

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
*CAMPUS NOVA GAMELEIRA*  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Lucas Augusto Nacif Moura

UTILIZAÇÃO DE SENSORES LiDAR NO MAPEAMENTO E  
MODELAGEM 3D DE AMBIENTES



Belo Horizonte  
2023



Lucas Augusto Nacif Moura

# UTILIZAÇÃO DE SENSORES LiDAR NO MAPEAMENTO E MODELAGEM 3D DE AMBIENTES

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentada ao Colegiado de Graduação em Enge-  
nharia Elétrica como parte dos requisitos exigidos  
para a obtenção do título de Engenheiro Eletri-  
cista.

Orientador: Prof. Dr. Everthon de Souza Oliveira  
Coorientador: Prof. Dr. Túlio Charles de Oliveira  
Carvalho



Belo Horizonte  
2023



A MINHA FAMÍLIA, QUE SEMPRE  
ME APOIOU NESSA CAMINHADA.



# Agradecimentos

Agradeço,

a Deus pelo meu ser e pela providência em minha vida;

a todos os envolvidos no meu primeiro estágio, por me acolherem tão bem e me proporcionarem uma experiência profissional valiosa. Vocês foram fundamentais para o meu crescimento pessoal e profissional;

a todos que de alguma forma contribuíram com o meu progresso;

e a mim mesmo, por nunca desistir, mesmo diante das adversidades que surgiram em meu caminho.



A vida é 10% do que nos acontece e 90% como reagimos a isso.

Charles R. Swindoll



## **Resumo**

Moura, L. A. N.. Utilização de sensores LiDAR no Mapeamento e Modelagem 3D de Ambientes, 2023. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Engenharia Elétrica. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2023.

Com a crescente demanda por soluções de mapeamento tridimensional (3D) de alta qualidade, os sensores LiDAR têm se destacado como ferramentas essenciais para a obtenção de dados precisos e confiáveis. Esta tecnologia avançada de sensoriamento permite o mapeamento 3D de áreas internas e externas. Os sensores LiDAR ativos emitem pulsos de luz e medem o tempo que leva para esses pulsos retornarem após serem refletidos em superfícies. Essa informação é usada para calcular a distância entre o objeto e o sensor. Com a distância e a posição absoluta do sensor no momento do disparo de milhares pulsos, é criada uma nuvem de pontos tridimensional que permite observar a estrutura do alvo que foi submetido à digitalização.

Os sensores LiDAR têm capacidade para coletar informações detalhadas sobre o ambiente em questão, permitindo a tomada de decisões mais assertivas e a otimização de processos em diversas áreas, como arquitetura, engenharia, topografia, agricultura e gestão de recursos naturais, entre outras.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo fazer uma revisão sobre a tecnologia de sensores LiDAR, além de desenvolver um protótipo estacionário capaz de representar um pequeno ambiente por meio de nuvem de pontos.

Espera-se que o protótipo desenvolvido seja capaz de gerar uma representação 3D dos principais contornos do ambiente em estudo com boa fidelidade e precisão. Para esta primeira etapa do trabalho, os resultados serão comparados visualmente com fotos do ambiente em que o protótipo será testado, permitindo avaliar a qualidade da representação gerada.

Palavras-chave: Sensores LiDAR, mapeamento tridimensional, tecnologia LiDAR, revisão.



## **Abstract**

Moura, L. A. N.. Utilização de sensores LiDAR no Mapeamento e Modelagem 3D de Ambientes, 2023. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Engenharia Elétrica. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2023.

With the increasing demand for high-quality three-dimensional (3D) mapping solutions, LiDAR sensors have emerged as essential tools for obtaining accurate and reliable data. This advanced sensing technology enables 3D mapping of both indoor and outdoor areas. Active LiDAR sensors emit light pulses and measure the time it takes for these pulses to return after being reflected from surfaces. This information is used to calculate the distance between the object and the sensor. By combining the distance measurements with the absolute position of the sensor at the moment of pulse emission, a three-dimensional point cloud is created, allowing for the observation of the scanned target's structure. LiDAR sensors have the capability to collect detailed information about the environment, enabling more informed decision-making and process optimization in various fields such as architecture, engineering, surveying, agriculture, and natural resource management, among others.

In this context, the objective of this work is to provide a review of LiDAR sensor technology and develop a stationary prototype capable of representing a small environment through a point cloud. The developed prototype is expected to generate a 3D representation of the main contours of the studied environment with good fidelity and accuracy. In this initial stage of the project, the results will be visually compared with photos of the environment where the prototype will be tested to evaluate the quality of the generated representation.

Keywords: LiDAR sensors, three-dimensional mapping, LiDAR technology, review.



# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Justificativa e relevância	2
1.2	Objetivos	3
1.3	Metodologia	3
<b>2</b>	<b>A Tecnologia LiDAR no mapeamento tridimensional</b>	<b>5</b>
2.1	O Método	5
2.2	Componentes Básicos	6
2.3	Coordenadas Esféricas	7
2.4	Princípios Físicos do LiDAR	9
2.5	Precisão	10
<b>3</b>	<b>Protótipo Desenvolvido</b>	<b>11</b>
3.1	Objetivos e Requisitos	12
3.2	Materiais e Recursos Utilizados	13
3.2.1	Protocolo I <sup>2</sup> C	13
3.2.2	Protocolo MQTT	16
3.2.3	Sinal PWM	18
3.2.4	Micro Servo SG92R TowerPro	19
3.2.5	Sensor AS5600	20
3.2.6	Alimentação do Protótipo	22
3.2.7	TF-Luna	23
3.2.8	Unity	25

3.2.9	ESP32-Devkitc V4 . . . . .	26
3.2.10	Eclipse Mosquitto . . . . .	26
3.3	Adaptação do Servo . . . . .	27
3.4	Configuração do Eclipse Mosquitto . . . . .	29
3.5	Avaliação do Controle e Precisão do Servo. . . . .	30
3.5.1	Averiguando os Limites de Alcance Operacional. . . . .	31
3.5.2	Investigando o Passo Mínimo do Servo . . . . .	33
3.5.3	Modelando o Comportamento do Servo por Regressão Quadrática para o Alcance Definido . . . . .	35
3.6	Configuração do Unity . . . . .	39
3.7	Diagrama de Conexões . . . . .	40
3.8	Rotina Implementada no ESP32 e no Unity . . . . .	40
3.9	Estrutura Física do Protótipo . . . . .	41
3.10	Resultados . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Conclusão . . . . .</b>	<b>47</b>
<b>Referências . . . . .</b>		<b>49</b>

# Lista de figuras

Figura 2.1 – Sistema LiDAR Tipicamente Utilizado em Aeronaves. Fonte: Adaptado de (DONG; CHEN, 2018) . . . . .	7
Figura 2.2 – Sistema de Coordenadas Esféricas. Fonte: (B. GEORGE, 2012) . . . . .	8
Figura 3.1 – Barramento I <sup>2</sup> C. Fonte: Kernel development community. . . . .	14
Figura 3.2 – Barramento I <sup>2</sup> C. Fonte: DigiKey. . . . .	15
Figura 3.3 – Comunicação MQTT. Fonte: (QUINCOZES; TUBINO; KAZIENKO, 2019). . . . .	16
Figura 3.4 – Característica de Saída ao longo de uma Revolução Completa de 360°. Fonte: (OSRAM GROUP, 2018). . . . .	21
Figura 3.5 – Detecção de dois objetos em diferentes localizações. Fonte: (BENEWAKE, 2020). . . . .	24
Figura 3.6 – Resistores colocados nos terminais onde anteriormente estava o potenciômetro de feedback. . . . .	28
Figura 3.7 – Circuito elaborado para o sensor AS5600. . . . .	28
Figura 3.8 – Placa elaborada para o sensor AS5600. . . . .	29
Figura 3.9 – Servomotor adaptado. . . . .	29
Figura 3.10–Vista interna da estrutura. . . . .	30
Figura 3.11–Estrutura equipada com o servo e o sensor acoplados. . . . .	31
Figura 3.12–Gráficos das medições do sensor em função dos sinais de controle. . . . .	32
Figura 3.13–Histograma da Distribuição Angular para um Período de PWM de Aproximadamente 0,5 ms. . . . .	32

Figura 3.14–Histograma da Distribuição Angular para um Período de PWM de Aproximadamente 2,6 ms. . . . .	33
Figura 3.15–Resposta completa para incrementos unitários. . . . .	34
Figura 3.16–Resposta para incrementos unitários com zoom aplicado em um trecho específico do duty cycle. . . . .	34
Figura 3.17–Em preto, estão representadas as entradas aleatórias aplicadas e as posições registradas pelo AS5600. Em vermelho, é exibida a reta obtida por regressão linear. . . . .	36
Figura 3.18–Em preto, estão representadas as entradas aleatórias aplicadas e as posições registradas pelo AS5600. Em vermelho, é exibida a curva obtida por regressão quadrática. . . . .	37
Figura 3.19–Histograma da Distribuição de Probabilidade do Erro para o Ajuste Linear. . . . .	38
Figura 3.20–Histograma da Distribuição de Probabilidade do Erro para o Ajuste Quadrático. . . . .	38
Figura 3.21–Objeto visualmente semelhante ao TF-Luna criado no Unity. . . . .	39
Figura 3.22–Diagrama de elementos e conexões. . . . .	40
Figura 3.23–Fluxograma de funcionamento. . . . .	41
Figura 3.24–Estrutura final do protótipo. . . . .	42
Figura 3.25–Fotos do primeiro ambiente de teste. . . . .	42
Figura 3.26–Vista 1 do resultado obtido no primeiro ambiente de teste. . . . .	43
Figura 3.27–Vista 2 do resultado obtido no primeiro ambiente de teste. . . . .	43
Figura 3.28–Vista 3 do resultado obtido no primeiro ambiente de teste. . . . .	43
Figura 3.29–Efeito da histerese no AS5600. . . . .	44
Figura 3.30–Foto posterior do segundo ambiente de teste. . . . .	44
Figura 3.31–Vista 1 do resultado obtido no segundo ambiente de teste. . . . .	44
Figura 3.32–Vista 2 do resultado obtido no segundo ambiente de teste. . . . .	45
Figura 3.33–Vista 3 do resultado obtido no segundo ambiente de teste. . . . .	45

# Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Especificações do Servo . . . . .	20
Tabela 3.2 – Consumo Médio dos Dispositivos Utilizados. . . . .	22
Tabela 3.3 – Especificação dos parâmetros do TF-Luna. Fonte: (BENEWAKE, 2020). .	23
Tabela 3.4 – Resumo estatístico dos dados do primeiro experimento para um Pe- ríodo de PWM de Aproximadamente 0,5 ms. . . . .	33
Tabela 3.5 – Resumo estatístico dos dados do primeiro experimento para um Pe- ríodo de PWM de Aproximadamente 2,6 ms. . . . .	33
Tabela 3.6 – Resumo Estatístico Para o Ajuste Linear . . . . .	38
Tabela 3.7 – Resumo Estatístico Para o Ajuste Quadrático . . . . .	39



# Lista de acrônimos e notações

<b>I<sup>2</sup>C</b>	Inter-Integrated Circuit
<b>2D</b>	Duas Dimensões
<b>3D</b>	Três Dimensões
<b>ACK</b>	Acknowledge
<b>ACL</b>	Access Control List
<b>DAC</b>	Digital-to-Analog Converter
<b>DC</b>	Direct Current
<b>DGPS</b>	Differential Global Positioning System
<b>FET</b>	Field-Effect Transistor
<b>FOV</b>	Field of View
<b>GND</b>	Ground
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>GPU</b>	Graphics Processing Unit
<b>ICs</b>	Integrated Circuits
<b>IMU</b>	Inertial Measurement Unit
<b>Inter-IC</b>	Inter-Integrated Circuit
<b>IoT</b>	Internet of Things
<b>LiDAR</b>	Light Detection and Ranging
<b>LSB</b>	Least Significant Bits

<b>M2M</b>	Machine-to-Machine
<b>MQTT</b>	Message Queuing Telemetry Transport
<b>NACK</b>	Not Acknowledge
<b>PLA</b>	Ácido Poliláctico
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>RADAR</b>	Radio Detection And Ranging
<b>RAM</b>	Random Access Memory
<b>RMSE</b>	Root Mean Square Error
<b>SCL</b>	Serial Clock Line
<b>SDA</b>	Serial Data Line
<b>TOF</b>	Time of Flight
<b>UART</b>	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
<b>Wi-Fi</b>	Wireless Fidelity

Capítulo 1

## Introdução

O mapeamento por sensores LiDAR (Light Detection and Ranging) é amplamente reconhecido como um método eficaz para gerar imagens precisas e obter informações espaciais detalhadas sobre as formas e características da superfície da Terra. Esta técnica de sensoriamento remoto é semelhante ao RADAR, mas usa pulsos de luz de laser em vez de ondas de rádio. O LiDAR é comumente utilizado em aeronaves, permitindo a rápida coleta de pontos em grandes áreas. Além disso, também é empregado em plataformas estacionárias e móveis terrestres. Essas técnicas de coleta são amplamente adotadas pelas comunidades de topografia e engenharia devido à sua capacidade de gerar altas densidades de pontos e extremamente precisas. Isso possibilita o desenvolvimento de representações tridimensionais acuradas e realistas de diversos elementos, como ferrovias, estradas, pontes, edifícios e outras estruturas. (J. CARTER, 2012)

Existem dois tipos de sistemas de sensoriamento remoto: passivo e ativo. Os sistemas passivos de sensoriamento remoto medem a radiação solar refletida nos comprimentos de onda visível, infravermelho próximo e infravermelho médio, bem como a radiação solar absorvida e reemitida nos comprimentos de onda do infravermelho térmico. Por outro lado, os sistemas de sensoriamento remoto ativos emitem radiação em direção ao alvo usando sua própria fonte de energia e detectam a radiação refletida proveniente desse alvo. Uma vantagem importante dos sensores ativos é a capacidade de obter medições independentemente das condições de iluminação solar e em grande parte independente das condições meteorológicas. (DONG; CHEN, 2018)

As coordenadas tridimensionais dos objetos de destino, (como x, y, z ou latitude, longitude e elevação), são calculadas levando em consideração três elementos: 1) a diferença

de tempo entre a emissão e o retorno do pulso laser, 2) o ângulo no qual o pulso foi disparado e 3) a localização absoluta do sensor na superfície terrestre ou em uma posição acima dela. Esses dados combinados permitem determinar as coordenadas precisas dos objetos alvo no espaço tridimensional. (J. CARTER, 2012)

### **1.1 Justificativa e relevância**

O tema do presente trabalho, que aborda os sensores LiDAR, é de grande relevância e justifica-se por diversas razões. Primeiramente, a crescente utilização desses sensores em aplicações práticas tem despertado interesse tanto na indústria quanto na academia. Com o avanço da tecnologia e a disponibilidade de dispositivos mais acessíveis e eficientes, os sensores LiDAR estão sendo adotados em diferentes setores, como mapeamento, monitoramento ambiental, arquitetura, agricultura, entre outros. Compreender o funcionamento, as aplicações e as potencialidades desses sensores é fundamental para acompanhar essa tendência e explorar suas possibilidades.

No entanto, a relevância do tema não se limita apenas à sua utilização atual. Os sensores LiDAR têm o potencial de abrir portas para o desenvolvimento de novas tecnologias e soluções inovadoras. Ao explorar e aprofundar o conhecimento nessa área, é possível identificar lacunas e desafios que podem impulsionar pesquisas e avanços tecnológicos. A tecnologia LiDAR pode servir como ponto de partida para o desenvolvimento de novas metodologias, algoritmos e ferramentas que ampliem as capacidades de sensoriamento remoto.

