de “estar na companhia de alguém” (DAMIANO; DUMOUCHEL, 2018).

### 2.3.3 Robôs Companheiros

Dentro da robótica assistiva, definida como ramo da robótica voltada para auxiliar os seres humanos em tarefas de cuidado (JAKHOTIYA; HAQUE, 2022), um robô companheiro é um sistema que possui habilidades sociais para interagir com os usuários, e que além disso, é capaz de realizar tarefas para assistência dos seres humanos em ambientes domésticos (DAUTENHAHN, 2007).

O conceito de um robô companheiro abrange tanto a perspectiva da IHR centrada no humano quanto a perspectiva centrada na cognição, pois o requisito de realizar tarefas de maneira confortável e aceitável para os humanos no ambiente compartilhado está alinhado com a abordagem centrada no humano, enquanto a execução flexível e adaptativa de tarefas exige que o robô se ajuste e aprenda em ambientes novos e dinamicamente mutáveis, correspondendo assim à abordagem centrada na cognição (DAUTENHAHN, 2007).

## 2.4 Inteligência Artificial

A Inteligência Artificial (IA) é um campo de pesquisa dentro da ciência da computação voltado para a compreensão da inteligência por meio de modelos computacionais eficazes e o desenvolvimento de sistemas que os implementem (MARQUIS; PARDE; PAPINI, 2020). A IA mantém vínculos interdisciplinares com a matemática, psicologia, neurociência, linguística, filosofia e outras ciências cognitivas. Atualmente, já proporcionou uma variedade de tecnologias robustas, como as técnicas de aprendizado de máquina, que agora estão integradas de maneira contínua em muitos dispositivos computadorizados, como smartphones, câmeras, navegadores da web, mecanismos de busca e aplicativos (MARQUIS; PARDE; PAPINI, 2020).

A robótica e a IA são áreas distintas mas que se sobrepõem (MARQUIS; PARDE; PAPINI, 2020). Quando se pensa em IA destaca-se a possibilidade de uma tecnologia aprender com suas próprias experiências a cada iteração, aprimorando, conseqüentemente, seu desempenho. Essa característica incorpora a noção de adaptabilidade (MOHAMMED, 2020) que quando aplicada ao campo da robótica permite que os robôs realizem tarefas complexas de forma autônoma, respondendo dinamicamente à cenários variados com base em algoritmos e processos inteligentes que são aprimorados a partir da experiência.

A adaptabilidade citada previamente nos leva ao que é conhecido como “Aprendizado de Máquina” ou *Machine Learning*, que nada mais é que um conceito da IA que permite que um sistema utilize técnicas algorítmicas para aprimorar suas previsões e análises de dados a cada iteração (MOHAMMED, 2020).

### 2.4.1 Machine Learning

*Machine Learning* (ML) é uma aplicação da IA que engloba todas as abordagens que permitem que as máquinas aprendam com dados sem serem explicitamente programadas. O objetivo do ML é treinar as máquinas com base nos dados e algoritmos fornecidos. Utilizando os dados e as informações processadas, as máquinas aprendem a tomar decisões. O aspecto de “aprendizagem” do ML indica que os algoritmos de ML tentam minimizar os erros e maximizar a probabilidade de suas previsões serem verdadeiras conforme são treinadas, isto é, conforme “aprendem” (JAKHAR; KAUR, 2020).

### 2.4.2 Deep Learning

Deep Learning (DL) é uma subcategoria do (ML) que se baseia em algoritmos aplicados a modelos computacionais inspirados na arquitetura das redes neurais biológicas do cérebro, conhecidas como Redes Neurais Artificiais (RNA). Quando o cérebro humano recebe novas informações, ele procura compará-las com conhecimentos já existentes para compreendê-las, utilizando identificação e atribuição a diversas categorias. O DL aplica esse conceito ao contexto computacional, utilizando redes neurais com características específicas que suportam esse tipo de aprendizado (JAKHAR; KAUR, 2020).

O termo *Deep*, em tradução livre para o português, “profundo”, refere-se ao número de camadas presentes em uma RNA. Basicamente, uma RNA é composta por três tipos de camadas: A camada de entrada que recebe dados, a camada de saída que gera os resultados, e a camada oculta que extrai padrões dos dados fornecidos. Uma RNA superficial possui apenas uma camada oculta, realizando a tentativa de padronização uma vez. Em contraste, uma RNA profunda diferencia-se por ter várias camadas ocultas, realizando mais tentativas de padronização e conseqüentemente sendo capaz de identificar padrões e executar tarefas mais complexas (JAKHAR; KAUR, 2020). Logo, DL é uma técnica aplicada a RNA profundas, que suportam esse tipo de aprendizado. Em termos práticos, a técnica de DL apresenta um desempenho robusto quando aplicado a um contexto de dados não estruturados, porém demanda uma quantidade significativa de dados de treinamento, além de exigir hardware e software mais sofisticados (JAKHAR; KAUR, 2020).

## 2.5 Visão Computacional

Visão computacional é uma técnica que usa de algoritmos computacionais para extrair informações sobre o mundo físico a partir de imagens. Através de um sistema de visão computacional, é possível obter uma descrição, de acordo com as demandas específicas de cada tarefa, de uma cena física capturada por um sensor de imagem, como uma câmera de vídeo digitalizadora (WALTERS, 2003).

Aplicações de visão computacional vem ganhando relevância nas áreas de automação e robótica (OKARMA, 2020). No campo da pesquisa de tecnologias assistivas, algoritmos de visão computacional veem sendo utilizados no controle de membros protéticos, desenvolvimento de cadeiras de rodas inteligentes e reconhecimento de emoções e expressões faciais (LEO et al., 2017).

Dentro da visão computacional técnicas de auto-localização visual e mapeamento, popularmente conhecidas como *Visual Self-Localization And Mapping* (SLAM) também têm sido utilizadas para estimar rotas e para planejamentos de movimentação (LEO et al., 2017). Nesse sentido, a robótica móvel é uma das áreas que se favorece da visão computacional, uma vez que através dela, a quantidade de informações coletadas sobre um determinado ambiente pode ser o suficiente para construir soluções eficazes de navegação e planejamento de rotas (CEBOLLADA et al., 2021).

As aplicações da visão computacional se estendem também á IHR, possibilitando, por meio da detecção de gestos ou expressões, uma comunicação do usuário com um robô de maneira mais natural e intuitiva (LEO et al., 2017). Sistemas robóticos assistivos que usam deste recurso já foram propostos em ambiente domésticos, como o de Mollaret et al. (2016), cuja característica principal é a capacidade de iniciar a interação com um usuário apenas quando é detectada a intenção do usuário de fazê-la (LEO et al., 2017), resultando em um robô não intrusivo e dentro da abordagem de IHR centrada no humano.

Detectar objetos também é uma tarefa que utiliza da visão computacional. Segundo Leo et al. (2017), a detecção de objetos pode ser dividida em duas abordagens: a baseada em marcadores, que exigem etiquetas visuais colocadas nos objetos a serem identificados; e a que não faz uso de marcadores, isto é, que utiliza sequências mais complexas de algoritmos que coletam informações como a forma, textura, cor e outras características físicas do objeto para a identificação deles (JAFRI et al., 2014). Independentemente da estratégia de detecção, o princípio de reconhecimento de objetos consiste em realizar correspondências da imagem capturada em relação a um conjunto de exemplos fornecidos como entrada. Isso pode ser feito através de um programa baseado em ML em uma rede neural após uma etapa de treinamento (WEI; PHUNG; BOUZERDOUM, 2014).

## 2.6 Sistemas Embarcados

Um sistema embarcado é uma combinação de vários componentes eletrônicos e mecânicos projetados para a realização de uma tarefa específica em tempo real, com alta eficiência e desempenho (SHANMUGAVEL; T; R, 2018). Esses sistemas são utilizados em diversos dispositivos eletrônicos de consumo, como eletrodomésticos, equipamentos médicos e telefones celulares. Chamamos esses sistemas de embarcados, porque o microprocessador, componente responsável pelo controle do sistema, está embutido diretamente dentro do produto. Alguns sistemas embarcados são também chamados de microcontroladores (MCU's) (TOULSON; WILMSHURST, 2017).

Os elementos principais que compõem um microcontrolador são: núcleo, memória e periféricos (TOULSON; WILMSHURST, 2017). Os periféricos são os elementos que distinguem um microcontrolador de um microprocessador, pois são eles que permitem a interação do sistema com o mundo exterior. São exemplos de periféricos saídas digitais, analógicas, portas seriais, temporizadores, contadores e outros subsistemas úteis para um dispositivo microcontrolado (TOULSON; WILMSHURST, 2017).

Apesar de sistemas robóticos e sistemas embarcados serem conceitos distintos, estão relacionados. Aplicações como máquinas de lavar que detectam sujeira nas roupas e realizam ações específicas, e condicionadores de ar que percebem a temperatura externa e a ajustam a temperatura interna do ambiente são exemplos de sistemas embarcados inteligentes, que assim como robôs, percebem características do ambiente por meio de sensores e tomam decisões a partir delas (SHANMUGAVEL; T; R, 2018).

### 2.6.1 STM32

A família STM32 é uma ampla gama de microcontroladores produzida pela empresa STMicroelectronics, e que é dividida em nove subfamílias, cada uma com suas próprias características. A produção comercial desses dispositivos começou em 2007, com a série STM32F1, que ainda segue em desenvolvimento. Todos os microcontroladores STM32 têm um núcleo Cortex-M, e internamente, são compostos por um núcleo de processamento, RAM estática, memória flash, interface de depuração e vários outros periféricos específicos de cada modelo e família (NOVIELLO, 2016).

#### 2.6.1.1 STM32F411CEU6

O microcontrolador STM32F411CEU6, da família STM32F4, é baseado no núcleo ARM Cortex-M4 de 32 bits e opera com uma frequência de até 100 MHz (STMICROELECTRONICS, 2017). A série de dispositivos da família STM32F4 é o grupo mais difundido de microcontroladores baseados em Cortex-M4 no segmento de alto desempenho (NOVIELLO, 2016). De maneira geral o STM32F411CEU6 apresenta uma memória embarcada de alta

velocidade e uma variedade de entradas e saídas, e periféricos, fazendo dele um dispositivo adequado para uma ampla gama de aplicações, como no controle de motores, equipamentos médicos, aplicações industriais (controladores lógicos programáveis, inversores, disjuntores), sistemas de alarme, eletrodomésticos, sensores e entre outros (STMICROELECTRONICS, 2017). A tabela 1 mostra atributos técnicos específicos deste microcontrolador descritas pelo fabricante.

Tabela 1 – Ficha técnica STM32F411CEU6

Processador	ARM Cortex-M4 com FPU de 32 bits
Encapsulamento	UFQFPN
Frequência	100MHz
SRAM	128 Kbytes
Memória Flash	512 Kbytes
Periféricos	I2C,SPI, I2S, USARTs,SDIO, USB 2.0 OTG

Fonte: Adaptado de [STMicroelectronics \(2017\)](#)

Ademais das características citadas, o microcontrolador em questão possui seis *timers* ou temporizadores de propósito geral de 16 bits, incluindo um temporizador PWM para controle de motor, e dois de propósito geral de 32 bits (STMICROELECTRONICS, 2017). Vale ressaltar ainda, que a placa STM32F411CEU6 opera na faixa de temperatura de -40 a +125 °C, com alimentação de 1,7 a 3,6 V (STMICROELECTRONICS, 2017). A conexão USB para fins de debug e programação também pode ser utilizada como fonte de alimentação da placa, de tal forma que quando a placa estiver conectada via USB, ela também estará sendo alimentada pela energia fornecida. Em aplicações autônomas, em que faz-se necessário o uso de uma fonte de alimentação externa, utilizam-se os respectivos pinos de alimentação da placa (UNSAN; BARKANA; GURHAN, 2021). A Figura 1 representa o diagrama de pinagem da placa.



A placa Sipeed MaixDuino é projetada com base no design e estrutura da placa Arduino UNO, fazendo dele também compatível com seu ambiente de desenvolvimento e módulos. De maneira geral, o sistema MaixDuino integra câmera, slot para cartão de memória, botões do usuário, display TFT e interface de expansão MaixDuino\*. Além disso, possui uma interface de desenvolvimento e depuração para aplicações de IA e reconhecimento facial (SIPEED, 2019). Destaca-se também a inclusão do FreeRTOS com suporte à versão exclusiva de MicroPython desenvolvida pela Sipeed, chamada de MaixPy. A plataforma de desenvolvimento também conta com suporte para Redes Neurais Convolucionais por meio de um KPU e conectividade Wi-Fi e Bluetooth gerenciada por um módulo ESP-32 (LEITE, 2023). A tabela 2 reúne mais aspectos técnicos relevantes da placa descritos pelo fabricante.

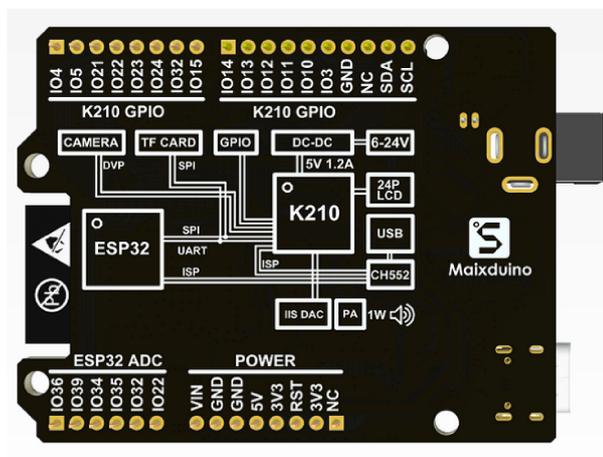
Tabela 2 – Ficha técnica Maixduino

Processador	RISC-V Dual Core 64bit, with FPU
Frequência	400MHz (overclockable to 600MHz)
SRAM	8M Byte
Memória Flash	512 Kbytes
Detecção de Imagem	QVGA@60fps/VGA@30fps
Detecção de voz	Microphone array (8mics)
Rede Neural	Support YOLOv3, Mobile netv2, TinyYOLOv2
Deep Learning Framework	TensorFlow, Keras, Darknet; Caffe
Periféricos	FPIOA, UAR, GPIO, SPI, I2C, I2S, TIMER
Processamento de Vídeo	Neural Network Processor (KPU)

Fonte: Adaptado de SIPEED (2019)

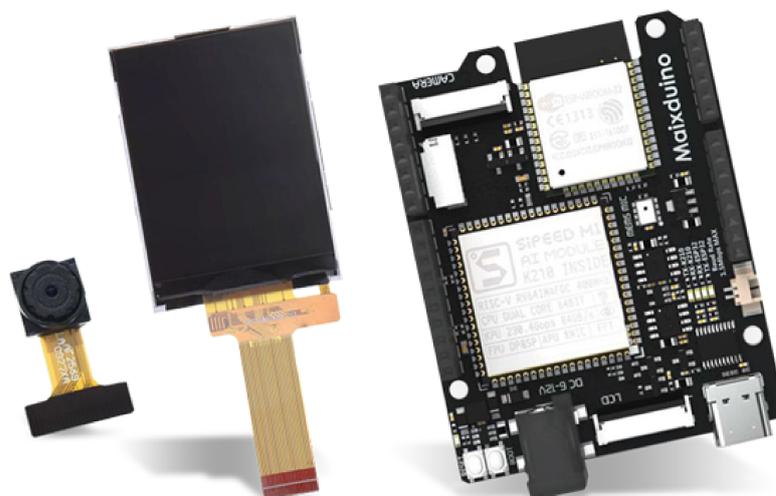
A tensão de operação do módulo M1 é 5V, com uma corrente de no mínimo 300mA. Apesar disso, aconselha-se alimentar o kit MaixDuino com uma fonte de 6 a 12V, devido a presença de conectores para um alto-falante de 1.2mm (LEITE, 2023). A Figura 3 mostra o verso do microcontrolador, que contém um diagrama dos pinos e funcionalidades do Maixduino, enquanto a Figura 4 mostra os componentes do Kit MaixDuino, isto é, a placa acompanhada de um módulo de câmera OV2640 e um Display TFT de 2,4 polegadas.

Figura 3 – Diagrama de pinos de entrada e saída presentes no verso da placa Sipeed Maixduino.



Fonte: Adaptado de [SIPEED \(2019\)](#).

Figura 4 – Kit de desenvolvimento Sipeed Maixduino.



Fonte: Adaptado de [Mouser Electronics \(2022\)](#).

### 2.6.3 Raspberry Pi 3

Desenvolvido pela Raspberry Pi Foundation, a Raspberry Pi 3, representada na Figura 5, é uma placa de desenvolvimento de código aberto baseada em Linux ([RASPBERRY PI FOUNDATION, 2019](#)). É equipado com um processador Quad-core Broadcom BCM2837 operando a 1,2 GHz, e juntamente com uma variedade de periféricos, proporciona um desempenho de processamento robusto para diversas aplicações. Além disso, o Raspberry Pi 3 apresenta conectividade sem fio integrada, utilizando módulos Wi-Fi 802.11 e Bluetooth 4.2, oferecendo opções versáteis de comunicação. Suas quatro portas USB 2.0 permitem a conexão de diversos periféricos, enquanto a porta Ethernet

possibilita a conexão com redes com fio. A saída HDMI permite conectar o Raspberry Pi a monitores ou TVs para exibição de vídeo (RASPBERRY PI FOUNDATION, 2019). Na tabela 3 estão mais informações técnicas da placa que complementam seu perfil técnico.

Figura 5 – Placa Raspberry Pi 3



Fonte: Adaptado de AMAZON (2023).

