

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

**WILLIAM MATEUS WERNER**

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE VEÍCULO AUTÔNOMO PARA  
PULVERIZAÇÃO DE VIDEIRAS**

**CAXIAS DO SUL**

**2024**

**WILLIAM MATEUS WERNER**

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE VEÍCULO AUTÔNOMO PARA  
PULVERIZAÇÃO DE VIDEIRAS**

Trabalho de Conclusão apresentado à  
Área de Ciências Exatas e Engenharias  
da Universidade de Caxias do Sul como  
requisito para obtenção do título de  
Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof<sup>a</sup> . Dra. Marilda Machado  
Spindola

**CAXIAS DO SUL**

**2024**

**WILLIAM MATEUS WERNER**

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE VEÍCULO AUTÔNOMO PARA  
PULVERIZAÇÃO DE VIDEIRAS**

Trabalho de Conclusão apresentado à  
Área de Ciências Exatas e Engenharias  
da Universidade de Caxias do Sul como  
requisito para obtenção do título de  
Engenheiro de Controle e Automação.

**Aprovado em: 09/12/2024**

**Banca Examinadora**

---

Prof<sup>a</sup> . Dra. Marilda Machado Spindola (orientador)

Universidade de Caxias do Sul - UCS

---

Prof. Me. Angelo Zerbetto Neto

Universidade de Caxias do Sul - UCS

---

Prof<sup>a</sup>. Ma. Patricia Giacomelli

Universidade de Caxias do Sul - UCS

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo principal apresentar o desenvolvimento de um protótipo de veículo autônomo em escala reduzida para pulverização de defensivos agrícolas em parreirais, visando facilitar a vida do viticultor e reduzir a exposição aos agroquímicos. A implementação desse veículo permitirá uma agricultura de precisão, minimizando os riscos ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores rurais, que frequentemente utilizam Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) de forma inadequada. Para alcançar esse objetivo geral, foram definidos seis objetivos específicos que guiaram o desenvolvimento do protótipo. sendo eles: projetar um sistema veicular na forma de protótipo, escolher um sistema de sensoriamento para localização de veículo em cenário rural, escolher uma plataforma para desenvolvimento do protótipo, estudar o cenário rural em campo de videiras, desenvolver um algoritmo de controle veicular e por último, testar a navegação em ambiente prototipal. A metodologia utilizada abrangeu a análise da movimentação do veículo autônomo e a escolha dos materiais usados na sua construção, como o sensor laser LiDAR, a placa de controle raspberry pi e o módulo MPU-9250. Além disso, foram realizados estudos detalhados sobre a elaboração do carrinho para a execução dos testes. Os resultados obtidos demonstraram uma performance satisfatória que atendeu aos requisitos do projeto, apresentando uma solução inovadora que contribui para a modernização da agricultura, protegendo os trabalhadores de tarefas perigosas e promovendo uma produção agrícola mais segura e eficiente.

**Palavras-chave:** Navegação autônoma. Raspberry pi. LIDAR. Robô móvel. Fileiras de videiras.

## **ABSTRACT**

The main objective of this work is to present the development of a prototype of an autonomous vehicle on a reduced scale for spraying agricultural pesticides in vineyards, aiming to make life easier for winegrowers and reduce exposure to agrochemicals. The implementation of this vehicle will enable precision agriculture, minimizing risks to the environment and the health of rural workers, who frequently use personal protective equipment (PPE) inappropriately. To achieve this objective general, six specific objectives were defined that guided the development of the prototype. Being them: design a vehicle system in the form of a prototype, choose a sensing system for vehicle location in a rural scenario, choose a platform for prototype development, study the rural scenery in a vine field, develop a vehicle control algorithm and finally, test navigation in a prototype environment. The methodology used covered the analysis of the movement of the autonomous vehicle and the choice of materials used in its construction, such as the LIDAR laser sensor, the raspberry pi control board and the MPU-9250 module. In addition, detailed studies were carried out on the preparation of the cart for carrying out the tests. The results obtained demonstrated satisfactory performance that met the project requirements, presenting an innovative solution that contributes to the modernization of agriculture, protecting workers from dangerous tasks and promoting safer and more efficient agricultural production.

**Keywords:** Autonomous navigation. Raspberry pi. LIDAR. Mobile robot. Rows of vines.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pulverizador costal manual.....	17
Figura 2 - Pulverizador costal motorizado.....	17
Figura 3 - Pulverizador com mangueira.....	18
Figura 4 - Trator com pulverizador acoplado.....	19
Figura 5 - Trator com pulverizador eletrostático.....	19
Figura 6 - Plantio em fileiras forma espaldeira.....	21
Figura 7 - Videiras cultivo método em latada.....	22
Figura 8 - Ciclo agricultura de precisão.....	23
Figura 9 - Ligações para implementação da primeira estratégia.....	27
Figura 10 - Ligações para implementação da segunda estratégia.....	28
Figura 11 - Representação do cenário de trabalho do protótipo.....	29
Figura 12 - Plataforma utilizada para o desenvolvimento.....	29
Figura 13 - Interação entre dispositivos do sistema.....	31
Figura 14 - Medição da orientação do veículo usando o Sistema Inercial IG500N.....	32
Figura 15 - Representação de três possíveis situações de orientação do robô.....	33
Figura 16 - Protótipo do robô.....	34
Figura 17 - Diagrama esquemático do funcionamento móvel do robô.....	36
Figura 18 - Ensaio com várias coordenadas e obstáculos.....	38
Figura 19 - Diagrama representando as fases do projeto.....	39
Figura 20 - Estrutura construída para simular fileiras de videiras.....	40
Figura 21 - Diagrama de movimentação do robô entre fileiras de uvas.....	41
Figura 22 - Sensor laser lidar RPLIDAR-C1M1 da empresa Slamtec.....	43
Figura 23- Representação da medição realizada pelo sensor laser lidar RPLIDAR-C1M1 da empresa slamtec.....	44
Figura 24 - Representação Pinout Raspberry Pi 3 B +.....	45
Figura 25 - Carrinho para Desenvolvimento do Projeto.....	47
Figura 26 - Motor usado no projeto.....	47
Figura 27 - Micro servo SG90.....	48
Figura 28 - Motor shield I293D.....	49
Figura 29 - Interação entre os diferentes componentes embarcados no carrinho.....	51
Figura 30 - Conexão servo rodas frontais.....	55
Figura 31 - Diagrama bloco de controle do sistema.....	61
Figura 32 - Diagrama de manobra ao entrar em nova fileira.....	63
Figura 33 - Leitura lidar sem limitação de distância.....	64
Figura 34 - Veículo posicionado no centro da fileira.....	65
Figura 35 - Leitura sensor de centro.....	65
Figura 36 - Veículo posicionado à esquerda.....	67
Figura 37 - Leitura sensor lado esquerdo.....	67
Figura 38 - Dados de navegação com o veículo iniciando no centro da fileira.....	69
Figura 39 - Dados de navegação com o veículo iniciando a direita na fileira.....	70
Figura 40 - Primeira etapa manobra de entrada em nova fileira.....	71
Figura 41 - Segunda etapa manobra de entrada em nova fileira.....	72

Figura 42 - Terceira etapa manobra entrada em nova fileira.....	73
Figura 43 - Quarta etapa manobra de entrada em nova fileira.....	74
Figura 44 - Valor de yaw durante manobra de curva para direita.....	75
Figura 45 - Valor de yaw durante manobra de curva para esquerda.....	76
Figura 46 - Representação Pinout Módulo MPU-9250.....	84
Figura 47 - Esquema elétrico ligação MPU-9250 Raspberry PI.....	84
Figura 48 - Esquema elétrico ligações Raspberry PI motor shield.....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Legenda de componentes.....	35
Tabela 2 - leituras obtidas pelo sensor lidar em uma varredura posição central.....	66
Tabela 3 - leituras obtidas pelo sensor lidar em uma varredura posição a esquerda.....	58
Tabela 4 - Especificações Técnicas MPU- 9250.....	82
Tabela 5 - Parâmetros do Carrinho e Prototipagem.....	83
Tabela 6 - Especificações Técnicas Raspberry Pi 3 B +.....	83

## LISTA DE SIGLAS

EMBRAPA	Empresa Brasileira de pesquisa agropecuária
OIV	Organização internacional da vinha e do vinho
SAVSAR	<i>Semi-Autonomous Vineyard Spraying Agricultural Robot</i> (robô semi-autônomo para pulverização agrícola de vinhedo)
GRAPE	<i>Ground Robot for Vineyard Monitoring and Protection</i> (robô terrestre para monitoramento e proteção de vinhedos)
EPI	Equipamento de Proteção Individual
IOT	<i>Internet Of Things</i> (internet das coisas)
PID	Proporcional, Integral, Derivativo
MPC	<i>Model Predictive Control</i> (modelo preditivo de controle)
LQR	Regulador Quadrático Linear
GPS	<i>Global Positioning System</i> (sistema de posicionamento global)
LED	<i>Light-Emitting Diode</i> (diodo emissor de luz)
LiDAR	<i>Light detection and Ranging</i> (detecção de luz e alcance)
IMU	Unidade de Medição Inercial
4WD	<i>4 Wheel Drive</i> (tração nas quatro rodas)
DTOF	<i>Direct Time of Flight</i> (hora direta do voo)
RPM	Rotação Por Minuto
BPS	Bytes por Segundo
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i> (entrada/saída de uso geral)
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (barramento serial universal)
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> (interface periférica serial)
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> (receptor/transmissor assíncrono universal)
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i> (painel de fibra de média densidade)
DC	<i>Direct Current</i> (corrente contínua)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (modulação por largura de pulso)
VCC	Vtagem em Corrente Contínua

GND	<i>Graduated Neutral Density</i> (densidade neutra graduada)
SCL	<i>Serial Clock</i> (relógio serial)
SH	<i>Shift Clock</i> (relógio de turno)
ST	<i>Store clock</i> (relógio de loja)
DS	<i>Serial data</i> (dados seriais)
OE	<i>Output Enable</i> (habilitação de saída)
PVC	Policloreto de vinila

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVO GERAL.....	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.3 ESCOPO E RESTRIÇÕES.....	14
1.4 APRESENTAÇÃO.....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
2.1 MÉTODOS PARA PULVERIZAÇÃO DE VIDEIRAS.....	16
<b>2.1.1 Riscos à saúde.....</b>	<b>20</b>
2.2 PLANTIO DE VIDEIRAS EM FILEIRAS.....	20
2.3 AGRICULTURA DE PRECISÃO.....	22
2.4 ROBÓTICA NA AGRICULTURA.....	24
2.5 SISTEMAS DE CONTROLE DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS.....	24
<b>2.5.1 Controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo).....</b>	<b>24</b>
2.6 TRABALHOS RELACIONADOS.....	25
<b>2.6.1 - Desenvolvimento de Plataforma Autônoma Para Agricultura.....</b>	<b>25</b>
<b>2.6.2 - Desenvolvimento de Um Sistema de Controle Em Um Robô Móvel Agrícola em Escala Reduzida Para Deslocamento Entre Fileiras de Plantio.....</b>	<b>28</b>
<b>2.6.3 - Projeto de um robô móvel para tarefas de apoio à vindima.....</b>	<b>33</b>
<b>2.6.4 - Desenvolvimento de um protótipo de veículo autônomo a partir de um carro telecomandado.....</b>	<b>37</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>39</b>
3.1 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO FILEIRAS.....	40
<b>3.1.1 Movimentação proposta.....</b>	<b>40</b>
3.2 MATERIAIS.....	42
<b>3.2.1 Sensor Laser LiDAR 2d.....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.2 Raspberry Pi.....</b>	<b>44</b>
<b>3.2.3 Sistema Inercial IMU.....</b>	<b>46</b>
<b>3.2.4 Plataforma Para Prototipagem.....</b>	<b>46</b>
<b>3.2.5 Componentes do Carrinho.....</b>	<b>47</b>
<b>3.2.6 Sistema de alimentação.....</b>	<b>49</b>
3.3 METODOLOGIA.....	50
<b>3.3.1 Configurações iniciais dos componentes.....</b>	<b>52</b>
<b>3.3.2 Configurações sensor inercial MPU 9250.....</b>	<b>52</b>
<b>3.3.3 Configurações motor shield L293d.....</b>	<b>54</b>

<b>3.3.4 Configurações servo SG90</b> .....	<b>55</b>
3.4 SISTEMA DE NAVEGAÇÃO.....	56
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>64</b>
4.1 RESULTADOS LEITURA SENSOR LIDAR.....	64
4.2 TESTE DE NAVEGAÇÃO.....	69
4.3 TESTE DE MANOBRA.....	71
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>77</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>79</b>
<b>APÊNDICE A - Tabelas de especificações e parâmetros</b> .....	<b>82</b>
<b>APÊNDICE B - Figuras de representação e esquemas elétricos</b> .....	<b>84</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A viticultura contemporânea enfrenta a necessidade de incorporar tecnologias que facilitem a vida do agricultor e promovam a sustentabilidade. Essas tecnologias devem reduzir a intervenção humana, aumentar a produtividade e diminuir custos e desperdícios, além de preservar a saúde do trabalhador rural. Segundo dados da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2022), a produção de uvas no Brasil em 2021 foi de 1.697.680 toneladas, com o Rio Grande do Sul sendo o maior estado produtor, responsável por 957.567 toneladas. No que diz respeito às exportações de uvas, vinhos, sucos e espumantes, foram movimentados pouco mais de um bilhão de reais, enquanto as importações totalizaram 520.122 milhões de reais. Ainda segundo dados da Organização Internacional da Vinha e do Vinho (OIV, 2023), a produção mundial de uvas em 2023 foi de 30.9 milhões de toneladas.

Consoante aos dados expostos acima, percebe-se que, devido ao grande volume de produção de uva e da venda de seus derivados, torna-se imprescindível a aplicação de tecnologias que facilitem o cultivo e o manejo das videiras, além de aprimorar o trabalho dos produtores. Conforme Aires (2023), nas últimas décadas têm sido introduzidas tecnologias que melhoraram substancialmente a qualidade e eficácia da agricultura. Com a implementação de mecanismos automatizados torna-se possível fazer uma escolha mais certa da quantidade de pesticidas e herbicidas, reduzindo também os custos de produção e respectivo impacto ambiental. Infelizmente, as tecnologias associadas à agricultura de precisão são frequentemente complexas e dispendiosas, tornando-se inacessíveis para muitos produtores de uva.

O desafio reside no fato de que, a curto prazo, os custos de investimento em sistemas de automação podem ser elevados, limitando sua adoção por pequenos viticultores com recursos financeiros restritos, além disso pode haver resistência por parte dos agricultores em adotar novos sistemas. Conforme Aires (2023) muitos dos robôs para pulverização na viticultura ainda se encontram numa fase de protótipos, mas alguns projetos já foram colocados no mercado, por exemplo; o SAVSAR (*Semi-Autonomous Vineyard Spraying Agricultural Robot*) e o GRAPE (*Ground Robot for Vineyard Monitoring and Protection*).

A proposta deste trabalho é desenvolver um protótipo em escala reduzida de um veículo autônomo para pulverização de videiras que atenda as necessidades do agricultor. Este veículo busca minimizar o contato direto do produtor com produtos químicos, promovendo uma produção mais eficiente e sustentável.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um protótipo de veículo autônomo para pulverização de videiras, usando a plataforma Raspberry Pi com sensoriamento LiDAR (*Light Detection and Ranging*).

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral neste trabalho, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- a) Projetar um sistema veicular na forma de protótipo;
- b) Estudar o cenário rural em campo de videiras;
- c) Escolher um sistema de sensoriamento para localização de veículo em cenário rural;
- d) Escolher uma plataforma para desenvolvimento do protótipo;
- e) Desenvolver um algoritmo de controle veicular;
- f) Testar a navegação em ambiente prototipal.

### 1.3 ESCOPO E RESTRIÇÕES

O sistema será validado em um ambiente prototipal, no qual será estabelecido um cenário que simula uma área de cultivo de videiras. Esse ambiente permitirá a realização de testes de navegação autônoma, utilizando uma velocidade constante. Neste estágio, o desenvolvimento do sistema de pulverização será omitido, concentrando-se exclusivamente na capacidade do sistema de se mover autonomamente entre as fileiras da cultura.

## 1.4 APRESENTAÇÃO

O presente trabalho possui uma organização distribuída em capítulos, conforme listado a seguir:

Capítulo 1: Apresenta a introdução sobre o tema com objetivos propostos para o trabalho e suas restrições.

Capítulo 2: Aborda o referencial teórico, discutindo conceitos essenciais para a criação de um protótipo de veículo autônomo. Inclui uma análise dos métodos de pulverização agrícola, os riscos de saúde associados ao uso de agrotóxicos, a aplicação da robótica na agricultura e uma revisão de trabalhos relacionados.

Capítulo 3: Descreve os materiais utilizados para construir o protótipo e as metodologias aplicadas para a navegação autônoma, detalhando o processo de desenvolvimento para alcançar os objetivos do projeto.

Capítulo 4: Apresenta e discute os resultados obtidos durante a pesquisa, avaliando o desempenho do protótipo e a eficácia das metodologias implementadas.

Capítulo 5: Fornece as conclusões do estudo e lista as referências bibliográficas que sustentaram a pesquisa, destacando as principais descobertas e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trará a revisão bibliográfica que descreve uma revisão teórica dos métodos de pulverização agrícola, os riscos associados ao uso de agrotóxicos, práticas de plantio de videiras em fileiras, aplicação da robótica na agricultura, sistemas de controle para veículos autônomos e uma análise de trabalhos correlatos. Esses aspectos fundamentais fornecem a base conceitual necessária para o desenvolvimento do protótipo de veículo autônomo destinado à pulverização de videiras.

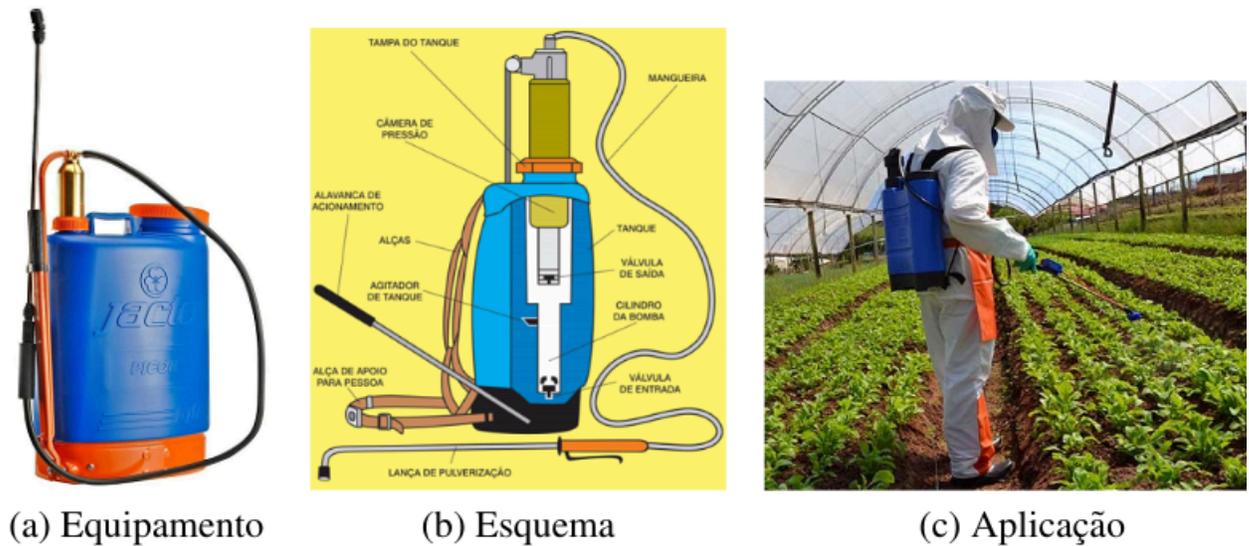
### 2.1 MÉTODOS PARA PULVERIZAÇÃO DE VIDEIRAS

Em Júnior (2023), o cultivo de videiras é descrito como suscetível a uma variedade de doenças ao longo de todo o ciclo produtivo, desde o estágio inicial até o final. Essas doenças podem causar grandes perdas de produtividade ou danos às plantas, comprometendo as futuras safras. Os viticultores enfrentam uma preocupação significativa com essas doenças, que demandam uma aplicação constante de defensivos para manter a produção. Essa constante necessidade de aplicação de defensivos não apenas representa um custo adicional para os viticultores, mas também levanta preocupações ambientais e de saúde pública devido à exposição aos produtos químicos utilizados.

A pesquisa realizada por Souza (2015) apontou as 5 principais técnicas de pulverização de videiras, que são através de:

- Pulverizador costal manual: dispositivo de baixa capacidade, concebido para ser transportado nas costas do operador. Capacidade de até 20 litros de agrotóxicos e acionamento por alavanca manual. Indicado para aplicação em pequenas áreas e locais de difícil acesso. A figura 1 representa este equipamento.

Figura 1 - Pulverizador costal manual



Fonte: Terra (2020).

- Pulverizador costal motorizado: equipamento equipado com um motor a combustão que aciona um ventilador para dispersão do líquido pulverizado. As gotas são formadas por um disco rotativo movimentado pela força do ventilador, são utilizados principalmente por pequenos produtores. Oferece boa cobertura foliar e penetração na copa das plantas. A figura 2 ilustra este tipo de pulverizador.

Figura 2 - Pulverizador costal motorizado



Fonte: Souza (2015).