Ademais, a relevância do tema também reside na sua atualidade e impacto social. Com a busca por soluções mais sustentáveis e eficientes, os sensores LiDAR apresentam-se como uma tecnologia promissora. Eles permitem a obtenção de informações detalhadas sobre o ambiente em três dimensões, possibilitando a tomada de decisões mais assertivas e o desenvolvimento de projetos mais precisos e econômicos. Dessa forma, estudar os sensores LiDAR é contribuir para a evolução de tecnologias que podem ter um impacto positivo na sociedade, tanto em termos de otimização de recursos quanto de preservação do meio ambiente.

Portanto, a escolha desse tema para o presente trabalho não só se justifica pela sua crescente utilização e relevância atual, mas também pela sua capacidade de impulsionar

pesquisas e avanços tecnológicos, além de contribuir para soluções mais sustentáveis e eficientes.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma revisão bibliográfica sobre a tecnologia de sensores LiDAR. A partir dessa revisão, busca-se identificar os tipos, componentes básicos, princípios físicos, precisão e outras características relevantes da tecnologia LiDAR.

Utilizando as informações adquiridas durante a revisão bibliográfica, será desenvolvido um protótipo estacionário de baixo custo para o mapeamento 3D de pequenas áreas por nuvem de pontos. O protótipo não terá um sistema de pose integrado, focando exclusivamente na captura e processamento dos dados da nuvem de pontos.

## 1.3 Metodologia

Para realizar a revisão descrita anteriormente, serão utilizadas fontes de pesquisa como livros, artigos científicos e manuais técnicos. A revisão bibliográfica fornecerá a base para a elaboração de uma abordagem e metodologia visando o desenvolvimento de um protótipo LiDAR que utiliza componentes de baixo custo. Por meio desse processo de desenvolvimento, será possível identificar as potencialidades e limitações associadas à criação de um protótipo com recursos mais acessíveis.

Para avaliar o controle e precisão do servomotor selecionado para o protótipo, em termos de posição angular, será empregada uma abordagem de modelagem e predição. Será desenvolvido um modelo para prever a posição do servomotor com base no sinal de Pulse Width Modulation (PWM) aplicado, utilizando técnicas de regressão linear e regressão quadrática. Essas técnicas foram escolhidas por sua capacidade de estabelecer uma relação matemática entre a variável dependente (posição angular do servomotor) e a variável independente (sinal de PWM), permitindo estimar a posição com base nos valores do sinal de controle.

A regressão linear foi selecionada como uma abordagem inicial, pois é uma técnica amplamente utilizada e fornece uma estimativa direta da relação linear entre as variáveis. No entanto, a regressão quadrática também será considerada, uma vez que pode capturar

relações não lineares mais complexas entre as variáveis, permitindo uma modelagem mais precisa em casos em que a relação linear não é suficiente.

Para avaliar a confiabilidade e a precisão dos modelos de regressão, será empregado um intervalo de confiança de 95% baseado na distribuição normal (ou distribuição gaussiana). Esse intervalo de confiança permitirá verificar quão bem os modelos se ajustam aos dados experimentais e quão confiáveis são as previsões obtidas.

Será conduzido um experimento utilizando um sensor de posição angular para gerar os conjuntos de dados de entrada e saída necessários para o levantamento dos modelos. Os detalhes específicos sobre esse experimento serão apresentados no capítulo 3. Por outro lado, os dados dos demais componentes utilizados no protótipo serão obtidos a partir dos documentos fornecidos pelos fabricantes.

É importante destacar que, para o protótipo final desenvolvido neste trabalho, a avaliação dos resultados será realizada visualmente, comparando os dados obtidos pelo sensor com fotos do ambiente em estudo. No entanto, na próxima etapa do trabalho, será definido um método adicional de avaliação para garantir uma análise mais precisa e quantitativa dos resultados obtidos.

# Capítulo 2

## A Tecnologia LiDAR no mapeamento tridimensional

Neste capítulo será abordado o método de mapeamento tridimensional por meio da utilização de sensores LiDAR, considerando os princípios físicos que governam essa tecnologia, os componentes básicos envolvidos e a avaliação da precisão.

### 2.1 O Método

Em sua forma mais fundamental, o LiDAR (Light Detection and Ranging) utiliza um feixe de laser para produzir e emitir pulsos de luz, enquanto registra o tempo necessário para o retorno do reflexo desse pulso. Comumente, o sistema LiDAR é transportado por uma aeronave de asa fixa e, além do scanner a laser emissor-receptor, está conectado a um sistema de posicionamento global (GPS) e a uma unidade de medição inercial (IMU). O sistema de posicionamento global realiza medições constantes da posição do scanner a laser, o que é crucial para determinar precisamente a origem dos pulsos de luz emitidos. Por sua vez, a IMU mensura a inclinação da aeronave (rolamento, arfagem e guinada), o que desempenha um papel essencial no cálculo da direcionalidade da aeronave e, portanto, dos pulsos de luz emitidos (M. MELIN, 2017).

Uma maneira simples de compreender o funcionamento do LiDAR é analisar o percurso de um único pulso de luz emitido. Esse pulso consiste em um conjunto de fótons com marcas de tempo, emitidos em uma direção específica. Quando esse pulso entra em contato com uma superfície, como uma folha em uma floresta, parte desses fótons é refletida de

volta ao emissor a laser. O LiDAR reconhece esses fótons refletidos, registrando suas marcas de tempo e calculando o tempo transcorrido entre a emissão inicial e o retorno refletido, conhecido como “eco” (ou seja, um eco é captado do pulso emitido). Em seguida, o sistema do LiDAR calcula a localização de onde o eco se originou. Essa determinação é possível devido ao conhecimento da velocidade do pulso (ou seja, a velocidade da luz), do ponto de partida do pulso (posição da emissão), da direção do pulso e do tempo de viagem do pulso. Com esses valores conhecidos, o cálculo da localização do eco se torna um problema de geometria simples (M. MELIN, 2017).

Frequentemente, pulsos de luz geram diversos retornos luminosos, pois nem todos os feixes de luz são refletidos na primeira superfície com a qual se deparam. Ao invés disso, alguns feixes atravessam superfícies semitransparentes ou não opacas antes de interagir com outros objetos e gerar novos retornos luminosos. Dessa forma os ecos são categorizados de acordo com esse detalhe. As categorias são primeiro de muitos, último de muitos, único e intermediário. Primeiro de muitos significa que o dispositivo recebeu muitos ecos de um pulso, dos quais o eco atual foi o primeiro. Da mesma forma, último de muitos significa que dos muitos ecos recebidos, este foi o último; ecos intermediários, então, vêm entre as duas categorias anteriores. Por fim, único significa que a partir deste pulso apenas um eco foi detectado (M. MELIN, 2017).

Os sistemas LiDAR modernos podem emitir até 800.000 pulsos por segundo. Cada pulso pode gerar vários ecos, e a localização de cada eco é registrada. Cada eco está associado às coordenadas XYZ de um pulso LiDAR. o processamento dos dados é geralmente denominado de dados de nuvem de pontos. Ao representar graficamente os dados, é possível observar a estrutura do alvo que foi submetido à digitalização (M. MELIN, 2017).

## 2.2 Componentes Básicos

Em sistemas LiDAR terrestres, é comum utilizar lasers com comprimento de onda de 500 a 600 nm, enquanto em sistemas LiDAR aéreos são utilizados lasers com comprimento de onda de 1000 a 1600 nm. Um sistema LiDAR aéreo típico é composto por um scanner a laser, uma unidade de medição de distância, unidades de controle, monitoramento e gravação, sistema de posicionamento global diferencial (DGPS) e uma unidade de medição

inercial (IMU) (DONG; CHEN, 2018).

As informações precisas de posição (longitude, latitude e altitude) e orientação, também conhecidas como pose são geradas pelos sistemas de DGPS e IMU. Os padrões de varredura a laser podem ser em zigue-zague, paralelos ou elípticos. Com base nas informações obtidas pelos sensores, nos dados de calibração e montagem, os pontos de laser coletados podem ser processados e atribuídos a coordenadas (x, y, z). A Figura 2.1 a seguir, ilustra um sistema típico de LiDAR utilizado em aeronaves (DONG; CHEN, 2018).

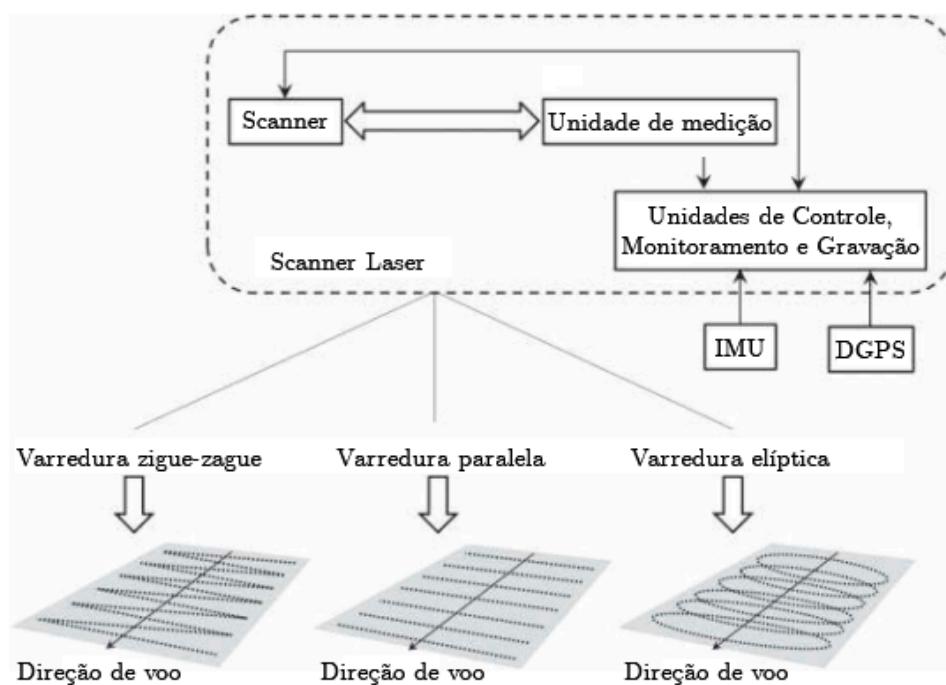


Figura 2.1 – Sistema LiDAR Tipicamente Utilizado em Aeronaves. Fonte: Adaptado de (DONG; CHEN, 2018)

O uso de coordenadas esféricas no LiDAR estacionário oferece uma abordagem eficaz para a captura e análise de dados tridimensionais. A conversão das coordenadas esféricas para coordenadas cartesianas (XYZ) é um processo relativamente simples, permitindo uma representação mais tradicional dos dados.

## 2.3 Coordenadas Esféricas

As coordenadas esféricas são empregadas para a localização de pontos no espaço por triplas coordenadas, fazendo uso de dois ângulos e uma distância. Essa abordagem é

exemplificada de forma visual na Figura 2.2. (B. GEORGE, 2012)

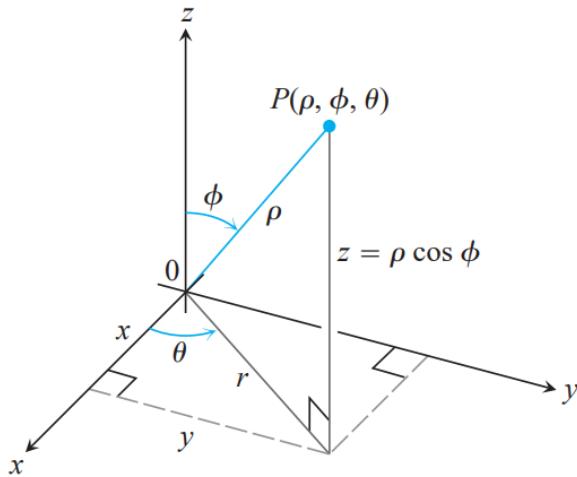


Figura 2.2 – Sistema de Coordenadas Esféricas. Fonte: (B. GEORGE, 2012)

1.  $\rho$  é a distância entre P e a origem.
2. O ângulo polar  $\phi$  é medido a partir do eixo positivo z (ou eixo polar) e define a posição vertical do ponto P em relação ao plano xy. Ele varia de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  (ou de 0 a  $\pi$  radianos), onde  $0^\circ$  representa o plano xy positivo (equador) e  $180^\circ$  representa o oposto (polo sul).
3. O ângulo azimutal  $\theta$ , também conhecido como ângulo de azimute ou ângulo de inclinação, é medido a partir do eixo positivo x e define a posição horizontal do ponto P em relação ao plano xz. Ele varia de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  (ou de 0 a  $2\pi$  radianos), percorrendo todo o plano horizontal.

Nos mapas da Terra, o ângulo  $\theta$  está relacionado ao meridiano de um ponto, representando sua posição no sentido leste-oeste. O ângulo  $\phi$  está relacionado à latitude, indicando a posição no sentido norte-sul em relação ao Equador. Enquanto isso, a distância radial  $\rho$  está associada à elevação acima da superfície terrestre, denotando a altitude em relação ao nível do mar. (B. GEORGE, 2012)

As equações a seguir relacionam as coordenadas esféricas às coordenadas cartesianas:

$$x = \rho \sin(\phi) \cos(\theta), \quad (2.1)$$

$$y = \rho \sin(\phi) \sin(\theta), \quad (2.2)$$

$$z = \rho \cos(\phi). \quad (2.3)$$

## 2.4 Princípios Físicos do LiDAR

Os sistemas de LiDAR pulsado realizam a medição do tempo de voo (TOF) de um pulso de luz curto, emitido pelo laser, até atingir o alvo e retornar ao receptor. Assim, a distância pode ser obtida pela equação

$$D = \frac{1}{2}c \times t_s, \quad (2.4)$$

onde  $D$  é a distância;  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e  $t_s$  o tempo gasto para o pulso retornar ao receptor.

A relação entre a potência dos sinais transmitidos ( $P_t$ ) e recebidos ( $P_r$ ) é expressa através da equação fundamental do LiDAR:

$$P_r(t) = \frac{D^2}{4\pi\lambda^2} \int_0^H \frac{\eta_{sys}\eta_{atm}}{R^4} P_t(t - \frac{2R}{v_g}) \sigma(R) dR \quad (2.5)$$

onde  $t$  é o tempo;  $D$  o diâmetro de abertura ótica do receptor;  $P_r$  é a potência do sinal recebido;  $P_t$  é a potência do sinal transmitido;  $\lambda$  é o comprimento de onda;  $H$  é a altura de voo;  $R$  é a distância entre o sistema e o alvo;  $\eta_{sys}$  e  $\eta_{atm}$  são os fatores de transmissão do sistema e da atmosfera, respectivamente;  $v_g$  é a velocidade de grupo do pulso de laser e  $\sigma(R)dR$  é a seção transversal diferencial efetiva aparente.

A potencia do sinal recebido ( $P_r(t)$ ) pode ser expressa como a combinação das contribuições provenientes de  $N$  alvos:

$$P_r(t) = \sum_{i=1}^N P_{r,i}(t) \times \eta_{sys}(t) \times \eta_{atm}(t) = \sum_{i=1}^N \frac{D^2}{4\pi\lambda^2} P_t(t) \times \eta_{sys}(t) \times \eta_{atm}(t) \times \sigma'_i(t) \quad (2.6)$$

onde  $\sigma'_i(t)$  é a seção transversal aparente das áreas iluminadas dentro de cada faixa de distância  $P_t(t) \times \eta_{sys}(t)$  é o componente da contribuição do sistema e  $\eta_{atm}(t) \times \sigma'_i(t)$  é a contribuição do ambiente.

## 2.5 Precisão

Normalmente, a precisão do LiDAR é avaliada através de uma análise estatística comparativa entre pontos de referência conhecidos (obtidos por medição) e os pontos medidos pelo laser. Essa avaliação costuma ser realizada considerando medidas como desvio padrão ( $\sigma^2$ ) e erro quadrático médio (RMSE) (S. EVANS, 2009).