Tabela 3 – Ficha técnica Raspberry Pi

Processador	1.2GHz Quad-Core ARM Cortex-A53
Frequência CPU	1.2Ghz
RAM	1GB
Sistema Operacional	Micro SD card c/ Linux ou Windows
Saída de Vídeo	HDMI 1.3/ 1.4 Composite RCA (PAL and NTSC)
Saída de Áudio	Audio Output 3.5mm jack, HDMI
	4 conectores USB 2.0
GPIO	Barra de conectores de 40 pinos (2x20)
	Inclui 27 pinos de GPIO
Conexão de Câmera	15-pin MIPI Camera Serial Interface (CSI-2)
Conexão de Display	Display Serial Interface (DSI)
Slot de Cartão de Memória	Push/pull Micro SDIO

Fonte: Adaptado de Raspberry Pi Foundation (2019)

O Raspberry Pi possui uma conexão de energia microUSB de 5V, localizada no canto inferior esquerdo da placa. A corrente de alimentação recomendada 1.2A (RASPBERRY

PI FOUNDATION, 2019). A figura 6 mostra um diagrama contendo o esquema de pinagem da placa.

Figura 6 – Diagrama de pinos de entrada e saída da placa Raspberry Pi 3.

Pin#	NAME		NAME	Pin#
01	3.3v DC Power		DC Power 5v	02
03	GPIO02 (SDA1 , I2C)		DC Power 5v	04
05	GPIO03 (SCL1 , I2C)		Ground	06
07	GPIO04 (GPIO_GCLK)		(TXD0) GPIO14	08
09	Ground		(RXD0) GPIO15	10
11	GPIO17 (GPIO_GEN0)		(GPIO_GEN1) GPIO18	12
13	GPIO27 (GPIO_GEN2)		Ground	14
15	GPIO22 (GPIO_GEN3)		(GPIO_GEN4) GPIO23	16
17	3.3v DC Power		(GPIO_GEN5) GPIO24	18
19	GPIO10 (SPI_MOSI)		Ground	20
21	GPIO09 (SPI_MISO)		(GPIO_GEN6) GPIO25	22
23	GPIO11 (SPI_CLK)		(SPI_CE0_N) GPIO08	24
25	Ground		(SPI_CE1_N) GPIO07	26
27	ID_SD (I2C ID EEPROM)		(I2C ID EEPROM) ID_SC	28
29	GPIO05		Ground	30
31	GPIO06		GPIO12	32
33	GPIO13		Ground	34
35	GPIO19		GPIO16	36
37	GPIO26		GPIO20	38
39	Ground		GPIO21	40

Fonte: Adaptado de Sparkfun (2023).

## 3 Metodologia

Visando atingir os objetivos gerais e específicos do trabalho, a construção do sistema proposto foi dividida em seis etapas: (i) Estudo de Requisitos de Hardware, (ii) Desenvolvimento de Firmwares, (iii) Validação e Integração dos Firmwares, (iv) Desenvolvimento da PCI, (v) Desenvolvimento e Impressão da Estrutura 3D e (vi) Testes Finais.

### 3.1 Estudo de Requisitos de Hardware

A fase inicial do projeto consistiu em realizar um estudo dos requisitos de hardware necessários para o desenvolvimento do robô, seguida de uma seleção das tecnologias mais adequadas e compatíveis disponíveis no mercado. Durante esta etapa foram considerados não só aspectos de custo, mas também a compatibilidade dessas tecnologias com os objetivos específicos do projeto.

#### 3.1.1 Sistemas Embarcados

A partir do estudo levantado e tendo como objetivo um sistema robusto e de baixo custo, optou-se, neste trabalho, por uma solução de processamento modular, isto é, que utiliza de três sistemas embarcados diferentes com propriedades e funções distintas, de modo a distribuir as tarefas do sistema de forma eficiente e sem o risco de sobrecarga de processamento. Nesse sentido, os sistemas embarcados utilizados foram: a placa Raspberry Pi 3, o Kit de desenvolvimento Maixduino e o microcontrolador STM32F411CCEU6.

A escolha da Raspberry Pi para esta aplicação é justificada pela sua integração com um ambiente Linux, altamente compatível com implementações em Python. Além disso, seu hardware versátil, conta com recursos relevantes para esta aplicação, como entradas USB, saída de áudio P2, UART e uma extensão de pinos GPIO, ferramentas fundamentais para as funcionalidades de entrada e saída requeridas pelo projeto.

O Kit de desenvolvimento Maixduino foi adotado principalmente por sua capacidade de executar modelos de inteligência artificial embarcados e seu baixo custo em comparação com outros dispositivos do mercado com a mesma funcionalidade. Os recursos de expansão de memória e de integração de periféricos da placa Maixduino o tornam uma opção acessível e eficiente para a realização de tarefas complexas envolvendo diferentes modelos de reconhecimento de padrões. Além disso, sua compatibilidade com a linguagem MicroPython traz consigo bibliotecas e ferramentas amplamente utilizadas do Python, facilitando significativamente o acesso à referências para a implementação do projeto.

Por fim, o microcontrolador STM32F411CCEU6 foi utilizado por suas características de baixo consumo de energia, recursos de entrada e saída adequados, e capacidade de processamento suficiente para as funcionalidades específicas atribuídas a ele no sistema proposto.

### 3.1.2 Periféricos e Componentes Complementares

Integrados ao *hardware* e *software* de cada sistema embarcado, estão componentes como módulos eletrônicos, motores, sensores e periféricos de entrada e saída que garantem a operação e funcionalidade do sistema como um todo. Nesta subseção serão descritos tais dispositivos, bem como o critério utilizado para adoção deles.

#### 3.1.2.1 Dispositivos de entrada e saída de áudio

Considerando a capacidade de reconhecimento de comandos de voz, é essencial que o robô possua um dispositivo de entrada de áudio capaz de captar com clareza e precisão as solicitações do usuário. Nesse sentido, esta aplicação conta como equipamento de entrada de áudio, a Webcam Logitech C270, ilustrada na figura 7. Este dispositivo é responsável unicamente pela captação de áudio do sistema e foi selecionado por sua compatibilidade de conexão com a Raspberry Pi, via USB, e sua capacidade e alcance de captação suficiente para a implementação pretendida.

Figura 7 – Webcam Logitech C270 usada para captação de áudio.



Fonte: Adaptado de [Logitech \(2023\)](#).

De forma análoga, a característica de responder em áudio aos comandos dados, exige do sistema dispositivos de saída de áudio. Para isto, optou-se pelo conjunto de alto-falantes SP-8900 K-MEX, ilustrados na figura 8. A decisão de utilizar este par de dispositivos foi motivada pelo seu baixo custo e também por sua propriedade de fácil integração com a Raspberry Pi, uma vez que os alto-falantes possuem uma entrada P2 de sinal e são alimentados por conexão USB, características que se alinham com o *hardware* da placa.

Figura 8 – Alto-falantes USB Sp-8900 K-MEX.

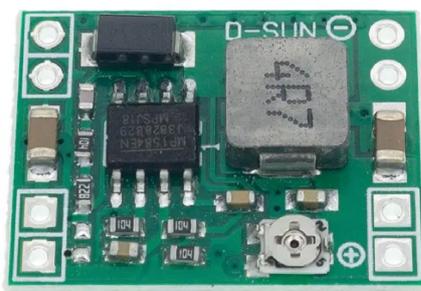


Fonte: Adaptado de [K-MEX \(2023\)](#).

### 3.1.2.2 Módulos Conversores de Tensão CC

Para garantir uma alimentação adequada aos diferentes componentes do sistema foram utilizados módulos conversores de tensão CC. Mais especificamente, foram usados três módulos MP1584, ilustrados na figura 9, que convertem a tensão de entrada do sistema em 3.3V, para a alimentação da STM e as Ponte-H's; 5V, para alimentar a Raspberry Pi e os sensores; e 9V para abastecimento dos motores e do microcontrolador Maixduino. O modelo MP1584 foi adotado devido às suas características técnicas, tais como sua ampla faixa de tensões de entrada, de até 28V, tensão de saída ajustável, eficiência de conversão de mais de 90%, tamanho compacto e baixo custo.

Figura 9 – Módulo Conversor de Tensão MP1584.

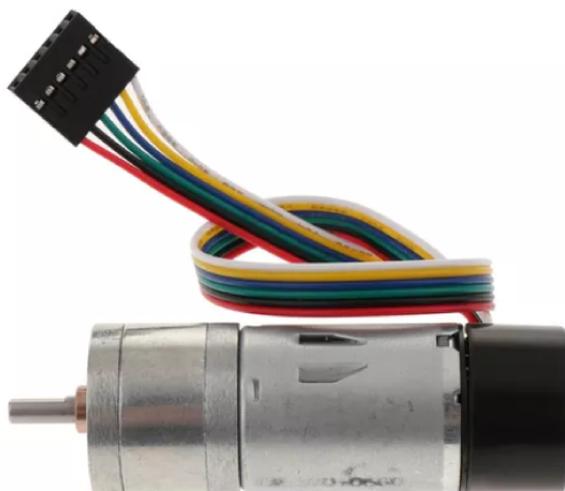


Fonte: Adaptado de [Soldered \(2023\)](#).

### 3.1.2.3 Motores

Esta implementação conta com três motores DC de 9V com caixa de redução representados pela figura 10. Dois destes motores são acoplados às esteiras do chassi e são responsáveis pela movimentação do robô. Já o terceiro, é preso a um sistema de engrenagens encarregado pela abertura e fechamento de uma garra mecânica direcionada para coleta de objetos. Considerando que cada motor de 9V necessita de um circuito de Ponte H dedicado para seu acionamento, foram utilizados três módulos TB6612FNG de canal duplo, ilustrados na figura 11, específicos para controle de motores DC de até 15V.

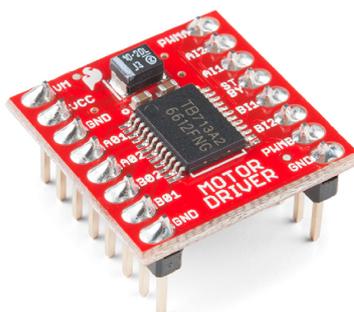
Figura 10 – Motor DC 9v.



Fonte: Adaptado de [Mercado Livre \(2023\)](#).

A escolha pelo uso deste componente baseou-se em suas propriedades físicas e operacionais, como seu tamanho compacto e sua capacidade de 1.2A de saída de corrente por canal. Por se tratar de uma ponte H de dois canais, dois motores distintos poderiam ser acionados pelo mesmo módulo, entretanto, visando dar mais potência para os motores, montou-se um circuito que dá a possibilidade de soma das saídas dos dois canais de cada módulo, oferecendo uma corrente de mais de 2A, e conseqüentemente, proporcionando maior rotação aos motores no caso do desenvolvedor achar necessário.

Figura 11 – Módulo TB6612FNG de Canal Duplo.



Fonte: Adaptado de [Sparkfun \(2024\)](#).

Um servo-motor do modelo 90g, ilustrado na figura 12, foi acoplado a uma estrutura que controla a posição da lente da câmera. O ângulo do servo-motor varia de acordo com a posição relativa do objeto ou face detectada pela câmera. A seleção deste componente deve-se ao baixo custo de aquisição e compatibilidade com esta aplicação.

Figura 12 – Servo Motor 90g.



Fonte: Adaptado de [ByteFlop \(2024\)](#).

#### 3.1.2.4 Sensores, Indicadores e Alimentação

Considerando que o robô deverá navegar em ambientes com obstáculos adversos, o sistema implementado conta com suporte ao sensor ultrassônico HC-SR04, ilustrado na figura 13. Através dele o robô é capaz de detectar, a sua frente, objetos para coleta ou quaisquer corpos que possam significar risco a sua integridade física durante sua trajetória.

Figura 13 – Sensor Ultrassônico HC-SR04.



Fonte: Adaptado de [RS-Components \(2024\)](#).

Com o objetivo de monitorar e indicar a tensão disponível na bateria, e o consumo de corrente do sistema, foi adicionado um voltímetro amperímetro digital com display, ilustrado na figura 14.

Figura 14 – Voltímetro e Amperímetro Digital.



Fonte: Adaptado de [Amazon \(2024\)](#).

Nessa mesma perspectiva, três LEDs, nas cores verde, azul e vermelha indicam eventos e estágios de operação do robô que serão descritos ao longo do trabalho. Um botão switch foi incorporado para permitir ligar e desligar o robô de forma conveniente e direta. Este botão está conectado à fonte de alimentação do sistema, uma bateria Lipo 2200mah 3s 11.1V.

## 3.2 Desenvolvimento de Firmwares

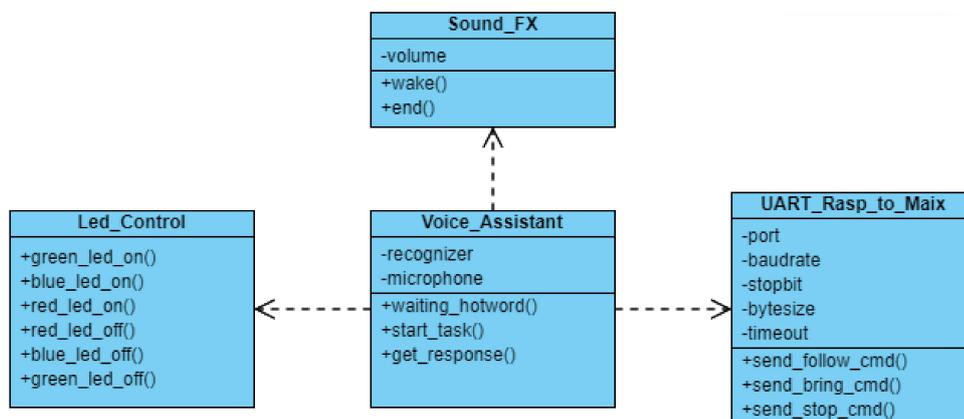
Correspondendo ao funcionamento modular do sistema, foram desenvolvidos três firmwares distintos, projetados para atender especificamente aos objetivos funcionais atribuídos a cada microcontrolador.

### 3.2.1 Firmware Raspberry Pi 3

O *firmware* embarcado na Raspberry Pi 3 desempenha o papel central de interface de interação entre o usuário e o sistema. Sua principal responsabilidade é distinguir, sinalizar e controlar os diferentes modos de operação do robô, ativando-os e desativando-os através de comandos de voz do usuário e do envio de mensagens via UART para os demais microcontroladores do sistema. Para isso, o programa integra bibliotecas de processamento de áudio com dispositivos físicos de entrada e saída, como microfones e alto-falantes. Além disso, faz uso de *Application Programming Interfaces* (APIs) de inteligência artificial que são capazes de converter comandos de voz em texto e gerar respostas coesas ao usuário.

A implementação do *firmware* foi feita na linguagem Python, e adotou o paradigma de programação orientada a objetos com o intuito de assegurar uma estrutura organizada, modular e que facilite desenvolvimento, manutenção e expansão do código. O diagrama UML (Unified Modeling Language) representado na figura 15 ilustra as classes utilizadas no sistema, bem como seus atributos e métodos.

Figura 15 – Diagrama UML do software implementado na Raspberry Pi.



Fonte: Autoral.

A classe “Led\_Control” possui métodos de controle dos três LEDs que compõem o sistema. Cada função ativa e desativa um dos LEDs, servindo como indicador de eventos e ações. A classe “Sound\_FX” comanda a reprodução dos efeitos de som do sistema. Para isso, ela conta com o atributo “volume”, que regula o ganho do áudio reproduzido, e dois métodos de reprodução de sons que indicam eventos específicos. O método “wake” reproduz um som que indica que a *wake-word* foi detectada, enquanto o método “end” reproduz um som que indica que o robô não está mais atendendo as solicitações do usuário, sendo necessário chamar a *wake-word* novamente para entrar com algum comando.

A classe “UART\_Rasp\_to\_Maix” controla o protocolo de comunicação entre a Raspberry e o Maixduino. Tem como atributos parâmetros de configuração da comunicação UART, como porta, *baudrate*, *stop-bit*, e como métodos, funções de envio de mensagens específicas que representam comandos feitos pelo usuário. Por último, a classe “Voice\_Assistant” conta com a importação de cada uma das classes anteriores, isto é, faz uso dos métodos e atributos das demais classes. É a partir dela que o microfone do sistema é configurado, e se torna hábil para captar as entradas do usuário que dão início a todas as interações do robô com o ambiente, incluindo o controle de LEDs, controle de reprodução de mídias e envio de comandos aos demais microcontroladores.

Entre as bibliotecas utilizadas neste firmware, ressaltam-se: “Speech Recognition”, “Pytttsx3”, “Aplay” e “OpenAI”. Apesar de algumas das bibliotecas contarem com recursos offline, neste trabalho foram utilizados somente funcionalidades online. Mais detalhes sobre os recursos utilizados de cada biblioteca serão descritos no capítulo 4 deste trabalho.

### 3.2.2 Firmware Maixduino

O *firmware* embarcado na placa de desenvolvimento Maixduino detecta objetos e faces por meio de modelos de inteligência artificial baseados em Deep Learning, ao mesmo tempo em que controla um servo-motor que reposiciona a lente da câmera no eixo Y conforme a movimentação do objeto ou face identificada em até 120 graus de angulação. Além disso, o programa incorpora um sistema de recebimento de comandos via UART, que atua como gatilho para a execução dos modelos de inteligência artificial, e também um sistema de envio de coordenadas para o microcontrolador da STM, utilizado para o controle dos motores acoplados a esteira do robô.

