

# Construção e Caracterização de Sensores LiDAR no Mapeamento 3D de Ambientes

Lucas Augusto Nacif Moura, CEFET-MG

**Resumo**—Este estudo descreve o desenvolvimento e a implementação de um protótipo de scanner LiDAR terrestre estacionário, que foi utilizado para avaliar o impacto do aliasing espacial em função da resolução espacial e da distância de medição. Experimentos realizados a distâncias de 1 m, 2 m e 4 m revelaram uma tendência de incremento do aliasing com o aumento da distância, evidenciando a correlação entre a distância de medição e diminuição da resolução espacial. Esta constatação ressalta a importância de uma escolha criteriosa da taxa de amostragem para assegurar a integridade do sinal amostrado. Complementando os achados experimentais, coletas realizadas com o protótipo realçam sua capacidade de criar nuvens de pontos detalhadas, enfatizando sua eficácia na captura dos detalhes mais relevantes dos ambientes mapeados. Diante dos resultados obtidos, este trabalho oferece uma compreensão dos desafios associados ao aliasing espacial, especialmente no contexto de scanners LiDAR terrestres estacionários. Paralelamente, o protótipo desenvolvido se destaca por sua eficácia, demonstrando um equilíbrio otimizado entre custo, desempenho, funcionalidade, leveza e capacidade de transmissão de dados em tempo real.

**Index Terms**—Scanner LiDAR, Stationary Terrestrial, Aliasing, Resolution.

## I. INTRODUÇÃO

A tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging) é uma maneira de capturar e interpretar dados espaciais, gerando representações tridimensionais realistas através de nuvens de pontos. Utilizada em diversas áreas como engenharia civil, arqueologia, monitoramento ambiental, mineração e agricultura, a tecnologia LiDAR proporciona um mapeamento detalhado e versátil do ambiente.

Embora a necessidade de exigência de precisão possa variar significativamente entre diferentes aplicações, a resolução espacial é um atributo fundamental em levantamentos usando scanners LiDAR. A resolução espacial determina quais detalhes são identificáveis em uma nuvem de pontos obtida por escaneamento LiDAR. O conhecimento correto desta resolução é necessário para prevenir o aliasing, permitindo uma avaliação de quais detalhes que podem ser capturados da nuvem de pontos.

Conforme Lichti [1], a resolução em scanners LiDAR é frequentemente mal interpretada e calculada de maneira

incorreta. É destacado que a ênfase excessiva é comumente colocada no menor intervalo de amostragem possível, ignorando fatores cruciais como a largura do feixe do laser. Tal mal-entendido atribui erroneamente uma alta resolução espacial em nuvens de pontos escaneadas, mesmo quando a largura do feixe compromete a qualidade da resolução. Para evitar tais equívocos e fornecer uma compreensão mais apropriada e abrangente da resolução em scanners a laser, Lichti [1] introduz um novo método chamado “Effective Instantaneous Field of View” (EIFOV). Esse método propõe integrar considerações da largura do feixe e do intervalo de amostragem para uma avaliação mais exata da resolução.

Sendo assim, este trabalho dedica-se a explorar e analisar a metodologia empregada no desenvolvimento de um scanner LiDAR terrestre estacionário de ponto único, sem ecos e sem uma unidade de GPS. A preocupação com a economia de recursos são características marcantes do aparato desenvolvido e examinado. Após essa fase inicial, a investigação avança para uma análise do fenômeno do aliasing espacial, uma consideração essencial para a compreensão das operacionalidades e limitações inerentes ao dispositivo.

Na sequência, uma avaliação é conduzida sobre o protótipo desenvolvido, utilizando-se o método EIFOV para estabelecer a resolução. Complementando a investigação, um teste prático é realizado com o objetivo de observar a ocorrência e a manifestação do efeito aliasing no contexto de medições LiDAR.

## II. ASPECTOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS DO SCANNER LiDAR

### A. Scanner LiDAR Aéreo e Terrestre: A Tecnologia e Princípios Básicos

O sistema LiDAR, frequentemente utilizado em aeronaves de asa fixa, compreende um scanner com emissor e receptor de laser. Ele é integrado a um Sistema de Posicionamento Global (GPS) para medir continuamente a localização do scanner, essencial na determinação da origem dos pulsos laser. Além disso, uma Unidade de Medição Inercial (IMU) é usada para monitorar as variações angulares da aeronave, como rolamento, arfagem e guinada, fornecendo dados para calcular a orientação da aeronave e, por extensão da direção dos pulsos emitidos [12].