(S. EVANS, 2009) também sugerem que as abordagens utilizadas para determinar e relatar a precisão vertical e horizontal dos dados LiDAR discreto sigam as diretrizes estabelecidas em FGDC-STD-007 (Comitê Federal de Dados Geográficos, 1998) e NGS58 (NOAA, 1997). No caso de terrenos com declives leves a moderados, é exigido um nível mínimo de precisão para os dados LiDAR, que consiste em um erro quadrático médio vertical de menos de 15 cm e um erro quadrático médio horizontal de 55 cm.

Capítulo **3**

## Protótipo Desenvolvido

Este capítulo apresenta uma descrição detalhada do processo de criação e implementação do protótipo de um sensor LiDAR estacionário desenvolvido no contexto deste trabalho. Neste capítulo, serão abordados os principais aspectos relacionados a concepção, design e construção do protótipo, que representa uma parte fundamental deste estudo.

Inicialmente, são apresentados os objetivos e requisitos estabelecidos para o protótipo, fornecendo uma visão geral do propósito e da funcionalidade esperada. Em seguida, serão discutidos os materiais, ferramentas e tecnologias utilizados para a construção do protótipo, destacando-se suas características e justificativas para sua escolha. Serão apresentadas as metodologias e técnicas empregadas durante o processo de desenvolvimento. Além disso, serão explorados os desafios e as soluções encontradas ao longo do desenvolvimento, bem como as decisões que foram tomadas para garantir a viabilidade e eficiência do protótipo.

Ao longo deste capítulo, serão fornecidos detalhes sobre a arquitetura do protótipo, suas funcionalidades e interfaces, destacando os principais elementos e componentes envolvidos. Será apresentado um panorama completo do processo de prototipagem, desde a fase inicial de projeto até a implementação final.

Por fim, serão analisados os resultados obtidos com a criação do protótipo, incluindo testes, validações e possíveis limitações identificadas. Com base nessas conclusões, recomendações serão feitas para aprimorar o protótipo e orientar futuros trabalhos.

### 3.1 Objetivos e Requisitos

O principal objetivo do protótipo é garantir a representação de pequenos ambientes por meio de nuvens de pontos, levando em consideração as limitações dos sensores e equipamentos utilizados, os quais que são de baixo custo. Busca-se alcançar uma fidelidade adequada na representação do ambiente, capturando os detalhes mais relevantes. Além disso, pretende-se implementar uma representação gráfica em tempo real e sincronizada em um computador, proporcionando uma visualização imediata dos dados adquiridos pelo sensor, tanto os já capturados quanto os que estão sendo obtidos em tempo real.

No que diz respeito aos requisitos, um fator fundamental é a leveza do protótipo. O objetivo é projetá-lo de forma a ser suficientemente leve para ser transportado por drones comuns, ampliando as possibilidades de aplicação do sensor LiDAR em diversos contextos, como mapeamento de áreas remotas ou áreas de difícil acesso.

Outro requisito estabelecido é a sincronização em tempo real entre o protótipo e o computador. A transmissão e o processamento dos dados do sensor LiDAR devem ser executados de forma eficiente para possibilitar a representação gráfica em tempo real, proporcionando uma experiência imersiva e permitindo a tomada de decisões ágeis, seja por um usuário humano ou por sistemas automatizados, como, por exemplo, os que são fundamentados em técnicas avançadas de reconhecimento de imagem.

Além disso, utilizando componentes de baixo custo, o protótipo deve garantir uma precisão adequada na representação dos detalhes mais relevantes do ambiente. Espera-se que o protótipo seja capaz de fornecer uma representação precisa e fiel do ambiente em estudo.

Quanto às condições ambientais, é importante ressaltar que o protótipo foi desenvolvido levando em consideração as limitações dos componentes utilizados. Embora não seja resistente à água ou poeira, o objetivo é que ele seja capaz de operar em condições ambientais normais, garantindo a integridade do sistema e a eficácia em ambientes controlados.

Esses objetivos e requisitos estabelecidos para o protótipo de sensor LiDAR fornecem uma estrutura sólida para o desenvolvimento do projeto. Eles são fundamentais para orientar as etapas subsequentes, desde a concepção e o design até a implementação e os testes, assegurando que o resultado final esteja em conformidade com os critérios estabelecidos e cumpra adequadamente a sua função proposta. É importante destacar que esse

protótipo não terá um sistema de pose integrado, focando exclusivamente na captura e processamento dos dados da nuvem de pontos.

## 3.2 Materiais e Recursos Utilizados

Na presente seção, são detalhados os materiais e equipamentos empregados, assim como os recursos digitais e softwares utilizados. Será provida uma explanação acerca da justificativa para a seleção desses elementos e recursos, em consonância com os objetivos e requisitos do projeto.

### 3.2.1 Protocolo I<sup>2</sup>C

O barramento bidirecional de 2 fios conhecido como Inter-IC ou I<sup>2</sup>C, desenvolvido pela NXP Semiconductors (anteriormente Philips Semiconductors), possibilita um controle eficiente entre circuitos integrados. Esse barramento utiliza apenas duas linhas: uma linha de dados seriais (SDA) e uma linha de clock serial (SCL). As transferências de dados ocorrem de forma bidirecional, com orientação de 8 bits, suportando velocidades de até 100 kbit/s no modo padrão, 400 kbit/s no modo rápido, 1 Mbit/s no modo rápido plus (Fm+), e até 3,4 Mbit/s no modo alta velocidade. Adicionalmente, o modo ultra rápido permite transferências unidirecionais com velocidade de até 5 Mbit/s (SEMICONDUCTORS, 2021).

As linhas SDA e SCL do barramento I<sup>2</sup>C são projetadas com o tipo de saída dreno aberto, o que significa que elas operam de maneira semelhante a um coletor aberto, mas com o uso de transistores de efeito de campo (FET). Para garantir o correto funcionamento dessas linhas, elas devem ser polarizadas no estado lógico alto (ou seja, conectadas à tensão de alimentação) por meio do uso de resistores pull-up (CARLETTI, 2019).

Essa configuração com resistores pull-up cria uma estrutura de barramento que permite conexões paralelas de vários dispositivos I<sup>2</sup>C. O diagrama mostrado na Figura 3.1 exemplifica o barramento I<sup>2</sup>C.

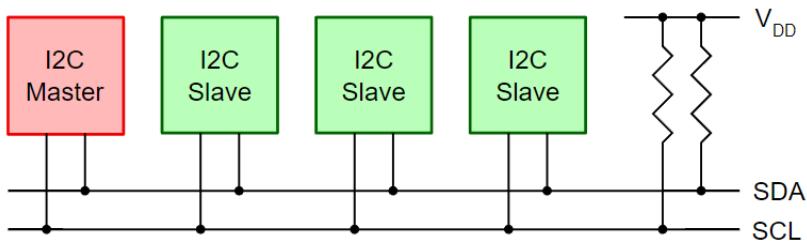


Figura 3.1 – Barramento I<sup>2</sup>C. Fonte: Kernel development community.

Cada dispositivo conectado ao barramento é identificável por um endereço único atribuído por software, e existe uma relação simples entre controlador e alvo, comumente conhecida como mestre/escravo. Os controladores podem atuar como transmissores de dados ou receptores de dados. O número de ICs que podem ser conectados ao mesmo barramento é limitado pela capacidade máxima do barramento de 400 pF (SEMICONDUCTORS, 2021).

Com vários dispositivos conectados ao barramento, é natural que a comunicação por meio dele siga um protocolo específico. Somente os dispositivos mestres têm a capacidade de iniciar a comunicação.

A condição inicial, conhecida como barramento livre, é caracterizada pela presença de ambos os sinais em nível lógico alto. Nesse estado, qualquer dispositivo mestre tem a capacidade de assumir o controle do barramento, estabelecendo assim a condição de início de comunicação, conhecida como “START”. Essa condição ocorre quando um dispositivo mestre coloca o nível lógico da linha de dados (SDA) em nível baixo e mantém o sinal de clock (SCL) em nível alto (CARLETTI, 2019).

Após o envio da condição de início (START) pelo dispositivo mestre, ele transmite um byte contendo sete bits que representam o endereço de um dispositivo escravo no barramento, enquanto o oitavo bit indica o modo de operação (leitura ou escrita). Após a transmissão do endereço, o dispositivo escravo correspondente responde com um bit de reconhecimento (ACK) em nível baixo. Caso seja transmitido um novo byte para o mesmo dispositivo escravo (já endereçado), o escravo também responde com um ACK.

Durante uma operação de leitura, quando o dispositivo mestre recebe um byte do dispositivo escravo, ele deve confirmar o recebimento ao escravo com um ACK. Se não houver mais dados a serem recebidos, o mestre envia um sinal de não reconhecimento (NACK) e interrompe a transação de dados. Em uma operação de escrita, se o mestre recebe um NACK em vez de um ACK, indica que o escravo não conseguiu reconhecer ou

processar o byte de dados, e solicita ao mestre que interrompa a transmissão.

Ao final da troca de mensagens, é enviada uma condição de parada (STOP), que sinaliza a todos os dispositivos do barramento que o mesmo está novamente disponível (barramento livre).

A Figura 3.2 exemplifica a comunicação pelo protocolo I<sup>2</sup>C. O exemplo ilustra o processo de leitura da temperatura de um sensor TMP102. Inicialmente, é enviado um comando de escrita para o TMP102, e o TMP102 responde com um sinal de reconhecimento (ACK). Em seguida, o endereço do registrador 0x00 é escrito, e o TMP102 envia um sinal de reconhecimento (ACK) em resposta. O mestre, então, envia um sinal de parada (STOP). Posteriormente, o TMP102 é chamado novamente no barramento para uma leitura. O TMP102 responde com ACK seguido de 1 byte de informação, recebe o sinal de reconhecimento (ACK) do dispositivo mestre e, em seguida, responde com o byte de informação do próximo registrador. Por fim, o dispositivo mestre envia um sinal de não reconhecimento (NACK), indicando o fim da comunicação.

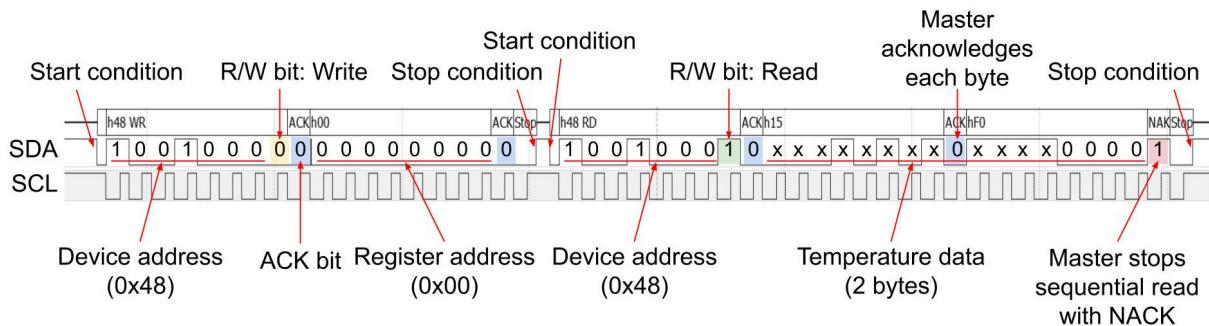


Figura 3.2 – Barramento I<sup>2</sup>C. Fonte: DigiKey.

O motivo principal para a escolha do protocolo I<sup>2</sup>C como meio de comunicação entre os sensores e o controlador do protótipo desenvolvido neste trabalho reside no fato de que os sensores selecionados para o projeto (que serão apresentados nesta sessão) são nativamente compatíveis com esse protocolo. Além disso, é importante destacar a ampla disponibilidade de sensores no mercado que utilizam o protocolo I<sup>2</sup>C, oferecendo uma vasta variedade de opções confiáveis e de alta qualidade que podem ser facilmente integradas ao projeto. A compatibilidade entre os sensores escolhidos e o protocolo I<sup>2</sup>C simplifica o processo de configuração e comunicação entre eles, resultando em um desenvolvimento mais ágil e eficiente do sistema como um todo.

#### 3.2.2 Protocolo MQTT

No contexto dos dispositivos de IoT, são estabelecidos requisitos específicos, como a necessidade de otimização do consumo de energia e recursos de processamento. Esses requisitos são impostos pelos próprios dispositivos. Dentre os protocolos propostos para a camada de aplicação na IoT, estudos indicam a proeminência do protocolo MQTT, especialmente em redes de sensores sem fio e na comunicação veículo-a-veículo (QUINCOZES; TUBINO; KAZIENKO, 2019). Portanto, com o objetivo de viabilizar a comunicação em tempo real entre o protótipo desenvolvido e o software selecionado para a representação 3D (que será apresentado posteriormente nesta seção), optou-se pela adoção do protocolo MQTT.

Ao contrário da abordagem comumente adotada pela maioria dos protocolos da Internet, que se baseia no paradigma Cliente-Servidor, o protocolo MQTT segue um paradigma que permite a transmissão intermitente de mensagens para grupos específicos de clientes. Esse paradigma é conhecido como Publish-Subscribe (Publicador-Assinante), no qual os clientes interessados podem assinar tópicos de seu interesse em um servidor centralizado chamado broker MQTT. Um broker pode conter vários tópicos, nos quais mensagens de diferentes dispositivos publicadores são recebidas e entregues a múltiplos dispositivos assinantes do respectivo tópico (QUINCOZES; TUBINO; KAZIENKO, 2019).

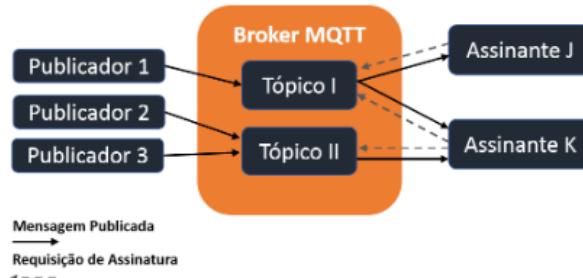


Figura 3.3 – Comunicação MQTT. Fonte: (QUINCOZES; TUBINO; KAZIENKO, 2019).

A Figura 3.3 facilita a compreensão do fluxo de comunicação assíncrona, em que as mensagens enviadas pelos dispositivos publicadores são propagadas para todos os dispositivos assinantes por meio do broker. Essa visualização visual reforça a flexibilidade e a eficiência do modelo publicador-assinante adotado pelo MQTT.

Nesse diagrama, pode-se visualizar um cenário hipotético onde múltiplos dispositivos publicadores alimentam um broker, responsável por gerenciar a troca de mensagens entre

os dispositivos assinantes.

Os dispositivos publicadores são responsáveis por enviar mensagens para o broker, enquanto os dispositivos assinantes demonstram interesse em receber mensagens de tópicos específicos. No diagrama o Assinante J está inscrito no Tópico I e recebe as mensagens provenientes do Dispositivo Publicador 1. O Assinante K, por sua vez, além de receber as mensagens do Dispositivo Publicador 1 pelo Tópico I, também assina o Tópico II para receber mensagens dos Publicadores 2 e 3.

O protocolo MQTT envolve o uso de 14 tipos de mensagens (OASIS, 2019). Dentre essas mensagens, as mais relevantes são aquelas utilizadas nos processos de conexão, publicação de mensagens, assinatura de tópicos de interesse e cancelamento de assinaturas indesejadas. Abaixo estão listadas as principais mensagens envolvidas nessas operações:

- 1) Connect: Essa mensagem é enviada pelo cliente para estabelecer a conexão com o broker MQTT. Contém informações como o identificador do cliente, configurações de autenticação e outras opções de conexão.
- 2) Publish: Essas mensagens são utilizadas para transmitir informações do cliente publicador para outros clientes assinantes que estão interessados no tópico em questão. O broker é responsável por receber as mensagens publicadas e encaminhá-las aos clientes que se inscreveram no respectivo tópico.
- 3) Subscribe: Esse tipo de mensagem permite que um cliente se registre para receber informações de um ou mais tópicos no servidor. Dessa forma, as mensagens publicadas nos tópicos assinados serão recebidas pelo cliente a partir do servidor.
- 4) Unsubscribe: esse tipo de mensagem permite cancelar a inscrição em um determinado tópico.