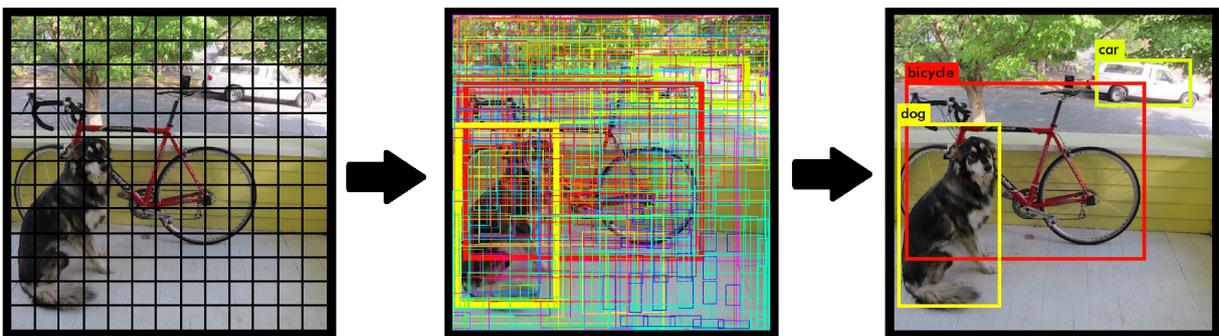
O código em questão foi feito em MicroPython, uma implementação da linguagem Python, otimizada para rodar em microcontroladores e dispositivos embarcados com recursos limitados de memória e processamento. Esta linguagem oferece uma sintaxe familiar à do Python, que permite a escrita e execução do código diretamente no microcontrolador, sem a necessidade de um sistema operacional completo.

Os modelos utilizados para o reconhecimento de faces e detecção de objetos são

baseados no sistema de detecção YOLO 2 (You Only Look Once versão 2), uma arquitetura de Rede Neural Convolutacional (RNC) amplamente conhecida e utilizada para detecção de objetos em tempo real. O YOLO 2 se destaca por sua eficiência computacional, sendo capaz de detectar múltiplos objetos em uma única passagem pela rede, o que o torna adequado para implementações em sistemas embarcados com recursos limitados de processamento.

O YOLO 2 opera recebendo uma imagem de entrada e, em seguida, gerando uma grade de caixas delimitadoras (bounding boxes) ao redor dos objetos detectados. Para cada uma dessas caixas, é atribuído um valor de confiança que indica a probabilidade (de 0 a 1) de conter um objeto e uma previsão sobre o tipo de objeto presente em cada caixa. Posteriormente, esses valores de confiança e as previsões de classe são combinados para gerar uma pontuação final, que indica a probabilidade da caixa conter um objeto específico. A figura 16 ilustra parte do processo empregado pelo YOLO 2.

Figura 16 – Diagrama representativo do funcionamento do sistema YOLO 2.



Fonte: Adaptado de YOLO (2023).

Apesar dos modelos utilizados não serem extensos, a capacidade da memória Flash nativa do Maixduino não foi suficiente para armazenar e executar dois modelos ao mesmo tempo. Isso levou à necessidade de usar um cartão de memória micro SD para alocar exclusivamente o modelo de maior tamanho. Essa abordagem é também recomendada pelo fabricante, que alerta para a possibilidade de sobrecarga da memória caso dois modelos compartilhem o mesmo espaço de armazenamento.

### 3.2.3 Firmware STM32

O *firmware* embarcado no microcontrolador da STM32 cumpre a função de, por meio de *timers*, controlar o acionamento de motores, gerir o funcionamento de um sensor ultrassônico e ativar um *buzzer*. Seu código foi programado em linguagem C, fazendo uso das bibliotecas HAL (Hardware Abstraction Layer), que oferecem uma camada de abstração de hardware que simplifica o acesso e o controle de periféricos do microcontrolador, como GPIOs, *timers*, UART, entre outros.

O controle dos motores é realizado por meio do recebimento de dados provenientes do Maixduino, via UART e fazendo uso do *Direct Access Memory* (DMA). Especificamente,

a STM recebe coordenadas provenientes do mapeamento da câmera do microcontrolador da Sipeed, e utiliza essas informações para aplicar sinais PWM coordenados aos motores, permitindo que o robô se mova para frente, para trás, para a direita ou para a esquerda.

Dentre as várias estratégias que poderiam ser adotadas para o recebimento destes dados de localização, a adoção de interrupções por DMA se justifica pela capacidade de proporcionar transferências de dados em alta velocidade entre os periféricos e a memória. Através desse método, as informações podem ser movidas rapidamente pelo DMA sem nenhuma ação da CPU, mantendo os recursos da CPU livres para outras operações, o que não aconteceria em outros modelos de transmissão, como por interrupções simples e polling.

Vale ressaltar que, considerando o papel que este *firmware* desempenha dentro do sistema, percebe-se que sua funcionalidade poderia ser integrada a um dos programas embarcados na Raspberry Pi ou no Maixduino. No entanto, optou-se por separá-lo em um microcontrolador distinto, não apenas para evitar sobrecarga de processamento nos demais microcontroladores, mas também com o viés de aprimoramento das habilidades em linguagem C e familiarização com a plataforma STM.

### 3.3 Validação e Integração dos Firmwares

Após o desenvolvimento de cada um dos *firmware* descritos, deu-se início ao estágio de validação individual de cada programa e a subsequente integração dessas soluções em um único sistema coeso. Na etapa de validação individual, cada *firmware* foi submetido a testes e análises para garantir que atendesse aos requisitos estabelecidos e funcionasse conforme o esperado. Isso envolveu verificar a funcionalidade correta de cada componente, bem como o processamento de dados, a interação com periféricos e a comunicação com outros microcontroladores ou dispositivos externos.

Após a validação individual de todos os *firmwares*, ocorreu a etapa de integração, na qual essas soluções foram combinadas em um único sistema. Isso envolveu a interconexão dos diferentes componentes dos *firmwares*, de modo que pudessem trabalhar em conjunto de forma harmoniosa. Durante a integração, foram realizados testes abrangentes para garantir que a comunicação entre os diversos módulos fosse efetiva e que o sistema como um todo funcionasse de acordo com as especificações definidas.

### 3.4 Desenvolvimento da PCI

Com o objetivo de proporcionar um ambiente estável e eficiente para o funcionamento do sistema, foi projetada, e posteriormente fabricada, uma placa de circuito impresso capaz de atender às demandas elétricas e físicas do sistema. O design e layout da

placa foi realizado no *software* KiCad e teve como principal diretriz garantir a integração precisa de todos os componentes de forma eficiente.

### 3.5 Desenvolvimento da Estrutura 3D

Para proteger e alocar o sistema proposto, foi desenvolvida uma estrutura 3D modular compatível com as funcionalidade do robô e com os aspectos físicos do chassi adquirido e ilustrado na figura 17. Todas as peças desta estrutura foram criadas e projetadas utilizando o *software* Fusion 360 e foram posteriormente fabricadas sob medida por meio da tecnologia de impressão 3D. O modelo estrutural projetado foi totalmente autoral e considerou aspectos físicos e estéticos, proporcionando uma estrutura de acabamento eficiente, personalizada e de baixo custo.

Figura 17 – Estrutura do Chassi SN2500.



Fonte: Adaptado de [Maker Buying \(2024\)](#).

### 3.6 Testes Finais

Por fim, ao final de todas as etapas de desenvolvimento, foram conduzidos testes para avaliar a eficiência e a confiabilidade das funcionalidades propostas, garantindo que o sistema atenda aos requisitos estabelecidos. Os testes abrangeram diferentes cenários de operação, abordando tanto situações ideais quanto possíveis cenários de contingência.

## 4 Resultados

Os resultados do trabalho foram organizados em duas grandes seções que descrevem o robô construído e os testes aos quais ele foi submetido. Serão abordados também, aspectos como desempenho e funcionalidades incluídas. Um vídeo demonstrativo do robô está disponível no link: <https://youtu.be/cWnuLTotcqo?si=hWuPNN8QQ-hs7uCb>.

### 4.1 O robô

Seguindo a metodologia do trabalho e visando atingir os objetivos propostos, a primeira versão do robô assistente pessoal, batizado de Wisey-1 e ilustrado na figura 18, foi construído com sucesso. O anexo A contém mais imagens da versão final do robô. Detalhes sobre suas características de operação, aspectos funcionais e estruturais serão descritas nos tópicos seguintes.

Figura 18 – Wisey-1, robô desenvolvido como resultado deste trabalho.



Fonte: Autoral.

### 4.1.1 Modos de Operação

O sistema foi projetado para funcionar em três modos de operação distintos: Finder Mode, Follow Mode e Conversation Mode. Cada um desses modos desempenha interações específicas do robô com o ambiente e requer comandos de voz específicos para sua ativação e desativação. Essa segmentação permite um funcionamento e fluxo de execução das tarefas do robô mais organizado.

O Finder Mode, é o modo de operação do robô em que ele busca em seu entorno por objetos solicitados pelo usuário. Ao encontrar determinado objeto, ele se movimenta em direção a ele até que o sensor ultrassônico, juntamente com o *buzzer* indiquem que a distância para o agarre foi atingida. Neste momento, o robô interrompe sua trajetória e aciona as garras, capturando o objeto. Com o objeto capturado, ele busca um rosto, para quem entregar o objeto concedido.

No Follow Mode, o robô procura por um rosto a ser seguido. Quando uma face humana é identificada, ele analisa se essa é também a mais próxima. Em caso afirmativo, o robô se movimenta em direção a ela até que a distância de segurança seja atingida, ajustando sempre sua posição para que esta distância se mantenha fixa entre o robô e o usuário.

Por fim, o Conversation Mode é o modo no qual o robô responde a perguntas e dialoga com o usuário, apresentando habilidade para formular respostas coesas e compreender contextos. Todos os modos de operação são interrompidos pelo comando de voz “parar”.

### 4.1.2 Aspectos Funcionais de Software

#### 4.1.2.1 Detecção de comandos de voz e Interatividade

A responsividade do sistema, em termos de reconhecimento de comandos e capacidade de reação, é essencialmente proporcionada pela integração das bibliotecas “Speech Recognition”, “Pyttsx3”, “Pygame” e “OpenAI”. A biblioteca “Speech Recognition” faz o reconhecimento de fala através de APIs como a Google Cloud Speech API, que envia o áudio captado pelo microfone de entrada para uma nuvem de processamento, e retorna o conteúdo em texto. Com este recurso, a estratégia aplicada para reconhecimento dos comandos foi a detecção de palavras-chave no texto convertido, de tal forma que o robô é programado para realizar determinadas tarefas a partir da identificação de palavras-chave na entrada de voz do usuário.

Com essa mesma lógica, foi aplicado o conceito de *hotword* ou *wake-word*, isto é, estratégia de ativação de determinada função do sistema a partir da detecção de uma palavra específica previamente estabelecida pelo desenvolvedor, similar a “Alexa” e “Ok Google” nos assistentes virtuais da Amazon e Google, respectivamente. Neste trabalho,

usou-se a *wake-word* “robô” para sinalizar o início de qualquer pedido feito ao robô. A figura 19 ilustra uma tabela de todas as palavras definidas como chave para tomada de decisão do sistema.

Figura 19 – Tabela relacionando termos ou expressões específicas reconhecidas pelo sistema, com seu papel ou propósito no sistema, e seus efeitos resultantes na interface-homem-máquina.

Palavra-chave/Expressão no comando de voz	Função	Ação (Interface Homem-Máquina)
<b>Robô</b>	Wake-word	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acende LED azul</li> <li>• Reproduz <i>ringtone</i> de ativação</li> </ul>
<b>Trazer</b>	Ativa Finder Mode	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acende LED vermelho</li> <li>• Reproduz a mensagem “Ok, irei te levar este objeto” ou “Desculpe, não sou capaz de reconhecer este objeto.”</li> </ul>
<b>Siga-me</b>	Ativa Follow Mode	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acende LED vermelho</li> <li>• Reproduz a mensagem “Ok, irei te seguir.”</li> </ul>
<b>Ausência da palavra “Trazer” e da expressão “Siga-me”</b>	Ativa Conversation Mode	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acende LED vermelho</li> <li>• Reproduz uma resposta coesa gerada por Inteligência Artificial</li> </ul>
<b>Parar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desativa qualquer modo de operação que esteja ativo</li> <li>• Faz necessário um novo chamado da Wake-word para funcionamento do robô</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apaga LED Azul</li> <li>• Apaga LED vermelho (se aceso)</li> <li>• Reproduz <i>ringtone</i> de desativação.</li> </ul>

Fonte: Autoral.

Quando o robô reproduz mensagens e respostas em áudio, a conversão das frases em formato de texto para áudio é possível a partir da biblioteca “Pyttsx3”, que sintetiza voz a partir de mensagens escritas. Através dela, o sistema fornece respostas, programadas ou fornecidas pelo ChatGPT, no formato de áudios compreensíveis emitido pelos alto-falantes. A biblioteca “Pyttsx3” tem suporte a vozes em diferentes línguas. No caso deste trabalho, a língua escolhida foi o português do Brasil.

Com o propósito de dar retornos auditivos que facilitem a experiência interativa do usuário com o sistema, a biblioteca “Pygame”, que reproduz áudios locais sob comando, foi empregada para a reprodução de *ringtones* e consequente sinalização de eventos durante a interação com o robô. Um som é emitido pelos alto-falantes quando a *wake-word* é detectada, e outro som diferente é reproduzido também quando o comando “parar” é dado pelo usuário, ou quando o microfone não capta nenhuma interação depois de 10 segundos

que a *wake-word* foi detectada. Em ambos os casos, o som reproduzido indica que um novo chamado da *wake-word* deve ser feito para que o robô inicie uma tarefa novamente.

#### 4.1.2.2 Finder Mode

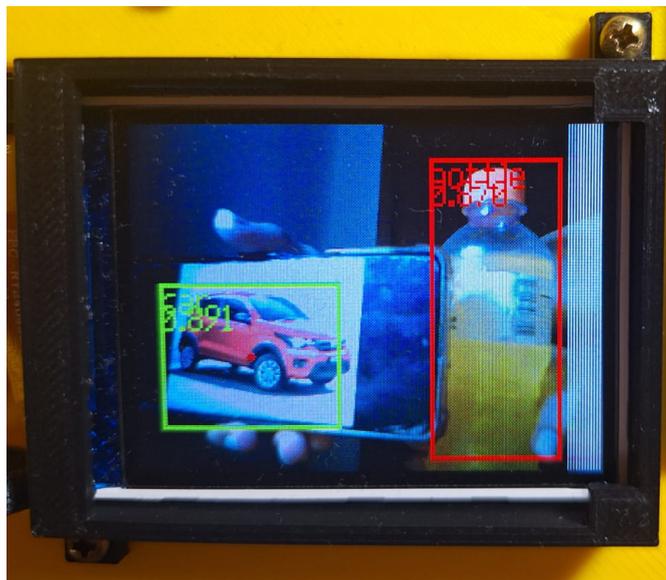
Como mostrado na figura 19, o gatilho para a ativação do Finder Mode é a presença da palavra “trazer” no comando introduzido pelo usuário após a detecção da *wake-word*. Especificamente neste modo de operação, é necessária uma segunda palavra-chave para que o sistema entenda qual o objeto desejado pelo usuário. Nesse sentido a estratégia adotada foi de além de verificar a presença da palavra “trazer”, analisar a presença do nome dos objetos os quais o modelo de inteligência artificial embarcado no Maixduino foi treinado para identificar.

Se o nome do objeto desejado proferido pelo usuário estiver entre os objetos indetectáveis pelo modelo, a Raspberry Pi envia a mensagem “bring-“ seguida do objeto requerido via UART para o Maixduino. Vale ressaltar que, considerando que o modelo de reconhecimento de objetos foi estruturado na língua inglesa, faz-se necessário, antes do envio da mensagem via UART, um tratamento dentro do código de tradução dos nomes dos objetos solicitados na língua portuguesa, para o inglês. Dessa forma, no caso do usuário entrar com o comando “Poderia me trazer uma garrafa”, a mensagem que o Maixduino receberá será “bring-bottle“. Se o objeto desejado não estiver entre os objetos indetectáveis pelo modelo, o robô responde a mensagem: “Desculpe, não sou capaz de reconhecer este objeto“.

Assim que o comando é recebido pelo microcontrolador da Sipeed, o modelo de detecção de objetos é ativado e o Display LCD exibe a imagem captada pela câmera. Através dos recursos do kit Maixduino, o sistema pode identificar objetos e aplicar retângulos ao redor deles. Um retângulo verde é aplicado em volta do objeto desejado, e, como mostrado na figura 20, no caso de outros objetos além do requisitado, o microcontrolador desenha um contorno retangular vermelho.

Além disso, o algoritmo também calcula a área e a coordenada do ponto central do retângulo verde demarcado, assinalando seu centro com um ponto vermelho. As coordenadas deste ponto servem como referência para o movimento do servo-motor acoplado a estrutura que sustenta a câmera, e para os motores da esteira do robô. O servo-motor, controlado pelo próprio Maixduino, ajusta a posição da câmera ao longo do eixo Y de acordo com a posição relativa do ponto central do objeto, realizando compensações para manter o centro da estrutura e da câmera, alinhado ao centro do objeto. Enquanto isso, os motores da esteira, controlados pela STMF411, respondem à variação da posição do objeto em relação ao eixo X. Mais especificamente, as coordenadas do ponto central do retângulo são enviadas continuamente via UART para o microcontrolador da STM. Este componente, por sua vez, recebe as coordenadas e aplica nos motores sinais PWM que fazem o robô

Figura 20 – Tela do Display LCD, acoplado à estrutura, mostrando dois objetos reconhecidos pelo MaixDuino, uma garrafa e um carro.



Fonte: Autoral.

seguir o objeto e ajustar sua posição para estar alinhado ao centro do alvo.