Para compreender os princípios do LiDAR, é instrutivo observar o trajeto de um pulso de luz individual. Este pulso é formado por fótons cronometrados, disparados em uma direção predeterminada. Ao interagir com um objeto, como uma folha na floresta, uma fração dos fótons é refletida em direção à

Lucas Augusto Nacif Moura, Belo Horizonte, Minas Gerais (lanacif@hotmail.com)

Trabalho de Conclusão de Curso submetido em 04/12/2023 e orientado pelo Dr. Everthon de Souza Oliveira, e coorientado pelo Dr. Túlio Charles de Oliveira Carvalho integrantes do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

“E não vos conformeis com este mundo, mas transformai-vos pela renovação do vosso entendimento, para que experimenteis qual seja a boa, agradável e perfeita vontade de Deus.” Romanos 12:2

fonte laser. O sistema LiDAR detecta esses fótons refletidos, registrando o momento de seu retorno e calculando o intervalo de tempo desde sua emissão até a recepção. Este processo é conhecido como “eco”, originado do pulso emitido. Usando a velocidade conhecida do pulso (equivalente à velocidade da luz), o local de emissão, a direção e o tempo de viagem do pulso, o LiDAR determina o ponto de origem do eco. [12].

Os pulsos de luz podem gerar múltiplos retornos luminosos, pois alguns feixes penetram materiais parcialmente transparentes antes de refletir em outros objetos. Esses ecos são classificados em quatro categorias: “primeiro de muitos” (o primeiro eco dentre vários), “último de muitos” (o último eco), “intermediário” (ecos entre o primeiro e o último) e “único” (quando apenas um eco é detectado a partir de um pulso) [12].

A localização de cada eco é registrada, associando-se às coordenadas XYZ correspondentes. Esses dados coletados são comumente processados sob a forma de uma nuvem de pontos. Mediante a representação gráfica desses dados, torna-se viável a visualização da estrutura do objeto que passou pelo processo de digitalização [12].

Embora o scanner LiDAR aéreo seja uma ferramenta poderosa para a captação de dados em grande escala, sua contraparte terrestre oferece uma perspectiva complementar. Os fundamentos da medição de distância a laser e varredura apresentados se aplicam tanto a sistemas aéreos quanto a sistemas terrestres.

A tecnologia LiDAR terrestre, oferece um nível de detalhe e precisão distintos. Enquanto o LiDAR aéreo é ideal para mapeamentos de grande escala e análises extensas de áreas, o LiDAR terrestre se destaca em levantamentos mais detalhados em escalas menores. Frequentemente utilizado em projetos de engenharia, arquitetura e arqueologia, o LiDAR terrestre opera com scanners montados em tripés ou plataformas móveis, permitindo medições detalhadas e de alta resolução de estruturas, terrenos e objetos próximos. Esta tecnologia complementar amplia a capacidade de análise e representação do mundo físico.

Enquanto os scanners a laser aéreos necessitam apenas de uma direção de varredura, com a outra realizada pelo movimento da aeronave, os terrestres normalmente empregam um sistema de varredura 2D. Há três tipos principais: janela (usualmente operados por dois espelhos de galvanômetro, oferecendo um campo de visão retangular), panorâmicos (com visão horizontal de 360 graus e vertical tipicamente entre 80 a 90 graus, frequentemente utilizando uma roda poligonal para a varredura vertical e uma rotação horizontal completa do dispositivo. A substituição da roda poligonal por um sistema de varredura Palmer expande o campo de visão, sendo limitado somente pelas auto-oclusões do instrumento e do tripé que o suporta) e (hemi)esféricos [13].

### B. Fundamento do Funcionamento de um Scanner LiDAR Estacionário

Conforme apresentado, os sistemas de varredura a laser funcionam através da emissão de feixes de luz intensos e focalizados, realizando medições baseadas no tempo requerido

para a captura dos reflexos pelo sensor. Essas informações são empregadas na determinação das distâncias em relação aos objetos analisados. As coordenadas tridimensionais desses objetos são estabelecidas levando em consideração os seguintes parâmetros:

- 1) A discrepância temporal entre a emissão e o retorno do pulso de laser,
- 2) o ângulo específico em que o pulso de laser foi projetado, e
- 3) a posição absoluta do sensor, situado na ou elevado acima da superfície terrestre [3].