- Pulverizadores com mangueiras: equipamentos compostos por bomba, tanque e mangueira, destinados ao tratamento de alto volume. Amplamente empregados em áreas de pequeno porte, típicas da agricultura familiar. No entanto, devido à dificuldade em obter uma aplicação uniforme, esses pulverizadores podem não proporcionar uma distribuição homogênea do produto. A figura 3 ilustra este tipo de pulverizador.

Figura 3 - Pulverizador com mangueira



Fonte: *Toyama* (2023).

- Pulverizadores de arrasto tratorizados, conhecidos como turboatomizadores ou turbopulverizadores, são equipamentos que projetam gotas em direção ao alvo por meio da corrente de ar gerada por um ventilador acionado pela tomada de força do trator. Amplamente utilizado em qualquer fase do ciclo da cultura, esses pulverizadores garantem uma aplicação eficiente de agrotóxicos ou outros produtos. A figura 4 ilustra este modelo de pulverizador.

Figura 4 - Trator com pulverizador acoplado



Fonte: *Vista torta – Revista Cultivar* (2016).

- Pulverizadores eletrostáticos: equipamentos ainda pouco utilizados no Brasil, que operam com base no princípio de carregar eletricamente as gotículas de líquido pulverizado. Essas gotículas carregadas são atraídas para as plantas, que estão ligadas à terra, criando um campo elétrico que as atrai. Este método é indicado especialmente quando há pouca folhagem, pois só consegue atingir as partes mais expostas da planta. A figura 5 traz a representação desse modelo de pulverizador.

Figura 5 - Trator com pulverizador eletrostático



Fonte: Souza (2015).

### 2.1.1 Riscos à saúde

Segundo Simon (2022), o trabalho e a preparação na agricultura são atividades predominantemente masculinas, porém as mulheres também correm risco de contaminação devido ao seu envolvimento em trabalhos de apoio à produção, como a lavagem de roupas e equipamentos de proteção individual (EPIs). O autor relata que a maioria dos agricultores utiliza os EPIs de forma inadequada, expondo-se assim a riscos.

Conforme descrito por Vieiro (2016), os defensivos agrícolas estão entre os maiores fatores de risco para os trabalhadores rurais e o meio ambiente. Embora seja compreendido que seu uso não pode ser eliminado a curto e médio prazo devido às condições atuais de produção de alimentos, há riscos significativos à vida humana devido à exposição a substâncias tóxicas durante o trabalho.

“Entre 2007 e 2017 foram registrados 40 mil casos de intoxicação por agrotóxicos, resultando em 1900 mortes. Isso destaca a necessidade urgente de políticas de proteção ao trabalhador rural.” (Globo Rural G1, 2019).

A Biblioteca Virtual em Saúde MS (2006), destaca que:

As principais vias de contato com agrotóxicos são através da pele, mucosas, respiração e ingestão. Os sintomas de intoxicação crônica incluem distúrbios comportamentais como irritabilidade, ansiedade, alteração do sono e da atenção, depressão, dor de cabeça, cansaço, formigamentos, entre outros. Já a intoxicação aguda apresenta sintomas como náuseas, vômitos, desorientação, dificuldade respiratória, sudorese e salivação excessiva, podendo levar ao coma e à morte.

## 2.2 PLANTIO DE VIDEIRAS EM FILEIRAS

Segundo dados do portal Embrapa (2021), a forma de cultivo espaldeira é um método de cultivo de videiras em que as plantas são dispostas em fileiras e treliças, com as plantas crescendo verticalmente. A distância entre as fileiras varia de 2,00 a 2,50 metros, enquanto a distância entre as plantas pode variar de 1,20 a 2,00 metros, dependendo da variedade e qualidade do solo. Esta técnica apresenta vantagens como

boa adaptabilidade a diferentes variedades, facilitação de operações mecanizadas, custo de implantação mais baixo em comparação com o método de plantio em latada e facilidade de expansão devido à independência de cada fileira. No entanto, suas desvantagens incluem uma produção menor em comparação com o método de plantio em latada e tendência ao sombreamento. A figura 6 ilustra este método de plantio.

Figura 6 - Plantio em fileiras forma espaldeira



Fonte: Portal Embrapa (2021).

O plantio na forma em latada, também conhecido como pérgola, é amplamente utilizado na região da Serra Gaúcha, RS, e no Vale do Rio do Peixe, SC. Neste método, as videiras se desenvolvem horizontalmente a uma distância de aproximadamente 1,80 metros do solo, com os ramos atados aos fios do sistema de sustentação. As plantas são alinhadas em fileiras distanciadas geralmente de 2,00 a 3,00 metros, e a distância entre as plantas é geralmente de 1,50 a 2,00 metros. Esta técnica apresenta vantagens como o desenvolvimento de videiras vigorosas, permitindo uma grande área de desenvolvimento de cachos, o que aumenta bastante a produtividade. Além disso, é de fácil adaptação a regiões montanhosas e permite o deslocamento do agricultor em todas as direções. No entanto, suas desvantagens incluem o alto custo de implantação do sistema de sustentação e problemas posturais devido aos frutos acima do trabalhador. A figura 7 ilustra este método de cultivo.

Figura 7 - Videiras cultivo método em latada



Fonte: Aires (2023).

### 2.3 AGRICULTURA DE PRECISÃO

Segundo Veiros (2019), a agricultura de precisão representa a integração de diversas técnicas com o objetivo de ampliar o controle dos processos agrícolas. Através da coleta, análise e aplicação dos dados obtidos, essa abordagem, também conhecida como agricultura 4.0, emerge como uma poderosa aliada para os produtores rurais, permitindo um aumento na eficiência da produção e uma redução de prejuízos ao longo de todo o ciclo agrícola, desde o plantio até a colheita.

A interligação de todos os equipamentos utilizados no processo agrícola é uma das características-chave da agricultura de precisão, possibilitando uma maior integração e sincronização das operações, desde o monitoramento das condições do solo e clima até a aplicação de insumos e o gerenciamento da colheita.

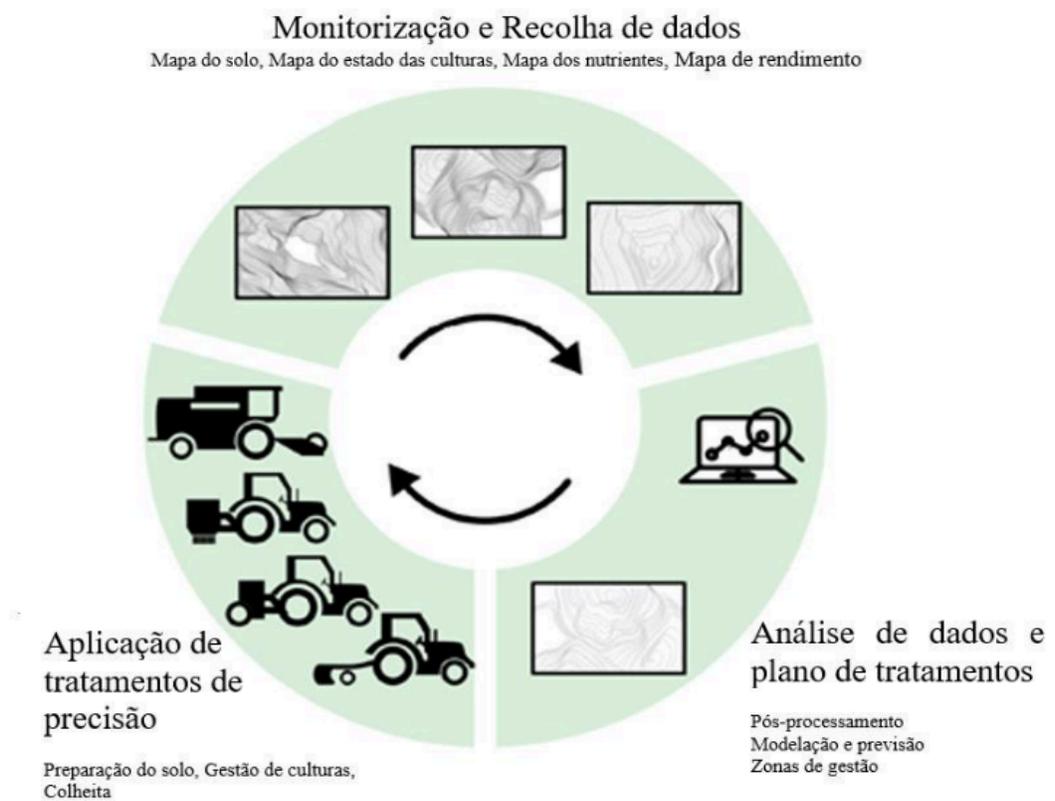
Ao permitir uma tomada de decisão mais informada e precisa, a agricultura de precisão oferece aos produtores rurais a oportunidade de otimizar recursos, maximizar a produtividade e minimizar os riscos associados à atividade agrícola. Essa abordagem representa um avanço significativo na modernização do setor agrícola, oferecendo soluções inovadoras para os desafios enfrentados pela agricultura contemporânea.

A integração de diferentes sensores de rastreamento contribui significativamente para o monitoramento de alta precisão em agricultura, possibilitando até mesmo a

navegação autônoma de equipamentos agrícolas, como drones e tratores autônomos, tendo seu uso cada vez mais difundido nas propriedades rurais. Por meio da utilização de softwares e serviços de Internet das Coisas (IoT), essa abordagem proporciona acesso a dados em tempo real sobre as condições das culturas, solo e ambiente, além de outras informações relevantes, como previsões meteorológicas, custos de mão de obra e disponibilidade de equipamentos.

Segundo Andrade (2020) a agricultura de precisão está dividida em três fases distintas, ocorrendo em um padrão cíclico, como é demonstrado na figura 8.

Figura 8 - Ciclo agricultura de precisão



Fonte: Aires (2023).

## 2.4 ROBÓTICA NA AGRICULTURA

Segundo Veiros (2019), o desenvolvimento de robôs agrícolas tem sido uma resposta importante para lidar com trabalhos repetitivos ou perigosos para os trabalhadores agrícolas. Nos últimos anos, houve um progresso significativo nessa área, com o objetivo de enfrentar o aumento dos custos de produção e a diminuição da disponibilidade de mão de obra qualificada na agricultura.

Um dos principais focos de desenvolvimento tem sido a criação de robôs especializados na colheita e no controle de pragas. Esses robôs são projetados para automatizar tarefas específicas, como a colheita de frutas, legumes e culturas de alto valor, bem como a aplicação precisa de defensivos agrícolas para o controle de pragas e doenças.

## 2.5 SISTEMAS DE CONTROLE DE VEÍCULOS AUTÔNOMOS

A condução autônoma de veículos depende de um sistema de controle avançado que gerencia simultaneamente todos os atuadores do veículo, como aceleradores, freios e direção. Esse sistema é responsável por interpretar as informações percebidas do ambiente e tomar decisões em tempo real para atingir os objetivos de condução estabelecidos, como seguir uma rota planejada, evitar colisões e garantir o conforto dos passageiros.

Os modelos de controle utilizados em veículos autônomos variam em complexidade e metodologia, cada um oferecendo vantagens específicas para diferentes aspectos da condução. A seguir é apresentado o controlador PID muito usado em sistemas de controle em veículos autônomos.

### **2.5.1 Controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo)**

Segundo Ogata (2011), o controle PID (Proporcional, Integral, Derivativo) é um dos métodos mais populares e amplamente utilizado em sistemas de controle automático. Sua aplicação se estende por diversos campos e setores, desde a

automação industrial até sistemas de controle em veículos e eletrodomésticos. O termo proporcional ajusta a saída do controlador proporcionalmente ao erro atual. Se o erro é grande, a ação proporcional é forte; se o erro é pequeno, a ação proporcional é fraca, já o termo integral ajusta a saída com base na soma dos erros passados. Ele corrige erros acumulados ao longo do tempo, que o componente proporcional não conseguiu eliminar. E o termo derivativo ajusta a saída com base na taxa de mudança do erro. Ele prevê a tendência futura do erro, ajudando a suavizar a resposta e melhorar a estabilidade.

O controlador PID é descrito pela equação 1 no domínio do tempo.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{d}{dt} e(t) \quad (1)$$

- $u(t)$  é o sinal de controle que é aplicado ao sistema (como ângulo de direção ou comando de aceleração)
- $e(t)$  é o erro no tempo  $t$ , definido como a diferença entre o valor desejado (setpoint) e o valor medido (feedback).
- $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  = São os ganhos proporcional, integral e derivativo, respectivamente.

## 2.6 TRABALHOS RELACIONADOS

### 2.6.1 - Desenvolvimento de Plataforma Autônoma Para Agricultura

Na sua dissertação de mestrado, Gonçalves (2023) descreve o desenvolvimento de uma plataforma de baixo custo destinada à navegação em trajetos pré-definidos, utilizando câmera e visão computacional sendo implementada em linguagem Python. O foco da plataforma é a plantação de árvores, sendo sua principal função a capacidade de se movimentar em linha reta com o mínimo desvio possível.

O sistema utiliza uma mini moto quatro como base, com a direção controlada por um motor linear. Dois relés de 12 V são empregados no acionamento para controle

da direção, enquanto outros dois relés de 24 V são utilizados no acionamento da tração do carrinho.

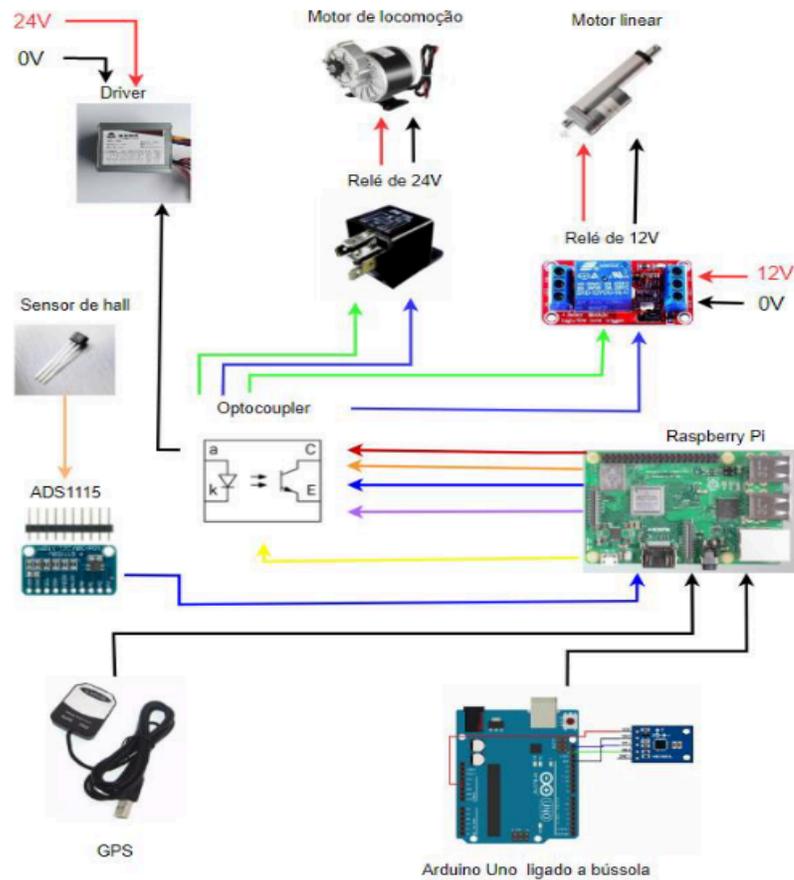
A placa Raspberry Pi foi escolhida para controlar o carrinho devido ao seu baixo custo e dimensões reduzidas. Uma câmera compatível com Raspberry Pi, com visão diurna e noturna, foi integrada ao sistema. Para garantir o isolamento do Raspberry Pi do restante do circuito e protegê-lo durante a navegação, foi utilizado um optoacoplador.

Para a navegação, foram empregados um GPS (Global Positioning System) mouse, uma bússola e um sensor Hall. O sensor Hall é utilizado para verificar a posição das rodas do carrinho, sendo necessário o uso do conversor ADS1115 para converter o sinal analógico em digital, já que o Raspberry Pi não suporta leitura de sinais analógicos diretamente.

A bússola foi conectada a um Arduino Uno devido às interferências do motor do robô, sendo posicionada a uma distância adequada da Raspberry Pi. Para facilitar a comunicação entre o Arduino e a placa Raspberry Pi, foi estabelecida uma comunicação serial entre os dois dispositivos.

Neste estudo, foram empregadas duas abordagens para a resolução do problema proposto. A primeira abordagem consistiu na utilização da bússola e do GPS para a locomoção do robô. No entanto, esta abordagem enfrentou várias limitações devido a erros significativos de leitura tanto no GPS quanto na bússola. Esses erros resultaram em uma orientação inadequada do robô e dificuldade em sua localização, culminando em resultados insatisfatórios. Na figura 9, é apresentado o diagrama das ligações correspondentes a esta abordagem específica.

Figura 9 - Ligações para implementação da primeira estratégia



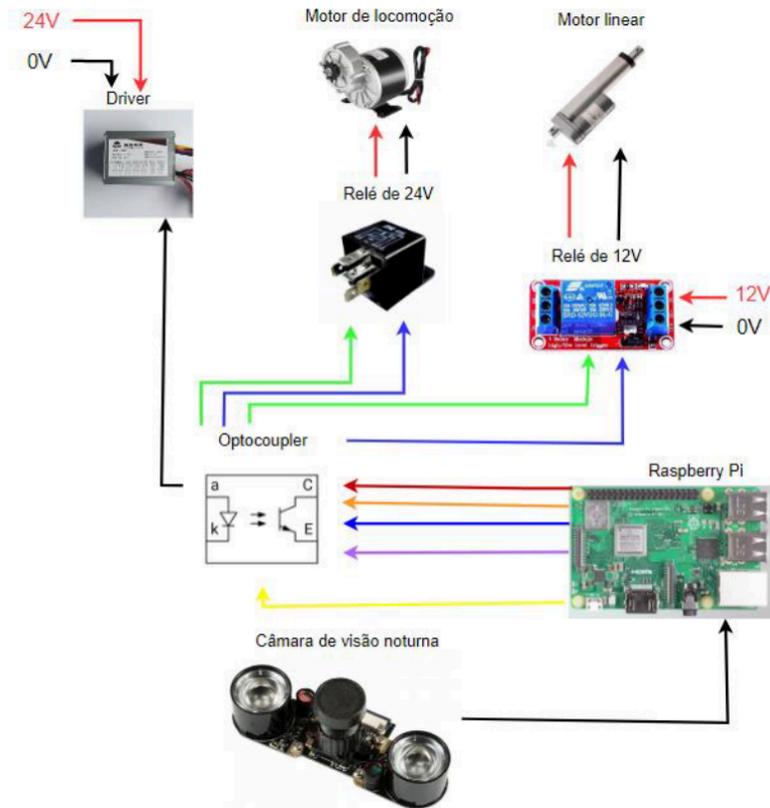
Fonte: Gonçalves (2023).

Na continuidade do estudo, uma segunda abordagem foi adotada, empregando visão computacional como método de orientação. Nessa abordagem, uma câmera equipada com visão noturna foi combinada com um projetor de LEDs (Light-Emitting Diode) infravermelhos para a orientação do robô. Dois métodos distintos foram utilizados para a navegação: um para ambientes noturnos e outro para ambientes diurnos, devido à variação de luminosidade.

No ambiente noturno, a câmera foi direcionada para detectar o ponto de maior luminosidade emitido pelo projetor de LEDs infravermelhos. Já na navegação diurna, a detecção de objetos foi empregada para guiar o robô pela posição da pessoa. Essa abordagem gerou resultados satisfatórios, superando as limitações encontradas na

primeira abordagem. A figura 10 apresenta o diagrama das ligações correspondentes a esta segunda abordagem.

Figura 10 - Ligações para implementação da segunda estratégia



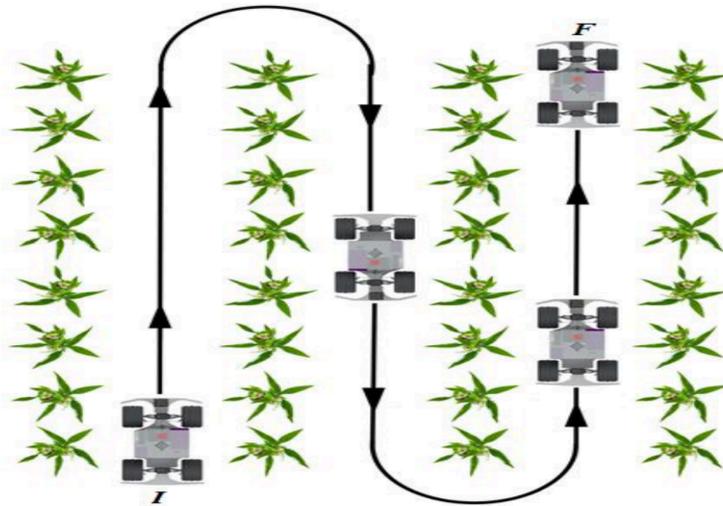
Fonte: Gonçalves (2023).

### 2.6.2 - Desenvolvimento de Um Sistema de Controle Em Um Robô Móvel Agrícola em Escala Reduzida Para Deslocamento Entre Fileiras de Plantio.

A tese de doutorado do autor Guerrero (2016) aborda o desenvolvimento de um robô capaz de se deslocar entre fileiras e a implementação de um sistema de controle em malha fechada utilizando o método de otimização H infinito.