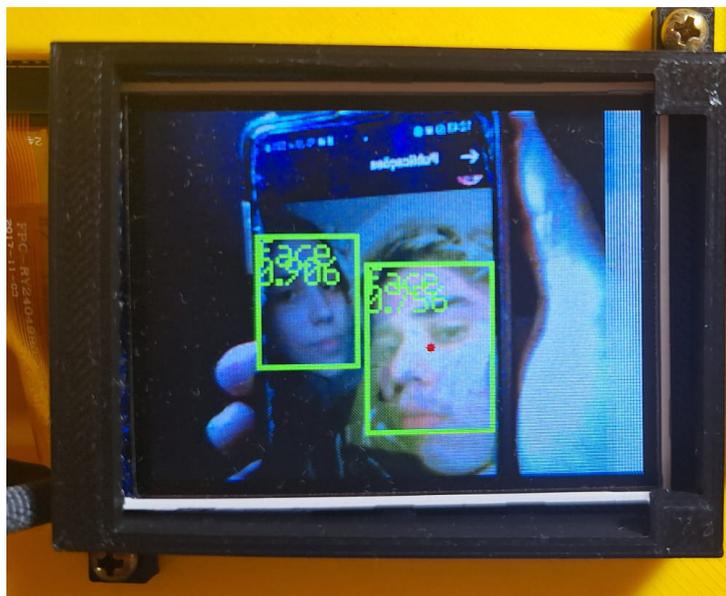
Dessa forma, o robô segue o objeto até que o sensor detecte um corpo a uma distância igual à estabelecida como limite. Neste momento, o *buzzer* é ativado e os motores deixam de girar. Dependendo do objeto localizado a frente, o robô toma diferentes decisões, podendo ativar o motor das garras no caso de ser objeto desejado, ou no caso de ser um corpo desconhecido, permanecer parado até que o obstáculo seja retirado de sua frente. Com o objeto capturado, ele inicia um funcionamento similar ao Follow Mode, descrito a seguir.

#### 4.1.2.3 Follow Mode

O gatilho para a ativação do Follow Mode é a presença da expressão “siga-me” no comando introduzido pelo usuário após a detecção da *wake-word*. Quando o gatilho é identificado, a Raspberry Pi envia a mensagem “follow” para o Maixduino, via UART. Assim que o comando é recebido pelo microcontrolador da Sipeed, o modelo de reconhecimento facial é ativado e o Maixduino identifica faces e aplica retângulos ao redor delas na imagem exibida no Display LCD.

Como mostrado na figura 21, no caso de mais de um rosto ser identificado, o algoritmo é projetado para seguir aquele cujo retângulo possui maior área, geralmente o mais próximo ao robô. Similarmente ao funcionamento do Finder Mode, após a detecção do alvo desejado, o algoritmo calcula a área e a coordenada do ponto central do retângulo demarcado, assinalando-o com um ponto vermelho, usado como referência para movimentação do servo-motor e dos motores da esteira.

Figura 21 – Tela do Display LCD, acoplado à estrutura, mostrando duas faces reconhecidas.



Fonte: Autoral.

O robô segue o rosto alvo até que o retângulo atinja um valor de área pré-estabelecido. Entende-se através desse valor de área, que o robô se encontra no nível de proximidade limite, e os motores deixam de girar. De acordo com a movimentação do usuário, o robô ajusta sua posição para se manter sempre dentro desse limite de distância. Neste modo, quando o sensor ultrassônico detecta um corpo estranho a uma distância igual à estabelecida como limite, o *buzzer* também é ativado e os motores obrigatoriamente deixam de girar.

#### 4.1.2.4 Conversation Mode

Quando uma pergunta ou frase não possui a estrutura ou palavras-chave necessárias para serem identificadas como gatilhos para o Finder Mode ou Follow Mode, é interpretada como uma requisição ao Conversation Mode. Nestes casos, a API da OpenAI é acionada e a mensagem convertida em texto é enviada diretamente à inteligência artificial ChatGPT. Esta, por sua vez, responde de acordo com sua base de dados sobre o assunto em questão. Neste modo de operação não há movimentação de nenhuma parte do robô.

#### 4.1.2.5 Considerações Gerais

Enquanto nenhum modelo está em execução, o display do Maixduino exibe a mensagem “Waiting Command”, mostrada na figura 22. Os LEDs presentes na parte frontal do robô também são elementos de interação com o usuário, sinalizando eventos e estados de operação do robô. O LED na cor verde acende quando o sistema está ligado e pronto para operação. O LED azul aceso significa que a *wake-word* foi detectada, e a partir

desse momento, o robô ouvirá e atenderá às requisições do usuário. Ele desliga quando a palavra “parar” é captada pelo microfone ou quando não há entrada do usuário nos 10 segundos seguintes ao chamado. O LED vermelho representa que o sistema está ocupado, seja pelo carregamento inicial do sistema, ou pela execução de alguma tarefa específica. Assim como o LED azul, ele também só desliga quando as tarefas são interrompidas pela palavra “parar” dita pelo usuário. Um fluxograma da operação geral do software do sistema está contida no anexo B, e um diagrama do relacionamento dos firmwares no anexo C. Mais detalhes sobre os códigos implementados estão disponíveis no link: <[https://github.com/thiagofcm/Personal\\_Assistant\\_Robot\\_TCC](https://github.com/thiagofcm/Personal_Assistant_Robot_TCC)>.

Figura 22 – Tela do Display LCD, integrado à estrutura, mostrando a mensagem “Waiting command”.



Fonte: Autoral.

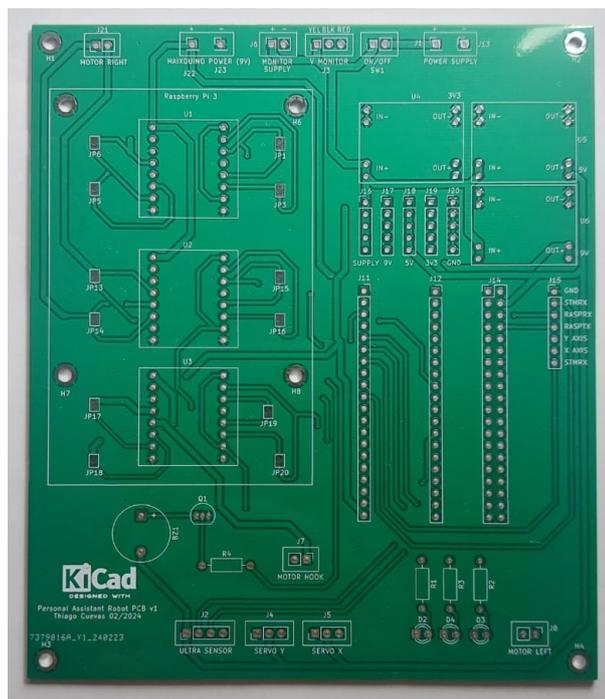
### 4.1.3 Aspectos Funcionais de Hardware

A composição do robô em termos de *hardware* gira em torno principalmente de uma PCI pensada, projetada e fabricada para atender aos requisitos específicos do projeto em termos de tamanho, capacidade, forma e layout. O resultado foi a placa ilustrada na figura 23.

A placa foi pensada para componentes chamados de *Pin Through Hole*, isto é, que utilizam o método de montagem de inserção dos terminais dos dispositivos eletrônicos em perfurações da placa de circuito impresso. Esta abordagem simplificou o processo de montagem, pois, após a aquisição dos componentes, a instalação dependeu exclusivamente de técnicas básicas de soldagem elétrica.

A placa possui duas camadas de cobre, representadas nos anexos D e E. As trilhas da placa apresentam três espessuras diferentes, sendo elas 0.3mm, 0.525mm e 1.07mm. Para as conexões de alimentação foram adotadas as trilhas de maior espessura, pela possibilidade de passagem de correntes mais elevadas. Por segurança, esta trilha suporta descargas de corrente de até 3A. As rotas de acionamento dos motores possuem a espessura de 0.525mm, e também leva em consideração o nível de corrente que pode vir a circular pelas conexões.

Figura 23 – PCI projetada e fabricada especificamente para este trabalho



Fonte: Autoral.

Por último, para as conexões de sinal entre microcontroladores e sensores, foi adotada a espessura de 0.3mm assegurando a passagem de corrente de até 1A. O anexo F contém o esquemático elétrico utilizado de base para o roteamento da placa.

#### 4.1.4 Aspectos Estruturais

A estrutura do robô foi projetada e construída para atender aos requisitos específicos do sistema, garantindo não apenas estabilidade e resistência, mas também facilitando a montagem e manutenção. A seguir, serão apresentados os principais elementos e componentes estruturais do projeto, juntamente com as principais características e propriedades dos métodos de fabricação e materiais utilizados.

##### 4.1.4.1 Chassi

O chassi do robô, já ilustrado na figura 17, é fabricado em alumínio. Suas dimensões são de 275mm de largura, 190mm de comprimento e 95mm de altura. Com um peso aproximado de 1100g, este chassi foi selecionado por sua resistência, leveza e capacidade de suportar as cargas do sistema.

Entre suas principais características está a presença de esteiras de plástico, que são acopladas aos motores da estrutura e proporcionam tração adequada em uma variedade de superfícies. Essas esteiras garantem uma movimentação suave e estável do robô, permitindo que ele navegue com facilidade por diferentes tipos de terreno. Além disso, o chassi possui

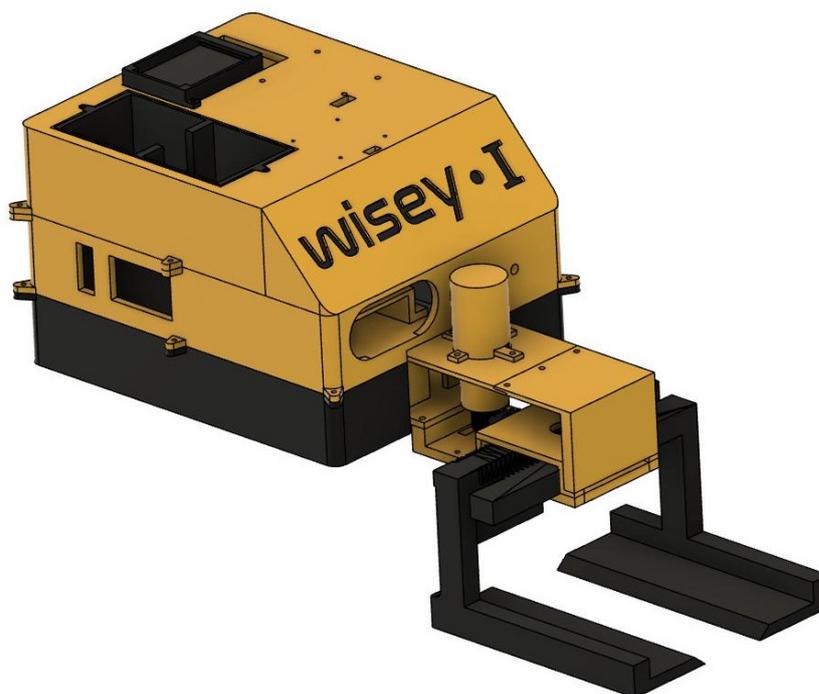
pontos de fixação e suporte para os demais componentes do sistema, garantindo uma montagem segura e organizada.

#### 4.1.4.2 Estrutura 3D

As peças da estrutura foram fabricadas utilizando PLA de 1.75mm, um material comumente utilizado na impressão 3D devido à sua facilidade de uso e resistência. O design de todas as peças que serão mostradas a seguir é autoral e levou em consideração além de aspectos estéticos, a capacidade de integração com os componentes utilizados e distribuição de peso.

A figura 24 ilustra o modelo 3D completo da estrutura, com todos os componentes projetados incluídos. A partir deste modelo, foram impressas todas as peças necessárias para a montagem da estrutura. A seguir, serão descritos os principais componentes que compõem a estrutura.

Figura 24 – Estrutura 3D completa do Robô.



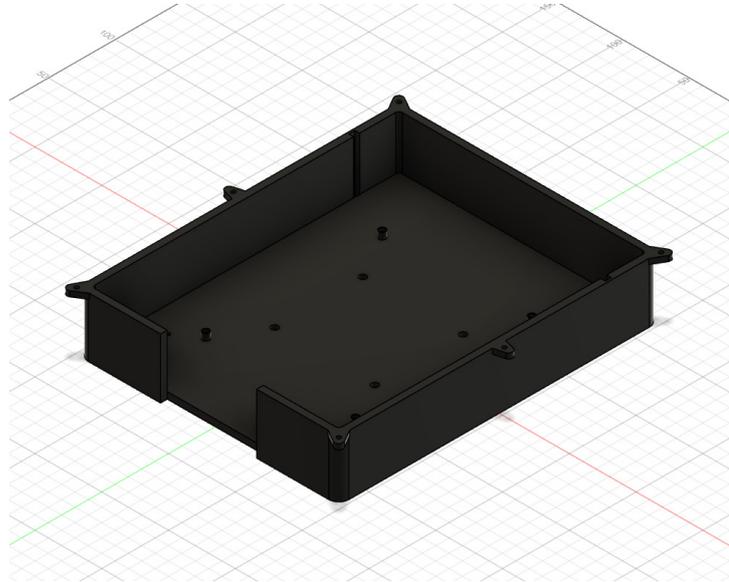
Fonte: Autoral.

#### 4.1.4.3 Base

A base desenvolvida para o robô proporciona estabilidade e suporte físico para os demais elementos do sistema. Seu design foi pensado levando em consideração a compatibilidade com os pontos de fixação do chassi, garantindo uma integração sólida e segura. Mais especificamente, quatro parafusos garantem que a base e os demais componentes que vem acima dela, se mantenham presos a estrutura do chassi durante a

locomoção e as operações do robô. A figura 25 mostra a estrutura 3D da base projetada via *software*. Seu formato retangular foi escolhido para promover uma distribuição de peso mais uniforme, facilitando o equilíbrio do robô durante sua operação.

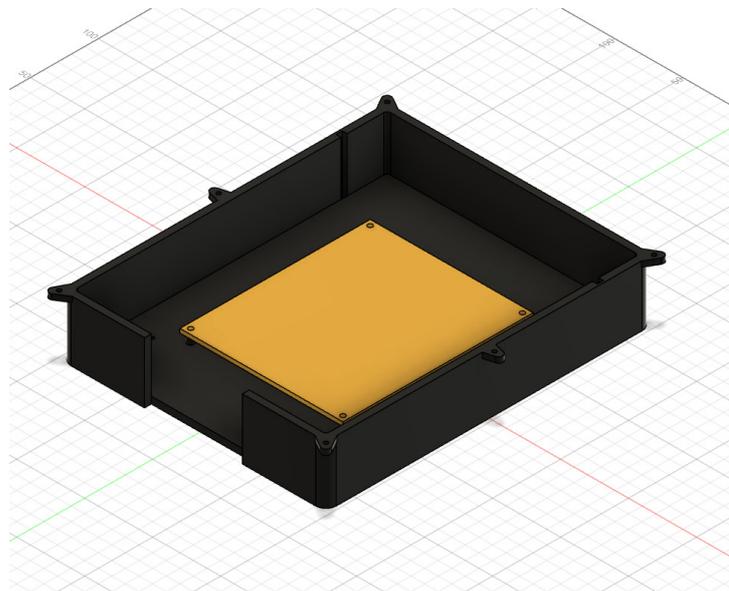
Figura 25 – Estrutura 3D da Base projetada no software Fusion360.



Fonte: Autoral.

Uma segunda peça, ilustrado na figura 26, é acoplada a base para dar suporte físico a PCI. Para isso, este componente além de possuir as dimensões similares a placa, tem furos compatíveis com os furos de fixação da PCI, garantindo estabilidade e a integridade estrutural do circuito.

Figura 26 – Estrutura 3D da estrutura de sustentação da PCI já acoplada ao modelo da Base.

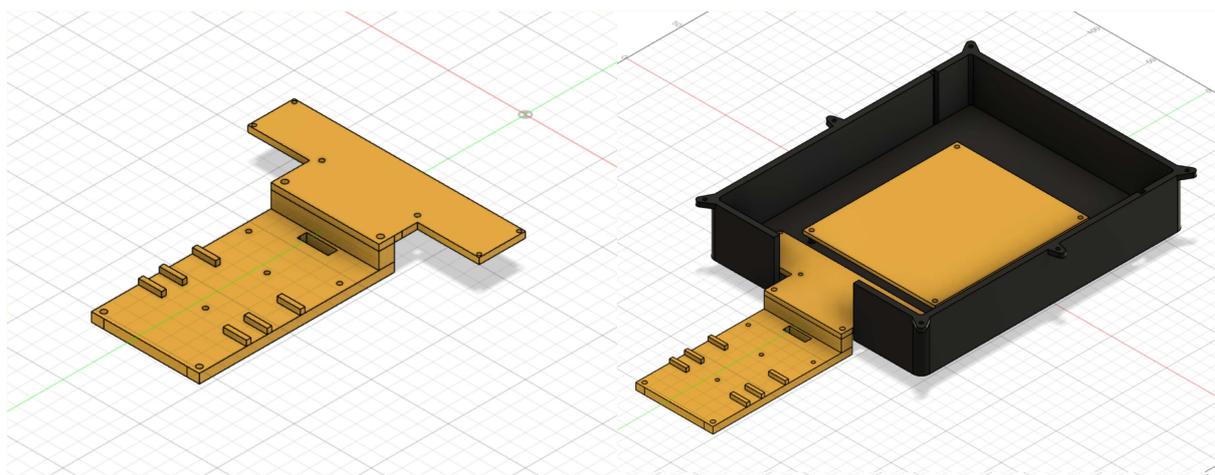


Fonte: Autoral.