Uma das características distintivas do MQTT é o suporte a diferentes níveis de qualidade de serviço QoS. O QoS no MQTT permite que os clientes determinem o nível de garantia e confiabilidade na entrega das mensagens trocadas entre os dispositivos conectados à rede. Abaixo estão listados os níveis de qualidade de serviço (QoS) disponíveis no protocolo MQTT:

- 1) QoS 0 (At Most Once): O nível de QoS 0, também conhecido como “entrega no máximo uma vez”, é o nível mais básico e simples. Nele, as mensagens são enviadas

apenas uma vez, sem garantia de entrega ou confirmação. O broker não mantém o estado das mensagens e não há retransmissão em caso de falhas de entrega. Embora seja o nível mais rápido e eficiente em termos de largura de banda, não há garantia de que as mensagens cheguem ao destinatário.

- 2) QoS 1 (At Least Once): O nível de QoS 1, chamado de “entrega pelo menos uma vez”, oferece maior confiabilidade na entrega das mensagens. Ao enviar uma mensagem com QoS 1, o cliente recebe uma confirmação de que a mensagem foi recebida pelo broker. Caso a confirmação não seja recebida, o broker retransmite a mensagem. Isso garante que a mensagem seja entregue pelo menos uma vez ao cliente, embora possa ocorrer duplicação de mensagens em caso de falhas de rede.
- 3) QoS 2 (Exactly Once): O nível de QoS 2, denominado “entrega exatamente uma vez”, é o mais seguro e confiável dos três. Ele oferece garantia de entrega sem duplicação de mensagens. Ao enviar uma mensagem com QoS 2, o cliente e o broker realizam um handshake para garantir que a mensagem seja entregue exatamente uma vez, sem falhas ou duplicações. Esse nível é mais lento e consome mais recursos de rede e armazenamento devido aos processos adicionais de confirmação.

#### 3.2.3 Sinal PWM

O PWM (Pulse Width Modulation) é uma técnica usada para gerar um sinal de potência a partir de um dispositivo digital quando um sinal analógico não está disponível. A principal vantagem do uso do PWM é permitir a geração de um sinal de potência variável sem a necessidade de um conversor digital-analógico, reduzindo assim a complexidade e o número de componentes em um projeto.

Na modulação por largura de pulso, um sinal digital é alternado rapidamente entre os níveis alto e baixo, por meio de pulsos de curta duração. Ao variar a duração do pulso alto dentro de um período, mantendo o período constante, é possível alterar a tensão média do sinal. Essa variação na largura do pulso alto é chamada de duty cycle e determina a tensão média fornecida ao dispositivo.

Para diminuir o consumo de energia de um dispositivo ou limitar a potência fornecida a ele, o ciclo de trabalho do sinal PWM deve ser reduzido. Ao diminuir o ciclo de trabalho, a tensão média diminui.

Além de controlar a potência, a modulação por largura de pulso também pode ser usada para transmitir informações. Alguns dispositivos, como servos e controles remotos infravermelhos, utilizam a largura dos pulsos altos para codificar e transmitir dados.

No presente trabalho, foi selecionado um servomotor que permite o controle da posição angular do protótipo. O servomotor será apresentado a seguir e oferece o controle da posição angular através de um sinal de referência PWM.

#### 3.2.4 Micro Servo SG92R TowerPro

Os servomotores são dispositivos utilizados para controlar o posicionamento preciso de um eixo em uma determinada posição. Eles se destacam pelo tempo de resposta rápido, alta precisão, alta confiabilidade, alta repetibilidade, movimentos coordenados e capacidade de manter continuamente a posição desejada (YOUNKIN, 2003).

Um método comum de controle de posição em servomotores é por meio do uso de sinais PWM. No controle PWM, um sinal elétrico é enviado ao servo, e a largura do pulso desse sinal determina a posição desejada para o eixo do servo.

O ângulo do servo SG92R é controlado por um sinal PWM com frequência de 50 Hz. Ele possui a capacidade de girar em um ângulo de 180 graus, onde a posição “0°” (pulso de 1,5 ms) é o centro, “90°” (pulso de 2 ms) é todo o caminho para a direita e “-90°” (pulso de 1 ms) é todo o caminho para a esquerda.

O sistema de feedback do servo SG92R é baseado em um potenciômetro externo. O potenciômetro é conectado mecanicamente ao eixo de saída do servo, de modo que ele gira juntamente com o movimento do servo. Esse potenciômetro é responsável por fornecer informações de posição ao circuito de controle do servo.

Quando o servo é comandado para uma determinada posição, o circuito de controle monitora continuamente o sinal de feedback do potenciômetro para verificar a posição atual do servo. Ele compara essa posição com a posição desejada e faz os ajustes necessários para alcançar e manter a posição correta.

É importante destacar que a precisão e a calibração do potenciômetro externo são fatores críticos para o desempenho do servo. O potenciômetro de feedback geralmente tende a ser linear, ou seja, a relação entre a posição física do eixo do servo e o valor de resistência do potenciômetro é aproximadamente proporcional. Um potenciômetro de feedback preciso e devidamente calibrado garante que o servo seja capaz de posicionar-

### 3.2. MATERIAIS E RECURSOS UTILIZADOS

se de forma correta e consistente. Uma imprecisão ou uma calibração inadequada do potenciômetro podem resultar em erros de posicionamento ou movimentos imprecisos do servo.

O servo SG92R tem um peso leve de aproximadamente 9g. Esse baixo peso é uma vantagem significativa em projetos que exigem componentes mais leves para minimizar a carga total ou para aplicações onde o peso é um fator crítico.

Em resumo, o servo SG92R TowerPro é apresentado no mercado como uma opção confiável e versátil para projetos que requerem movimento controlado e preciso, o controle e precisão do servo SG92R serão avaliados em uma seção posterior. Seu tamanho compacto, peso, forma de controle e baixo custo o tornam uma boa escolha para o projeto. As principais características do servo SG92R estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Especificações do Servo

<b>Peso</b>	9 g
<b>Dimensões</b>	23x12,2x27 mm
<b>Torque de arranque</b>	2,5 kg/cm(4,8 V)
<b>Tipo de engrenagens</b>	Polioximetileno com fibra de carbono
<b>Velocidade de operação</b>	0,1 s/60 °(4,8 V)
<b>Tensão de operação</b>	4,8 V
<b>Faixa de temperatura</b>	0 °C a 55 °C
<b>Frequência do PWM</b>	50 Hz
<b>Duty Cycle</b>	1 ms a 2 ms

#### 3.2.5 Sensor AS5600

O AS5600 é um sensor de posição magnética rotativa baseado em Hall, que utiliza sensores planares para converter o componente do campo magnético perpendicular à superfície do chip em um sinal de tensão (OSRAM GROUP, 2018). A comunicação entre o sensor e outros dispositivos é feita por meio da interface de comunicação I<sup>2</sup>C.

Com uma resolução de saída de 12 bits do conversor digital para analógico (DAC), o AS5600 proporciona uma leitura precisa e detalhada dos ângulos medidos. Além disso, o AS5600 é conhecido por sua confiabilidade e durabilidade (OSRAM GROUP, 2018).

É importante mencionar que se a faixa medida for de 360°, para evitar pontos de descontinuidade exatamente no limite da faixa, o AS5600 aplica uma histerese de 10 LSBs, como mostrado na Figura 3.4. Essa histerese suprime a oscilação do pino de saída

enquanto o ímã está próximo de zero ou  $360^\circ$ . O impacto dessa histerese pode ser calculado aproximadamente como:

$$\text{Impacto (em graus)} = \left( \frac{10 \text{ LSBs}}{4096} \right) \times 360. \quad (3.1)$$

Considerando que a resolução do sensor é de 12 bits (4096 unidades de resolução ao longo de  $360^\circ$ ), o cálculo resulta em:

$$\text{Impacto (em graus)} \approx 0,8789 \text{ graus.} \quad (3.2)$$

Portanto, a histerese de 10 LSBs do AS5600 terá um impacto aproximado de 0,8789 graus na medição angular ao atravessar os limites de  $360^\circ$  e  $0^\circ$ .

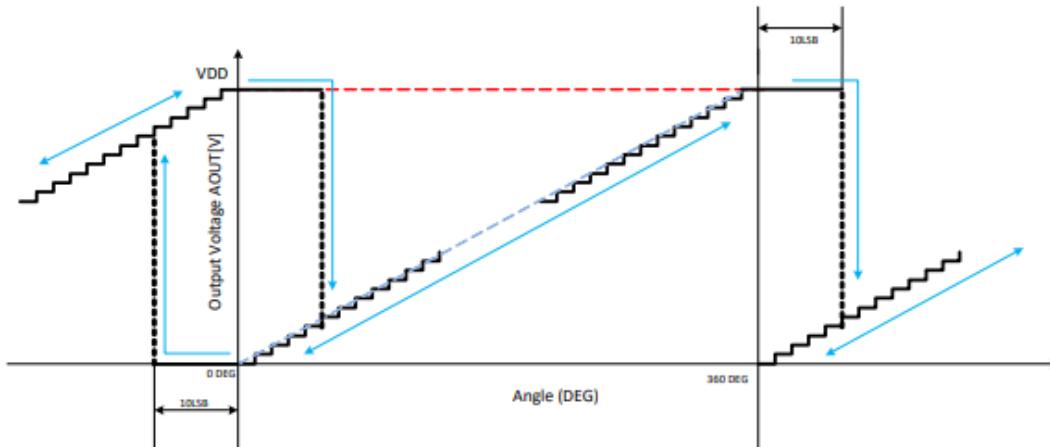


Figura 3.4 – Característica de Saída ao longo de uma Revolução Completa de  $360^\circ$ .  
Fonte: (OSRAM GROUP, 2018).

Essa imprecisão é relativamente pequena e pode ser considerada insignificante na maioria das aplicações. No entanto, em aplicações que exigem alta precisão, como os sensores LiDAR, é importante ressaltar essa fonte adicional de erro.

No contexto do protótipo desenvolvido, através da fórmula do comprimento de um arco, o impacto dessa histerese dependerá da distância radial e do ângulo  $\phi$ . Considerando a máxima distância radial possível de ser coletada com o TF-Luna (800 cm), e o ângulo  $\phi = 90^\circ$  essa histerese implica em uma descontinuidade de  $0,8789 \times \frac{\pi}{180} \times 800 \approx 12,27 \text{ cm}$  e a não confiabilidade dos pontos gerados nos limites de transição para a volta completa.

Para uma melhor compreensão da situação descrita, a Figura 3.29 ilustra o problema na prática. Nesta imagem, é evidente que existe uma faixa não amostrada que excede 12

cm, mesmo com uma distância radial inferior a 8 m. Esse resultado será discutido e na seção de resultados.

#### 3.2.6 Alimentação do Protótipo

Para alimentar o protótipo escolheu-se utilizar uma célula de lítio por sua disponibilidade, popularidade, ser recarregável, baixo custo e dimensões. Para a recarga da célula foi escolhido o módulo TP4056 com proteção.

O módulo TP4056 com proteção é uma escolha popular para recarregar baterias devido às suas diversas vantagens. Ele oferece proteção contra sobrecarga, evitando danos à bateria durante o processo de carga, e também possui recursos de proteção contra descarga excessiva, garantindo que a bateria não seja descarregada além de seus limites seguros. Além disso, o módulo TP4056 com proteção é projetado para gerenciar a carga de forma eficiente, garantindo um processo de recarga seguro e otimizado. Sua ampla disponibilidade, baixo custo e facilidade de uso tornam-no uma escolha conveniente.

No que diz respeito à capacidade da célula escolhida, levou-se em consideração consumo médio dos dispositivos utilizados, conforme apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Consumo Médio dos Dispositivos Utilizados.

Dispositivo	Consumo Médio
ESP32-Devkitc V4	240 mA
TF-Luna	70 mA
Servo SG92R	550 mA
AS5600	6,5 mA

Considerando a utilização de dois servomotores e um elemento de cada listado na Tabela 3.2, o consumo médio total é estimado em 1416,5 mA. Para alimentar o protótipo, foi selecionada uma célula de lítio com capacidade de 3000 mA/h. Isso possibilita o protótipo operar por cerca de 2 horas. As perdas dos módulos de recarga e step-up (que será citado a seguir) foram desconsideradas.

O ESP32 pode operar com uma tensão de alimentação de 3,3 V ou 5 V. No entanto, como as células de lítio geralmente fornecem uma tensão de saída de 3,7 V, que pode danificar o controlador, foi utilizado um conversor step-up DC-DC genérico, que não será detalhado neste trabalho, para elevar a tensão de 0,9 V a 5 V para 5 V. Dessa

forma, utilizou-se a alimentação de 5 V do ESP32. Tanto o sensor TF-Luna quanto os servomotores também são alimentados com 5 V.

Embora o sensor AS5600 possa ser alimentado com 5 V, o primeiro circuito desenvolvido pelo autor foi projetado para uma alimentação de 3,3 V. Essa escolha foi mantida, pois o ESP32 possui uma saída de 3,3 V que será utilizada para alimentá-lo.

### 3.2.7 TF-Luna

O sensor TF-Luna utiliza o princípio do tempo de voo (TOF) para medir distâncias, emitindo periodicamente ondas moduladas de infravermelho próximo. Ela calcula o tempo ao medir a diferença de fase entre a onda original e a onda refletida (BENEWAKE, 2020).

Os parâmetros característicos básicos do TF-Luna são apresentados na Tabela 3.3 a seguir:

Tabela 3.3 – Especificação dos parâmetros do TF-Luna. Fonte: (BENEWAKE, 2020).

Descrição	Valor do parâmetro
Faixa de operação	0,2 a 8 m <sup>①</sup>
Precisão	$\pm 6\%$ (0,2 m a 3 m) <sup>②</sup> $\pm 2\%$ (3 m a 8 m)
Resolução de alcance	1 cm
Campo de visão	2 ° <sup>③</sup>
Taxa de atualização	1 a 250 Hz (ajustável) <sup>③</sup>

(1) Faixa de operação medida em ambientes internos com base em uma lousa branca padrão com reflectividade de 90%

(2) Teórico, o valor real pode ser diferente.

(3) A frequência padrão é de 100 Hz e apenas fatores de 500 Hz divididos por n (onde n pode ser qualquer número inteiro entre 2 e 500) estão disponíveis.

A precisão do TF-Luna está positivamente correlacionada com a intensidade do sinal de retorno captado pelo sensor. Por outro lado, a precisão é afetada negativamente pela frequência de saída (BENEWAKE, 2020).

O TF-Luna possui uma zona morta de 20 cm ou menos. Qualquer distância inferior a 20 cm é considerada pouco confiável. A faixa de operação para alvos com alta e baixa reflectividade é diferente: A faixa de operação do TF-Luna para detecção de um alvo com 10% de reflectividade é de 0,2 a 2,5 metros; A faixa de operação do TF-Luna para detecção de um alvo com 90% de reflectividade é de 0,2 a 8 metros (BENEWAKE, 2020).