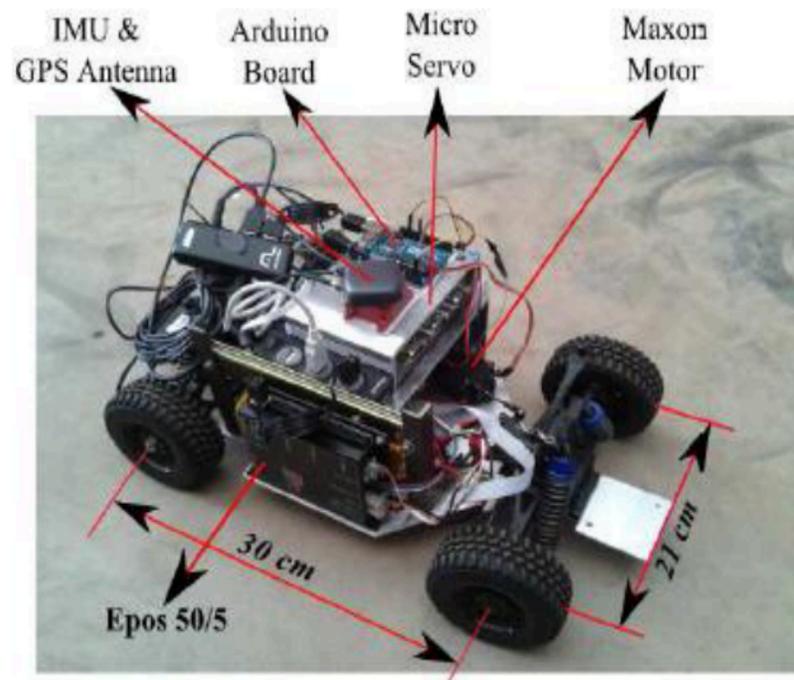
Um protótipo de robô móvel do tipo car-like foi construído para executar o deslocamento entre fileiras de cultura. O cenário de movimentação do protótipo está representado na figura 11, enquanto o robô utilizado para essa finalidade é demonstrado na figura 12.

Figura 11 - Representação do cenário de trabalho do protótipo



Fonte: Guerrero (2016).

Figura 12 - Plataforma utilizada para o desenvolvimento



Fonte: Guerrero (2016).

O protótipo corresponde a um veículo do tipo "car-like", cuja manobrabilidade é dependente do esterçamento das rodas frontais.

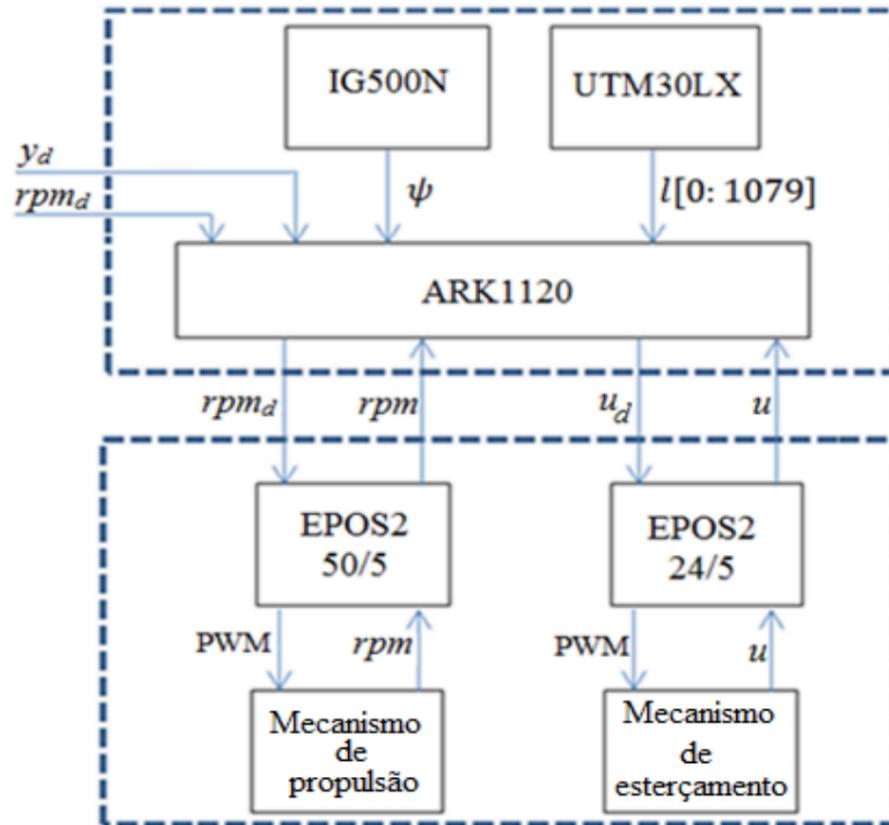
Os itens embarcados no protótipo incluem:

1. Sensor LiDAR Hokuyo UTM30LX: Utilizado para navegação, possui uma varredura de 270° e alcance de até 30 metros.
2. Arranjo para propulsão.
3. Arranjo para o esterçamento das rodas frontais.
4. Computador industrial ADVANTECH ARK 1122H.
5. Conjunto de baterias LiPo para o computador e os sensores.
6. Unidade inercial IG500N: Fornecendo informações de GPS através de comunicação serial com o computador.
7. Antena GPS.
8. Conjunto de baterias LiPo para os mecanismos de propulsão e esterçamento.
9. Placa EPOS-2 24/5.
10. Placa EPOS-2 50/5.
11. Roteador de rede sem fio.

O sensor LiDAR Hokuyo UTM30LX da empresa Hokuyo é empregado para navegação, enquanto o computador embarcado modelo ARK-1120 é responsável pelo processamento e controle do sistema. O sistema inercial IG500N fornece informações de GPS por meio de comunicação serial com o computador.

A figura 13 demonstra as interações entre os dispositivos do sistema, mostrando a integração dos componentes mencionados para o funcionamento do protótipo.

Figura 13 - Interação entre dispositivos do sistema

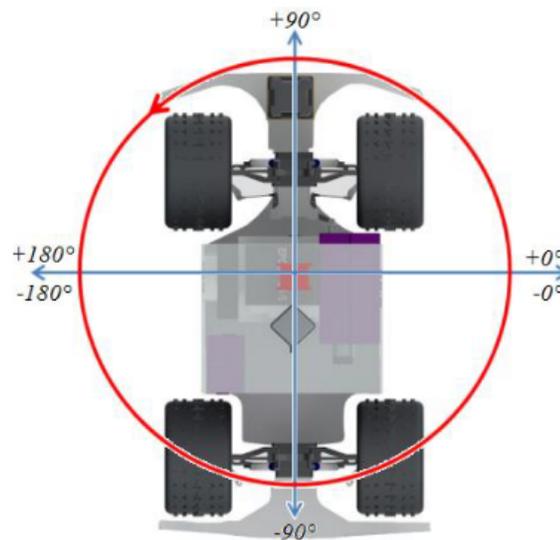


Fonte: Guerrero (2016).

Para realizar o deslocamento do robô, foi empregado o conceito de seguidor de muro, utilizando o sensor LiDAR na configuração de 180° e o GPS, combinados com as informações da IMU embarcada no sensor inercial IG500N para determinar a orientação do robô em relação aos seus eixos.

O sensor LiDAR fornece dados sobre o ambiente circundante e o GPS fornece a localização do robô, enquanto a IMU fornece informações sobre a orientação do robô em relação aos seus eixos. Esses dados são integrados no computador embarcado para realizar o controle do robô e garantir seu deslocamento de maneira precisa e eficiente. A figura 14 representa a medição realizada pelo sensor inercial, mostrando as informações capturadas e utilizadas para determinação da orientação do robô em relação aos seus eixos.

Figura 14 - Medição da orientação do veículo usando o Sistema Inercial IG500N



Fonte: Guerrero (2016).

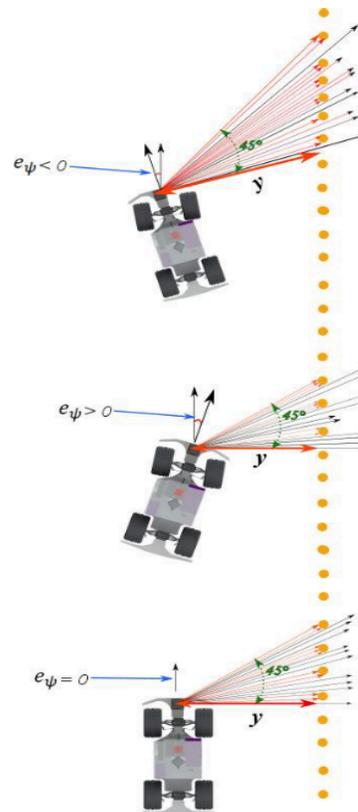
Na figura 15 são representadas as três situações possíveis de posicionamento do robô, com erro nulo de orientação onde o robô continua o trajeto sem a necessidade de correção e duas outras situações onde ocorre um erro de orientação positivo ou negativo, resultando em desvios angulares em relação à trajetória desejada. Quando ocorrem esses desvios, o controle da trajetória é realizado pelo entrelaçamento das rodas frontais do robô. Esse mecanismo aciona o controle em malha fechada para corrigir a trajetória, garantindo que o robô retorne ao curso correto.

Os resultados obtidos pelo projeto foram satisfatórios, evidenciando o bom funcionamento da orientação do robô com o sensor LiDAR e o sistema de orientação inercial. A integração desses sistemas permitiu uma navegação precisa e confiável, garantindo que o robô pudesse se deslocar de forma eficiente entre as fileiras de cultivo. O sensor LiDAR proporcionou uma percepção detalhada do ambiente ao redor do robô, permitindo a detecção de obstáculos e a análise precisa do terreno. Por sua vez, o sistema de orientação inercial forneceu informações cruciais sobre a orientação do robô em relação aos seus eixos, complementando os dados obtidos pelo LiDAR.

Essa combinação de sensores possibilitou ao robô reagir de forma rápida e precisa a mudanças no ambiente, garantindo um deslocamento suave e eficiente entre

as fileiras de cultivo. Assim, os resultados alcançados demonstram a viabilidade e eficácia do uso do sensor LiDAR e do sistema de orientação inercial para a navegação autônoma do robô em ambientes agrícolas.

Figura 15 - Representação de três possíveis situações de orientação do robô



Fonte: Guerrero (2016).

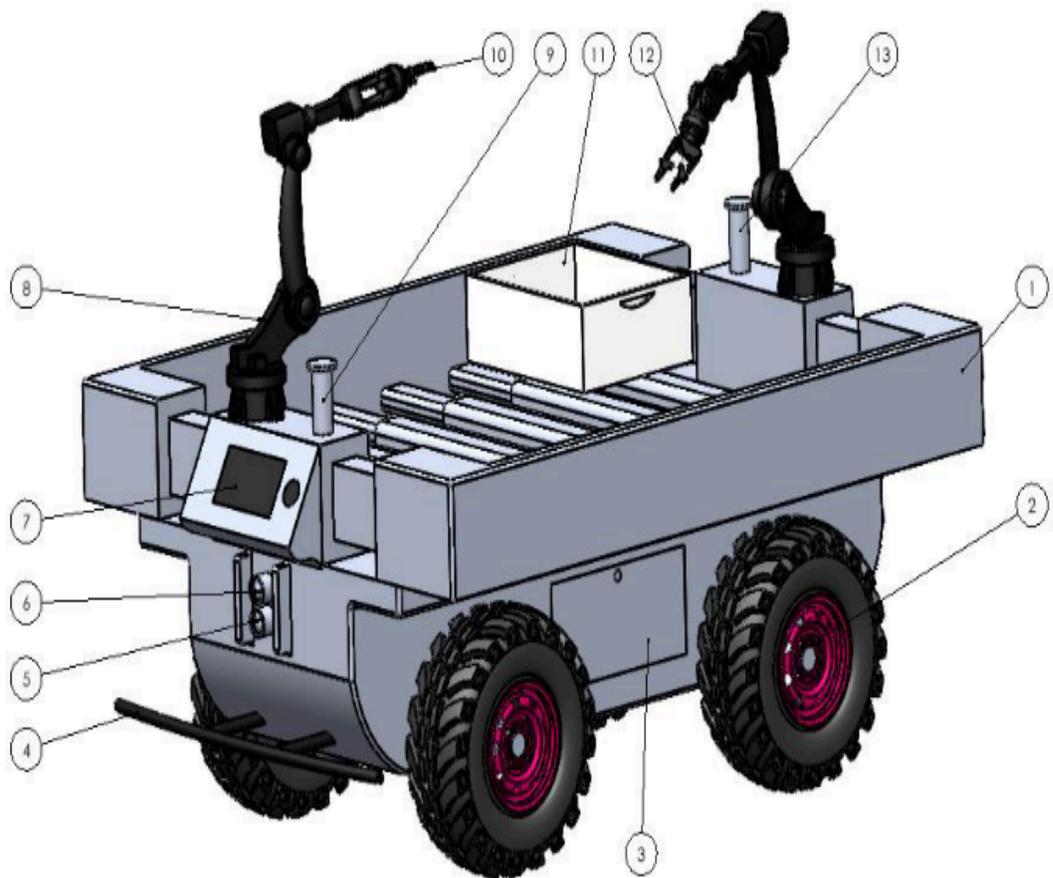
### 2.6.3 - Projeto de um robô móvel para tarefas de apoio à vindima

Na sua dissertação de mestrado, Aires (2023) discute a concepção de uma plataforma para a colheita de uvas. O robô proposto será composto por um sistema de locomoção de 4 rodas motrizes 4WD (4 Wheel Drive), sensores de mapeamento, visão computacional, sensores de localização e braços robóticos para facilitar a colheita das

uvas. Além disso, o robô terá a capacidade de ser adaptado para outras tarefas, como pulverização de herbicidas e poda, através da utilização de garras especializadas.

A figura 16 ilustra a estrutura concebida para o robô, enquanto na tabela 1 são apresentadas as legendas dos componentes utilizados no projeto. Este trabalho foi realizado em ambiente virtual, sem a construção de um protótipo físico.

Figura 16 - Protótipo do robô



Fonte: Aires (2023).

Tabela 1 - Legenda de componentes

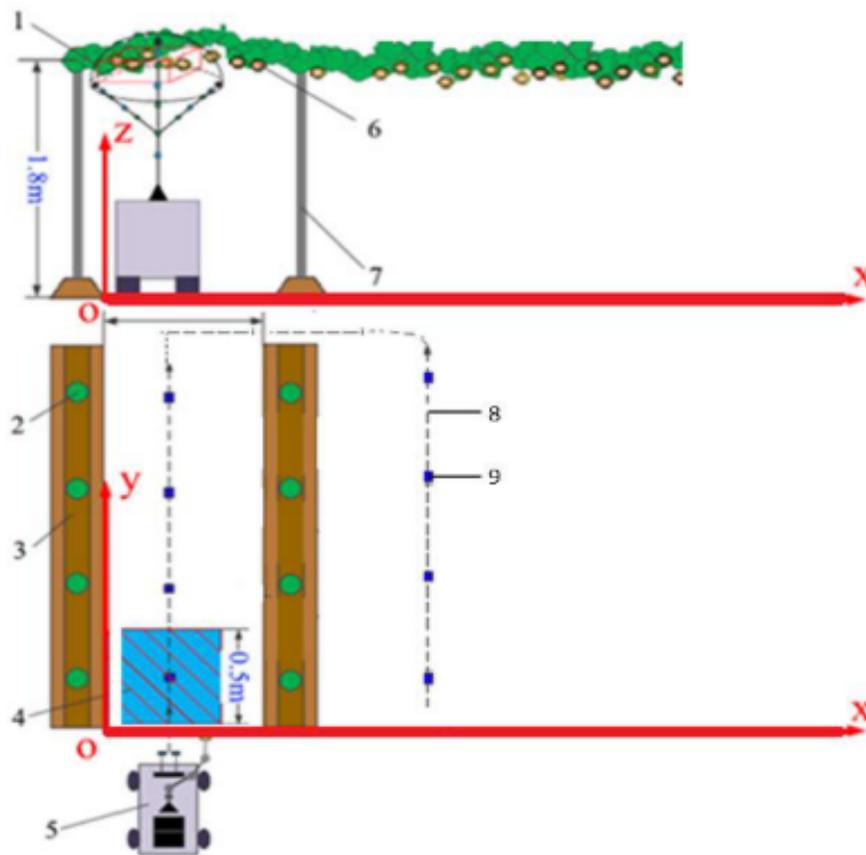
<b>Número</b>	<b>Designação</b>
1	Corpo do robô
2	Encoders
3	Dispositivos eletrônicos, IMU, bateria e sensores de temperatura e umidade
4	Para-choques
5	Câmeras NIR e RGB
6	Unidade de controle
7	Braço robótico
8	Câmera LiDAR
9	Pinça de dois dedos
10	Caixa transportadora
11	Sensores ambientais e GPS

Fonte: Aires (2023).

Na abordagem do sistema de navegação neste trabalho, foi empregado um encoder em cada roda do robô, juntamente com um sensor inercial IMU e uma unidade de sensor LiDAR, para estimar a sua localização. A combinação desses sensores proporciona uma estimativa mais precisa e robusta do estado do robô.

A trajetória a ser seguida pelo robô é retratada na figura 17, onde os troncos da videira são utilizados como referência para a navegação. Essa abordagem permite que o robô se desloque de forma autônoma entre as fileiras de videiras, utilizando os troncos como guias visuais para a sua trajetória.

Figura 17 - Diagrama esquemático do funcionamento móvel do robô.



Fonte: Aires (2023).

Legenda:

- 1- Espaço de trabalho em forma de guarda-chuva para polinização;
- 2- Videira;
- 3- Zonas de videiras distribuídas em colunas;
- 4- Localização para uma única colheita;
- 5- Robô;
- 6- Uvas;
- 7- Treliças das vinhas;
- 8- Trajetória do robô;
- 9- Pontos de paragem do robô.

Na simulação, a plataforma CoppeliaSim foi empregada para realizar os testes do projeto. Durante o ensaio de movimentação entre as videiras, verificou-se que o sistema se mostrou acessível, demonstrando a eficácia do sistema de controle e programação adotados. Essa constatação valida a robustez e a funcionalidade do sistema desenvolvido, indicando sua capacidade de navegar de forma eficiente e precisa no ambiente representado, constituído pelas fileiras de videiras.

#### **2.6.4 - Desenvolvimento de um protótipo de veículo autônomo a partir de um carro telecomandado**

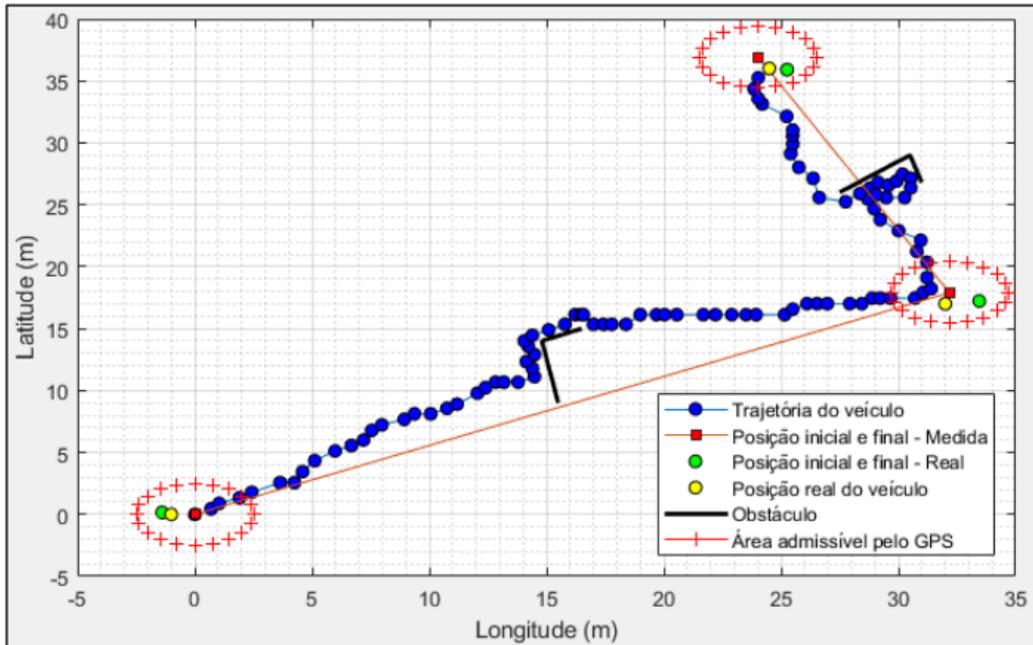
Na sua dissertação de mestrado, Marçal (2023) aborda a construção de um protótipo de veículo autônomo capaz de se deslocar por trajetos pré-definidos, desviando de obstáculos. O sistema é fundamentado na unidade de processamento Arduino Mega e faz uso de diversos sensores ultrassônicos para evitar colisões com obstáculos. Além disso, incorpora um magnetômetro para orientação como uma bússola, um módulo Bluetooth e um sistema de GPS para localização e comunicação.

Para controlar os motores do veículo, foi escolhido o driver ponte H L298D como controlador. Este dispositivo possibilita o controle de velocidade e direção dos motores, viabilizando o movimento do veículo de forma autônoma e segura.

No projeto, o módulo GPS e o magnetômetro foram utilizados para orientação do veículo. Observou-se que o módulo GPS apresenta um erro de leitura em torno de 1 metro da posição desejada. Por sua vez, o sensor ultrassônico foi empregado para detecção e desvio de obstáculos.