#### 4.1.4.4 Suporte para as Garras

Para proporcionar estabilidade e funcionalidade às garras do robô, foi desenvolvido um suporte específico, ilustrado na figura 27, responsável por garantir o correto posicionamento e movimentação das garras e do sistema de engrenagens.

Figura 27 – Estrutura 3D do suporte para garras e engrenagens em vista individual (à esquerda) e acoplada à Base (à direita).

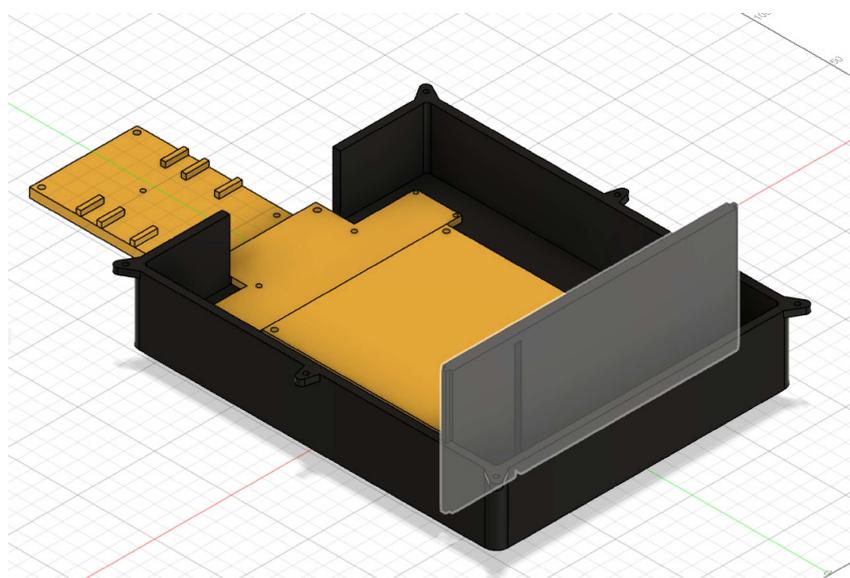


Fonte: Autoral.

#### 4.1.4.5 Divisória para a Bateria

Para a proteção e alojamento adequado da bateria, uma divisória foi projetada e integrada à estrutura do robô. Essa peça, destacada na figura 28 tem como principal objetivo isolar os contatos da bateria dos demais terminais presentes na PCI, prevenindo possíveis curto-circuitos e garantindo a segurança do sistema.

Figura 28 – Divisória para bateria destacada e acoplada a Base.

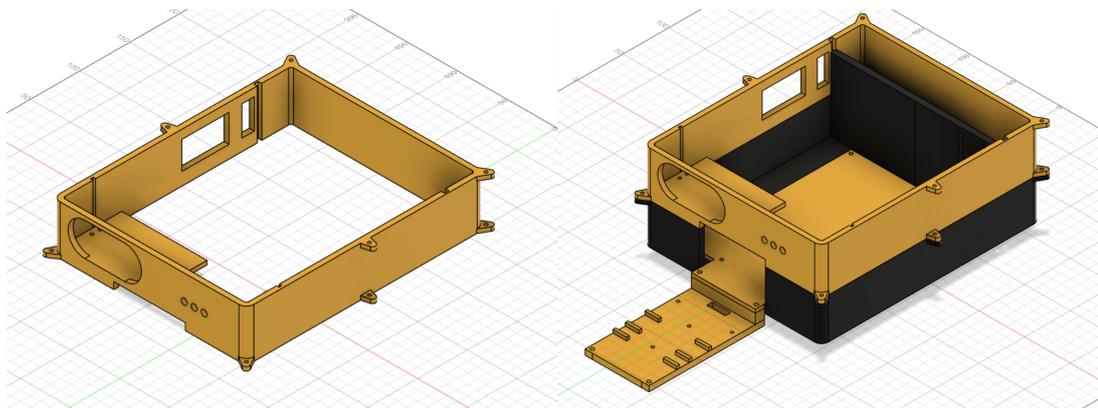


Fonte: Autoral.

#### 4.1.4.6 Cobertura Intermediária

Foi projetada uma camada intermediária para servir como plataforma de suporte para a divisória da bateria, a webcam, o conjunto de LEDs, o monitor de tensão e corrente, e o botão de acionamento do robô. Seu design garante compatibilidade e encaixe apropriado para cada um dos componentes nele incorporados. A figura 29 mostra seu modelo 3D individual e ele integrado às demais estruturas citadas anteriormente.

Figura 29 – Cobertura Intermediária do robô em vista individual (à esquerda), e acoplada aos demais componentes citados abaixo dela (à direita).

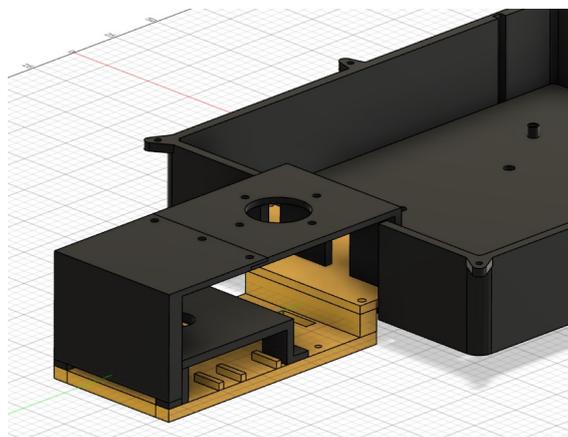


Fonte: Autoral.

#### 4.1.4.7 Suporte para o motor das Garras

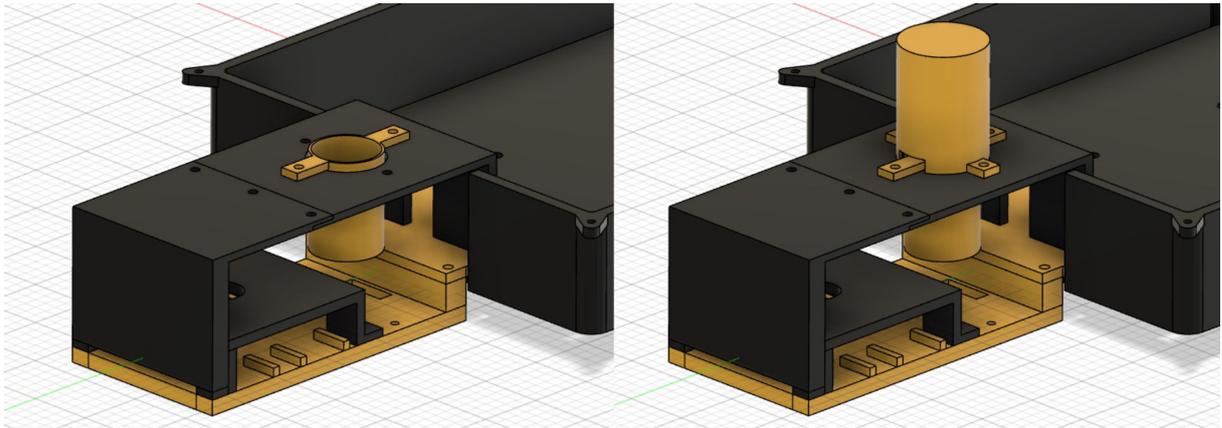
Para assegurar estabilidade e proteção adequada ao motor que movimentava as garras, foi desenvolvida uma estrutura composta por vários componentes modulares, os quais se encaixam entre si e também com o suporte para as garras. A figura 30 mostra a estrutura que cobre o suporte das garras e que possui pontos de fixação para as estruturas que alocam o motor. A figura 31 mostra as peças que alocam o motor já integradas ao suporte.

Figura 30 – Parte do suporte que serve como cobertura para as garras e base para o motor.



Fonte: Autoral.

Figura 31 – Suporte do motor (à esquerda) e sua cobertura protetora (à direita).

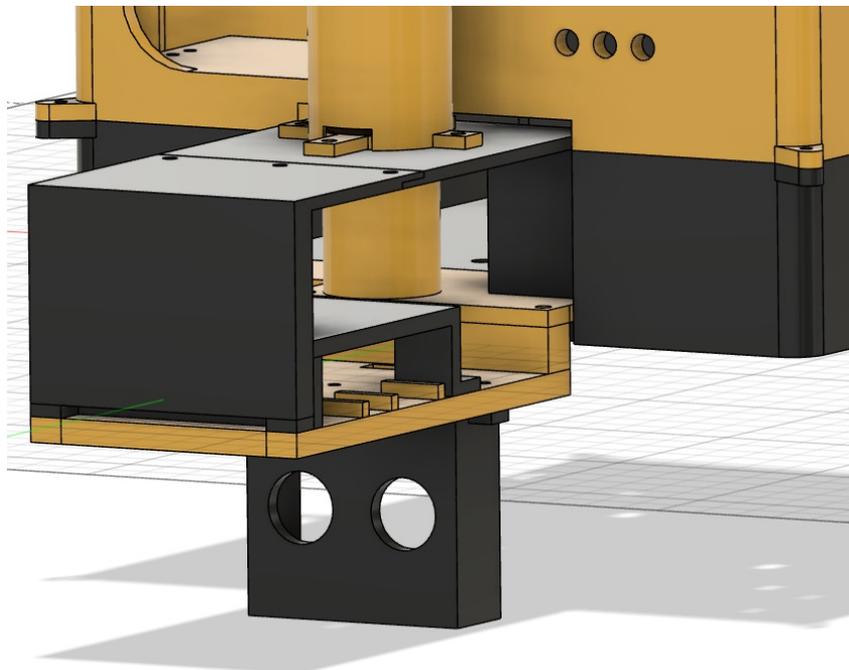


Fonte: Autoral.

#### 4.1.4.8 Suporte para o sensor ultrassônico

Foi desenvolvida uma estrutura para alojar e posicionar o sensor ultrassônico de forma precisa e estável no robô. Este suporte, ilustrado na figura 32 foi projetado para garantir que o sensor fique adequadamente posicionado, permitindo que ele detecte objetos à frente do robô. A estrutura é fixada abaixo do suporte para as garras, uma localização estratégica que maximiza a eficiência do sensor.

Figura 32 – Suporte para o sensor ultrassônico.

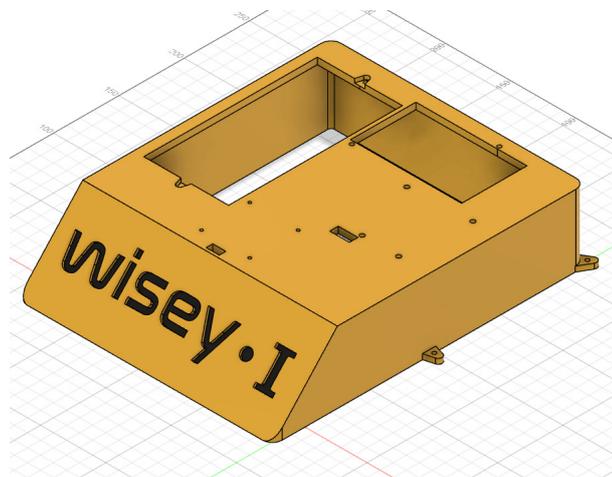


Fonte: Autoral.

#### 4.1.4.9 Camada Superior

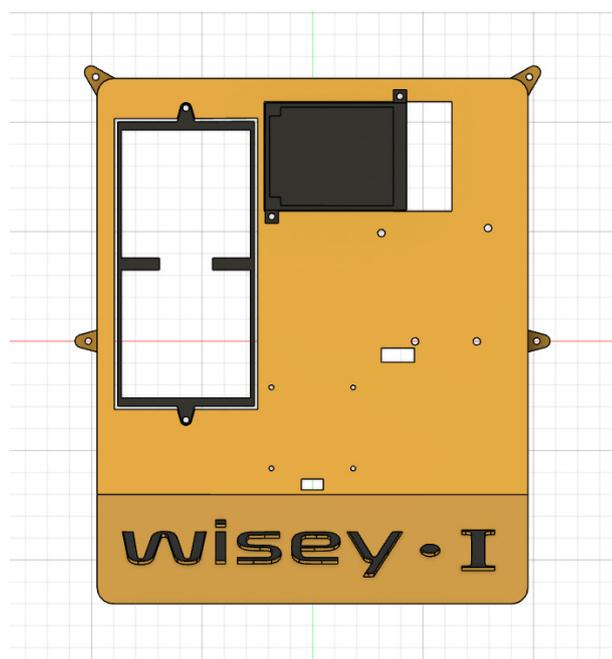
A peça que cobre o sistema como um todo foi desenvolvida para fornecer proteção e integração aos componentes internos do robô. Ela foi projetada levando em consideração também, aspectos estéticos, estampando, em preto, o nome Wisey-I dado ao robô. Esta estrutura conta com espaços para passagem de fios e pontos de fixação para as estruturas que alocam os alto-falantes, o suporte da câmera, o suporte do display LCD e o Maixduino, assegurado no interior na peça. A figura 33 mostra a peça em vista individual, enquanto a figura 34 ilustra os suportes e componentes auxiliares já incorporados.

Figura 33 – Camada final da Estrutura.



Fonte: Autoral.

Figura 34 – Camada final da Estrutura com suportes a alto-falantes e display LCD integrados.

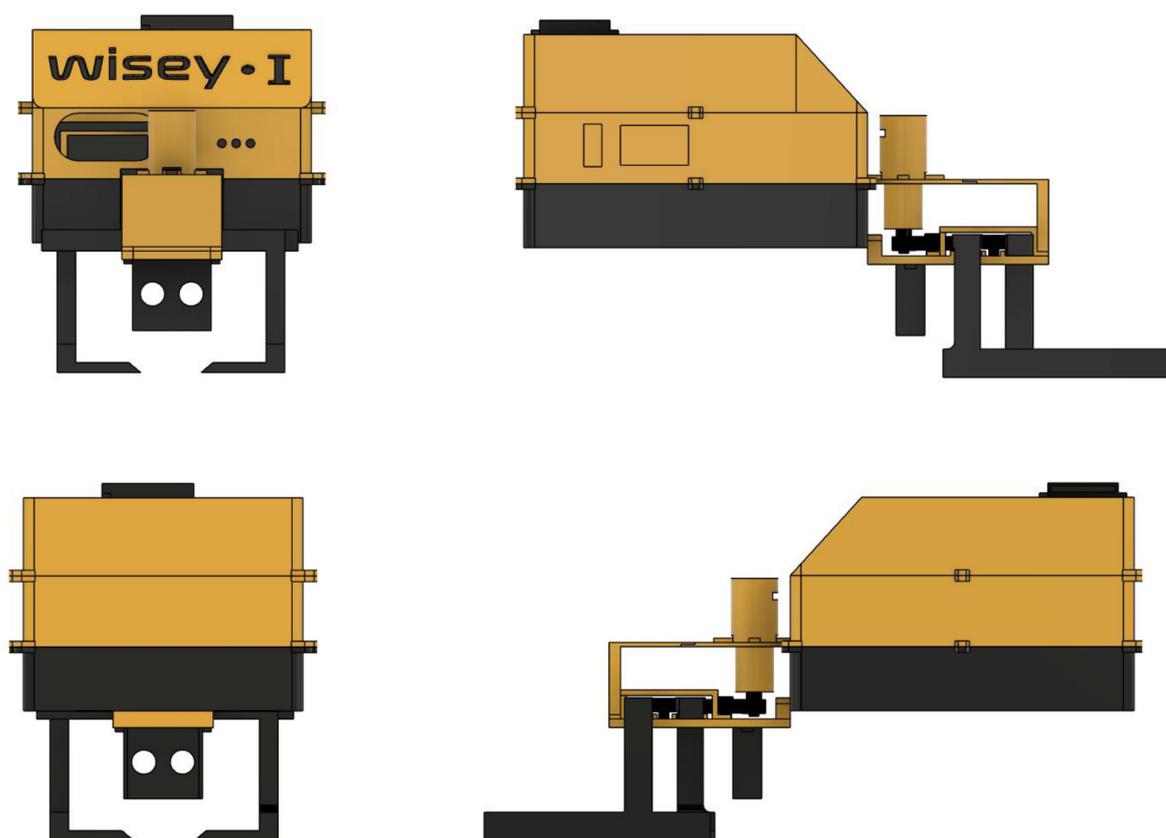


Fonte: Autoral.

#### 4.1.4.10 Estrutura Completa

A integração das peças descritas compõem o robô. A figura 35 mostra todos os componentes estruturais juntos e em diferentes perspectivas.

Figura 35 – Modelo 3D de todas as peças que compõem o robô em vista frontal (no canto superior esquerdo), vista traseira (no canto inferior esquerdo), vista lateral esquerda (no canto inferior direito) e vista lateral direita (no canto superior direito).



Fonte: Autoral.

## 4.2 Testes Finais

Nesta seção, serão apresentados os testes conduzidos para validar o desempenho e funcionamento do robô, bem como os resultados obtidos.

### 4.2.1 Testes Conversation Mode

Os testes do modo de operação Conversation Mode apontaram um bom desempenho do robô ao demonstrar capacidade de responder diversas perguntas com respostas coerentes e contextualizadas. O sistema conseguiu compreender e interpretar corretamente o contexto das perguntas, adaptando suas respostas de acordo com o conteúdo da conversa. Além

disso, o robô logrou manter um diálogo fluído e natural, proporcionando uma experiência de interação agradável e satisfatória para o usuário. Para validar o funcionamento desse modo de operação, algumas perguntas foram elaboradas e feitas ao robô com o propósito de coletar e analisar as respostas. Alguns dos exemplos de diálogos feitos entre um usuário e o robô estão representados na figura 36.

Figura 36 – Diálogos obtidos através do modo de operação Conversation Mode.