A confiabilidade dos dados dependem da cobertura total do ponto de luz pela superfície de reflexão. Portanto, o diâmetro mínimo do objeto deve ser igual ao diâmetro do ponto de luz, o qual é determinado pelo campo de visão (FOV) do TF-Luna. A fórmula para calcular o diâmetro mínimo da superfície do objeto é a seguinte(BENEWAKE, 2020):

$$d = 2 \cdot D \cdot \tan(\beta). \quad (3.3)$$

Na fórmula,  $d$  representa o diâmetro mínimo,  $D$  é a distância do objeto e  $\beta$  é a metade do campo de visão (FOV) do TF-Luna.

Quando um ponto de luz atinge dois objetos com distâncias diferentes, conforme ilustrado na Figura 3.5, o valor de saída da distância será qualquer valor entre as distâncias reais dos objetos. Isso pode causar erros em aplicações que requerem alta precisão (BENEWAKE, 2020).

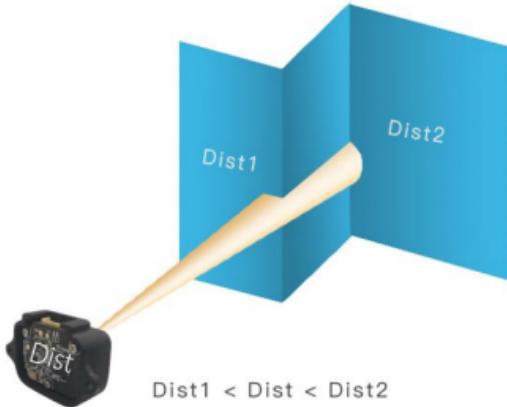


Figura 3.5 – Detecção de dois objetos em diferentes localizações. Fonte: (BENEWAKE, 2020).

Diante da limitação exposta, o que afetará sua precisão e adequação para a aplicação desejada, é importante considerar o contexto em que a decisão da escolha do sensor foi tomada. No presente estudo, o custo desempenhou um papel fundamental na seleção do sensor. Sensores com melhor desempenho e capacidades mais avançadas são facilmente encontrados no mercado, no entanto, seus custos elevados excediam os recursos disponíveis para o projeto. Portanto, apesar da limitação mencionada, o uso do sensor TF-Luna foi considerado a melhor opção dentro das restrições financeiras do projeto.

No presente trabalho, almeja-se alcançar uma boa fidelidade na representação dos detalhes mais relevantes do ambiente onde o protótipo for utilizado. Assim, em aplicações

que demandam a captura de detalhes minuciosos, é recomendável considerar a possibilidade de substituição do sensor. Dessa forma, será possível assegurar uma representação mais precisa e adequada dos elementos de interesse na referida aplicação.

O TF-Luna opera nativamente com comunicação UART ou I<sup>2</sup>C. No entanto, considerando que outro sensor utilizado no protótipo também utiliza a comunicação I<sup>2</sup>C optou-se pelo uso da comunicação I<sup>2</sup>C.

#### 3.2.8 Unity

O Unity é uma plataforma de desenvolvimento de jogos e criação de aplicativos interativos em 2D e 3D. Ele utiliza a linguagem de programação C# para criar a lógica do jogo ou do aplicativo. Os desenvolvedores podem escrever scripts para controlar o comportamento dos objetos, implementar a física do jogo, gerenciar o áudio e a colisão, entre outros aspectos.

Uma das principais razões para escolher o Unity como software para visualização dos dados coletados pelo protótipo desenvolvido é o suporte ao scripting com uso da plataforma “.NET Framework”. A “.NET Framework” possui uma rica variedade de bibliotecas dentre elas tem-se a M2Mqtt.

A M2Mqtt fornece uma interface fácil de usar para conectar dispositivos e sistemas ao broker MQTT e enviar/receber mensagens. A M2Mqtt é uma opção popular para implementar a comunicação MQTT em projetos de IoT e M2M , devido à sua simplicidade de uso, recursos abrangentes e a comunidade ativa de desenvolvedores que a suporta.

Portanto, é evidente a facilidade de integrar o protocolo MQTT ao projeto do Unity. No entanto, é importante ressaltar que os sensores LiDAR coletam milhares de pontos para realizar a representação 3D. No Unity 3D, cada ponto é tratado como um objeto individual, o que pode demandar um processamento intensivo, uso significativo da GPU e da memória RAM. Isso significa que computadores de baixo desempenho podem ter dificuldades em lidar com a carga de trabalho exigida para renderizar as aquisições do sensor.

Levando em consideração essa demanda por recursos computacionais mais robustos, é apropriado analisar a utilização de outros softwares para gerar a representação 3D, caso a disponibilidade de hardware adequado seja uma limitação.

#### 3.2.9 ESP32-Devkitc V4

O ESP32 é um microcontrolador amplamente utilizado na área de desenvolvimento de sistemas embarcados e (IoT), devido à sua versatilidade e capacidade de integração com diversos periféricos.

A escolha do ESP32 como controlador para o protótipo foi fundamentada nos recursos disponíveis nesse controlador que foram selecionados para serem utilizados no projeto.

Em primeiro lugar, a capacidade de gerar sinais de PWM do ESP32 será útil para controlar os servomotores escolhidos. Além disso, a interface I<sup>2</sup>C presente no ESP32 permitirá a leitura dos sensores utilizados. Outro recurso importante presente no ESP32 é o protocolo MQTT, juntamente com a conectividade Wi-Fi. Isso viabilizará a transmissão dos dados coletados para o software responsável por gerar a representação tridimensional em tempo real.

#### 3.2.10 Eclipse Mosquitto

A escolha do Eclipse Mosquitto como broker MQTT para este trabalho se baseia em critérios fundamentais que visam garantir um ambiente de comunicação eficiente, confiável e acessível. Dentre as diversas opções disponíveis, o Mosquitto se destaca por sua combinação de ser gratuito, completo e eficiente.

Desenvolvido pela Fundação Eclipse, o Eclipse Mosquitto é uma solução de código aberto que oferece todas as funcionalidades necessárias para a implementação de redes M2M e IoT baseadas no protocolo MQTT. Sua gratuidade e licença de código aberto proporcionam vantagens significativas para projetos com recursos limitados, eliminando barreiras financeiras e promovendo uma maior disseminação de uso.

O Eclipse Mosquitto é uma solução completa, suportando recursos essenciais do MQTT, como QoS, retenção de mensagens, autenticação e tópicos com curinga. Essas funcionalidades garantem uma comunicação confiável e flexível entre os dispositivos conectados, permitindo o envio e recebimento de informações de forma segura e eficiente.

Além disso, o Mosquitto vai além do básico, fornecendo recursos avançados que possibilitam um controle mais granular sobre a segurança e permissões de acesso. Através do suporte a ACL (Access Control List), é possível gerenciar de maneira precisa as permissões para diferentes usuários ou grupos, garantindo a integridade e privacidade dos dados.

A eficiência do Eclipse Mosquitto é outra característica primordial. Sua implementação otimizada e leve permite que ele seja executado até mesmo em dispositivos com recursos limitados, como microcontroladores e sistemas embarcados. Além disso, o Mosquitto é altamente escalável, sendo capaz de lidar com um grande número de clientes simultâneos, o que é essencial em projetos IoT que envolvem múltiplos dispositivos interconectados.

Portanto, a escolha do Eclipse Mosquitto como broker MQTT para este trabalho é respaldada pela sua gratuidade, abrangência funcional e eficiência comprovada. Sua disponibilidade como uma solução completa proporciona uma base sólida para a implementação bem-sucedida de sistemas de comunicação M2M e IoT, alinhando-se perfeitamente com os objetivos deste trabalho.

### 3.3 Adaptação do Servo

Como discutido anteriormente, o servo motor SG92R trabalha com um ângulo giro de 180°. No entanto, para que o protótipo fosse capaz de capturar todo o espaço ao seu redor, um dos dois servos precisou ser adaptado para poder girar continuamente em 360°.

Diferentemente de outros tipos de sensores que possuem um campo de visão fixo, os sensores lidar estacionários utilizam coordenadas esféricas para mapear o ambiente tridimensional. Para garantir uma cobertura completa do ambiente, é necessário que o sensor se mova em um ângulo de 180 graus em um eixo e 360 graus no outro. Isso permite uma varredura completa, abrangendo todas as direções e ângulos possíveis. Para realizar a adaptação e obter a medição da posição angular do servo adaptado, foram seguidos os seguintes passos:

1. Retirada do potenciômetro de feedback e a inserção de resistores equivalentes

Para permitir que o servo motor realize um giro contínuo de 360°, o potenciômetro de feedback originalmente conectado ao eixo de saída foi removido e substituído por dois resistores equivalentes de 2 kΩ em seus terminais, como mostrado na Figura 3.6. Isso faz com que o controlador do servo motor interprete sempre uma posição de 90°. Agora, a onda PWM aplicada ao servo motor é utilizada para controlar a velocidade e direção de giro.

Inicialmente, pretendia-se utilizar os terminais desconectados do potenciômetro para obter a posição do servo motor. No entanto, o ângulo elétrico disponível no potenciômetro era de apenas  $330^\circ$ , o que não abrangia os  $360^\circ$  necessários. Assim, foi necessária a busca por uma solução alternativa para medir a posição angular do servo motor.

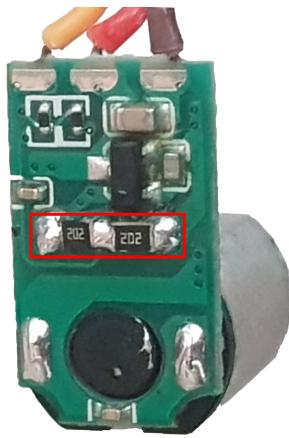


Figura 3.6 – Resistores colocados nos terminais onde anteriormente estava o potenciômetro de feedback.

#### 2. Placa e circuito para o sensor AS5600

Para resolver esse problema, foi utilizado o sensor de rotação sem contato AS5600. Um circuito foi projetado, como mostrado na Figura 3.7, para alimentar o sensor com uma tensão de 3,3 V.

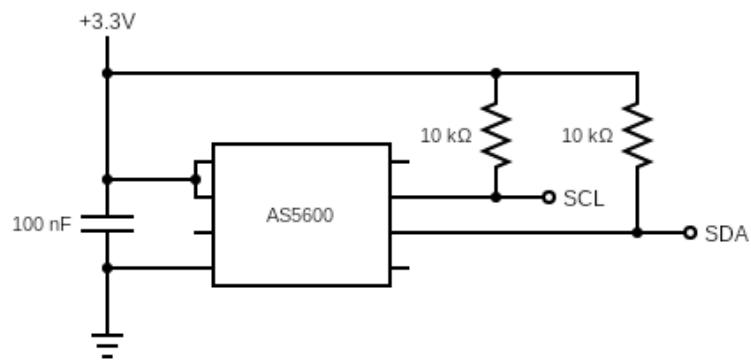


Figura 3.7 – Circuito elaborado para o sensor AS5600.

A placa de circuito ilustrada na Figura 3.8 foi projetada para ser facilmente incorporada à estrutura existente do servo motor. Essa integração será apresentada no próximo item.

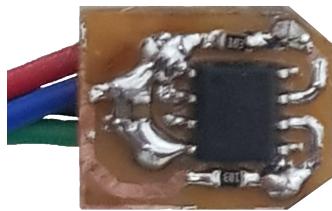


Figura 3.8 – Placa elaborada para o sensor AS5600.

### 3. Acoplamento do ímã e da placa ao servo motor

A fim de utilizar o sensor AS5600, é necessário efetuar a colocação de um ímã de neodímio no eixo do motor e posicionar o sensor imediatamente abaixo do ímã, mantendo uma distância de 0,5 a 3 mm. Para realizar essa configuração, foi necessário remover todas as estruturas metálicas presentes no potenciômetro. Em seguida, o ímã foi fixado sobre a parte móvel da estrutura física do potenciômetro, a qual se ajusta perfeitamente ao eixo de saída. A Figura 3.9 representa o resultado final das modificações realizadas no servo motor.

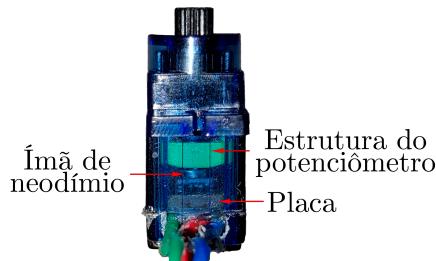


Figura 3.9 – Servomotor adaptado.

## 3.4 Configuração do Eclipse Mosquitto

O Eclipse Mosquitto foi configurado para trabalhar em rede local. Para isso os seguintes passos foram seguidos, considerando a utilização do Windows como sistema operacional onde o broker foi executado:

### 1. Regras de entrada adicionadas no Firewall do Windows

Para que o Eclipse Mosquitto pudesse realizar solicitações de eco para verificar a conectividade entre dispositivos na rede local, a regra “File and Printer Sharing (Echo Request - ICMPv4-In)” foi habilitada. Além disso, para o correto funcionamento do Mosquitto, a porta TCP 1883 foi habilitada. Essa porta é a padrão para

### 3.5. AVALIAÇÃO DO CONTROLE E PRECISÃO DO SERVO.

o protocolo MQTT utilizado pelo Eclipse Mosquitto, permitindo que os dispositivos da rede local se conectem e troquem mensagens utilizando esse protocolo.

#### 2. Modificações no arquivo .conf

A linha comentada “#listner” foi alterada para “listner 1883”, definindo assim a porta de escuta como 1883. A linha comentada “#allow\_anonymous false” foi alterada para “allow\_anonymous true”, permitindo que o broker não exija autenticação/cadastro do usuário. No entanto, é importante observar que essa configuração permite apenas o funcionamento do broker em rede local.

## **3.5 Avaliação do Controle e Precisão do Servo.**

Para realizar experimentos a fim de avaliar o controle e a precisão do servo motor, foi desenvolvida uma estrutura, ilustrada na Figura 3.11, na qual um sensor AS5600 foi fixado internamente de forma que o eixo do servo, contendo um ímã de neodímio, estivesse alinhado com o AS5600, respeitando as distâncias recomendadas pelo fabricante. Dessa maneira, a medição da posição angular de referência é obtida através do sensor AS5600.



Figura 3.10 – Vista interna da estrutura.



Figura 3.11 – Estrutura equipada com o servo e o sensor acoplados.

É fundamental ressaltar que, em todos os experimentos realizados, a frequência da onda de PWM foi definida como 50 Hz, e a resolução utilizada foi de 16 bits.

#### 3.5.1 Averiguando os Limites de Alcance Operacional.

Inicialmente, constatou-se que o intervalo do PWM de 1 ms a 2 ms não estava em conformidade com o ângulo de rotação de 180° especificado pelo fabricante. Diante disso, procedeu-se à utilização de um transferidor perfurado no centro, juntamente com um cursor fixado no eixo do servo, que foi posicionado no centro do transferidor. Foi constatado que o intervalo do PWM que correspondia ao giro de 180° era de aproximadamente 0,5 ms a 2,6 ms.

Em vista disso, foram coletadas 600 amostras da posição angular do servo, variando o período do PWM alternadamente entre os valores correspondentes aos limites determinados, com um intervalo de 1 segundo entre cada movimento. Com isso, foram coletadas 300 amostras referentes ao ângulo 0° e outras 300 amostras referentes ao ângulo de 180°.

Com as 300 amostras de cada posição angular, foi estabelecida como referência a menor amostra coletada para o duty cycle correspondente ao ângulo esperado de 0°. Em seguida, subtraiu-se esse valor de todas as 600 amostras. Após realizar essa operação, os resultados foram plotados na Figura 3.12 e nos histogramas apresentados nas Figuras 3.13 e 3.14. Além disso, os dados estatísticos foram tabulados nas Tabelas 3.4 e 3.5.