A navegação foi realizada por meio de coordenadas geográficas. O protótipo obteve êxito ao alcançar todos os pontos pretendidos sem colidir com obstáculos, na figura 18 é mostrado um dos testes de trajetória, com obstáculos e múltiplos pontos, realizado pelo robô. No entanto, algumas limitações foram identificadas no projeto: o módulo GPS apresenta um erro considerável e a unidade de processamento poderia realizar mais amostras por segundo para aumentar a eficiência na coleta de sinais pelos sensores.

Figura 18 - Ensaio com várias coordenadas e obstáculos



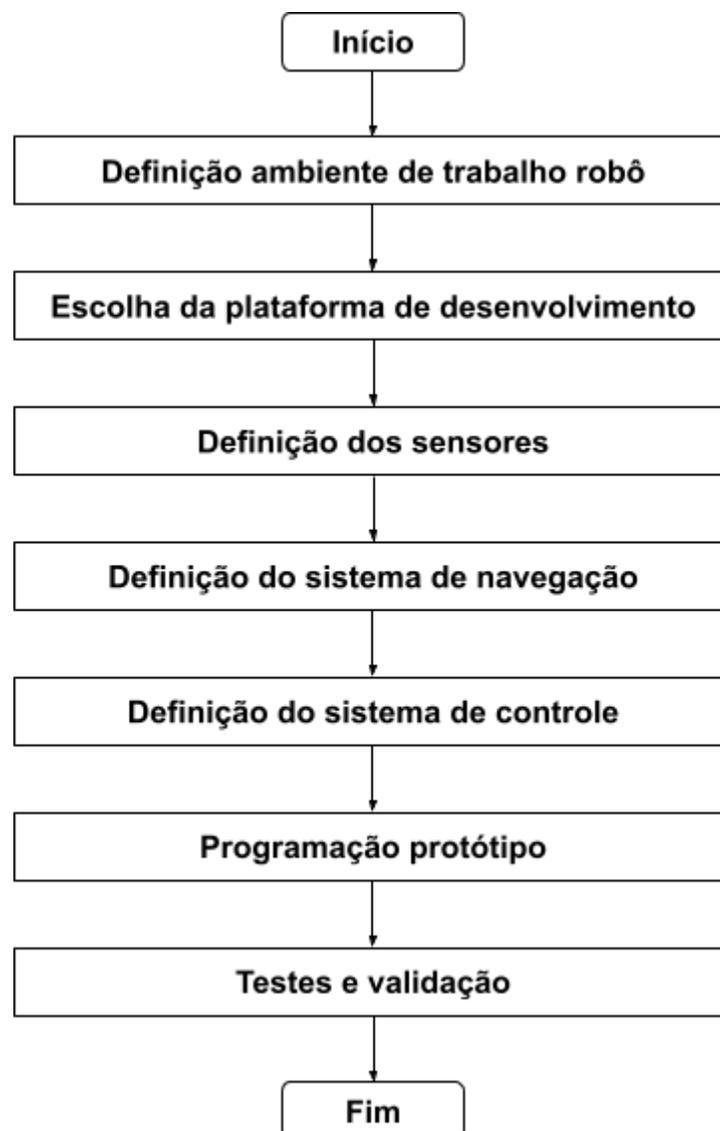
Fonte: Marçal (2023).

Os estudos analisados neste capítulo propõem métodos que contribuem para a realização do objetivo geral deste trabalho, apresentando abordagens de solução semelhantes. Esses trabalhos servirão de modelo para o desenvolvimento deste projeto, no próximo capítulo, será apresentada a proposta metodológica desenvolvida para este trabalho, fundamentada nos estudos analisados neste capítulo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão detalhados a metodologia e os materiais utilizados para o desenvolvimento do projeto, garantindo que os objetivos propostos sejam alcançados. Serão abordadas a escolha dos componentes utilizados no projeto e suas especificações técnicas. O fluxograma apresentado na figura 19 ilustra as etapas a serem desenvolvidas no projeto.

Figura 19 - Diagrama representando as fases do projeto

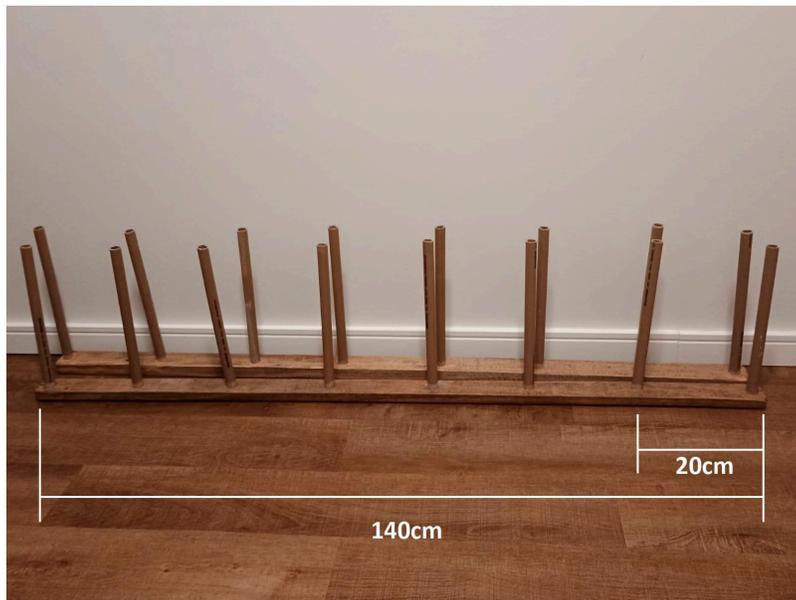


Fonte: O autor.

### 3.1 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO EM FILEIRAS

Para iniciar os testes com o protótipo, foi construída uma estrutura simulando fileiras de videiras semelhantes às encontradas em vinhedos reais. As fileiras foram confeccionadas utilizando canos de PVC de 2 cm de diâmetro, espaçados 20 cm entre si, e fixados em uma base de madeira de 140 cm de comprimento. Essa estrutura foi projetada para testes em ambiente interno, facilitando a realização do experimento. Na Figura 20 encontra-se a representação dessa estrutura.

Figura 20 - Estrutura construída para simular fileiras de videiras

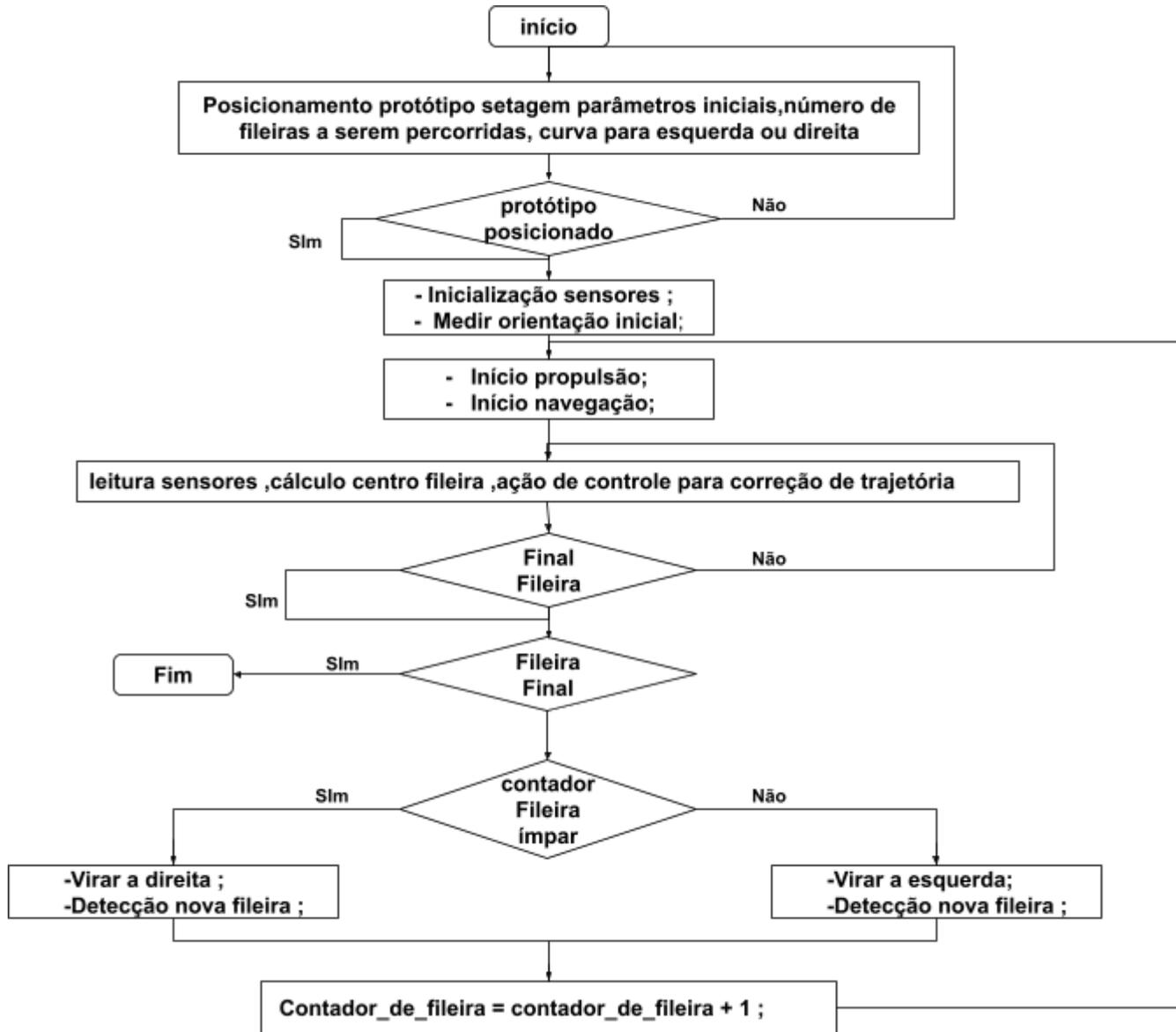


Fonte: o autor.

#### 3.1.1 Movimentação proposta

O ambiente de trabalho do robô é uma estrutura que simula um parreiral de uvas. A orientação do robô se dá com base nos canos de PVC que simulam os troncos das videiras e os postes, que estão presentes na estrutura de um parreiral, que é montado em um sistema de fileiras. O veículo utiliza essa estrutura para se guiar. Na figura 21 está representado o diagrama da movimentação proposta para o robô.

Figura 21 - Diagrama de movimentação do robô entre fileiras de uvas



Fonte: O autor.

Para o posicionamento inicial o veículo é levado até a fileira de início e recebe do usuário a informação sobre o número de fileiras a percorrer e a direção da primeira curva (esquerda ou direita), o contador de fileira recebe um valor inicial fornecido pelo usuário, podendo ser 1 ou 0, se usuário informa que a primeira curva é para a direita o contador recebe o valor 1, caso informado que a primeira curva é a esquerda o contador recebe o valor 0.

Após posicionar o robô, o sistema é inicializado com a medição do robô e o acionamento dos sensores. Em seguida, os motores são acionados, dando início à navegação do sistema que tem como objetivo manter o robô no centro da fileira, durante o percurso pela fileira, o sensor LiDAR calcula as distâncias laterais para manter o robô no centro da fileira até a detecção do final da fileira, que acontece quando o sensor LiDAR não detecta mais canos de PVC à esquerda e à direita. Neste momento, o robô realiza a manobra para entrar na nova fileira.

Para realizar a manobra entre fileiras, o sistema utiliza um contador de fileiras ímpar, que realiza o somatório das fileiras percorridas. Quando o número do contador for ímpar, o robô vira para direita; quando for par, o robô vira para esquerda. Este ciclo continua até que o robô chegue à fileira final. Ao entrar na nova fileira, o sistema de navegação será reiniciado, seguindo novamente até encontrar o final da fileira. Este processo de navegação entre fileiras continua até que o robô tenha percorrido todas as fileiras especificadas pelo usuário. Ao chegar à fileira final, o sistema é interrompido.

## 3.2 MATERIAIS

Para a confecção do protótipo se faz uso de diferentes materiais que são descritos a seguir.

### 3.2.1 Sensor Laser LiDAR 2d

A tecnologia LiDAR mede a distância entre o laser e um objeto, ao calcular o tempo decorrido entre a emissão de um feixe de laser pulsado e a recepção de seu eco. Este tempo é então utilizado para estimar a distância. Isso permite que os sensores LiDAR gerem uma imagem 3D ou 2D com dados espaciais e de profundidade para detectar, medir, localizar e rastrear objetos.

Em ambientes industriais, como fábricas e armazéns, os sensores LiDAR com área de detecção em tempo real de até 360° são usados para detectar obstáculos. Em veículos de transporte, por exemplo, os sistemas detectam distâncias e previnem colisões com pessoas, objetos ou outros veículos. Seus dados de medição permitem a

navegação precisa e a detecção de objetos, independentemente das condições de iluminação, tanto em ambientes internos quanto externos (Sick, 2024).

Para o presente trabalho, foi selecionado o sensor laser LiDAR da marca chinesa Slamtec, denominado RPLIDAR-C1M1 representado na figura 21. Este sensor é baseado na tecnologia DTOF (*Direct Time of Flight*), que permite medições precisas, na ordem de milímetros, ao medir diretamente o tempo que um pulso laser leva para viajar do sensor até o objeto e retornar. Essa abordagem resulta em uma alta precisão e capacidade de capturar milhões de pontos de dados por segundo.

Figura 22 - Sensor laser lidar RPLIDAR-C1M1 da empresa Slamtec



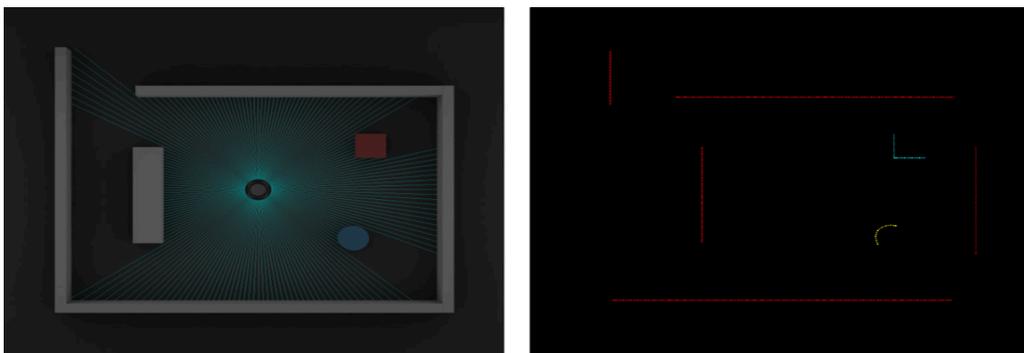
Fonte: Slamtec RPLIDAR C1.

De acordo com o fabricante, o RPLIDAR-C1M1 requer alimentação de uma fonte de corrente contínua de 5 V, com um consumo nominal de 230 mA. Ele possui uma velocidade de varredura de 600 RPM (rotações por minuto) e pode operar em uma faixa de temperatura que varia de -10 °C a 40 °C. Seu peso é de 110 g.

O sensor utiliza uma fonte laser com comprimento de onda de 905 nm para realizar uma varredura completa em um ângulo de abertura de 360°. Essa varredura é particionada em 500 passos, proporcionando uma resolução angular entre passos de 0,72°. O sensor é capaz de detectar objetos à frente de cada passo em distâncias que variam de 0,05m a uma distância máxima de 12 m. Ele opera com uma frequência de amostragem de 5 KHz e uma frequência de verificação de 10 Hz, e sua interface de comunicação é TTL UART com taxa de transmissão de 460800 BPS (Bytes por Segundo), (*Slamtec RPLIDAR C1*).

A escolha deste sensor foi motivada pelo seu custo reduzido em comparação com outros modelos disponíveis no mercado, além de atender aos requisitos específicos da aplicação. A figura 23 retrata um exemplo de medição realizada com este sensor.

Figura 23 - Representação da medição realizada pelo sensor laser lidar RPLIDAR-C1M1 da empresa slamtec



Fonte: Slamtec RPLIDAR C1.

A Figura 23 ilustra uma detecção realizada pelo sensor LIDAR. Na imagem à esquerda, o sensor é representado no centro, com os objetos posicionados ao redor de seu contorno. Os feixes de laser emitidos pelo sensor são indicados irradiando em direção aos objetos. Na imagem à direita, são apresentados os pontos de reflexão dos feixes, formando uma representação visual correspondente à percepção do sensor em relação ao ambiente detectado.

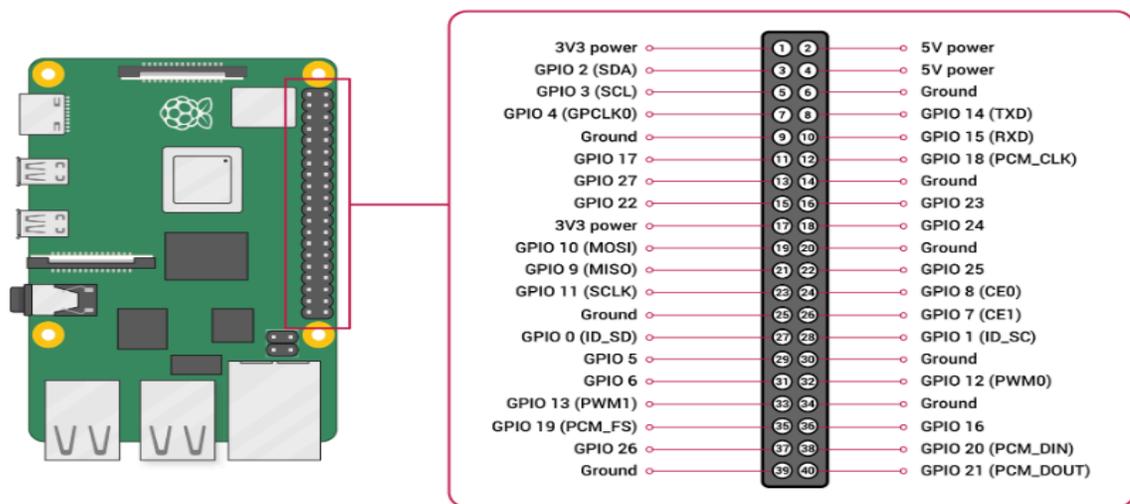
### 3.2.2 Raspberry Pi

Para realizar o controle do sistema e a leitura dos sensores, foi escolhida a placa de controle Raspberry Pi, considerada um computador de baixo custo e dimensões reduzidas, de placa única, com grande poder de processamento. Essa versatilidade permite seu uso em diferentes tipos de projetos, tanto escolares quanto industriais, tornando-a bastante popular no mundo da tecnologia.

Uma das razões para sua utilização em projetos de robótica são seus 40 pinos de GPIO (*General Purpose Input/Output*). A interface GPIO expande suas possibilidades, permitindo a conexão com componentes eletrônicos para projetos de IoT e robótica. Esses pinos possibilitam a conexão de sensores, motores e outros dispositivos eletrônicos, facilitando seu controle. Além disso, os pinos GPIO incluem suporte para interfaces de comunicação como I2C, SPI (*Serial Peripheral Interface*) e UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), além de pinos de alimentação e aterramento.

A Raspberry Pi suporta uma ampla variedade de linguagens de programação, como Python, C++ e Java, além de sistemas operacionais como Raspbian e Ubuntu. A figura 23 representa os pinos GPIO da Raspberry Pi.

Figura 24 - Representação Pinout Raspberry Pi 3 B+.



Fonte: Hardware Raspberry Pi (2024).

Para o presente trabalho, foi escolhido utilizar a placa Raspberry Pi 3 Model B+, principalmente por apresentar um custo mais acessível em comparação com modelos mais recentes e oferecer um bom processamento e custo-benefício.

### 3.2.3 Sistema Inercial IMU

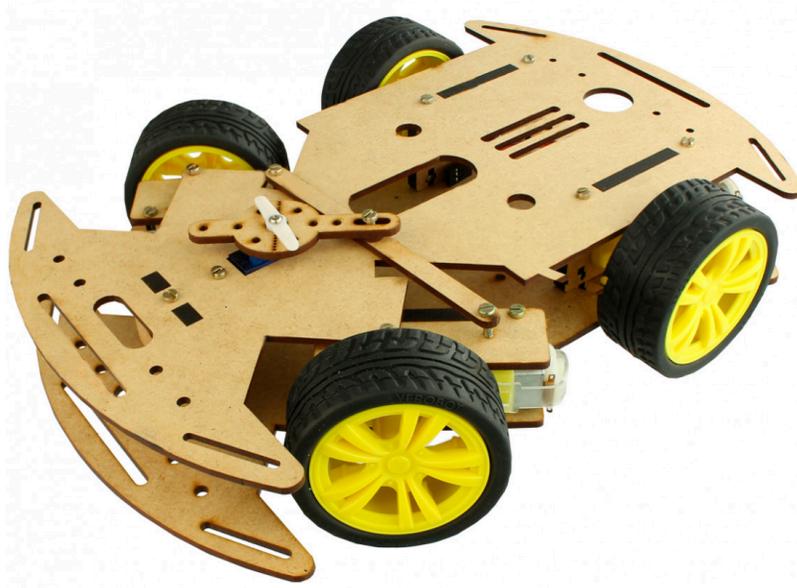
O módulo MPU-9250 é um sensor inercial de 9 eixos que combina um acelerômetro de três eixos, um giroscópio de três eixos e um magnetômetro de três eixos em um único chip. Este módulo é amplamente utilizado em projetos que requerem medições precisas de movimento e orientação, como drones, robótica e sistemas de navegação. Suporta comunicação via I2C e SPI, facilitando a integração com diversas plataformas, incluindo a Raspberry Pi.