Diálogo 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Usuário:</b> Robô, vamos conversar?</li> <li>- <b>Wisey:</b> Claro, estou aqui para ajudar. O que você gostaria de conversar ou perguntar?</li> <li>- <b>Usuário:</b> Que tipo de filme voce me recomenda?</li> <li>- <b>Wisey:</b> Que tal um filme de ficção científica para uma experiência emocionante e cativante. Posso sugerir alguns filmes interessantes se desejar.</li> <li>- <b>Usuário:</b> Por favor, sugira.</li> <li>- <b>Wisey:</b> Que tal assistir Blade Runner 2049, Ex Machine ou Interstellar? São filmes de ficção científica aclamados que vão te cativar. Divirta-se.</li> <li>- <b>Usuário:</b> Obrigado.</li> </ul>
Diálogo 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Usuário:</b> Robô, preciso fazer um pagamento. Quero comprar um produto que custa R\$ 40,00, mas só tenho R\$ 50,00 para pagar. Quanto é o troco?</li> <li>- <b>Wisey:</b> Se você quer um produto de R\$ 40,00 e tem R\$ 50,00 para pagar, seu troco é de R\$ 10,00. Ao final você terá um produto e R\$ 10,00 de troco. Posso ajudar em mais alguma coisa?</li> <li>- <b>Usuário:</b> Não, obrigado.</li> <li>- <b>Wisey:</b> Sem problemas.</li> </ul>
Diálogo 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Usuário:</b> Robô, você sabe onde é a farmácia mais próxima?</li> <li>- <b>Wisey:</b> Recomendo usar aplicativos de mapa em seu smartphone para encontrar a farmácia mais próxima. Eles são práticos e podem te ajudar rapidamente a encontrar locais próximas a você. Espero ter ajudado.</li> </ul>
Diálogo 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Usuário:</b> Robô, para que serve o remédio paracetamol?</li> <li>- <b>Wisey:</b> O paracetamol é um analgésico e antitérmico utilizado para aliviar dores e febres. Recomenda-se seguir a posologia do remédio e consultar um médico em caso de dúvidas. Espero ter esclarecido sua pergunta.</li> <li>- <b>Usuário:</b> Estou com dores de cabeça, você recomenda que eu use este remédio?</li> <li>- <b>Wisey:</b> Se a dor de cabeça for leve e moderada e você não possuir contraindicações, o paracetamol pode ser uma opção para aliviar a dor. De qualquer forma, em casos de dores persistentes, é recomendado consultar um médico. Espero que melhore.</li> </ul>

Fonte: Autoral.

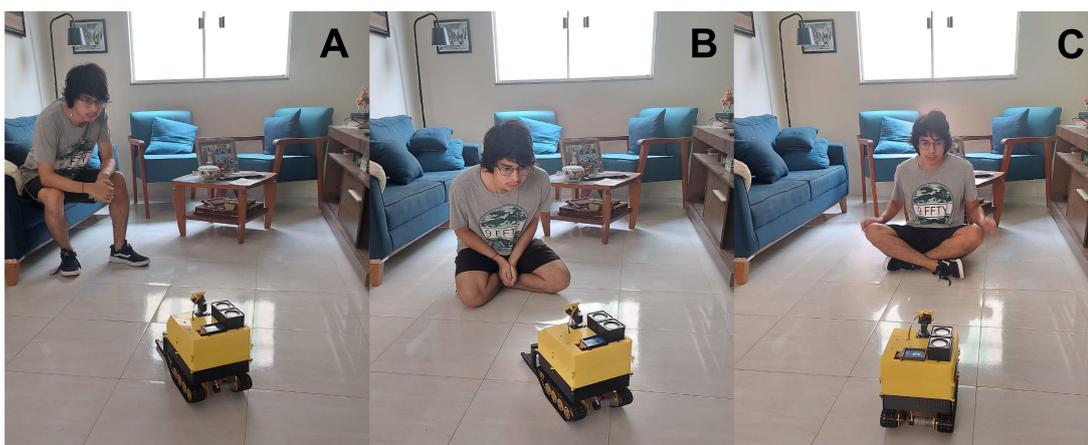
Vale ressaltar que, por ser um sistema que gera respostas pela inteligência artificial Chat GPT 3, as respostas seguem um banco de dados atualizado pela ultima vez em 2022, e podem variar mesmo para perguntas idênticas. Nenhuma das respostas neste modo de operação foi programada pelo desenvolvedor.

## 4.2.2 Testes Follow Mode

Nos testes do modo Follow Mode, os resultados foram positivos, evidenciando a habilidade do robô em seguir faces estáticas e em movimento com certo grau de precisão. Durante os testes, o robô acompanhou com sucesso a face da pessoa mais próxima a ele, ajustando sua posição de forma constante para manter a distância projetada, sem desvios significativos.

Para validar o funcionamento deste modo de operação, foram realizados testes em diferentes cenários e condições. Primeiramente, foram selecionados ambientes com iluminação variada para avaliar a capacidade da câmera e do robô de identificar e seguir a face em diferentes condições de luz. Em seguida, foram realizados testes com diferentes velocidades de movimento da pessoa para avaliar a capacidade de resposta e precisão do robô em seguir movimentos rápidos ou lentos. Os resultados desses testes, como esperado, demonstraram uma melhor eficácia do modo Follow Mode em contextos de melhor iluminação e em que o rosto alvo se move de forma mais lenta. Além disso, Observou-se que por limitações físicas de altura e do movimento do servo motor que sustenta a câmera, o robô não é plenamente capaz de rastrear o rosto de um humano em pé, sendo necessário, de alguma forma, que o usuário abaixe ou permaneça sentado para que o robô consiga percebê-lo. A figura 37 ilustra um conjunto de registros feitos em gravação do Follow Mode funcionando e sendo capaz de seguir o usuário em um ambiente doméstico e iluminado.

Figura 37 – Wisey I percebendo um rosto sentado em um sofá (A), se afastando de um rosto cuja distância ultrapassa o limite de segurança (B) e seguindo o rosto de um usuário sentado no chão (C).



Fonte: Autoral.

Como mostrado na figura 38, Wisey I não foi capaz de identificar um rosto em uma fotografia, no mesmo ambiente, porém com iluminação menor.

Figura 38 – Rosto apontado para câmera, em um ambiente com baixa iluminação e não conseguindo ser identificado pelo sistema.



Fonte: Autoral.

### 4.2.3 Testes Finder Mode

Considerando que o modelo de reconhecimento de objetos consegue detectar uma lista limitada de artefatos (composta por: avião, bicicleta, pássaro, barco, garrafa, ônibus, carro, gato, cadeira, vaca, mesa de jantar, cachorro, cavalo, moto, pessoa, vaso de planta, ovelha, sofá, trem, monitor de TV) e considerando que nem todos eles são objetos encontrados em um ambiente doméstico, os testes do Finder Mode foram conduzidos com imagens em escala menor de alguns dos objetos reconhecíveis pelo modelo, colados em estruturas leves e adaptadas para o agarre mais fácil do robô.

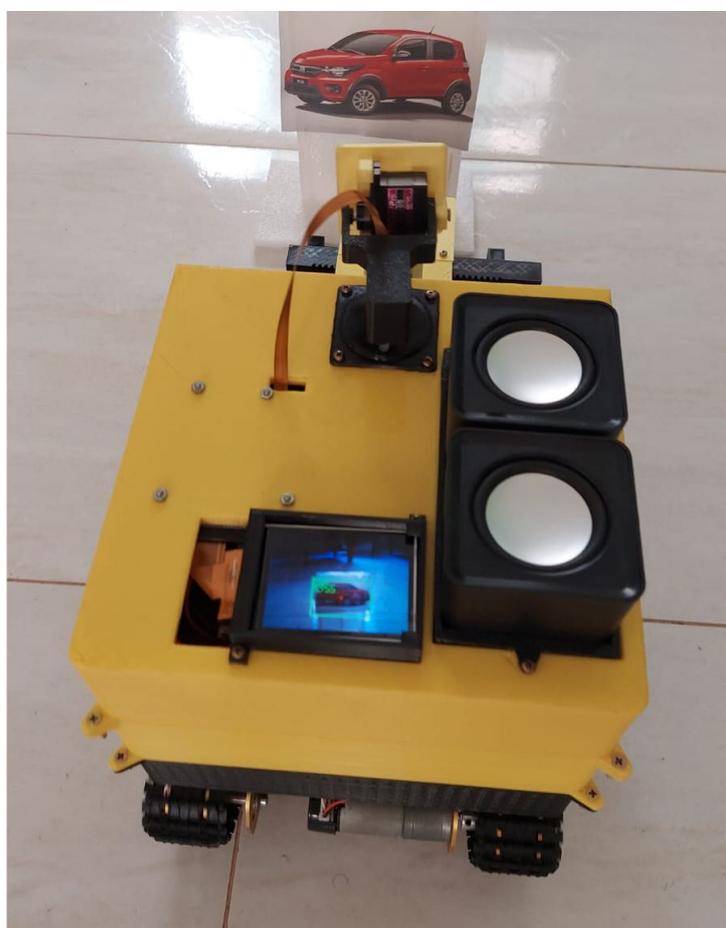
Por se tratar de um sistema de detecção baseado no mesmo princípio do Follow Mode, o Finder Mode apresentou resultados positivos quanto a identificação e rastreamento de objetos. O robô mostrou sucesso em, além de identificar os objetos designados, mover-se em direção a eles, conforme o esperado. No entanto, notou-se uma limitação na identificação dos objetos considerando a dimensão dos objetos proposta nos testes, sendo necessário posicionar-los próximos a câmera para que sejam identificados. Ademais, percebeu-se que, ao tentar capturar o alvo com as garras, o robô enfrentou dificuldades em realizar o procedimento corretamente. Tais limitações de operação resultaram em uma execução parcial da tarefa, impedindo o robô de realizar completamente a ação desejada. A figura 39 ilustra limitações na identificação do objeto requerido, no caso, um carro, e a figura 40 mostra o objeto solicitado detectado porém a uma distância curta.

Figura 39 – Sistema não sendo capaz de identificar a figura de um carro posicionado à sua frente.



Fonte: Autoral.

Figura 40 – Sistema identificando a figura de um carro, porém a curta distância.



Fonte: Autoral.

## 5 Discussão e Perspectivas Futuras

Sabe-se que, em termos práticos, quando se segue alguém ou algo em movimento, geralmente, o seguidor posiciona-se atrás do alvo, tendo uma visão da parte traseira do que está a ser seguido. Da mesma forma, é conveniente que um robô assistente pessoal seja capaz de seguir um usuário de costas para o robô, isto é, sem que sua face esteja direcionada a ele. Similarmente, é favorável que os objetos a serem trazidos por um robô assistente não tenham que estar obrigatoriamente no chão para que possam ser alcançados. Apesar da ciência destes fatos, é importante ressaltar que a busca por uma performance inteligente e que se aproxime mais com a de um humano nos leva a soluções complexas, de alto custo econômico e colaborativo. Considerando este contexto e mantendo-se resiliente diante dos desafios dessa área de pesquisa, este estudo restringe seu escopo de atuação a fim de exercitar conhecimentos e criar soluções adaptativas que servem como fundamentos práticos para, no futuro, otimizar e superar as limitações globais da área. Nessa perspectiva, o conteúdo discutido a seguir, analisa os resultados obtidos e os debate levando em consideração principalmente o escopo do trabalho, levantando possíveis melhorias de *hardware*, *software* e funcionalidade, além de projetar desdobramentos futuros para o aprimoramento da pesquisa na área.

A partir dos resultados obtidos, percebeu-se que, embora o *hardware* do sistema, como um todo, tenha funcionado corretamente para esta aplicação, há ainda bastante espaço para otimização, principalmente em termos de redução de componentes e conseqüentemente espaço físico. O sistema foi segmentado em três microcontroladores distintos, cada um responsável por funções específicas. No entanto, já existem produtos de custo mais alto no mercado, como os computadores da família Jetson Nano, fabricados pela NVIDIA, que são controladores integrados com tecnologia suficiente para abrigar a operação de todos os sistemas embarcados utilizados neste trabalho. Essa abordagem de consolidação de *hardware* poderia simplificar a arquitetura do sistema, reduzir custos e potencialmente melhorar a eficiência global.

Na mesma perspectiva, o design da PCI poderia ser mais compacto e eficiente se não tivessem sido utilizados módulos, isto é, se os componentes instalados na placa se reduzissem aos chips com os circuitos necessários projetados e já integrados à placa. Tal observação se aplica tanto aos microcontroladores como aos módulos conversores de tensão, Ponte-Hs e os demais periféricos. A integração desses componentes em uma único circuito reduziria as dimensões da placa, conseqüentemente o espaço físico ocupado por ela, e potencialmente os custos de produção.

Quanto aos aspectos estruturais, apesar do resultado positivo e esteticamente

harmônico obtido, a dificuldade de projetar um sistema de acoplamento de engrenagens com configuração adequada para movimentar as garras foi considerável. A complexidade dessa tarefa exigiu várias tentativas e adaptações das peças até que o arranjo se tornasse eficiente. Entretanto, mesmo com essas modificações, condições como o material das engrenagens (PLA) e o torque do motor contribuíram para que o sistema de garras não funcionasse corretamente. Nesse sentido, engrenagens feitas de um material mais maciço e rígido proporcionariam um acoplamento mais eficaz e uma força maior para o movimento das garras. Além disso, é provável que um motor de passo com torque melhor dimensionado conseguisse girar as garras com mais facilidade e oferecesse um controle de rotação mais preciso em comparação com um motor DC, como o adotado no projeto. A falta de sucesso nesta etapa de prototipagem do sistema de engrenagens foi o principal obstáculo que comprometeu o funcionamento do modo de operação Finder Mode.

No que tange os demais modos de operação, os resultados positivos dos testes do Conversation Mode e do sistema de detecção da *wake-word* evidenciam não apenas a eficácia da integração do algoritmo de processamento de áudio com os periféricos, mas também o uso correto e organizado dos recursos de processamento de linguagem natural implementados no *firmware* da Raspberry Pi 3. Esses resultados ressaltam a capacidade do sistema de reconhecer comandos de voz de forma precisa e de gerar respostas coerentes, o que contribui significativamente para uma interação eficiente com o usuário e relacionada ao conceito de interação-humano-robô centrada no humano, descrita no capítulo 2. Apesar da API de inteligência artificial utilizada para gerar respostas ter satisfeito as demandas do projeto, a utilização de outras aplicações similares, mas com outros propósitos, poderia incrementar a experiência do usuário, como a possibilidade do robô ter um senso de localização geográfica capaz de indicar comércios e estabelecimentos próximos, ou a capacidade de reproduzir uma música disponível nas plataformas digitais de *streaming*.

De maneira análoga, os testes bem-sucedidos do modo de operação Follow Mode indicam que as interações entre os microcontroladores responsáveis pelo processamento de imagem, controle dos motores e comunicação entre os sistemas foram eficientes. No entanto, foi observada uma limitação no alcance de detecção de faces, assim como na detecção de objetos, seja pelo alcance do motor que conduz a câmera, como pela próprio dispositivo de captura utilizado. A limitação de movimento do servo, juntamente com a baixa resolução da câmera, limita consideravelmente a capacidade de identificação de alvos a distâncias mais longas, afetando a eficácia dos modo de operação Follow Mode e Finder Mode em ambientes com objetos e rostos mais afastados ou pouco iluminados. Ainda sim, os resultados obtidos sustentam que o robô desenvolvido é uma alternativa útil não só para idosos, mas para cuidadores ou enfermeiros que necessitem de suporte físico ou interativo em um contexto onde se exija atenção para com o idoso, proporcionando assistência e interação social.

Diante do exposto, em futuras aplicações, seria vantajoso investir em um *hardware* mais otimizado, capaz de abrigar em um unico dispositivo, a operação de todos os sistemas embarcados adotados. Além disso, seria recomendável desenvolver uma garra de funcionamento mais simples ou um sistema de garras dimensionado adequadamente e que utilize materiais que garantam melhor desempenho. Da mesma forma, também seria benéfico adquirir uma câmera de maior resolução e um motor que suporte sua movimentação de forma mais precisa, proporcionando um alcance maior de identificação para os modelos de IA. Paralelamente, o desenvolvimento de modelos de inteligência artificial que reconheçam uma gama maior de objetos, especificamente, objetos encontrados em ambiente doméstico, como copos, talheres ou embalagens, enriqueceria utilidade do robô e deste modo de operação. Por fim, é de bastante relevância fazer um levantamento acerca das APIs disponíveis que possam proporcionar uma experiência de interação, companhia e utilidade ainda mais ampla para os usuários, com o objetivo de incrementar o sistema e atender as demandas do público alvo.

## 6 Conclusão

No decorrer deste trabalho, desenvolveu-se e implementou-se um sistema robótico multifuncional capaz de interagir com o ambiente por meio de comandos de voz e reconhecimento de faces e objetos. A integração harmoniosa de diferentes sistemas embarcados, como a Raspberry Pi 3, o Maixduino e o microcontrolador STM32, permitiu o desenvolvimento de funcionalidades distintas, como detecção de objetos, seguimento de rostos e interação por voz. A partir dos testes propostos, observaram-se resultados positivos, destacando os modos de operação Conversation Mode e o Follow Mode, que demonstraram a eficácia da integração dos algoritmos de processamento de áudio e visão computacional com os periféricos do robô. No entanto, foram identificados desafios funcionais a serem superados, como a falta de um sistema mecânico de garras mais eficaz e a limitação na detecção de objetos devido à resolução limitada da câmera. Apesar disso, a solução proposta ainda se mostra como uma alternativa de baixo custo para o suporte no cuidado doméstico de pessoas idosas com limitações motoras.