### 3.5. AVALIAÇÃO DO CONTROLE E PRECISÃO DO SERVO.

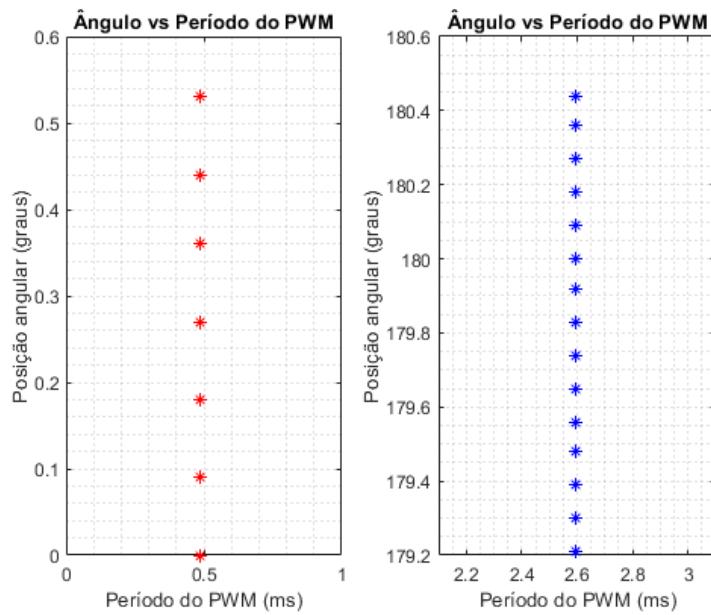


Figura 3.12 – Gráficos das medições do sensor em função dos sinais de controle.

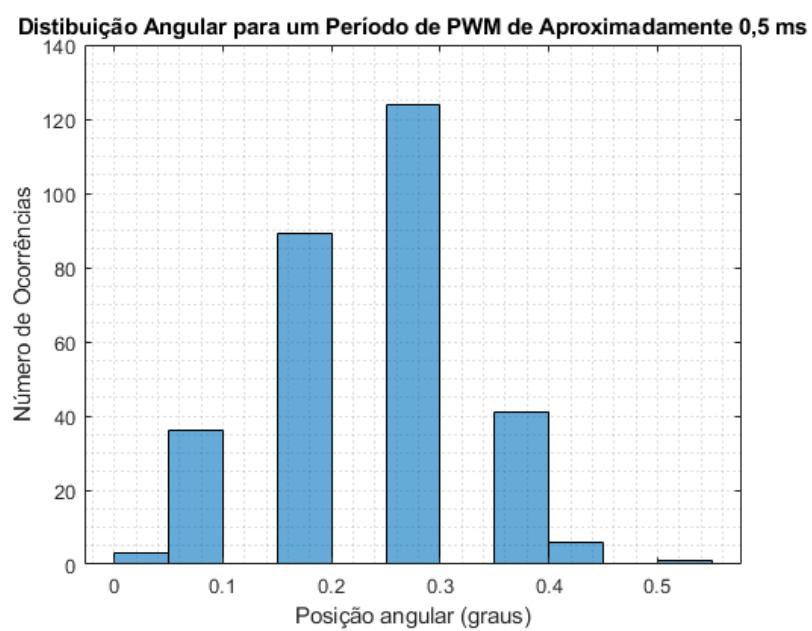


Figura 3.13 – Histograma da Distribuição Angular para um Período de PWM de Aproximadamente 0,5 ms.

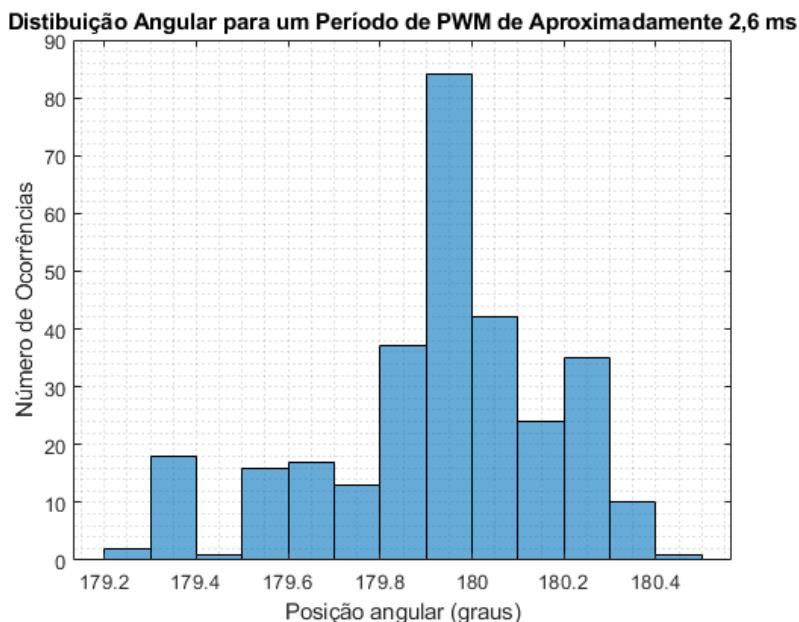


Figura 3.14 – Histograma da Distribuição Angular para um Período de PWM de Aproximadamente 2,6 ms.

Tabela 3.4 – Resumo estatístico dos dados do primeiro experimento para um Período de PWM de Aproximadamente 0,5 ms.

<b>Média</b>	0,2356
<b>Variância</b>	0,0077
<b>Desvio padrão</b>	0,0880

Tabela 3.5 – Resumo estatístico dos dados do primeiro experimento para um Período de PWM de Aproximadamente 2,6 ms.

<b>Média</b>	179,9387
<b>Variância</b>	0,0690
<b>Desvio padrão</b>	0,2627

### 3.5.2 Investigando o Passo Mínimo do Servo

Com o objetivo de determinar o menor incremento de duty cycle necessário para que servo motor desloque-se a partir de uma posição anterior, foram realizados incrementos unitários no duty cycle com uma resolução de 16 bits dentro do intervalo que possibilita o giro de aproximadamente 180° mencionado previamente. O experimento iniciou-se com um valor de 1600 (aproximadamente 0,5 ms) e finalizou em 8500 (aproximadamente 2,6 ms).

### 3.5. AVALIAÇÃO DO CONTROLE E PRECISÃO DO SERVO.

O resultado do experimento pode ser visualizado na Figura 3.15. Para facilitar a visualização das características do gráfico, um zoom foi aplicado em um trecho específico do duty cycle, conforme ilustrado na Figura 3.16.

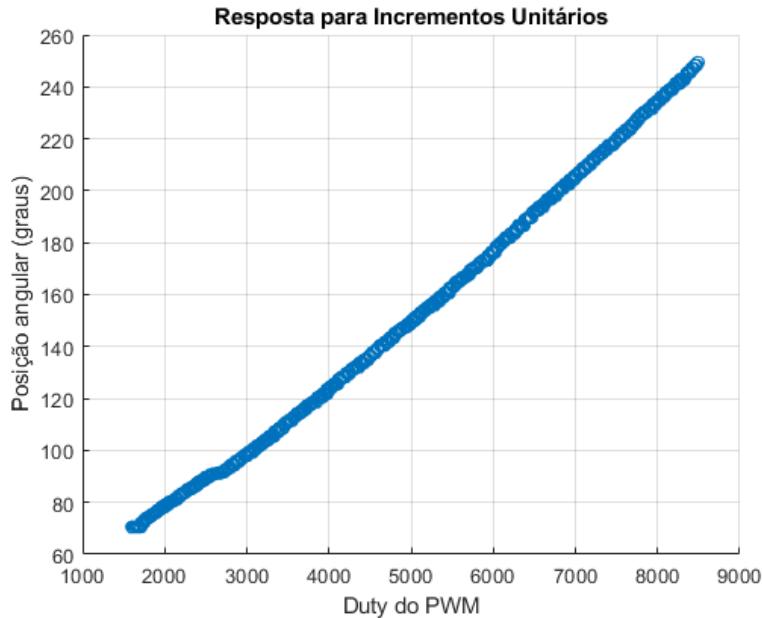


Figura 3.15 – Resposta completa para incrementos unitários.

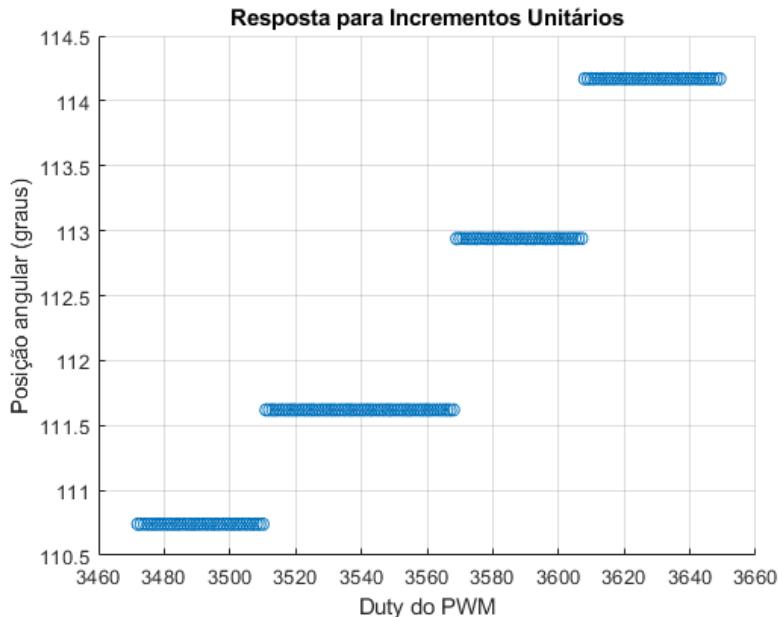


Figura 3.16 – Resposta para incrementos unitários com zoom aplicado em um trecho específico do duty cycle.

Ao analisar os gráficos obtidos, observa-se que a quantidade mínima de mudança no duty cycle necessária para gerar um deslocamento no servo é variável, assim como a

### 3.5. AVALIAÇÃO DO CONTROLE E PRECISÃO DO SERVO.

posição angular que é saltada entre cada movimentação. Contudo, foi constatado que, para que o servo move seu eixo, nenhuma diferença de duty cycle excedeu 113 unidades (pior caso observado). É importante ressaltar que o experimento foi realizado sem carga no eixo do servomotor. No entanto, devido à estrutura do protótipo ser extremamente leve, é seguro assumir que uma diferença de duty cycle mínima de 200 unidades garante que o motor seja acionado.

Quanto ao passo angular não uniforme a maior diferença de salto encontrada foi de  $2,2^\circ$ . Em uma visão geral, o servomotor escolhido apresenta uma precisão e controle satisfatórios para aplicações que não exigem extrema precisão. No contexto do protótipo em desenvolvimento, aplicando a fórmula do comprimento de um arco, um desvio de  $2,2^\circ$  corresponde a cerca de 30,7 cm de imprecisão na representação de um ponto coletado. Essa estimativa é baseada em uma distância radial de 8 m, que é o alcance máximo do sensor de distância selecionado.

Até o momento, foram identificadas três limitações que impõem restrições ao projeto. A primeira é a histerese aplicada pelo sensor de posição angular AS5600. A segunda é a imprecisão do sensor de distância escolhido para a detecção de dois objetos em diferentes localizações, conforme discutido em uma seção anterior, o que afeta a precisão da distância radial coletada. A terceira limitação relaciona-se à imprecisão no controle do servomotor, afetando uma das duas posições angulares coletadas. Nesse sentido, é recomendável considerar a substituição do servomotor por uma opção mais precisa e confiável.

#### 3.5.3 Modelando o Comportamento do Servo por Regressão Quadrática para o Alcance Definido

Como discutido anteriormente, ao apresentar o servo escolhido, espera-se uma relação linear entre o PWM aplicado e a posição angular do servomotor. No entanto, é importante considerar que a linearidade do potenciômetro de feedback, bem como as características e precisão dos demais componentes de controle do servomotor, podem variar na prática. Portanto, o comportamento do servo foi avaliado para diferentes entradas, com o objetivo de obter uma estimativa adequada para os parâmetros de período do PWM e o ângulo esperado.

Utilizando a estrutura ilustrada na Figura 3.11, foram coletadas 5000 amostras para entradas aleatórias dentro do intervalo de PWM previamente identificado, o qual permite

### 3.5. AVALIAÇÃO DO CONTROLE E PRECISÃO DO SERVO.

um giro de  $180^\circ$ . A fim de evitar a situação em que o motor não se moveu após a aplicação de uma nova entrada, foi assegurado que entre cada aplicação de entrada, a diferença entre elas respeitasse o valor mínimo determinado, garantindo assim que o motor se moveu. Com os dados obtidos, foi realizada uma regressão linear. O resultado do experimento está apresentado na Figura 3.17 , o coeficiente de determinação obtido foi de 0,9974.

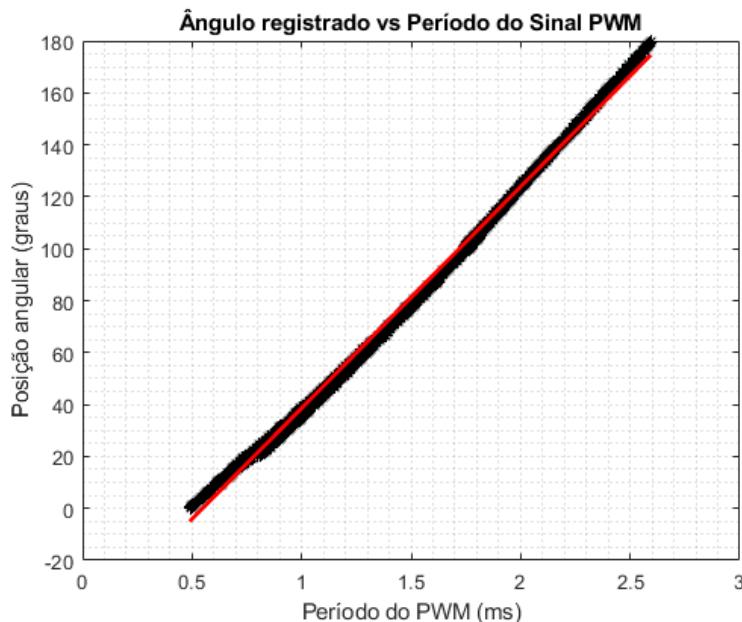


Figura 3.17 – Em preto, estão representadas as entradas aleatórias aplicadas e as posições registradas pelo AS5600. Em vermelho, é exibida a reta obtida por regressão linear.

Constatou-se que a reta de regressão linear se ajusta bem para a maioria dos pontos obtidos. No entanto, uma análise adicional foi realizada utilizando uma regressão quadrática, como demonstrado na Figura 3.18.

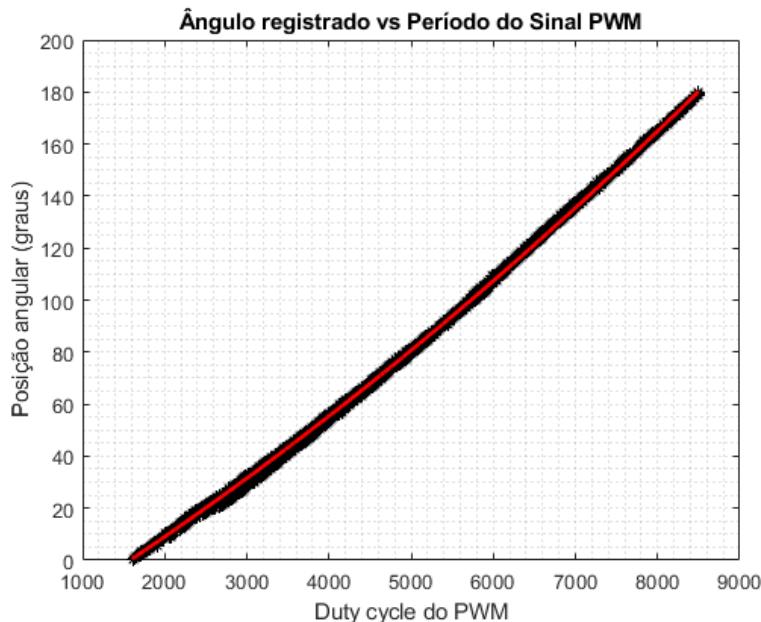


Figura 3.18 – Em preto, estão representadas as entradas aleatórias aplicadas e as posições registradas pelo AS5600. Em vermelho, é exibida a curva obtida por regressão quadrática.