MPU-9250 oferece medições precisas de aceleração, rotação e campo magnético, permitindo a detecção de movimentos e orientações em três dimensões. Tanto o acelerômetro quanto o giroscópio têm sensibilidade ajustável, permitindo que o usuário configure o sensor de acordo com a aplicação específica.

### 3.2.4 Plataforma Para Prototipagem

Para a realização dos testes de movimentação, optou-se pela utilização de um carrinho de baixo custo confeccionado em MDF (*Medium Density Fiberboard*). Este carrinho é do tipo 4WD, equipado com quatro motores independentes, cada um com sua própria caixa de redução. Além disso, o carrinho possui um servo SG90 que é responsável por controlar a curvatura das rodas frontais, permitindo realizar as manobras necessárias para o movimento do carrinho. A figura 25 traz a representação do carrinho utilizado no projeto.

Figura 25 - Carrinho para Desenvolvimento do Projeto



Fonte: Usinainfo (2024).

### 3.2.5 Componentes do Carrinho

- **Motor** - O motor utilizado no projeto é um motor DC de 3-6 V apresentado na figura 26, com uma velocidade nominal de 200 RPM. Ele se diferencia dos demais motores por possuir uma caixa de redução e um eixo duplo. Através dos dois pólos existentes na ponta, é possível fazer a inversão da polaridade, o que permite ao motor girar tanto no sentido horário quanto no anti-horário.

Figura 26 - Motor usado no projeto



Fonte: Usinainfo (2024).

Este motor é equipado com uma caixa de redução exclusiva, com uma relação de 48:1, o que proporciona um torque considerável, segundo o fabricante o motor atinge um torque de 0,35 Kgf/cm a 3 V e 0,80 Kgf/cm a 6 V. A corrente com carga do motor varia de 100 mA a 250mA a depender da carga.

- **Servo SG90** - No projeto de controle de direção do carrinho, o micro servo SG90 visto na figura 27 será utilizado para ajustar o entrelaçamento das rodas frontais, permitindo a mudança de direção com precisão.

Figura 27 - Micro servo SG90



Fonte: Usinainfo (2024).

Este servo motor possui um ângulo de rotação de 0° a 180°, operando com uma tensão de 4,8 V a 6,0 V. Ele oferece um torque de 1,2 kgf·cm a 4,8 V e 1,6 kgf·cm a 6,0 V. A posição do eixo é controlada através de modulação por largura de pulso PWM (*Pulse Width Modulation*), onde a largura do pulso indica a posição desejada dentro do intervalo de movimento. Com uma corrente de operação de 100 mA sem carga e 750 mA com carga, o SG90 é eficiente e compatível com diversas plataformas de microcontroladores, como Arduino e Raspberry Pi. Projetado para operar em temperaturas que variam de -30°C a 60°C, o servo é interligado por três pinos: VCC (Voltagem em Corrente Contínua); GND (*Graduated Neutral Density*) e PWM. Este servo é ideal para o controle preciso da direção, integrando-se facilmente aos sistemas de controle do carrinho.

- **Driver Motor Shield L293D** - Para garantir a operação adequada dos motores através da placa de controle Raspberry Pi, que por si só não pode fornecer

corrente suficiente para acioná-los diretamente, é necessário utilizar um driver de motor que pode ser observado na figura 28.

Figura 28 - Motor shield L293D



Fonte: Usinainfo (2024).

Nesse contexto, o Motor Shield L293D foi escolhido devido às suas características robustas e capacidade de controle avançado. Baseado no CI L293D, este shield de motor é um driver de ponte H duplo, permitindo não apenas controlar a direção, mas também regular a velocidade de até quatro motores DC ou dois motores de passo simultaneamente. Cada canal do L293D no shield pode suportar correntes de até 600mA de forma contínua, com picos de até 1,2 A, tornando-o adequado para uma ampla gama de aplicações. Operando com uma faixa de tensão de 5,0 V a 12,0 V e podendo acionar motores de 4,5 V a 25,0 V. Além disso, ele inclui proteção contra sobreaquecimento.

### 3.2.6 Sistema de alimentação

Para que o protótipo possa navegar de forma autônoma, é necessário um sistema de alimentação capaz de fornecer energia a todos os componentes de maneira eficiente e contínua. Para este propósito, optou-se por um power bank como fonte de alimentação do sistema. O Raspberry Pi 3 B+ requer uma tensão estável de 5 V e uma corrente mínima de 2,5 A para funcionar corretamente.

Devido à necessidade de operar de forma independente e longe de fontes de energia, o *power bank* (banco de potência) foi selecionado por apresentar características técnicas adequadas: saída estabilizada de 5 V, proteção contra sobrecorrente e portas USB compatíveis com o Raspberry Pi 3 B+. O *power bank* escolhido é um modelo da Samsung com capacidade de 10.000 mAh, saída de 5 V e corrente máxima de 3 A, suficiente para alimentar o Raspberry Pi 3 B + e os periféricos conectados.

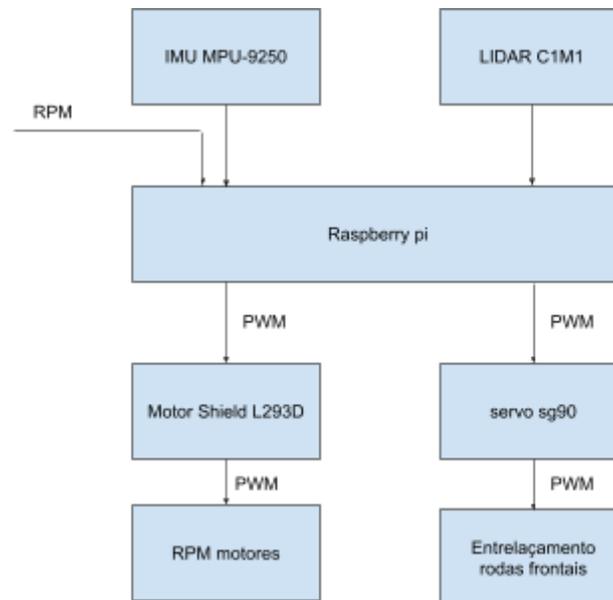
Como os pinos GPIO do Raspberry Pi podem fornecer um máximo de 1,2 A, foi necessário considerar o consumo dos periféricos do sistema. Entre os periféricos, o sensor LiDAR consome 230 mA, o servo motor SG90 consome até 750 mA com carga, e há quatro motores DC, cada um com consumo de 250 mA. Esse consumo total excede a capacidade de corrente fornecida pelos pinos GPIO do Raspberry Pi, justificando a necessidade de uma fonte de alimentação externa.

Portanto, optou-se por utilizar uma fonte de alimentação externa para alimentar o micro shield L293D, que fornece energia aos motores e ao servo, evitando sobrecarregar o Raspberry Pi. Nesse contexto, foram utilizadas três baterias de 12.800 mAh e 3,7 V, dispostas em um suporte de baterias, de forma a fornecer a energia necessária para o funcionamento do sistema.

### 3.3 METODOLOGIA

Para atender o objetivo geral do trabalho, que consiste no desenvolvimento de protótipo de veículo autônomo com capacidade de percorrer fileiras de um parreiral, se faz a seguinte proposta metodológica. A figura 29 ilustra o diagrama de blocos que representa a interação entre os diferentes componentes que compõem o protótipo.

Figura 29 - Interação entre os diferentes componentes embarcados no carrinho



Fonte: O autor.

Na figura 29 é demonstrada a interação entre os componentes do carrinho. Este é constituído por um sensor IMU, responsável por fornecer a orientação do carrinho em relação aos seus eixos, e um sensor LiDAR, que gera uma nuvem de pontos com as 500 distâncias medidas pelo sensor. Esses dados são transferidos para um Raspberry Pi por meio de comunicação serial, após, se comunica com a IMU utilizando o protocolo I2C. Além disso, são transmitidas as informações de RPM desejadas para os motores.

Após a Raspberry Pi receber os dados dos sensores, ela realiza a transferência do valor desejado de RPM diretamente para o motor shield utilizando um sinal PWM. O motor shield, por sua vez, transmite esse valor para os motores do carrinho, controlando assim a velocidade das rodas. Simultaneamente, a posição do servo responsável pelo entrelaçamento das rodas frontais é calculada pelo controlador PI que será posteriormente modelado. Nesse contexto, o algoritmo embarcado na Raspberry Pi utiliza os dados provenientes da IMU e do LiDAR para determinar os ajustes necessários no ângulo de entrelaçamento das rodas dianteiras do carrinho.

### 3.3.1 Configurações iniciais dos componentes

No Raspberry Pi foi instalado o sistema operacional Raspberry Pi OS, para suportar o algoritmo de controle que é desenvolvido com a utilização da linguagem Python. O sensor LiDAR se comunica com o Raspberry Pi por meio de uma interface serial através da porta USB, fornecendo dados de ângulo e distância até o objeto detectado, com base na reflexão da luz. Para a leitura e processamento dos dados foram utilizadas bibliotecas da plataforma Python que simplificam a integração, sendo permitidas algumas adaptações, como a configuração da taxa de transmissão para 460800 bps, devido à sensibilidade do sensor a essa velocidade específica.

Devido ao elevado volume de dados gerados pelo sensor, que realiza cerca de 5000 leituras por segundo, a abordagem inicial de processamento por meio de threads não apresentou um desempenho satisfatório, resultando em frequentes travamentos do código. Essa limitação ocorreu porque o sistema não conseguiu gerenciar adequadamente o intenso fluxo de informações. Assim, decidiu-se implementar o processamento de forma assíncrona, o que possibilitou uma gestão mais eficiente das tarefas e aumentou a responsividade ao lidar com o alto volume de dados.

### 3.3.2 Configurações sensor inercial MPU 9250

O MPU-9250 foi conectado ao Raspberry Pi utilizando os pinos de comunicação I2C, SDA e SCL, conforme ilustrado no esquema elétrico figura 47 apêndice B desenvolvido no software KiCad. Para este projeto, é necessário determinar o desvio da direção do veículo em relação à fileira. Para isso, os dados do acelerômetro, giroscópio e magnetômetro serão combinados para calcular os três ângulos de Euler, conhecidos como *roll*, *pitch* e *yaw*, amplamente utilizados na navegação, tanto em aeronaves quanto em veículos automotores.

O ângulo de *roll* (ângulo de rotação) mede a rotação ao longo do eixo X, alterando a orientação no plano YZ e afetando a posição lateral do objeto. O ângulo de *pitch* (ângulo de inclinação) mede a rotação ao longo do eixo Y, modificando a orientação no plano XZ, medindo a inclinação do objeto para cima ou para baixo. Por

fim, o ângulo de *yaw* (ângulo de guinada) mede a orientação ao longo do eixo Z, alterando a orientação no plano XY e medindo o giro do objeto para a esquerda ou direita. Esses ângulos são fundamentais para a determinação da orientação do veículo em seu ambiente. No presente trabalho é utilizado o ângulo de *Yaw* para cálculo de desvio do veículo em relação à fileira de cultura.

A determinação dos ângulos de *pitch*, *roll* e *yaw* foi realizada utilizando a biblioteca *smbus*, que é empregada para a comunicação com dispositivos I2C, como o MPU-9250. O cálculo desses ângulos foi feito com base nos dados obtidos do acelerômetro e giroscópio do MPU-9250. Embora o MPU-9250 possua também um magnetômetro de três eixos, que poderia ser utilizado para aprimorar a precisão na determinação dos ângulos de orientação, o magnetômetro não foi identificado corretamente no barramento I2C devido ao fato de apresentar um endereço I2C diferente. Em função disso, não foi possível estabelecer comunicação com o magnetômetro, o que impossibilitou seu uso neste projeto.

A seguir são apresentadas as fórmulas utilizadas para o cálculo dos ângulos de *pitch*, *roll* e *yaw*, com base nas medições de aceleração e taxa de rotação. As variáveis são definidas da seguinte forma,  $a_x$  : Aceleração no eixo X,  $a_y$ : Aceleração no eixo Y,  $a_z$ : Aceleração no eixo Z,  $\omega_x$ : Taxa de rotação no eixo X,  $\omega_y$  : Taxa de rotação no eixo Y,  $\omega_z$ : Taxa de rotação no eixo Z.

$$pitch = \arctan\left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}}\right) \quad (2)$$

$$roll = \arctan\left(\frac{-a_x}{a_z}\right) \quad (3)$$

$$yaw(t) = \int \omega_z(t) dt \quad (4)$$

Para aprimorar a precisão das leituras, foi implementado um filtro de Kalman que combina as medições do acelerômetro e do giroscópio. Oliveira(2017) realizou um estudo de implementação de sensor inercial similar ao do projeto que comprova a eficiência do filtro de kalman na melhora do desempenho das leituras dos dados gerados pelo sensor, o giroscópio é mais preciso para detectar movimentos rápidos, mas sofre de drift (erro acumulado) ao longo do tempo, enquanto o acelerômetro fornece estimativas precisas para movimentos lentos, mas está sujeito a ruídos decorrentes da aceleração gravitacional. O filtro de Kalman realiza a fusão dessas medições, proporcionando uma estimativa mais estável e menos suscetível a ruídos.

### **3.3.3 Configurações motor shield L293d**

Para o controle dos motores elétricos, foi escolhido o Motor Shield L293D, que é um driver de motores capaz de controlar até 4 motores DC. O shield é composto por dois circuitos integrados (CIs) L293D, cada um com capacidade de controle de 2 motores DC através de dois circuitos de ponte H. Ele possui 4 pinos de controle para acionamento dos motores e dois pinos de enable que podem ser alimentados com sinais PWM para ajustar a velocidade dos motores.

O Motor Shield L293D também integra um registrador de deslocamento de 8 bits, o CI 74HC595, que permite controlar os 4 motores com um número reduzido de pinos do microcontrolador. Ele opera com os seguintes pinos principais: o SH (Shift Clock), que desloca os dados no registrador a cada pulso de clock; o ST (Store Clock), que, após o envio dos dados, trava as informações no registrador e as envia para as saídas paralelas com um pulso; o DS (Data Serial), que recebe os dados bit a bit de forma serial; e o OE (Output Enable), que habilita ou desabilita as saídas do registrador. As saídas do 74HC595 são ligadas aos motores e a entrada do registrador conectada ao Raspberry PI onde também são conectados os pinos de enable de cada motor, no presente trabalho os pinos de enable serão alimentados com o mesmo sinal pwm permitindo um controle simultâneo dos motores. A figura 48 que encontra-se no apêndice B traz o esquema elétrico das ligações Raspberry PI motor shield e motores

O acionamento dos motores ocorre devido à diferença de potencial aplicada entre os terminais de controle, sendo que a direção do movimento é determinada pela

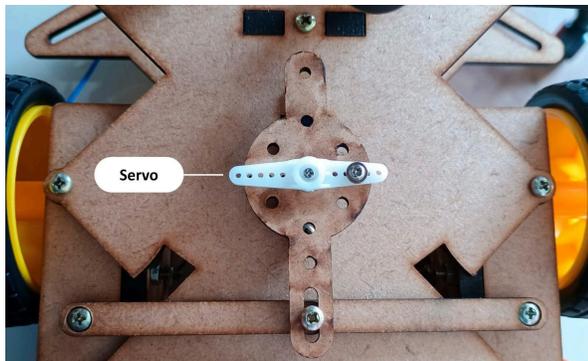
combinação dos valores lógicos nos terminais de controle. Quando o bit 1 é aplicado no terminal 1 e o bit 0 no terminal 2, uma diferença de potencial é gerada, fazendo o motor girar em uma direção. A inversão dos bits nos terminais inverte a polaridade, fazendo o motor girar no sentido oposto. Quando os bits em ambos são iguais, não há diferença de potencial, resultando no desligamento do motor, ou seja, o motor permanece parado.

Após os testes realizados, foram definidos os seguintes valores binários para o controle da direção de rotação dos motores: 0b01100011 para acionamento no sentido horário e 0b10011100 para acionamento no sentido anti-horário. Esses valores binários são enviados para o deslocador de 8 bits e juntamente com o sinal pwm enviado para os pinos de enable, fazem o motor funcionar da maneira pretendida para o projeto.

### 3.3.4 Configurações servo SG90

O controle do entrelaçamento das rodas frontais é efetuado por meio de um servo motor SG90, que está conectado ao motor shield L293 nos pinos específicos. A comunicação entre a Raspberry Pi e o motor shield é estabelecida através do pino GPIO 18 da Raspberry Pi, o qual está conectado ao pino D9 do motor shield L293. O pino GPIO 18 da Raspberry Pi é responsável pela geração do sinal PWM que controla o ângulo de rotação do servo. Na figura 30, pode-se observar o servo motor acoplado a uma peça que serve como mecanismo de junção para o controle de direção das rodas.

Figura 30 - Conexão servo rodas frontais



Fonte: o autor.

O ângulo aplicado ao servo motor exerce um efeito proporcional sobre as rodas frontais, de acordo com a dinâmica do carrinho. O ângulo de 90 graus representa a posição central, na qual as rodas ficam alinhadas na direção reta. A partir desse ponto, o sistema é capaz de ajustar o ângulo das rodas até 45 graus para cada lado. Para o controle desses ângulos, utiliza-se um sinal PWM com frequência de 50 Hz, cujo intervalo de operação é limitado entre 0,5 ms e 2,5 ms. Esses valores de largura de pulso correspondem ao intervalo de 0 a 180 graus que é a faixa de operação do servo. O valor aplicado ao servo é calculado pela seguinte fórmula.

$$\text{valor pwm aplicado servo} = 500 + (\text{ângulo } \theta * (2500 - 500) / 180) \quad (5)$$

Com o valor do ângulo desejado, a fórmula converte esse valor para a faixa de operação do servo, ajustando-o de acordo com os limites de movimento do atuador. Em seguida, aplica-se o sinal PWM correspondente ao ângulo calculado no servo, de forma a posicioná-lo no ângulo desejado.

### 3.4 SISTEMA DE NAVEGAÇÃO

Para realizar a navegação, o sistema utiliza os dados provenientes do sensor LiDAR para estimar a distância lateral até os canos de PVC, os quais simulam fileiras. Para esse processo, foi definida uma área de operação restrita para o sensor, de modo a considerar apenas os dados em uma faixa angular específica, correspondente a 60 graus de abertura do campo de visão. No sensor LiDAR, essa faixa abrange os ângulos de 30 a 90 graus no lado direito do veículo e de 270 a 330 graus no lado esquerdo.

Além disso, a distância detectada também é limitada ao tamanho da largura da fileira. Isso significa que, mesmo que o veículo esteja encostado no canto de uma fileira, o sistema evita a detecção incorreta de uma fileira adjacente. Com os dados dos ângulos e dos pontos válidos, definidos como aqueles que não excedam as condições predefinidas, a distância lateral é calculada utilizando a seguinte fórmula.

$$\text{distância lateral} = \text{distância medida} * \sin(\theta) \quad (6)$$

Para melhorar a precisão na estimativa da distância lateral, é fundamental considerar a inclinação do veículo durante o movimento. Quando o veículo se desloca, ele pode sofrer uma inclinação para o lado direito ou esquerdo, o que altera a orientação do sensor LiDAR em relação à linha de referência (fileira).

Para corrigir essa distorção e obter uma estimativa mais precisa, é utilizado o sensor inercial MPU 9250, que fornece a componente de *yaw* (giro em torno do eixo Z) do veículo. Quando o veículo é posicionado, inicialmente ele é alinhado à fileira de forma que o sensor inercial registre o ponto de referência de  $yaw = 0^\circ$ . A partir deste ponto de referência, qualquer inclinação do veículo para a esquerda ou direita resulta em um valor positivo ou negativo de *yaw*, dependendo da direção da inclinação.

A variação no valor de *yaw* é utilizada para ajustar a leitura do LiDAR, compensando o erro causado pela alteração na orientação do sensor devido à inclinação do veículo. Para corrigir esse erro e obter uma medição mais precisa, os seguintes ajustes são realizados para adequar o campo de trabalho do sensor LiDAR, para cada área limite de varredura do sensor é somado o valor de  $yaw + 30$ ,  $yaw + 90$ ,  $yaw + 270$  e  $yaw + 330$  de modo a ajustar o campo de trabalho do sensor LiDAR para a nova área de interesse, levando em consideração os dados fornecidos pelo sensor inercial.

O ajuste realizado permite que o campo de leitura do LiDAR se adapte à nova orientação do veículo. Após o ajuste do campo de trabalho para a nova área de interesse procede-se com o cálculo da distância lateral. Este cálculo é realizado com base nos valores de referência originais, que correspondem aos ângulos do sistema de coordenadas entre  $270^\circ$  a  $330^\circ$  para o lado esquerdo e entre  $30^\circ$  a  $90^\circ$  para o lado direito, esses ângulos correspondem à posição inicial do sensor LiDAR quando o veículo está alinhado com a fileira.

Para que o cálculo da distância lateral seja realizado corretamente, o valor do novo ângulo medido, após a compensação de *yaw*, deve ser ajustado subtraindo-se o valor de *yaw*. Dessa forma, para garantir o cálculo correto da distância lateral, o valor do novo ângulo medido, que já sofreu o efeito do *yaw*, deve ser ajustado subtraindo-se o valor de *yaw*. Isso faz com que o ângulo de leitura volte à sua posição original, antes da rotação provocada pelo *yaw*.