Por fim, este trabalho contribuiu para o avanço da pesquisa em sistemas robóticos assistivos e interativos, explorando a integração de diferentes tecnologias para criar um sistema versátil e funcional no contexto referido. As lições aprendidas ao longo do processo de desenvolvimento destacam a importância da seleção adequada de *hardware* e o design de algoritmos. Com isso, a compreensão sobre as possibilidades e os desafios da interação humano-robô foi ampliada, abrindo caminho para futuras pesquisas e aplicações práticas nesse campo em constante evolução.

# Referências Bibliográficas

AMAZON. Placa raspberry pi 3 modelo b. 2023. Disponível em: <<https://www.amazon.com.br/RS-Components-RASPBERRYPI3-MODB-1GB-Raspberry-modelo/dp/B01N13X8V1>>. Citado na página 30.

Amazon. Medidor de volt com display digital, voltímetro de corrente digital. 2024. Disponível em: <<https://www.amazon.com.br/Voltmetro-Corrente-Revestimento-DC0-100V-Conveniente/dp/B0CHBMCGC9>>. Citado na página 36.

BONIFAS, R. P. et al. Aging and place in long-term care settings: influences on social relationships. *J Aging Health*, United States, v. 26, n. 8, p. 1320–1339, dez. 2014. Citado na página 16.

BRASIL. Lei nº 13.146, artigo 74, de 6 de julho de 2015. institui a lei brasileira de inclusão da pessoa com deficiência (estatuto da pessoa com deficiência). *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2015. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2015/lei/l13146.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/l13146.htm)>. Citado na página 17.

BRUZZONE, L.; NODEHI, S. E.; FANGHELLA, P. Tracked locomotion systems for ground mobile robots: A review. *Machines*, v. 10, n. 8, 2022. ISSN 2075-1702. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2075-1702/10/8/648>>. Citado na página 21.

ByteFloP. Servo motor 9g sg90 towerpro. 2024. Disponível em: <<https://www.bytefloP.com.br/micro-servo-9g-sg90-towerpro>>. Citado na página 36.

CAT. ATA - VII Reunião do Comitê de Ajudas Técnicas (CAT). In: COORDENADORIA NACIONAL PARA INTEGRAÇÃO DA PESSOA PORTADORA DE DEFICIÊNCIA. *VII Reunião do Comitê de Ajudas Técnicas - CAT*. Secretaria Especial dos Direitos Humanos), 2007. p. 4. Disponível em: <[https://www.assistiva.com.br/Ata\\_VII\\_Reuni%C3%A3o\\_do\\_Comite\\_de\\_Ajudas\\_T%C3%A9cnicas.pdf](https://www.assistiva.com.br/Ata_VII_Reuni%C3%A3o_do_Comite_de_Ajudas_T%C3%A9cnicas.pdf)>. Citado na página 15.

CEBOLLADA, S. et al. A state-of-the-art review on mobile robotics tasks using artificial intelligence and visual data. *Expert Systems with Applications*, v. 167, p. 114195, 2021. ISSN 0957-4174. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095741742030926X>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 24.

DAMIANO, L.; DUMOUCHEL, P. Anthropomorphism in human–robot co-evolution. *Frontiers in Psychology*, v. 9, 2018. ISSN 1664-1078. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2018.00468>>. Citado na página 22.

DAUTENHAHN, K. Socially intelligent robots: dimensions of human-robot interaction. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, England, v. 362, n. 1480, p. 679–704, abr. 2007. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.

D'ONOFRIO, G.; SANCARLO, D. Assistive robots for healthcare and human–robot interaction. *Sensors*, v. 23, n. 4, 2023. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/23/4/1883>>. Citado na página 19.

ERINLE, T. J.; OLADEBEYE, D. H.; ADEMILOYE, I. B. *A Review of Robotics and Artificial Intelligence as Indisputable Implements for Developing Country Advanced Technology Development*. OSF Preprints, 2022. Disponível em: <[osf.io/57skm](https://osf.io/57skm)>. Citado na página 21.

FEIL-SEIFER, D.; MATARIC, M. J. Defining socially assistive robotics. IEEE, 2005. Citado na página 15.

FONG, T.; NOURBAKHSI, I.; DAUTENHAHN, K. A survey of socially interactive robots. *Robotics and Autonomous Systems*, v. 42, n. 3, p. 143–166, 2003. ISSN 0921-8890. Socially Interactive Robots. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092188900200372X>>. Citado na página 21.

ISO. *International Organization for Standardization - 8373:2021(E) - Robotics Vocabulary*. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/75539/1bc8409322eb4922bf680e15901852d2/ISO-8373-2021.pdf>>. Acesso em: 20 de dezembro de 2023. Citado na página 19.

JAFRI, R. et al. Computer vision-based object recognition for the visually impaired in an indoors environment: a survey. *The Visual Computer*, v. 30, n. 11, p. 1197–1222, nov. 2014. Citado na página 24.

JAKHAR, D.; KAUR, I. Artificial intelligence, machine learning and deep learning: definitions and differences. *Clinical and Experimental Dermatology*, v. 45, n. 1, p. 131–132, 01 2020. ISSN 0307-6938. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/ced.14029>>. Citado na página 23.

JAKHOTIYA, Y.; HAQUE, I. *Improving Assistive Robotics with Deep Reinforcement Learning*. 2022. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2209.02160>>. Citado na página 22.

K-MEX. Mini speaker sp-8900. 2023. Disponível em: <<http://kmex.com.br/exibir.asp?pag=Exibir&parent=Som&chave=134&sb=271&tsb=Caixas-de-Som&prod=957>>. Citado na página 34.

KAPLAN, F. et al. Taming robots with clicker training: A solution for teaching complex behaviors. 11 2001. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/2489373\\_Taming\\_robots\\_with\\_clicker\\_training\\_A\\_solution\\_for\\_teaching\\_complex\\_behaviors](https://www.researchgate.net/publication/2489373_Taming_robots_with_clicker_training_A_solution_for_teaching_complex_behaviors)>. Citado na página 21.

LEITE, E. Aplicação de machine learning em sistemas embarcados de borda: um estudo de caso. 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/38588>>. Citado na página 28.

LEO, M. et al. Computer vision for assistive technologies. *Computer Vision and Image Understanding*, v. 154, p. 1–15, 2017. ISSN 1077-3142. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1077314216301357>>. Citado na página 24.

Logitech. C270 hd webcam. 2023. Disponível em: <<https://www.logitech.com/pt-br/products/webcams/c270-hd-webcam.960-000694.html>>. Citado na página 33.

- Maker Buying. Sn2500 shock absorption metal robot tank chassis caterpillar suspension. 2024. Disponível em: <<https://www.makerbuying.com/product/sn2500-shock-absorption-metal-robot-tank-chassis-caterpillar-suspension/>>. Citado na página 41.
- MARQUIS, P.; PARDE, H.; PAPINI, O. *A Guided Tour of Artificial Intelligence Research: Volume III: Interfaces and Applications of Artificial Intelligence*. [S.l.]: Springer Cham, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 22.
- Mercado Livre. Dc motor 9v. 2023. Disponível em: <[https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1253577788-dc-3v-6v-9v-12v-24v-verme-voltada-reduco-motor-com-salo-\\_JM](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1253577788-dc-3v-6v-9v-12v-24v-verme-voltada-reduco-motor-com-salo-_JM)>. Citado na página 35.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. *Boletim temático da biblioteca do Ministério da Saúde*. [S.l.], 2022. v. 2. Disponível em: <[https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/boletim\\_tematico/saude\\_idoso\\_outubro\\_2022-1.pdf](https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/boletim_tematico/saude_idoso_outubro_2022-1.pdf)>. Citado na página 15.
- MOHAMMED, A. A. *A Brief Introduction on Artificial Intelligence*. IJARIIT - International Journal Of advance research, Ideas And Innovations In Technology, 2020. 254-257 p. Disponível em: <<https://www.ijariit.com/manuscripts/v6i2/V6I2-1238.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- MOLLARET, C. et al. A multi-modal perception based assistive robotic system for the elderly. *Computer Vision and Image Understanding*, v. 149, p. 78–97, 2016. ISSN 1077-3142. Special issue on Assistive Computer Vision and Robotics - "Assistive Solutions for Mobility, Communication and HMI". Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1077314216000758>>. Citado na página 24.
- MORENO, J. et al. Design, implementation and validation of the three-wheel holonomic motion system of the assistant personal robot (apr). *Sensors*, v. 16, n. 10, 2016. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/16/10/1658>>. Citado na página 21.
- Mouser Electronics. Sipeed maixduino kit for risc-v ai + iot. 2022. Disponível em: <[https://br.mouser.com/pdfDocs/Product\\_Overview-SeedStudioSipeedMaixduinoKit.pdf](https://br.mouser.com/pdfDocs/Product_Overview-SeedStudioSipeedMaixduinoKit.pdf)>. Citado na página 29.
- Mouser Electronics. Dfrobot stm32f411 blackpill development board. 2023. Disponível em: <<https://br.mouser.com/new/dfrobot/dfrobot-stm32f411-blackpill-board/>>. Citado na página 27.
- NOVIELLO, C. *Mastering STM32: A Step-by-step Guide to the Most Complete ARM Cortex-M Platform, Using a Free and Powerful Development Environment Based on Eclipse and GCC*. Leanpub, 2016. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=ZZnfzQEACAAJ>>. Citado na página 25.
- OKARMA, K. Applications of computer vision in automation and robotics. *Applied Sciences*, v. 10, n. 19, 2020. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/19/6783>>. Citado na página 24.

- ONU. *Organização das Nações Unidas - Convention on the Rights of Persons with Disabilities and Optional Protocol*. [S.l.], 2006. Disponível em: <<https://www.un.org/disabilities/documents/convention/convoptprot-e.pdf>>. Acesso em: 20 de dezembro de 2023. Citado na página 16.
- ONU. *Organização das Nações Unidas - World Population Ageing 2013*. [S.l.], 2013. Disponível em: <<https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/ageing/WorldPopulationAgeing2013.pdf>>. Acesso em: 19 de dezembro de 2023. Citado na página 15.
- PERRY, T. E.; ANDERSEN, T. C.; KAPLAN, D. B. Relocation remembered: perspectives on senior transitions in the living environment. *Gerontologist*, United States, v. 54, n. 1, p. 75–81, jul. 2013. Citado na página 16.
- RASPBERRY PI FOUNDATION. *Raspberry Pi 3 Model B*. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://us.rs-online.com/m/d/4252b1ecd92888dbb9d8a39b536e7bf2.pdf>>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 31.
- RENDYANSYAH, R. Implementation of mfcc and svm for voice command recognition as control on mobile robot. *Jurnal Ecotipe (Electronic, Control, Telecommunication, Information, and Power Engineering)*, 2022. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:252963010>>. Citado na página 21.
- RS-Components. Ultrasonic distance sensor hc-sr04 5v version. 2024. Disponível em: <<https://no.rs-online.com/web/p/bbc-micro-bit-add-ons/2153181>>. Citado na página 36.
- SAWIK, B. and et al. *Robots for Elderly Care: Review, Multi-Criteria Optimization Model and Qualitative Case Study*. MDPI, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2227-9032/11/9/1286>>. Citado na página 15.
- SCHULZ, R. et al. Advancing the Aging and Technology Agenda in Gerontology. *The Gerontologist*, v. 55, n. 5, p. 724–734, 08 2014. ISSN 0016-9013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/geront/gnu071>>. Citado na página 17.
- SHANMUGAVEL, B.; T, R.; R, K. Applications and future scope of robotics-a review. 06 2018. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/326293920\\_Applications\\_and\\_Future\\_scope\\_of\\_Robotics-A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/326293920_Applications_and_Future_scope_of_Robotics-A_Review)>. Citado 3 vezes nas páginas 19, 21 e 25.
- SIPEED. Maixduino development board. *Applied Sciences*, 2019. Disponível em: <[https://wiki.sipeed.com/hardware/en/maix/maixpy\\_develop\\_kit\\_board/maix\\_duino.html](https://wiki.sipeed.com/hardware/en/maix/maixpy_develop_kit_board/maix_duino.html)>. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 29.
- SNPD. *Secretaria Nacional de Promoção dos Direitos da Pessoa com Deficiência - Cartilha do Censo 2010, Pessoas com Deficiência Física*. [S.l.], 2012. Disponível em: <<https://inclusao.ena.gov.br/wp-content/uploads/2018/05/cartilha-censo-2010-pessoas-com-deficiencia-reduzido-original-eleitoral.pdf>>. Acesso em: 19 de dezembro de 2023. Citado na página 15.
- Soldered. Step-down module mp1584 3a. 2023. Disponível em: <<https://soldered.com/product/step-down-module-mp1584-3a/>>. Citado na página 34.

- Sparkfun. Raspberry gpio pinout. 2023. Disponível em: <<https://learn.sparkfun.com/tutorials/raspberry-gpio/gpio-pinout>>. Citado na página 31.
- Sparkfun. Sparkfun motor driver - dual tb6612fng. 2024. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/products/14451>>. Citado na página 35.
- STMICROELECTRONICS. *STM32F411xC*. [S.l.], 2017. Rev. 7. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- SUJATHA, P. V. Introduction to robotics. p. 3, 04 2021. Disponível em: <<https://ijarsct.co.in/ICISCT007.pdf>>. Citado na página 19.
- TOULSON, R.; WILMSHURST, T. Chapter 1 - embedded systems, microcontrollers, and arm. In: TOULSON, R.; WILMSHURST, T. (Ed.). *Fast and Effective Embedded Systems Design (Second Edition)*. Second edition. Newnes, 2017. p. 3–18. ISBN 978-0-08-100880-5. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081008805000013>>. Citado na página 25.
- UNSALAN, C.; BARKANA, D. E.; GURHAN, H. D. Hardware to be used in the book. In: \_\_\_\_\_. *Embedded Digital Control with Microcontrollers*. John Wiley Sons, Ltd, 2021. cap. 2, p. 5–21. ISBN 9781119576600. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119576600.ch2>>. Citado na página 26.
- WALTERS, D. Computer vision. In: \_\_\_\_\_. *Encyclopedia of Computer Science*. GBR: John Wiley and Sons Ltd., 2003. p. 431–435. ISBN 0470864125. Disponível em: <<https://dl.acm.org/doi/10.5555/1074100.1074274>>. Citado na página 24.
- WEI, X.; PHUNG, S. L.; BOUZERDOUM, A. Object segmentation and classification using 3-d range camera. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, v. 25, n. 1, p. 74–85, 2014. ISSN 1047-3203. Visual Understanding and Applications with RGB-D Cameras. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1047320313000631>>. Citado na página 24.
- WHO. *World Health Organization - World Report Ageing*. [S.l.], 2015. Disponível em: <<https://www.who.int/publications/i/item/9789241565042>>. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- WILES, J. L. et al. The Meaning of “Aging in Place” to Older People. *The Gerontologist*, v. 52, n. 3, p. 357–366, 10 2011. ISSN 0016-9013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/geront/gnr098>>. Citado na página 16.
- YOLO. Yolo: Real-time object detection. 2023. Disponível em: <<https://pjreddie.com/darknet/yolo/>>. Citado na página 39.

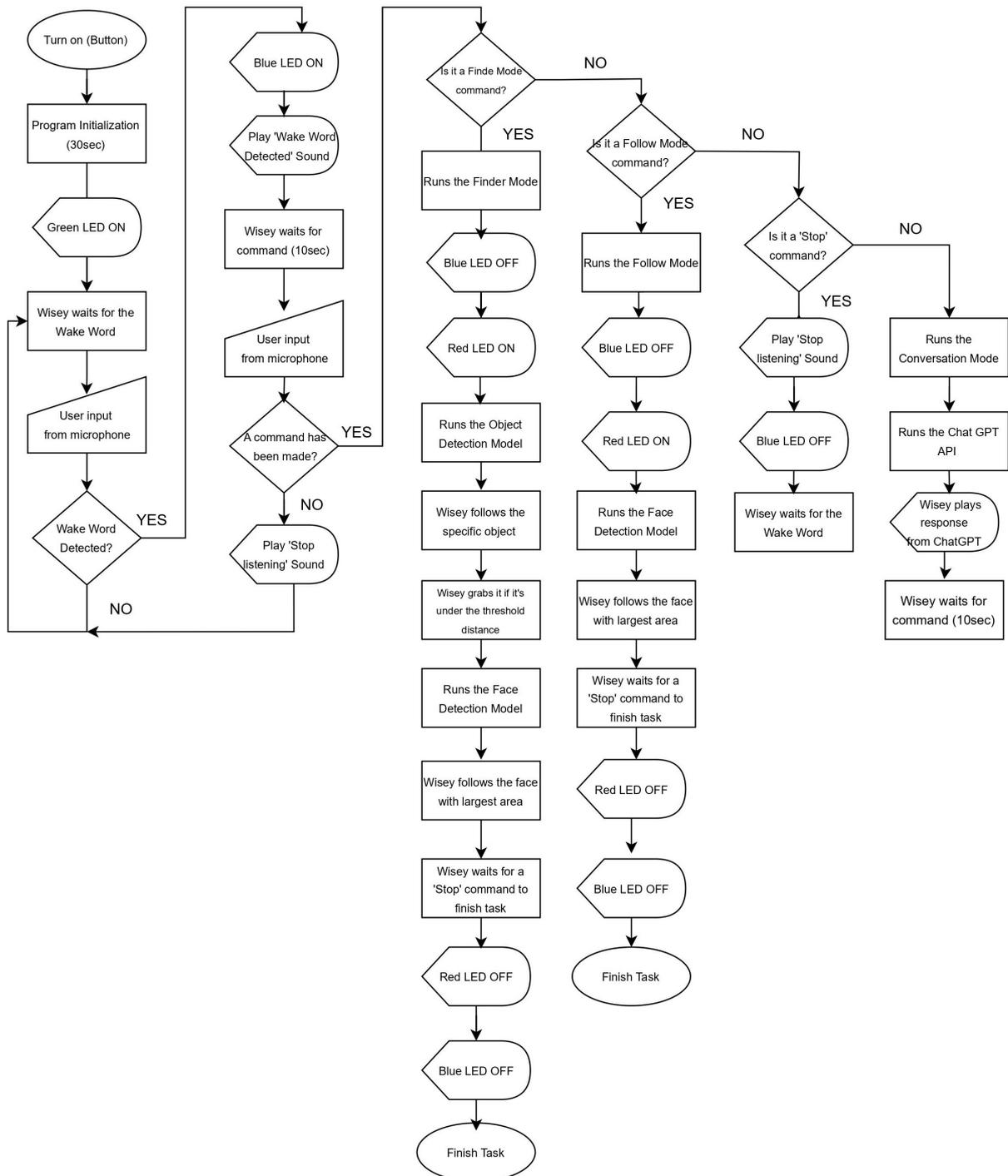
## ANEXO A – Imagens Wisey-I

A imagem neste anexo apresenta um conjunto de vistas do robô Wisey-I, oferecendo uma visão mais detalhada de sua estrutura, e design interno e externo.