O modelo obtido apresenta um coeficiente de determinação de 0,9996, indicando um ajuste altamente satisfatório. A curva quadrática se ajustou de forma precisa e consistente aos dados obtidos, refletindo uma forte relação entre as variáveis e a capacidade do modelo em descrever os padrões observados. A equação que descreve a curva obtida é dada por:

$$7,0106 \times 10^{-7}x^2 + 0,0190x - 31,7292. \quad (3.4)$$

A análise descritiva dos dados pode ser visualizada nos histogramas normalizados para a distribuição de probabilidade, apresentados nas Figuras 3.19 e 3.20, assim como nas Tabelas 3.6 e 3.7 a seguir.

### 3.5. AVALIAÇÃO DO CONTROLE E PRECISÃO DO SERVO.

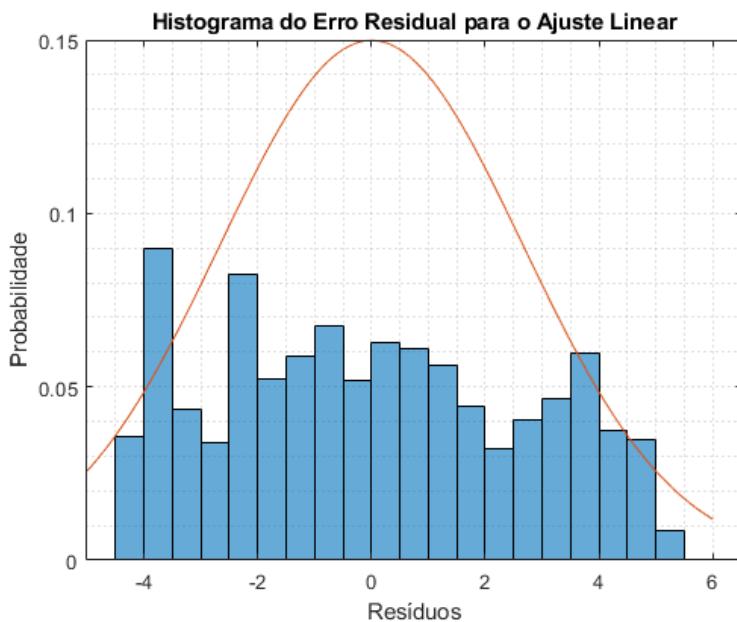


Figura 3.19 – Histograma da Distribuição de Probabilidade do Erro para o Ajuste Linear.

Tabela 3.6 – Resumo Estatístico Para o Ajuste Linear

<b>Média</b>	$-5,9202 \times 10^{-15}$ graus
<b>Desvio padrão</b>	2,6619 graus
<b>Intervalo de confiança de 95%</b>	$\pm 5,3237$ graus

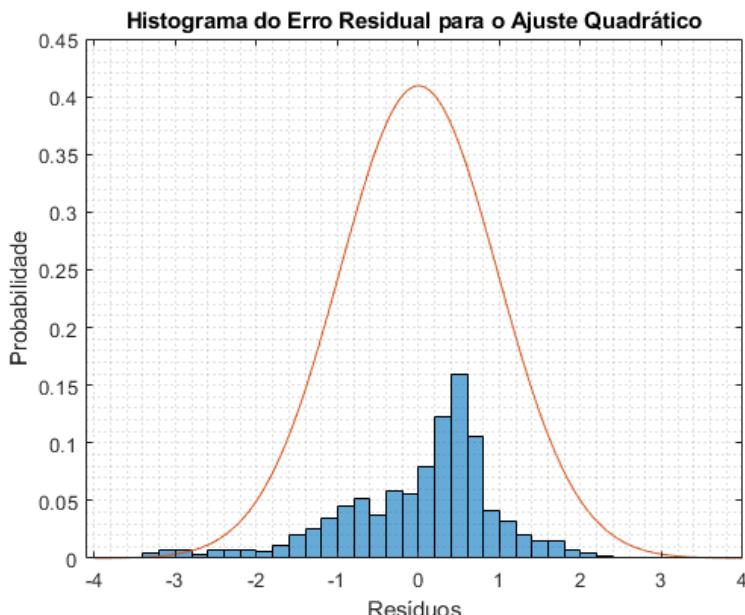


Figura 3.20 – Histograma da Distribuição de Probabilidade do Erro para o Ajuste Quadrático.

Tabela 3.7 – Resumo Estatístico Para o Ajuste Quadrático

<b>Média</b>	$-7,7989 \times 10^{-15}$ graus
<b>Desvio Parão</b>	0,9746 graus
<b>Intervalo de confiança de 95%</b>	± 1,9492 graus

## 3.6 Configuração do Unity

### 1. Nível de compatibilidade da API

Inicialmente, configurou-se o projeto do Unity para compatibilidade com a .NET Framework, com o intuito de realizar a conexão MQTT utilizando a biblioteca M2Mqtt, como discutido anteriormente. Para isso, foi necessário acessar a opção Edit > Project Settings > Player > API Compatibility Level > .NET Framework.

### 2. Gerenciador de pacotes NuGet

Para facilitar a adição da biblioteca M2Mqtt, foi utilizado o gerenciador de pacotes NuGet no Unity e, por meio dele, a biblioteca foi adicionada.

### 3. Inserção de um script de controle desenvolvido

Foi criado um objeto 3D visualmente semelhante ao TF-Luna no Unity, conforme mostrado na Figura 3.21. Neste objeto, foi inserido um script que será apresentado em uma seção posterior.

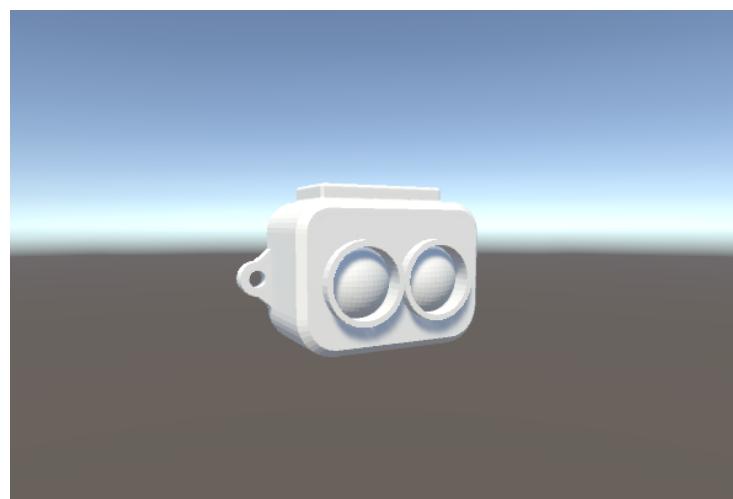


Figura 3.21 – Objeto visualmente semelhante ao TF-Luna criado no Unity.

### 3.7 Diagrama de Conexões

O diagrama apresentado na Figura 3.22 representa os elementos utilizados, juntamente com as conexões elétricas, mecânicas e de comunicação entre eles. No diagrama, os componentes do circuito de alimentação são destacados em laranja, o microcontrolador em azul, o broker em vermelho, o software para as representações em 3D em roxo, os servomotores em rosa e os sensores em verde.

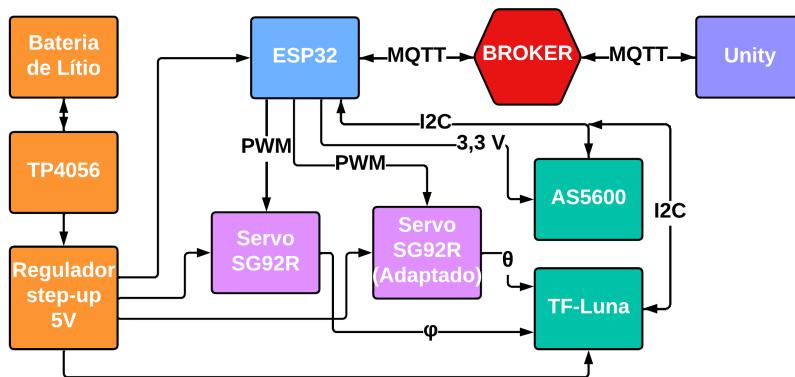


Figura 3.22 – Diagrama de elementos e conexões.

O circuito de alimentação fornece energia para o ESP32, os servomotores e o sensor TF-Luna. O ESP32 é responsável por controlar os servos usando sinais PWM, alimentar o AS5600 com 3,3 V, estabelecer comunicação via I2C com o AS5600 e o TF-Luna, e trocar mensagens com o Unity por meio do broker usando o protocolo MQTT. Os servomotores estão conectados mecanicamente ao TF-Luna e realizam os movimentos angulares  $\varphi$  e  $\theta$ .

### 3.8 Rotina Implementada no ESP32 e no Unity

As rotinas implementadas para o funcionamento do protótipo podem ser visualizadas na Figura 3.23 abaixo. Através dessa representação gráfica, é possível observar as etapas e processos envolvidos no sistema, destacando as principais funcionalidades e interações.

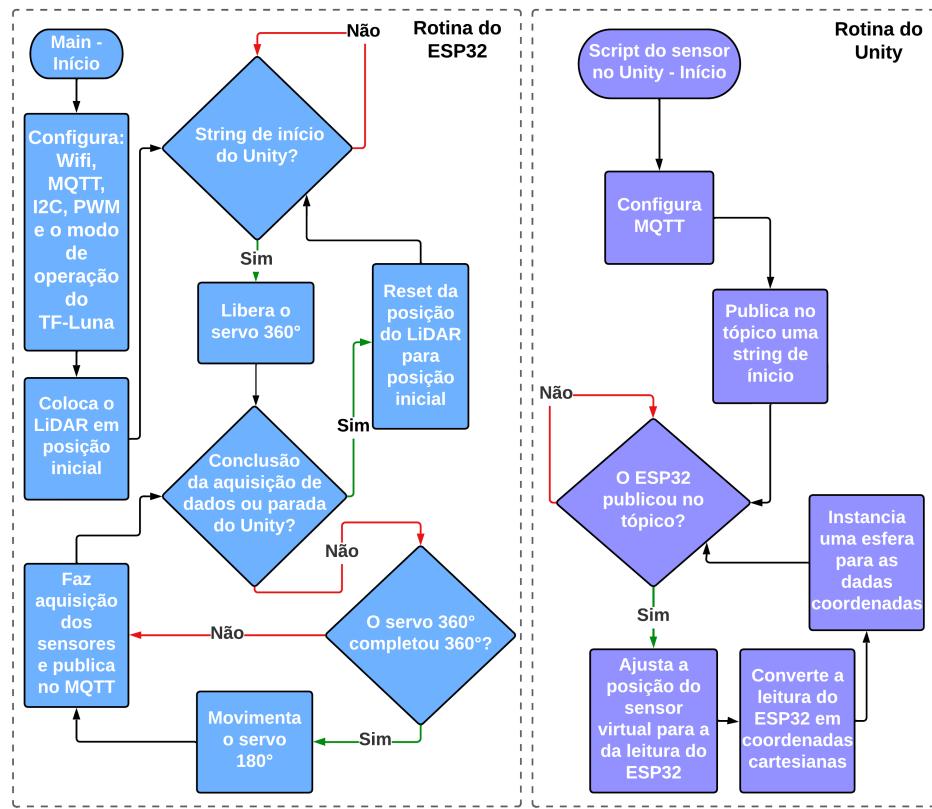


Figura 3.23 – Fluxograma de funcionamento.

## 3.9 Estrutura Física do Protótipo

A estrutura física do protótipo, ilustrada na Figura 3.24, foi concebida de modo a evitar o emaranhamento dos cabos, possibilitando uma rotação de 360 graus com relação à base do protótipo e de 180 graus no eixo do sensor. O material utilizado foi o PLA (ácido poliláctico), um material resistente e leve. É importante destacar que o sensor foi posicionado no centro dos dois eixos giratórios, resultando em uma ponto cego em que o protótipo será capaz de visualizar apenas sua própria estrutura. Com base nisso, recomenda-se o deslocamento do eixo do servomotor superior para evitar tais pontos cegos. Para essa finalidade, devem ser efetuadas as devidas compensações nas coordenadas esféricas.

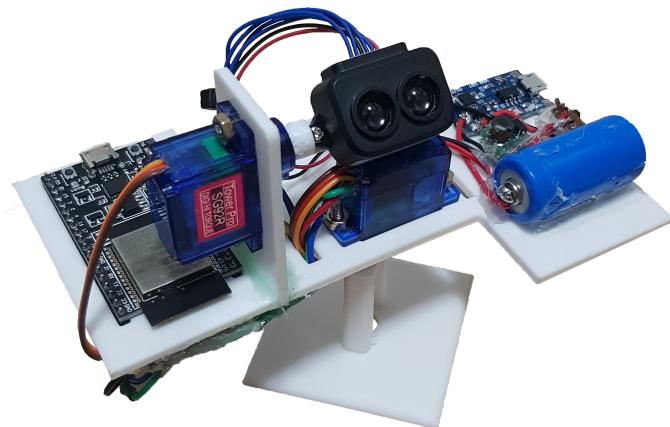


Figura 3.24 – Estrutura final do protótipo.

## 3.10 Resultados



Figura 3.25 – Fotos do primeiro ambiente de teste.

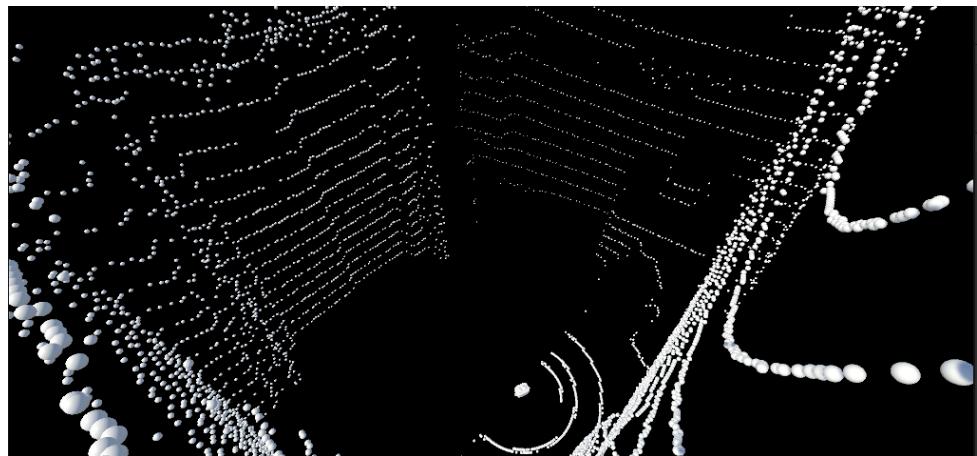


Figura 3.26 – Vista 1 do resultado obtido no primeiro ambiente de teste.