Essa correção é necessária para que a distância lateral seja calculada com base no ângulo na configuração inicial do sensor LiDAR, antes da modificação de faixa de leitura do LiDAR causada pela rotação do veículo. A fórmula que realiza esse cálculo é descrita a seguir.

$$\text{distância lateral} = \text{distância medida} * \sin(\theta \text{ ajustado} - \text{yaw}) \quad (7)$$

Após o cálculo da distância lateral para cada ponto válido, realiza-se a média dos resultados obtidos para cada lado do veículo, com o objetivo de estimar um valor de distância lateral com maior confiabilidade, eliminando possíveis ruídos. Em seguida, procede-se à subtração do valor da distância lateral de um lado pelo valor correspondente do outro lado, com o intuito de estimar o erro relativo ao centro da fileira a seguir é expressa a fórmula da média dos pontos válidos.

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8)$$

- X é a média aritmética dos dados.
- n é o número total de pontos válidos.
- X<sub>i</sub> são os valores de distância lateral válidos variando de 1 até n.
- $\sum_{i=1}^n$  é a soma de todos os valores dos dados.

O cálculo da média das distâncias laterais, tanto para o lado esquerdo quanto para o lado direito do veículo, é seguido pelo cálculo do erro de centro, o qual corresponde à diferença entre as médias calculadas para os dois lados. No cálculo do erro de centro, as distâncias medidas no lado direito geram valores positivos devido à ação do seno, enquanto as distâncias no lado esquerdo resultam em valores negativos. O erro de centro é descrito pela seguinte fórmula.

$$\text{erro de centro} = \frac{DLE + DLR}{2} \quad (9)$$

- DLE média distância lateral esquerda.
- DLR média distância lateral direita.

Com o erro de centro calculado, o sistema visa minimizar esse erro, buscando que ele se aproxime de zero, controlando o entrelaçamento das rodas por meio do uso do servo SG90. Para estabilizar a resposta do servo às variações do erro, é empregado um controlador PI, descrito pela seguinte equação.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (10)$$

- $u(t)$  = É o sinal de controle que é aplicado ao sistema.
- $e(t)$  = É o erro de centro calculado em milímetros.
- $K_p$  e  $K_i$  = São os ganhos proporcionais, integrais.

Para o presente trabalho, optou-se por descartar o uso da componente derivativa na formação do controlador PID, uma vez que ela é altamente suscetível a ruídos e vibrações, o que poderia comprometer a estabilidade e a precisão do sistema. Em vez disso, os ganhos  $K_p$  e  $K_i$  foram determinados com base na resposta dinâmica do sistema.

Como o valor de ajuste enviado ao servo é expresso em ângulo, enquanto o valor do erro é fornecido em milímetros, é necessário realizar a conversão de milímetros para graus. Para isso, utiliza-se uma variável de ganho  $K_c$ , que é estimada com base no ângulo máximo de entrelaçamento das rodas frontais dividido pelo erro máximo que o sistema pode ter em milímetros. A conversão é dada pela fórmula:

$$k_c = \frac{\theta_M}{EM} \quad (11)$$

- $k_c$  variável de conversão dada em graus por milímetros.
- $\theta_M$  ângulo máximo de entrelaçamento rodas frontais.
- $EM$  erro máximo de centro.

Para o presente trabalho, o ângulo máximo de entrelaçamento que o sistema suporta é de 45°. O erro de centro máximo que o sistema pode apresentar é estimado como metade da largura da fileira, a fórmula que estima o valor de ângulo de ajuste aplicado ao servo é demonstrada a seguir.

$$u(t) = k_c \cdot K_p \cdot e(t) + k_c \cdot K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (12)$$

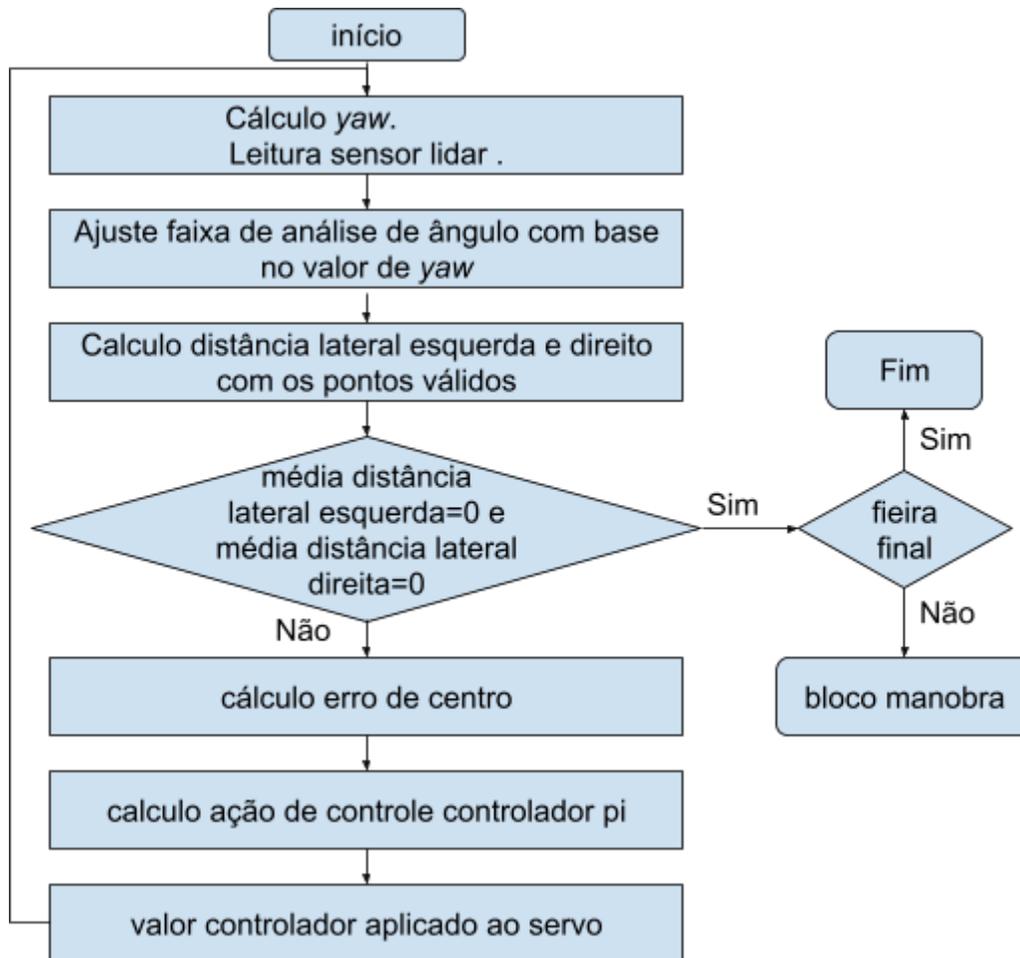
A fórmula 12 calcula um valor de ajuste que deve ser aplicado ao servo para manter o veículo no centro da fileira, este valor é aplicado ao servo pela seguinte fórmula.

$$\theta_{\text{servo}} = 90^\circ - u(t) - \text{yaw} \quad (13)$$

A fórmula 13 retorna um valor que ajusta o ângulo do servo para garantir que o veículo permaneça centralizado na fileira, considerando também o valor do ângulo *yaw* com o objetivo de manter a inclinação do veículo próxima de zero. Onde o ângulo máximo aplicado ao servo é limitado a  $\pm 45$  graus. Esse valor representa o ângulo máximo de entrelaçamento das rodas dianteiras do veículo.

O resultado obtido a partir da fórmula 13 é utilizado como entrada na fórmula 5, a fim de determinar o valor do sinal PWM aplicado ao servo para atingir o ângulo pretendido. A figura 31 representa o bloco que faz o processamento e controle para manter o veículo no centro da fileira.

Figura 31 - Diagrama bloco de controle do sistema



Fonte: o autor.

A figura 31 representa as ações realizadas pelo sistema de controle para manter o veículo no centro da fileira. Após o posicionamento do protótipo e a inicialização do sistema, os dados do sensor MPU 9250 são captados para calcular o valor de *yaw*. Em seguida, o sensor LiDAR é acionado e começa a realizar as leituras. No início do processo o valor de *yaw* é considerado como  $0^\circ$  determinando o alinhamento com a fileira.

Após é feito o ajuste da faixa de leitura do sensor LiDAR com a adição do valor de *yaw* na faixa base de leitura do sensor, que é limitada a  $60^\circ$  para cada lado do

protótipo e as leituras limitadas a uma distância igual à largura da fileira. Após a definição da faixa de operação, o cálculo das distâncias laterais esquerda e direita é realizado por meio da fórmula 7, que subtrai o valor de *yaw* previamente adicionado, garantindo o correto cálculo das distâncias laterais.

Posteriormente, a fórmula 8 é utilizada para calcular as médias das distâncias laterais à esquerda e à direita. Esse valor médio é comparado com 0; caso não haja leitura em ambos os lados, isso indica que o veículo atingiu o final da fileira, fazendo com que os motores sejam parados e o sistema reconheça o término do percurso. Se o veículo estiver na última fileira, o programa é encerrado; caso contrário, o sistema entra em um bloco de manobra, que será detalhado posteriormente.

Se forem detectadas distâncias nos lados esquerdo ou direito, o cálculo do erro de centro é realizado pela fórmula 9. O valor obtido é então inserido no controlador PI, descrito pela fórmula 12, com o ganho KC calculado previamente pela fórmula 11. O resultado do controlador PI é aplicado na fórmula 13 para estimar o ângulo de ajuste do servo. Esse ângulo calculado é convertido para um sinal PWM por meio da fórmula 6, que é então aplicada ao servo. O ciclo é repetido até que o veículo atinja o final da fileira.

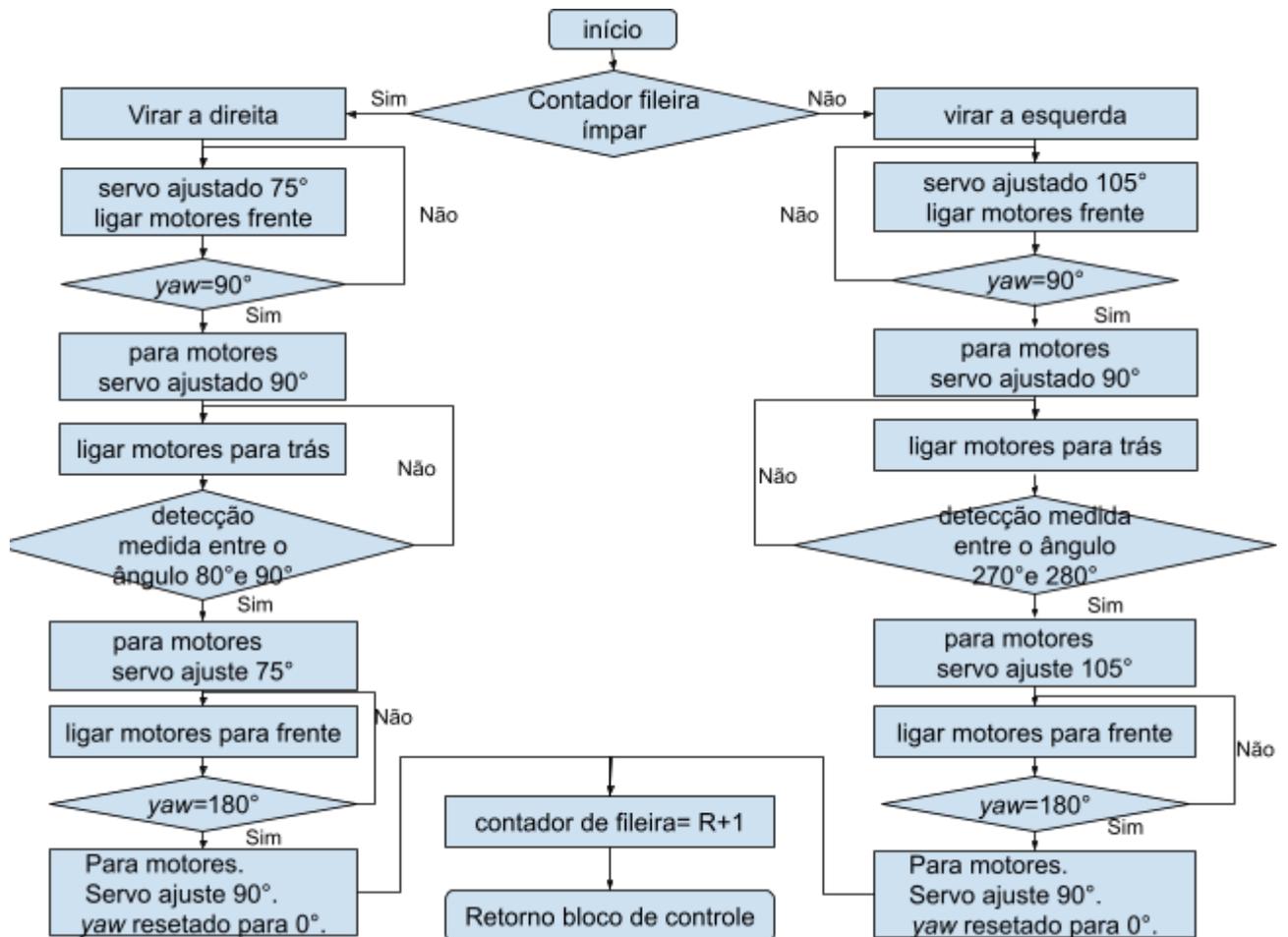
A Figura 32 ilustra a execução da manobra que permite ao protótipo entrar em uma nova fileira. A manobra é dividida em etapas e é iniciada assim que o sistema detecta o final da fileira e identifica a existência de fileiras adicionais a serem percorridas. Neste momento, a parte de manobra é ativada e o valor do contador de fileiras é verificado. Se esse valor for ímpar, a manobra é realizada para a direita. O ângulo aplicado ao servo é ajustado para  $75^\circ$ , e os motores são acionados para que o veículo continue em movimento até que o valor de *yaw* atinja  $90^\circ$ , indicando que o veículo está perpendicular à fileira. Neste ponto, os motores são desligados e o servo é ajustado para  $90^\circ$ .

Em seguida, os motores são acionados em sentido reverso, fazendo com que o veículo se mova de ré até que sejam detectadas medidas no sensor LIDAR entre os ângulos de  $80^\circ$  a  $90^\circ$  a uma distância limitada a 400 mm, confirmando que o veículo está alinhado na entrada da fileira. Os motores são então desligados, o servo é ajustado para  $75^\circ$ , e os motores são acionados para a frente para iniciar o movimento

de entrada na fileira. Esse movimento continua até que o valor de yaw atinja  $180^\circ$ , momento em que os motores são parados, o servo é ajustado para  $90^\circ$ , e o valor de yaw é redefinido para  $0^\circ$ .

A variável de contagem de fileiras ímpares é incrementada em 1, e o sistema retorna à navegação no bloco de controle. A manobra para a esquerda segue o mesmo procedimento, com diferenças apenas nos valores aplicados ao servo e nos ângulos de yaw envolvidos.

Figura 32 - Diagrama de manobra ao entrar em nova fileira



Fonte: o autor.

## 4 RESULTADOS

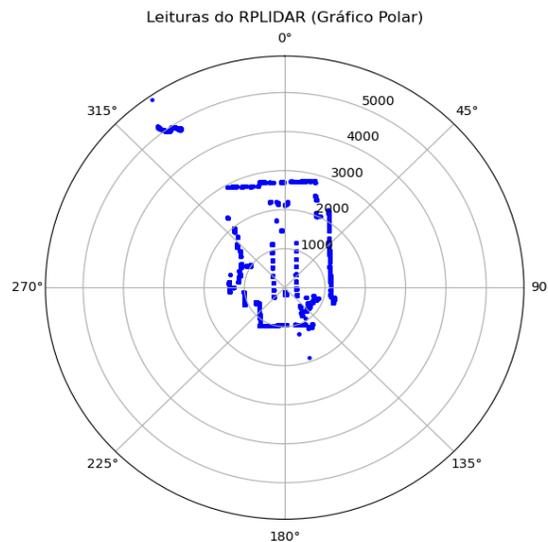
Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos com o método de navegação proposto, juntamente com a avaliação do desempenho dos componentes embarcados empregados na execução deste projeto.

### 4.1 RESULTADOS LEITURA SENSOR LiDAR

A leitura do sensor LiDAR é realizada por meio de um feixe de laser que efetua uma varredura de 360°, permitindo a detecção e mapeamento dos objetos no ambiente ao redor. No presente trabalho, o sensor LiDAR é utilizado para estimar a distância até a fileira composta por tubos de PVC dispostos a 200 mm entre eles sendo o comprimento total da fileira de 1400 mm.

A Figura 33 ilustra a leitura do sensor LiDAR, destacando a varredura sem uma referência direta à distância medida, evidenciando que o sensor captura não apenas a fileira de tubos de PVC, mas também todos os outros objetos presentes no ambiente, gerando um mapeamento completo da área.

Figura 33 - Leitura lidar sem limitação de distância



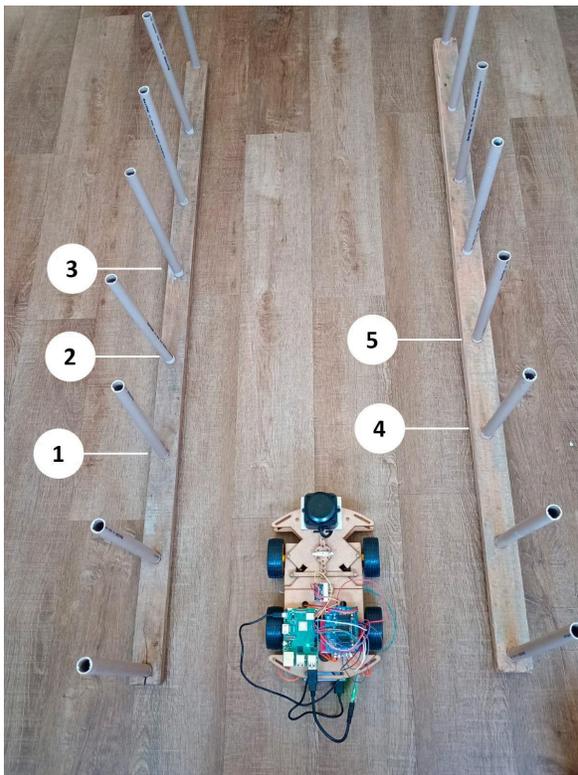
Fonte: o autor.

Para o presente trabalho, a área de leitura do sensor LiDAR foi restringida a dois segmentos específicos do ambiente: à direita, correspondendo aos ângulos de  $30^\circ$  a  $90^\circ$ , e à esquerda, nos ângulos de  $270^\circ$  a  $330^\circ$ . A distância máxima de captura foi limitada à largura da fileira de objetos, composta por tubos de PVC.

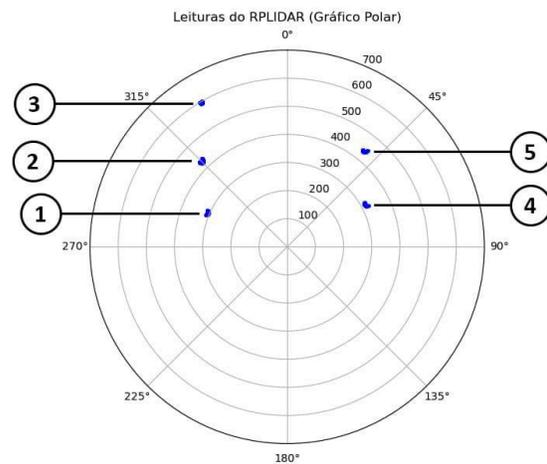
A Figura 34 mostra o carrinho posicionado no centro da fileira de aproximadamente 600mm de largura, enquanto a Figura 35 apresenta a leitura obtida com o sensor LiDAR, onde o sensor é representado no centro do gráfico, refletindo a área de varredura e as distâncias correspondentes dentro dos limites definidos.

Figura 34 - Veículo posicionado no centro da fileira

Figura 35 - Leitura sensor centro



Fonte: o autor.



Fonte: o autor.

A Figura 35 ilustra a identificação correta dos tubos de PVC que compõem a fileira que são representados pelos pontos em azul na figura e numerados de 1 a 5. Na Tabela 2, apresentada a seguir, são registradas as leituras dos pontos válidos, que não ultrapassam os limites predefinidos para a área de varredura. Além disso, são

apresentados os cálculos das médias das distâncias laterais, tanto pelo lado esquerdo quanto pelo lado direito, bem como o erro de centro obtido a partir das medições realizadas.

Tabela 2 - Leituras obtidas pelo sensor lidar em uma varredura posição central

número do tubo	ângulo válido	distância lado direito	número do tubo	ângulo válido	distância lado esquerdo
5	38,14°	269,12 mm	1	291,89°	-286,26 mm
	38,86°	273,86 mm		292,59°	-283,90 mm
	39,56°	280,72 mm		293,31°	-281,72 mm
4	60,86°	275,78 mm		294,02°	-280,65 mm
	61,58°	277,47 mm	2	314,48°	-305,35 mm
	62,28°	279,96 mm		315,19°	-300,94 mm
	63,00°	287,13 mm		315,91°	-299,38 mm
			3	329,52°	-302,73 mm
média		277,72 mm	média		-292,62 mm
Desvio Padrão		±5,70 mm	Desvio Padrão		±10,40 mm
erro de centro			-7,45 mm		

Fonte: o autor.