Fonte: Autoral.

# ANEXO B – Fluxograma do Funcionamento Geral do Robô Wisey - I



Fonte: Autoral.

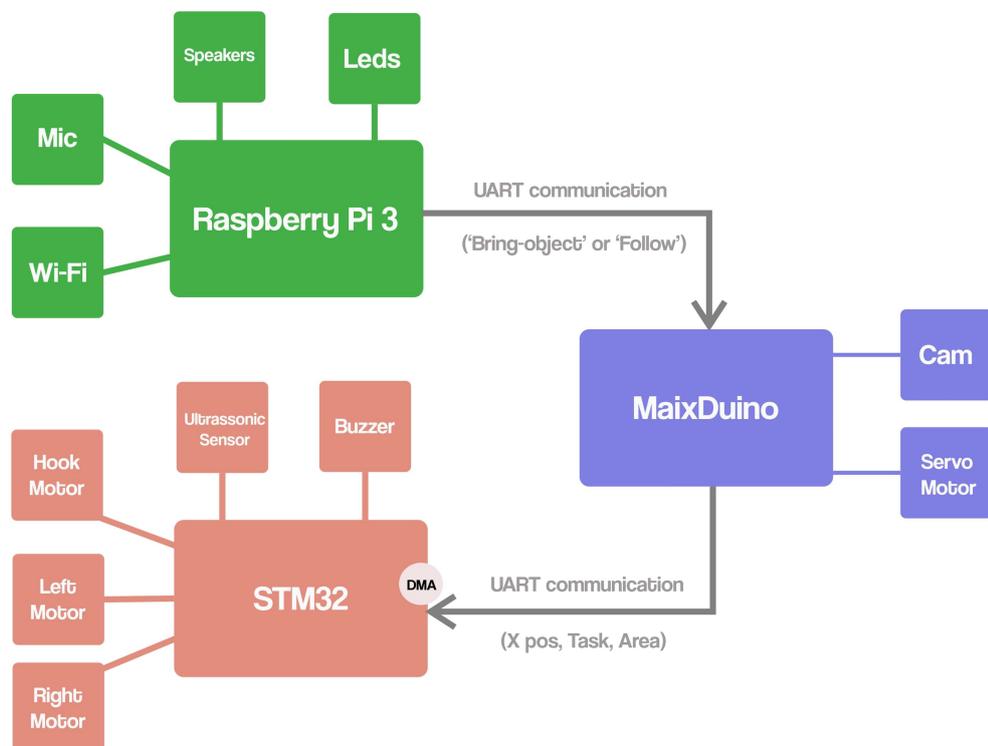
O fluxograma acima ilustra o funcionamento geral do robô Wise-I. A partir do

momento em que o botão que liga o sistema é apertado, o programa leva aproximadamente 30 segundos para inicializar. Em seguida, o LED verde acende, indicando que está pronto para operação. Neste momento, ele aguarda pela *wake-word* para a execução de alguma tarefa. No caso da *wake-word* ser detectada, o LED azul acende, um som específico é reproduzido, e o sistema aguarda por 10 segundos algum comando de voz feito pelo usuário. Se nenhum comando for detectado, o sistema reproduz um som específico, e aguarda novamente pela *wake-word*. Caso contrário, o sistema verifica a presença das palavras-chave que ativam os diferentes modos de operação do robô, a fim de definir se foi um comando de ativação de algum dos modos de operação ou um comando de parada. No caso do modo Finder Mode ser ativado, o LED azul é desligado, enquanto o vermelho é ligado para representar que o sistema está ocupado. O modelo de reconhecimento de objetos é executado, e o robô segue o objeto até que ele seja agarrado. Posteriormente, o modelo de reconhecimento facial é iniciado e uma face é seguida até que o comando de parar seja dado. Similarmente, o Follow Mode, usa os mesmos LEDs para indicar sua execução, e inicia o modelo de reconhecimento facial. O sistema segue a face cujo retângulo possui a maior área até que o comando de parar seja dado. Se o comando dado pelo usuário não contém as palavras-chave que ativam o Finder e Follow Mode, nem a palavra "parar", o sistema executa o Conversation Mode, e a solicitação do usuário é aplicada na API do ChatGPT 3, gerando uma resposta coesa, que é posteriormente reproduzida pelos alto-falantes.

# ANEXO C – Diagrama de relação entre os Firmwares implementados

Este anexo ilustra o relacionamento entre os firmwares implementados em cada um dos sistemas embarcados.

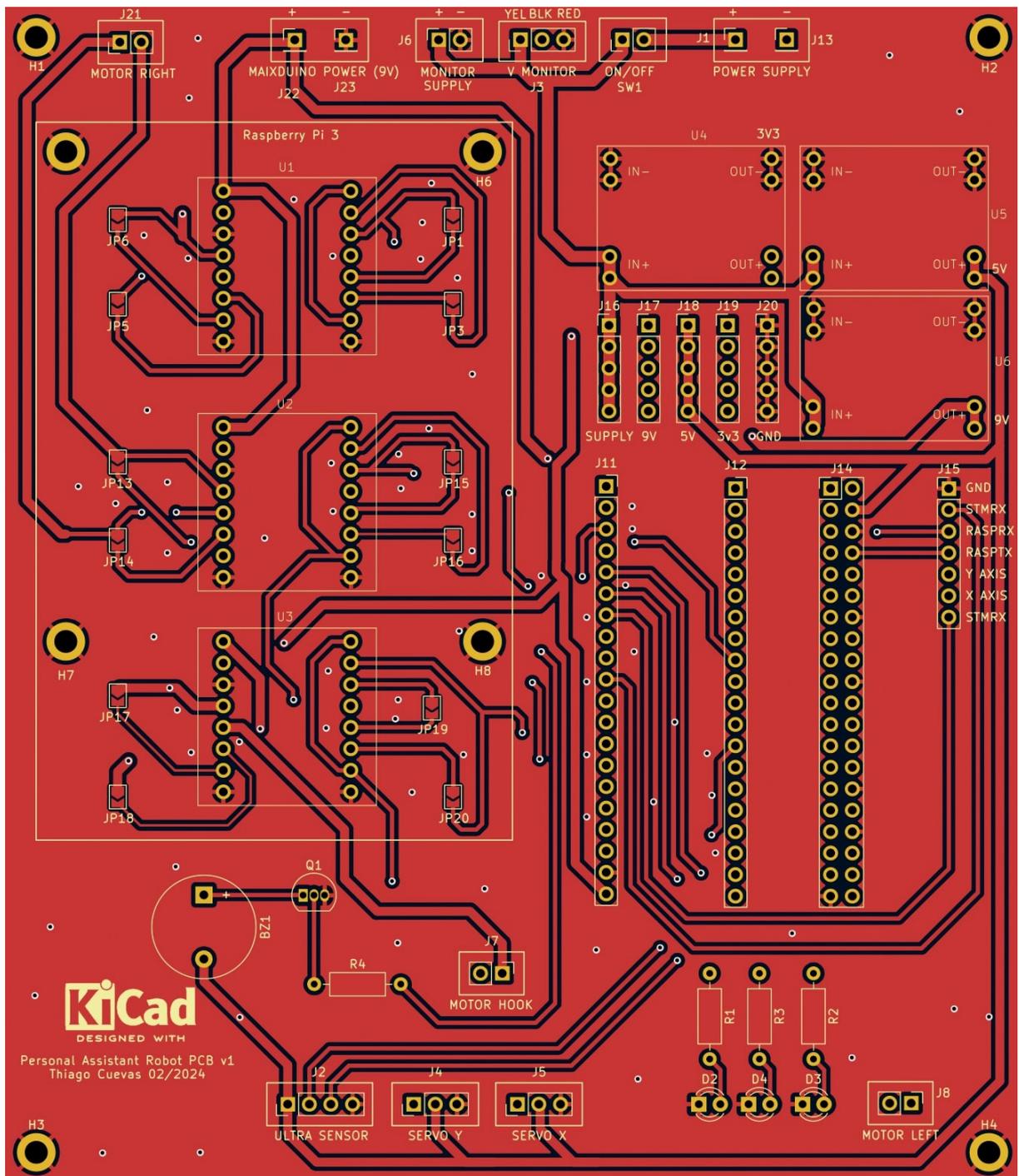
## Personal Assistant Robot - Firmwares Diagram



Fonte: Autoral.

# ANEXO D – Camada de roteamento frontal da placa

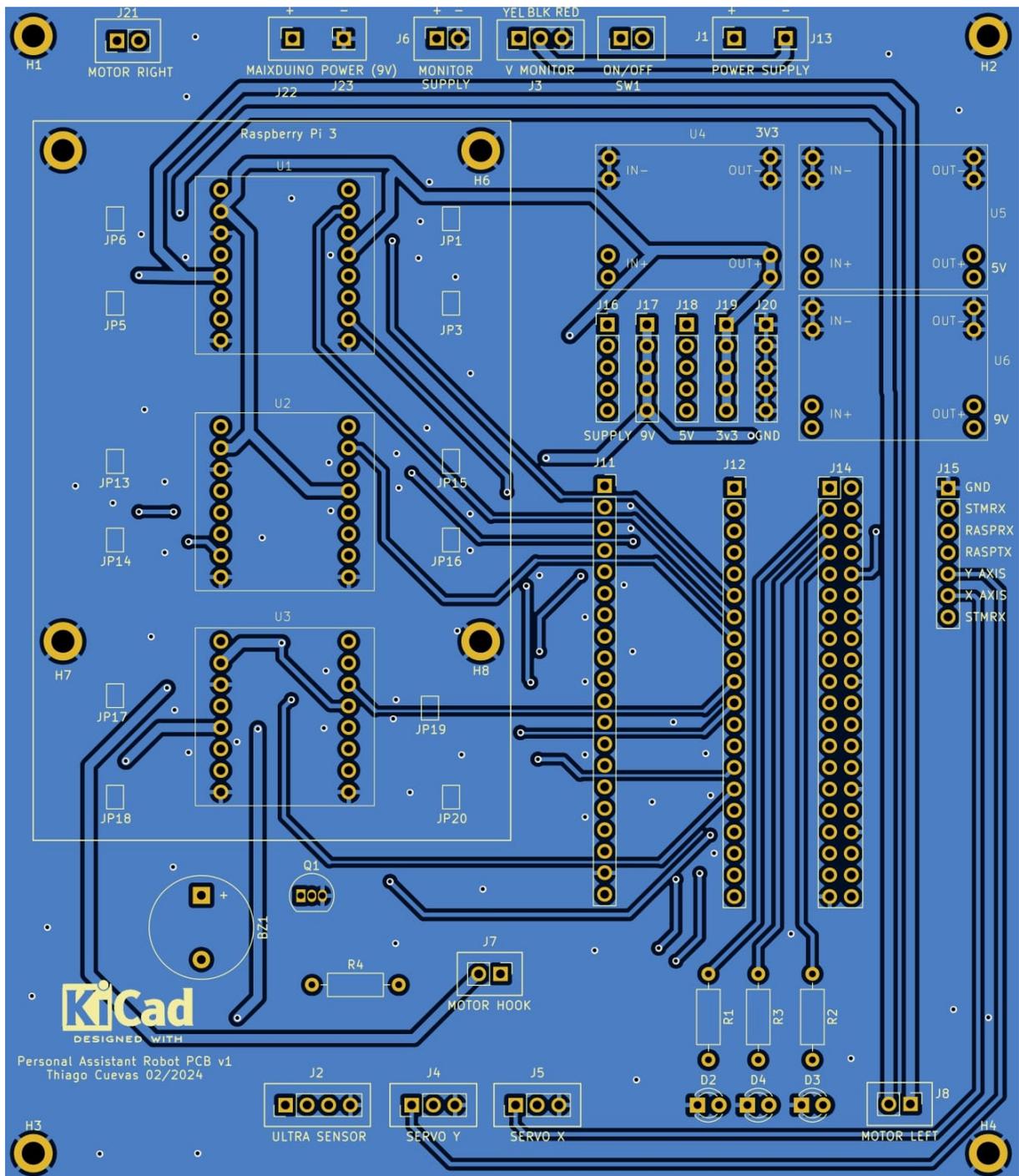
Este anexo ilustra a camada frontal de roteamento da PCI projetada para a implementação deste sistema.



Fonte: Autoral.

# ANEXO E – Camada de roteamento posterior da placa

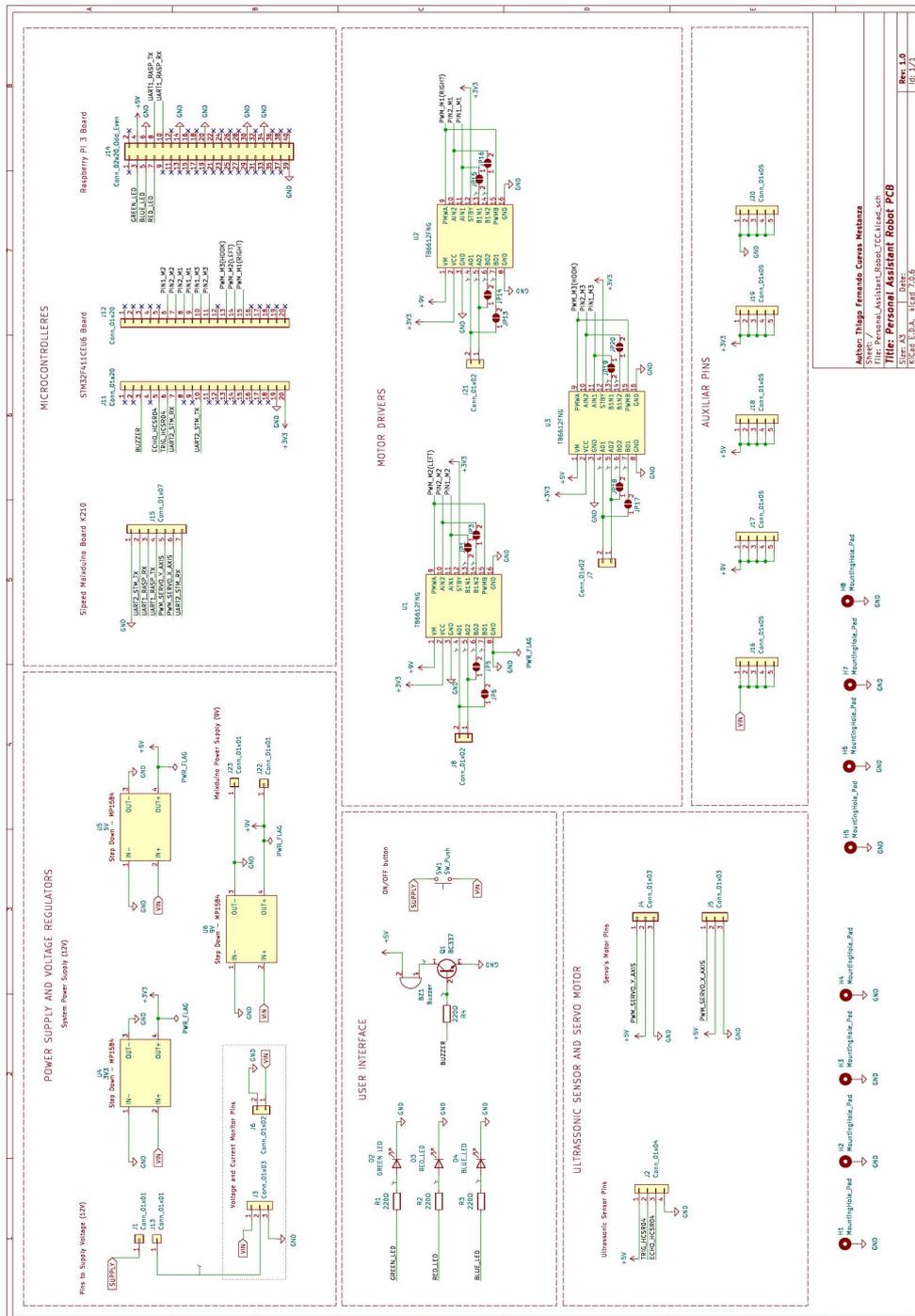
Este anexo ilustra a camada posterior de roteamento da PCI projetada para a implementação deste sistema.



Fonte: Autoral.

# ANEXO F – Esquemático elétrico do circuito da PCI

Esquemático elétrico projetado no *software* KiCad para o desenvolvimento da PCI.



Fonte: Autoral.