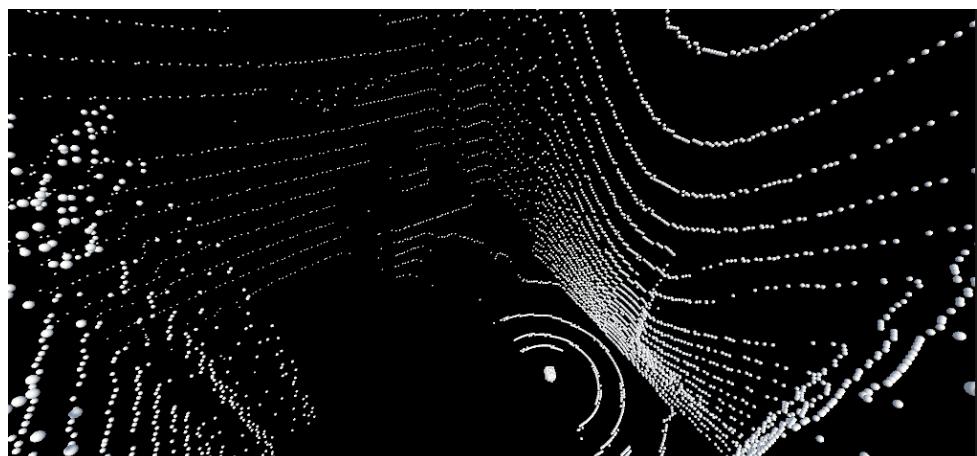


Figura 3.27 – Vista 2 do resultado obtido no primeiro ambiente de teste.

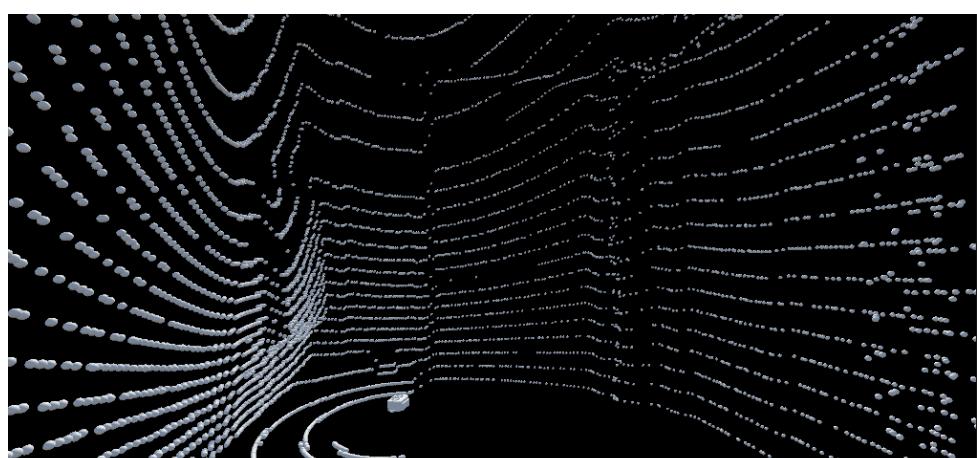


Figura 3.28 – Vista 3 do resultado obtido no primeiro ambiente de teste.

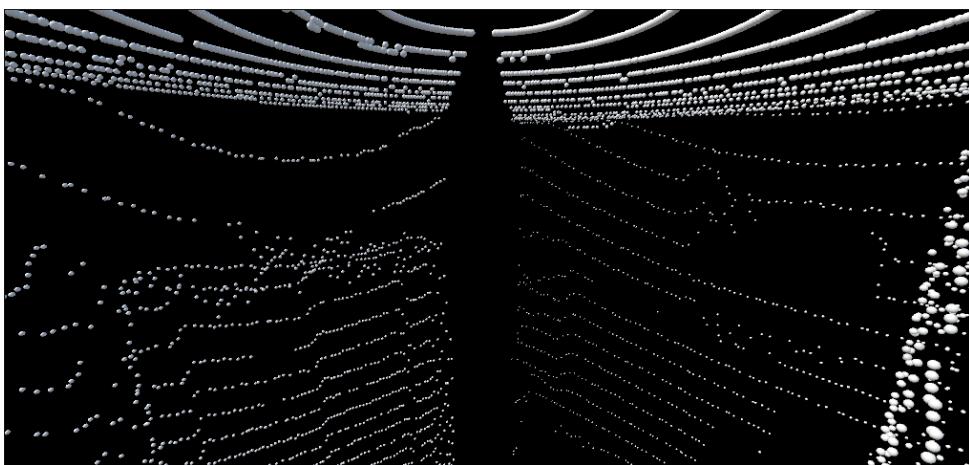


Figura 3.29 – Efeito da histerese no AS5600.

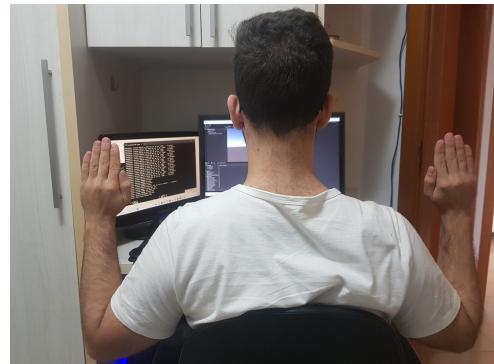


Figura 3.30 – Foto posterior do segundo ambiente de teste.

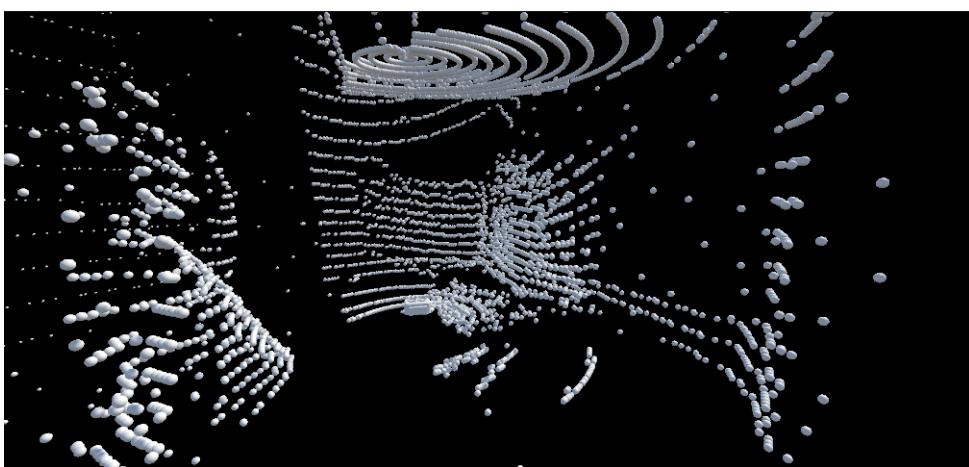


Figura 3.31 – Vista 1 do resultado obtido no segundo ambiente de teste.

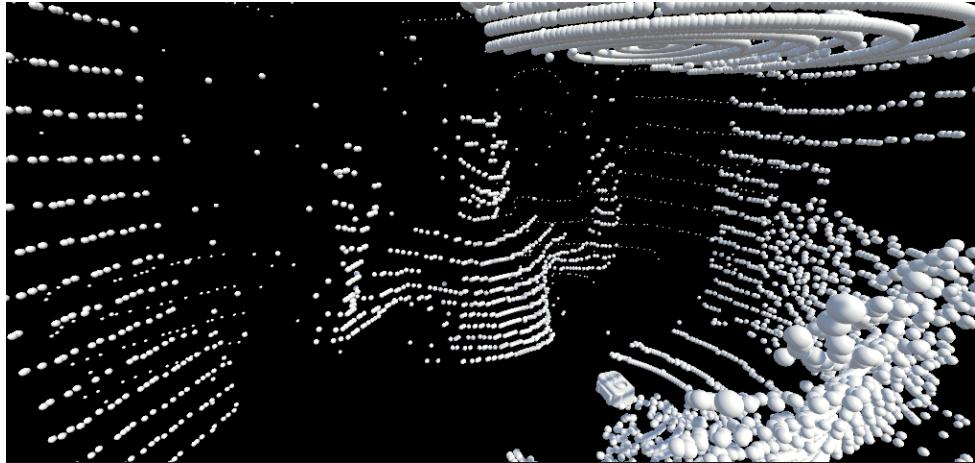


Figura 3.32 – Vista 2 do resultado obtido no segundo ambiente de teste.

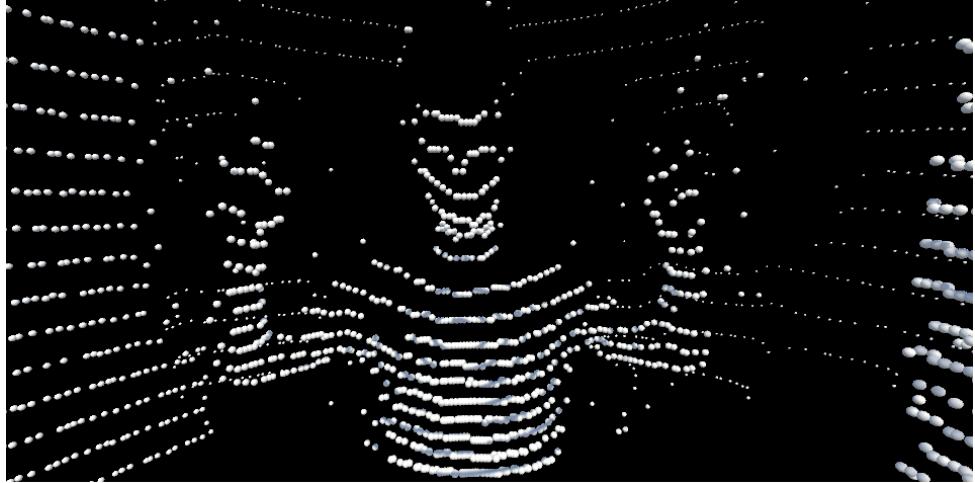


Figura 3.33 – Vista 3 do resultado obtido no segundo ambiente de teste.

A comparação visual entre as fotografias dos ambientes de teste e os resultados obtidos permite concluir que os principais contornos dos ambientes foram representados pelo protótipo desenvolvido. No entanto, é possível observar que a densidade de pontos obtida foi baixa. Isso se deve a dois motivos: em primeiro lugar, o passo mínimo alcançado pelo servomotor responsável pelo controle do ângulo  $\phi$ ; em segundo lugar, a taxa de frequência de coleta de dados, impactando a distância radial e o ângulo  $\theta$ .

Substituir o servomotor responsável pelo controle do ângulo  $\phi$  por uma alternativa capaz de dar passos menores, mantendo a velocidade do motor que controla o ângulo  $\theta$ , resultará em um aumento no tempo de aquisição. Por outro lado, aumentar a taxa de aquisição resultará em uma maior imprecisão do sensor de distância (conforme abordado na seção referente ao TF-Luna).

Em relação à histerese do AS5600, é possível verificar na Figura ?? que a descontinuidade dos pontos supera os 12,27 cm previstos. Ao revisar o datasheet e o circuito elaborado para o AS5600, constatou-se que uma possível causa é o terminal de direção “dir” (input de direção, VDD para sentido anti-horário e GND para sentido horário) estar flutuante. Uma análise mais aprofundada da documentação pode revelar exatamente a causa do problema.

Para a próxima etapa do trabalho, o terminal “dir” será conectado e a alimentação do AS5600 será alterada para 5 V sendo conectada em paralelo aos terminais do servomotor, o que economizará um terminal do ESP32 e dois cabos. O servomotor responsável pelo controle do ângulo  $\phi$  será substituído por um motor de passo, a fim de obter uma maior densidade de pontos. Vale ressaltar que outro sensor de posição será acoplado ao eixo do motor de passo, a fim de proporcionar uma maior precisão e confiabilidade na medição da posição angular. Para obter uma maior densidade de pontos a taxa de aquisição dos sensores também será aumentada. A possibilidade de determinar o passo do motor de passo, a taxa de coleta e a velocidade do servomotor da base do protótipo estará disponível no código implementado no ESP32.

Além das modificações mencionadas anteriormente, também está prevista a fusão de sensores com a adição de um sensor de distância a laser e um sensor ultrassônico. Essa fusão de sensores visa aprimorar ainda mais a precisão e a confiabilidade das medições, expandindo as capacidades do protótipo.

Por fim, em relação à estrutura física do protótipo, foi alcançado um peso total de apenas 97 gramas, atendendo ao critério proposto de que o protótipo seja capaz de ser levantado por um drone comum. No entanto, na próxima etapa do trabalho, a estrutura física do protótipo será reformulada para ser mais compacta, uma célula de lítio adicional será incluída e as placas de circuito serão modificadas, o que pode resultar ou não em um ligeiro aumento de peso.

# Capítulo 4

## Conclusão

Ao longo deste trabalho, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre a tecnologia de sensores LiDAR, explorando seus princípios físicos, componentes básicos, precisão, e outras características relevantes. Com base nessa revisão, foi desenvolvido um sistema LiDAR estacionário para o mapeamento de pequenas áreas.

Durante o processo de prototipagem, foram identificadas algumas limitações do sistema. No entanto, essas limitações foram discutidas formando uma base sólida para futuras pesquisas e melhorias no trabalho subsequente.

Em suma, este trabalho contribuiu ao propor uma abordagem para a construção de um sistema LiDAR para estudos com componentes de baixo custo, fornecendo uma solução viável para estudos nessa área. As limitações identificadas fornecem direções para aprimorar ainda mais o desempenho do protótipo desenvolvido.

No trabalho subsequente será realizado modificações para um aumento considerável da resolução do protótipo, além de explorar a utilização de técnicas de fusão de sensores para avaliar seu impacto e aplicação na tecnologia LiDAR.



# Referências

- B. GEORGE, et al. **CÁLCULO Volume 2.** 12<sup>a</sup> edição. São Paulo, SP, Brasil: Pearson, set. 2012. P. 340.
- BENEWAKE. **TF-Luna Instruction Manual.** No.28, Xinx Road, Haidian District, Beijing, PRC, mar. 2020. Disponível em: <<https://bit.ly/3WZiR0e>>.
- CARLETTI, E. Comunicación - Bus I2C Descripción y funcionamiento. [S.l.], jun. 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/3WVTmgc>>.
- DONG, P.; CHEN, Q. **LiDAR Remote Sensing and Application.** Terre Haute, Indiana, U.S.A.: CRC Press, 2018.
- J. CARTER, et al. **Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications.** Charleston, SC: NOAA Coastal Services Center, nov. 2012.
- J. MANKAR, et al. REVIEW OF I2C PROTOCOL. IJRAT, jan. 2014. vol. 2, Issue 1. Disponível em: <<https://bit.ly/43Q9WRa>>.
- M. MELIN, et al. **CONSERVATION TECHNOLOGY REMOTE SENSING: LiDAR.** Vol. 1 N.3. Woking, Surrey, United Kingdom: WWF Conservation Technology Series, 2017.
- OASIS. **MQTT Version 5.0 OASIS Standard.** [S.l.], mar. 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/3quWbsM>>.
- OSRAM GROUP, ams. **AS5600 12-Bit Programmable Contactless Potentiometer.** [S.l.], jun. 2018. Disponível em: <<https://bit.ly/3MUmWyc>>.
- QUINCOZES, S.; TUBINO, E.; KAZIENKO, J. MQTT Protocol: Fundamentals, Tools and Future Directions. IEEE Lat. Am. Trans., Niterói, Rio de Janeiro, Brazil, set. 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/43kPXKd>>.

S. EVANS, et al. Discrete Return Lidar in Natural Resources: Recommendations for Project Planning, Data Processing, and Deliverables. MDPI, p. 776–794, out. 2009. Disponível em: <<https://bit.ly/3DeC98E>>.

SEMICONDUCTORS, NXP. **I<sup>2</sup>C-bus specification and user manual**. [S.l.], out. 2021. Rev. 7.0. Disponível em: <<https://bit.ly/43v6NGm>>.

YOUNKIN, G. **INDUSTRIAL SERVO CONTROL SYSTEMS: Fundamentals and Application**. Second Edition, Revised and Explained. Fond du Lac, Wisconsin, U.S.A.: Marcel Dekker, Inc., 2003. P. 9–10. Disponível em: <<https://bit.ly/3JobUQL>>.