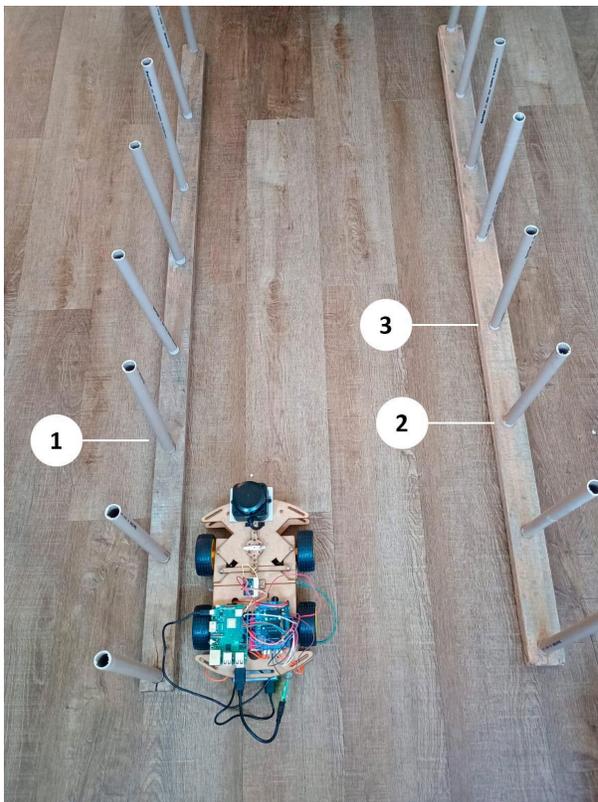
A partir das leituras obtidas, observa-se o correto reconhecimento dos tubos de PVC, com uma pequena variação nos valores medidos. Essa variação pode ser atribuída ao efeito causado pelo formato circular dos tubos, que possuem um diâmetro de 20 mm.

O feixe do sensor LiDAR é refletido em diferentes partes do diâmetro do tubo de PVC, o que resulta em pequenas flutuações nas distâncias medidas, uma vez que o sensor pode registrar múltiplos pontos de reflexão ao longo da circunferência do tubo.

Após a correta identificação dos tubos de PVC com o carrinho posicionado no centro da fileira, o carrinho foi posicionado no canto esquerdo da fileira, com o objetivo de verificar a capacidade do sistema em identificar os tubos de PVC a partir dessa nova posição.

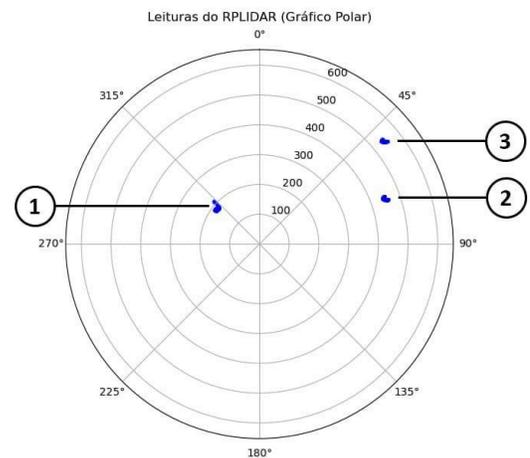
A Figura 36 ilustra o carrinho posicionado no lado esquerdo da fileira, com largura aproximada de 600 mm, enquanto a Figura 37 apresenta a leitura obtida pelo sensor LiDAR a partir dessa nova posição.

Figura 36 - Veículo posicionado à esquerda



Fonte: o autor.

Figura 37- Leitura sensor lado esquerdo



Fonte: o autor.

A Figura 37 demonstra a identificação dos tubos de PVC, onde o sensor LiDAR está representado no centro do gráfico e reconheceu um tubo à esquerda indicado com o número 1 e dois à direita representados pelos números 2 e 3. A Tabela 3 apresenta os dados obtidos durante essa medição.

Tabela 3 - Leituras obtidas pelo sensor lidar em uma varredura posição a esquerda

número do tubo	ângulo válido	distância lado direito	número do tubo	ângulo válido	distância lado esquerdo	
2	50,34°	417,09 mm	1	307,95°	-146,47 mm	
	51,05°	424,99 mm		308,66°	-146,63 mm	
3	69,45°	418,33 mm		309,36°	-144,20 mm	
	70,17°	420,73 mm		310,06°	-142,55 mm	
	70,88°	428,71 mm		310,77°	-140,50 mm	
				311,47°	-138,06 mm	
média		421,97 mm		média		-143,07 mm
Desvio Padrão		±4,83 mm		Desvio Padrão		±3,39 mm
erro de centro			139,45 mm			

Fonte: o autor.

Com base nos dados obtidos, observa-se que, embora tenha sido identificado apenas um tubo de PVC no lado esquerdo, este apresentou mais pontos de reflexão, ao contrário dos tubos localizados no lado direito, onde foram identificados dois tubos de PVC, mas com menor número de ângulos refletidos.

Essa diferença pode ser atribuída à abertura dos ângulos de varredura do sensor. Além disso, foi realizado um teste com o dispositivo posicionado mais à direita na fileira de tubos de PVC, resultando em um padrão semelhante ao observado no lado esquerdo, com um erro no centro da fileira de -152,83 mm.

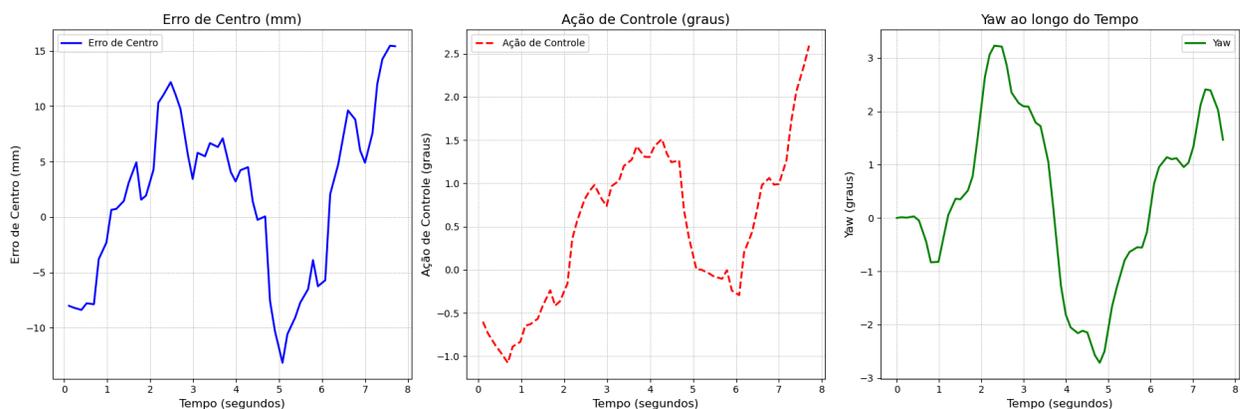
Os testes realizados confirmaram o correto funcionamento do sensor LiDAR, que foi capaz de identificar com precisão os tubos de PVC e fornecer medições com boa assertividade. Os resultados obtidos demonstraram uma performance satisfatória que atende aos requisitos do presente projeto.

## 4.2 TESTE DE NAVEGAÇÃO

Para realizar a navegação, o sistema utiliza os dados obtidos pelo sensor LiDAR para medir as distâncias laterais em relação aos tubos de PVC localizados à esquerda e à direita. Com base nessas informações o sistema calcula o erro de centro do veículo. Esse valor é então transmitido ao controlador PI, que aplica uma ação corretiva inversamente proporcional ao erro, erros maiores resultam em correções mais intensas, enquanto erros menores geram ações mais sutis. Esse processo configura um controle reativo.

A figura 38 ilustra um teste de navegação em uma fileira com largura aproximada de 600 mm e comprimento de 1400 mm, demonstrando os resultados obtidos com o veículo iniciando o trajeto no centro da fileira.

Figura 38 - Dados de navegação com o veículo iniciando no centro da fileira



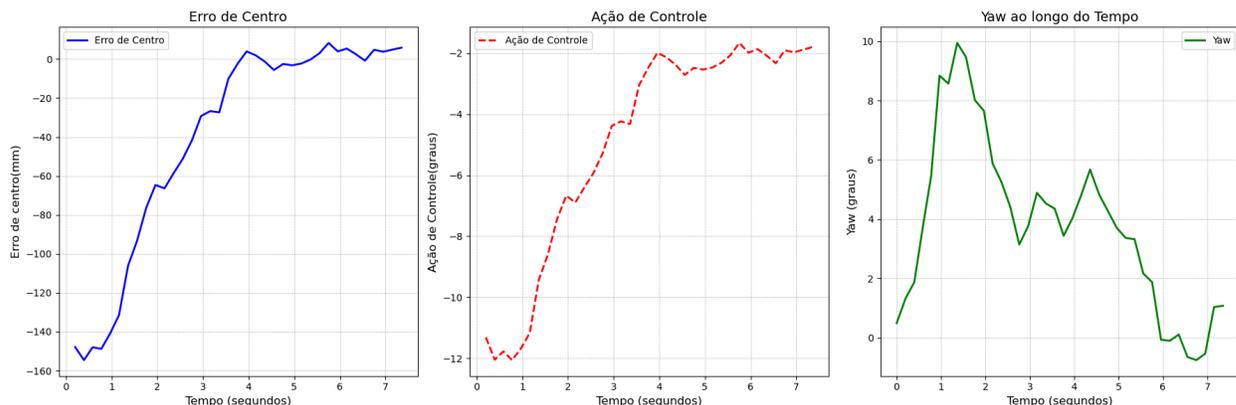
Fonte: o autor.

Na Figura 38, são apresentados os valores do erro de centro em mm, a ação de controle gerada pelo controlador PI em graus e o valor do ângulo de yaw ao longo da trajetória. Durante os testes se verificou que o sensor LiDAR conseguiu identificar os tubos de PVC e gerar os dados de erro de centro com precisão, registrando corretamente o final da fileira e efetuando a parada do veículo corretamente. O controlador PI foi eficaz na estabilização do veículo no centro da fileira. Para alcançar

essa estabilização, o sistema também realiza a compensação da inclinação, utilizando o valor de *yaw*, que é diminuído após a atuação do controlador PI, promovendo o alinhamento adequado do veículo. O desempenho do controlador PI foi considerado satisfatório, evidenciando a capacidade do sistema em corrigir e manter o veículo no centro da fileira.

O tempo de resposta do sistema foi estimado em aproximadamente 200 ms, valor considerado relativamente elevado para um sistema de navegação. Esse desempenho pode ser parcialmente atribuído ao tempo de resposta do servo, que é de cerca de 100 ms. Outra limitação do sistema está relacionada à construção do mecanismo de controle das rodas frontais, onde a peça que conecta o servo às rodas apresenta folga mecânica. Essa folga reduz significativamente a precisão do controle, especialmente em movimentos sutis, resultando na incapacidade do servo de transmissão com a exatidão dos ajustes necessários às rodas. O elevado tempo de resposta do sistema impacta diretamente nas configurações de navegação, pois as correções são aplicadas com atraso. O atraso identificado implica na necessidade de operação do veículo a uma velocidade reduzida. Durante os testes realizados, foi determinada uma velocidade de operação dos motores próxima a 0,20 m/s.

Figura 39 - Dados navegação com o veículo iniciando à direita na fileira



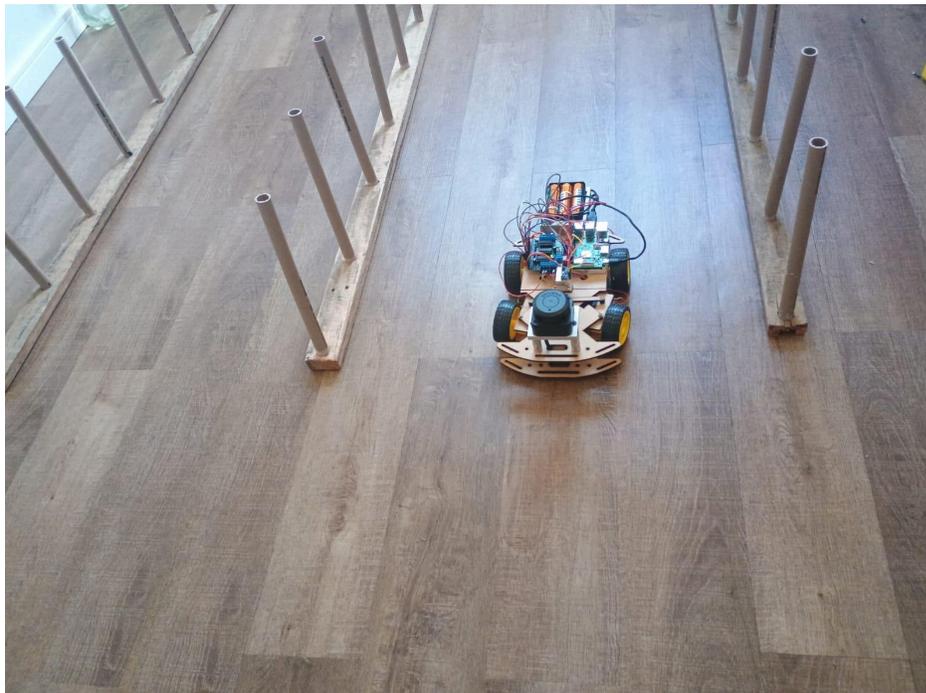
Fonte: o autor.

A Figura 39 ilustra a situação em que o veículo é posicionado mais à direita, apresentando um erro de centro próximo de -150 mm. Durante a execução da trajetória, observa-se uma redução progressiva do erro de centro, com o veículo concluindo o trajeto com erro de centro próximo de zero. Além disso, verifica-se que a ação de controle é proporcional ao erro gerado, com a estabilização ocorrendo de forma rápida. A inclinação do veículo também se estabiliza, finalizando próxima de zero graus. Esses resultados evidenciam o funcionamento adequado do sistema de controle.

### 4.3 TESTE MANOBRA

A manobra do veículo é realizada em etapas, ao atingir o final da fileira, desde que ainda existam fileiras a serem percorridas. A direção da manobra é definida com base na comparação do contador de fileiras: se o contador for ímpar, a manobra é realizada à direita; caso seja par, a manobra ocorre à esquerda. Esse mecanismo garante a alternância entre as fileiras durante o deslocamento do veículo.

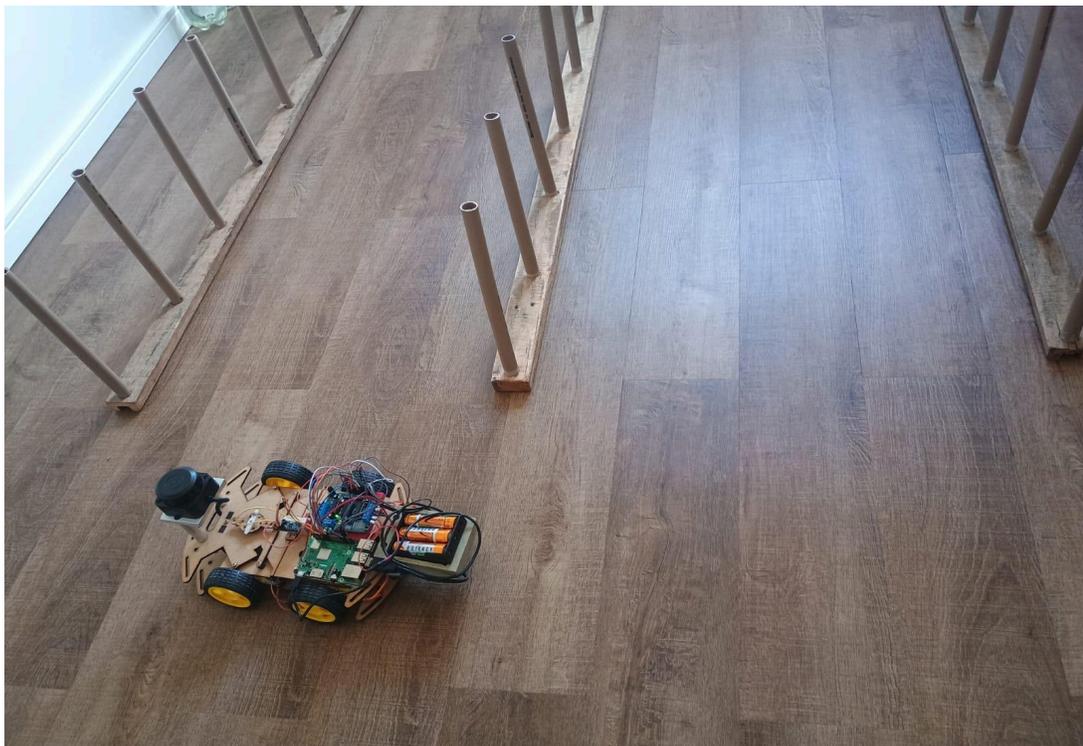
Figura 40 - Primeira etapa manobra de entrada em nova fileira



Fonte: o autor.

A Figura 40 ilustra a primeira etapa do processo de entrada em uma nova fileira. Nesse momento, o sensor LiDAR identifica a ausência de obstáculos, inferiores aos quais o veículo deve parar. Em seguida, é definido o lado da manobra, e o servo motor é ajustado para o ângulo correspondente:  $75^\circ$  para curvas à direita e  $105^\circ$  para curvas à esquerda. Na ilustração, o veículo realiza a manobra à direita, com o servo já ajustado para  $75^\circ$ . Nesta parte da manobra os motores são acionados para frente e o código monitora o valor de *yaw* quando esse valor atinge  $90^\circ$  o veículo para e se inicia outra etapa da manobra.

Figura 41 - Segunda etapa manobra de entrada em nova fileira



Fonte: o autor.

A Figura 41 ilustra o momento em que o código detecta uma mudança de  $90^\circ$  no valor de *yaw*. Nesta etapa, o veículo interrompeu o funcionamento dos motores, e o servo motor é ajustado para o ângulo de  $90^\circ$ . Em seguida, inicia-se uma manobra de ré, na qual os motores são acionados em modo reverso. A manobra prossegue até que o sensor LiDAR identifique uma medida dentro do intervalo angular de  $80^\circ$  a  $90^\circ$ , limitado a uma distância de 600 mm.

A Figura 42 ilustra o momento em que o sensor LiDAR detecta uma distância válida, indicando o alinhamento com a entrada da nova fileira. Nesse ponto, o funcionamento dos motores é interrompido, e o servo motor é ajustado para  $75^\circ$ . Em seguida, os motores são acionados para frente, iniciando o movimento de entrada na nova fileira até que o valor de *yaw* atinja o valor de  $180^\circ$ .

Figura 42 - Terceira etapa manobra entrada em nova fileira



Fonte: o autor.

Na Figura 43, é apresentado o momento em que o valor do ângulo de *yaw* atinge  $180^\circ$ , concluindo a manobra de entrada na nova fileira. Nesse momento, os motores são desativados, o servo é ajustado para um ângulo de  $90^\circ$ , e inicia-se a navegação ao longo da nova fileira. O trajeto continua alternando a curva entre direita e esquerda, sendo a próxima direcionada à esquerda, seguindo este padrão até que todas as fileiras estabelecidas sejam percorridas.

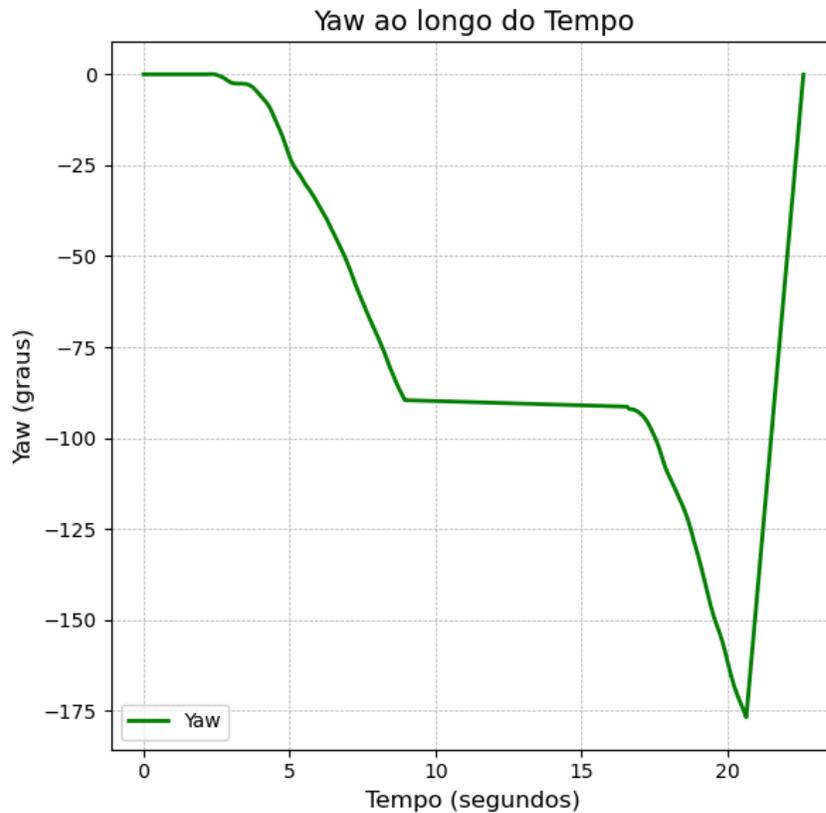
Figura 43 - Quarta etapa manobra de entrada em nova fileira



Fonte: o autor.

As Figuras 44 e 45 apresentam os valores de *yaw* durante a manobra de entrada em nova fileira, nos quais o *yaw* é utilizado para determinar os pontos de parada da manobra. Durante a execução desta, diversas variáveis influenciam o processo, como as velocidades dos motores. O sistema depende de dados precisos fornecidos pelo MPU-9250. Durante a manobra, observou-se que o sensor é capaz de atingir os pontos predefinidos com boa precisão apesar de ser um sensor de baixo custo, comparado a outros modelos disponíveis no mercado. Vale ressaltar que o magnetômetro, que poderia melhorar a qualidade da medição, não está sendo utilizado, sendo o valor de *yaw* calculado exclusivamente a partir do giroscópio.

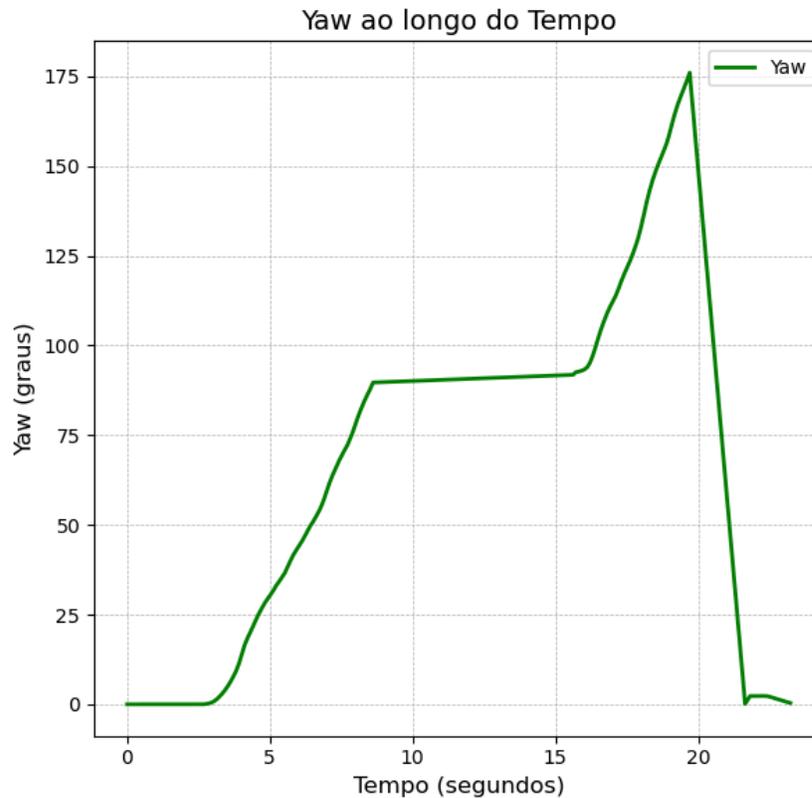
Figura 44 - Valor de yaw durante manobra de curva para direita



Fonte: o autor

A Figura 44 ilustra o momento em que o veículo detecta o fim da fileira e inicia o movimento de entrada em uma nova fileira. O servo é ajustado para 75 graus, iniciando a manobra até que o valor de yaw atinja  $-90^\circ$ . Em seguida, é realizada a manobra de ré até que a entrada da nova fileira seja identificada neste momento o valor de yaw permanece em 90 graus. Após essa identificação, o servo é novamente ajustado para 75 graus, e a manobra continua até que o valor de yaw atinja  $-180^\circ$ . Nesse ponto, o valor de yaw é resetado e a navegação na nova fileira é iniciada.

Figura 45 - Valor de yaw durante manobra de curva para esquerda



Fonte: o autor

A Figura 45 ilustra a manobra de entrada em nova fileira realizada para a esquerda, apresentando um comportamento gráfico semelhante ao da manobra para a direita, com a diferença de que os valores de yaw são positivos neste caso. Na primeira fase da manobra, o servo é ajustado para 105 graus, e o veículo segue até que o valor de yaw atinja 90 graus. Em seguida, é realizado o acionamento dos motores de ré até o veículo identificar a entrada da fileira. Neste ponto o valor de yaw permanece fixo em 90 graus. Após a identificação o servo é ajustado novamente para 105 graus, e a manobra de entrada na nova fileira é iniciada até que o valor de yaw atinja 180 graus. Quando isso ocorre, o veículo é parado, o yaw é resetado, e a navegação na nova fileira tem início.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho pretendeu desenvolver um protótipo de veículo autônomo capaz de se deslocar entre fileiras, com aplicação no contexto agrícola. Para tanto, foi realizado um estudo bibliográfico sobre trabalhos relacionados, identificando as tecnologias existentes para navegação autônoma. Como resultado, conclui-se que a integração de um sensor LiDAR, um sensor inercial e uma plataforma computacional Raspberry Pi seria suficiente para atender ao objetivo proposto.

O projeto desenvolvido é composto por diversos componentes selecionados com base em critérios de custo-benefício, priorizando alternativas de menor custo em comparação com outros componentes disponíveis no mercado. Durante a fase de desenvolvimento, foram realizados testes individuais para validar o funcionamento de cada componente. Após a verificação de sua funcionalidade, procedeu-se à integração dos códigos, para realizar a navegação autônoma entre fileiras.

Nos testes de navegação, o sensor LiDAR demonstrou precisão na detecção das fileiras, enquanto o sistema de controle mostrou-se eficaz em corrigir desvios e alinhar especificamente o entrelaçamento das rodas frontais, durante os testes foram identificados diversos pontos de melhoria com base nas falhas observadas. Um dos principais problemas constatados foi a ocorrência de erros no sensor LiDAR, devido ao alto volume de dados gerados, o que resultou em estouro do buffer e consequente desconexão do sensor.

Além disso, observou-se um elevado tempo de processamento, na ordem de 200 ms, o que comprometeu a resposta dinâmica do sistema e limitou o uso de velocidades mais altas, outra restrição identificada foi a ausência de controle preciso do RPM aplicado aos motores, ocasionando inconsistências nas paradas do veículo, ademais, durante as manobras, também foram detectados problemas, é necessário um movimento constante durante a manobra para o sensor inercial calcular corretamente o valor de *yaw*. Contudo na manobra de ré, o sensor LiDAR demonstrou eficiência na detecção da entrada na nova fileira a percorrer.

Os resultados obtidos a partir deste trabalho demonstram que é possível realizar uma navegação de forma autônoma em ambientes estruturados por fileiras, considerando

o cenário específico de fileiras retas e sem curvas. Como sugestões de melhorias para trabalhos futuros, sugere-se otimizar o processamento do sistema, para reduzir o tempo de resposta do controle de navegação, implementar o uso de um servo motor com maior velocidade de resposta e desenvolver um controle mais preciso da velocidade dos motores.

## REFERÊNCIAS

- AIRES, Filipa Gomes Leite Sempiterno *et al.* **Projeto de um robô móvel para tarefas de apoio à vindima**. ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa - 2023. Tese de Doutorado.
- ANDRADE, Bruno Gomes de. **Estudo de Modelo de Controle Preditivo (MPC) aplicado a uma Unidade Piloto a Frio tipo FCC utilizando medidas de concentração por transmissão gama**. 2020. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.
- BACOVIS, Otávio Vinicius. **Comparação da utilização do controlador fuzzy e PID aplicados em um uma planta didática de nível de líquido**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- BIBLIOTECA VIRTUAL EM SAÚDE MS / **Intoxicação por agrotóxicos**. Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/intoxicacao-por-agrotoxicos/>. Acesso em: 11 mai. 2024.
- EMBRAPA. **Vitivinicultura Brasileira: panorama 2021**. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 04 mai. 2024.
- GLOBO RURAL | G1. (2019). **Brasil registra 40 mil casos de intoxicação por agrotóxicos em uma década**. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/agronegocios/globo-rural/noticia/2019/03/31/brasil-tem-40-mil-casos-de-intoxicacao-por-agrotoxicos-em-uma-decada.ghtml>. Acesso em: 05 mai. 2024.
- GONÇALVES, Pedro Fernando Marques. **Desenvolvimento de plataforma autônoma para agricultura**. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu - 2023. Tese de Doutorado.
- GUERRERO, Henry Borrero. **Desenvolvimento de um sistema de controle em um robô móvel agrícola em escala reduzida para deslocamento entre fileiras de plantio**. 2016. Tese de Doutorado. Ph. D. thesis, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- HARDWARE RASPBERRY Pi - **Documentação Raspberry Pi**. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>. Acesso em: 26 mai. 2024.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION OF VINE AND WINE. **Statistics**. Disponível em: <https://www.vinumday.com.br>. Acesso em: 22 mai. 2024.
- JÚNIOR, Antonio F. Nogueira; AMORIM, Lilian; SPÓSITO, Marcel Bellato. **Videiras requerem monitoramento e combate às doenças de início e fim de ciclo**. 2021.

MARÇAL, Ricardo Miguel Nunes - **Desenvolvimento de um protótipo de veículo autônomo a partir de um carro telecomandado**. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2023. Dissertação de Mestrado.

MÓDULO SENSOR MPU 9250 9-DOF MEMS - **Folha de dados, pinagem, recursos, funcionamento, aplicações**. Disponível em: <https://components101.com/sensors/MPU9250-9-dof-mems-sensor-module-datasheet-pinout-features-working>. Acesso em: 26 mai. 2024.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2011.

OLIVEIRA, Waldri dos Santos; GONÇALVES, Eduardo Nunes. **Implementação em c:filtro de Kalman, fusão de sensores para determinação de ângulos**. ForScience: revista científica do IFMG, Formiga, v. 5, n. 3,e00287, jul./dez.2017.

PORTAL EMBRAPA - **Sistemas de condução**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/uva-para-processamento/producao/sistemas-de-conducao>. Acesso em: 22 mai. 2024.

RODRIGUES, Jéssica Mesquita. **Projeto de controladores LQR-LMI aplicados a sistemas dinâmicos**. 2021.

SICK / **Sensores LiDAR**. Disponível em: <https://www.sick.com/br/pt/produtos-e-solucoes/produtos/sensores-radar-e-lidar/sensores-lidar/c/g575802>. Acesso em: 01 jun. 2024.

SIMON, Patrícia Cristina *et al.* **Environment and health: perspective of rural producers against the use of agricultural pesticide**. 2022.

SLAMTEC RPLIDAR C1 - **Rede Global SLAMTEC**. Disponível em: <https://www.slamtec.ai/product/slamtec-rplidar-c1/>. Acesso em: 01 jun. 2024.

SOUZA, Reginaldo Teodoro de; PALLADINI, Luiz Antonio; FERREIRA, Marcelo da Costa. **Tecnologia de aplicação de agrotóxicos**. 2015.

TERRA, Fábio Pedrotti. **Desenvolvimento de um protótipo de baixo custo para automação de pulverizadores agrícolas**. 2020. Dissertação de Mestrado.

TOYAMA. **Pulverizador e Atomizador: entenda a diferença**. Disponível em: <https://toyama.com.br/blog/atomizador-e-pulverizador-entenda-a-diferenca/>. Acesso em: 22 mai. 2024.

USINAINFO - **Carrinho Arduino MDF 4WD 200RPM V2 com Micro Servo Motor e Eixo Móvel Kit Chassi + Manual de Montagem**. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/kit-robotica/carrinho-arduino-mdf-4wd-200rpm-v2-com-micro->

servo-motor-e-eixo-movel-kit-chassi-manual-de-montagem-4846.html. Acesso em: 28 mai. 2024.

VEIROS, André; MESQUITA, Ricardo; GASPAR, Pedro Dinis. **Current status and future trends in agricultural robotics. ICEUBI2019.** 2019.

VIERO, Cibelle Mello *et al.* **Sociedade de risco: o uso dos agrotóxicos e as implicações na saúde do trabalhador rural. Escola Anna Nery**, v. 20, p. 99-105, 2016.

VISTA TORTA – **Revista Cultivar**. Disponível em:  
<https://revistacultivar.com/artigos/mira-torta>. Acesso em: 11 mai. 2024

## APÊNDICE A - Tabelas de especificações e parâmetros

Tabela 4 - Especificações Técnicas MPU- 9250

Parâmetro	Especificação
Acelerômetro	3 eixos, $\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16g$ de sensibilidade ajustável
Giroscópio	3 eixos, $\pm 250/\pm 500/\pm 1000/\pm 2000$ dps de sensibilidade ajustável
Magnetômetro	3 eixos, faixa de $\pm 4800\mu T$
Interface de Comunicação	I2C (Inter-Integrated Circuit) e SPI (Serial Peripheral Interface)
Tensão de Operação	2.4V a 3.6V
Consumo de Corrente	Acelerômetro: $450\mu A$ , Giroscópio: $3.6mA$ , Magnetômetro: $280\mu A$
Faixa de Temperatura	$-40^{\circ}C$ a $85^{\circ}C$
Dimensões	Aproximadamente $4x4x1mm$

Fonte: Módulo sensor MPU 9250 9-DOF MEMS (2024).

Tabela 5 - Parâmetros do Carrinho e Prototipagem

Parâmetro	Especificação
Tensão dos motores	3 a 6V
Rotação dos motores	200 RPM (6V)
Relação de redução	48:1
Diâmetro dos pneus	64mm
Largura dos pneus	28mm
Dimensões (CxLxA)	28x19,2x6,5cm
Peso	520g

Fonte: Usinainfo (2024).

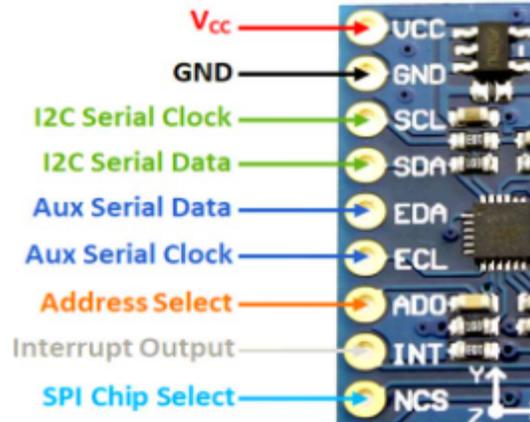
Tabela 6- Especificações Técnicas Raspberry Pi 3 B +.

<b>SoC</b>	Broadcom BCM2837BO quad-core A53 (ARMv8) 64-bit @ 1.4GHz
<b>GPU</b>	Broadcom Videocore-IV
<b>RAM</b>	1GB LPDDR2 SDRAM
<b>Networking</b>	Gigabit Ethernet (via USB channel), 2.4GHz and 5GHz 802.11b/g/n/ac Wi-Fi
<b>Bluetooth</b>	Bluetooth 4.2, Bluetooth Low Energy (BLE)
<b>Storage</b>	Micro-SD
<b>GPIO</b>	40-pin GPIO header, populated
<b>Ports</b>	HDMI, 3.5mm analogue audio-video jack, 4xUSB 2.0, Ethernet, Camera Serial Interface (CSI), Display Serial Interface (DSI)
<b>Dimensions</b>	82mm x 56mm x 19.5mm, 50g

Fonte: Gonçalves (2023).

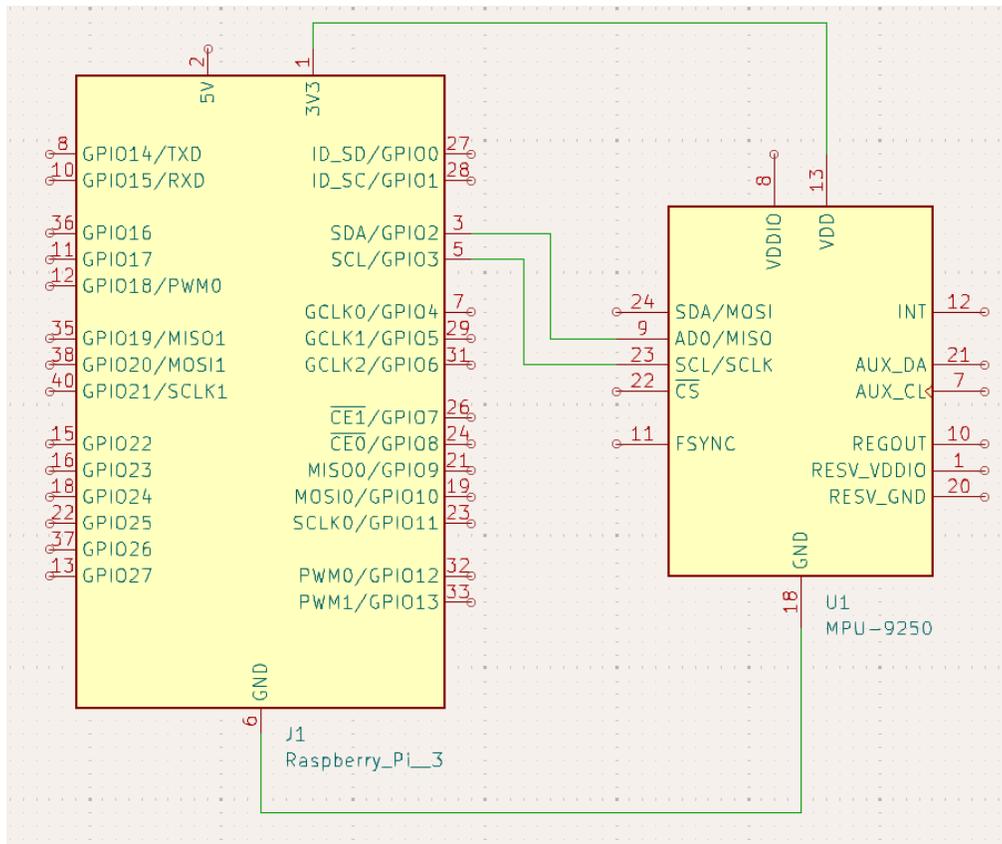
## APÊNDICE B - Figuras de representação e esquemas elétricos

Figura 46 - Representação Pinout Módulo MPU-9250



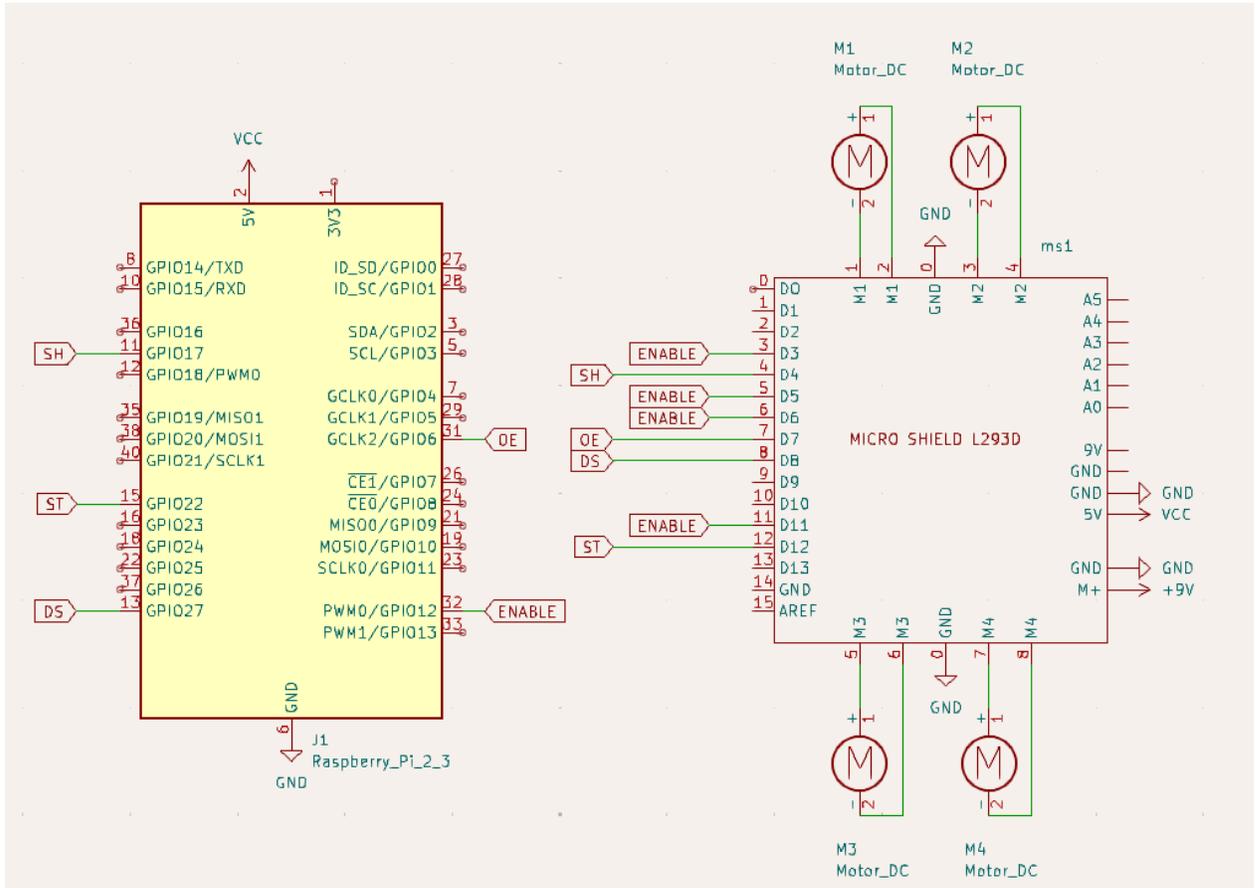
Fonte: Módulo sensor MPU 9250 9-DOF MEMS (2024).

Figura 47 - Esquema elétrico ligação MPU-9250 Raspberry PI



Fonte: o autor.

Figura 48 - Esquema elétrico ligações Raspberry PI motor shield



Fonte: o autor.