Um escaneamento 3D de uma cena pode ser realizado movimentando mecanicamente o feixe de laser do telêmetro em passos arcuais uniformes nos planos horizontal ( $\Delta\theta$ ) e vertical ( $\Delta\alpha$ ), conforme delineado por Besl [4]. Este procedimento permite a parametrização da cena escaneada em termos de distância,  $\rho$ , sendo representada como uma função uniformemente amostrada baseada na direção horizontal,  $\theta$ , e no ângulo de elevação,  $\alpha$ :

$$\rho_s(\theta, \alpha) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \rho_c(m\Delta\theta, n\Delta\alpha) \delta(\theta - m\Delta\theta, \alpha - n\Delta\alpha) \quad (1)$$

em que  $\rho_s$  representa a cena contínua  $\rho_c$  após a amostragem, e  $\delta$  simboliza a função delta de Dirac. Os intervalos de amostragem espacial variam proporcionalmente com a distância medida. Assim,  $\rho\Delta\theta$  e  $\rho\Delta\alpha$  indicam essa variação na direção horizontal e no ângulo de elevação, respectivamente.

A Figura 1 ilustra o exposto anteriormente. Na Figura, é evidenciado um plano retangular e as amostras obtidas no espaço tridimensional, com incrementos uniformes para  $\theta$  e  $\alpha$ . O telêmetro está centrado no ponto (0,0,0), que é destacado na figura.

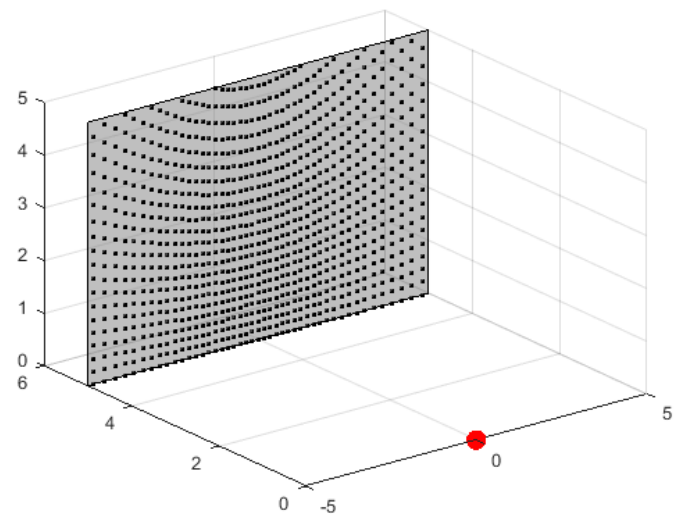


Figura 1. Visualização tridimensional da amostragem pelo LiDAR, destacando a variação do espaçamento entre as amostras com a distância.

Este fenômeno ocorre devido à dependência do espaçamento entre os pontos, em termos de distância linear, com a distância

do scanner. Proximamente ao LiDAR, uma alteração angular modesta pode resultar em um deslocamento linear relativamente pequeno. Entretanto, à medida que a distância em relação ao LiDAR aumenta, a mesma mudança angular pode levar a um deslocamento linear significativamente maior.

### III. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### A. A Transformada Discreta de Fourier

Uma função contínua  $f(x)$  pode ser discretizada através de uma série de amostras, cada uma separada por um intervalo  $\Delta x$ . A representação discreta dessa função é expressa por:

$$f(x) = f(x_0 + x\Delta x), \quad (2)$$

em que, neste contexto,  $x$  é uma variável discreta que assume valores de 0 a  $N-1$ . Aqui,  $x_0$  é o ponto inicial de amostragem e  $\Delta x$  é o espaçamento entre as amostras, ambos sendo valores constantes. Em termos simples, toma-se  $N$  amostras uniformemente espaçadas da função contínua correspondente.

Dada a notação anterior, o par de transformadas discretas de Fourier para funções amostradas são expressas por:

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) e^{-j2\pi ux/N} \quad (3)$$

e

$$f(x) = \sum_{u=0}^{N-1} F(u) e^{j2\pi ux/N}. \quad (4)$$

Na Equação 3, os valores de  $u$  correspondem a amostras de uma transformada contínua, isto é,  $F(u) = F(u\Delta u)$ .

Os termos  $\Delta u$  e  $\Delta x$  estão relacionados pela seguinte expressão:

$$\Delta u = \frac{1}{N\Delta x}. \quad (5)$$

Para um par de variáveis, o conjunto correspondente de transformadas de Fourier é expresso como:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(ux/M + vy/N)} \quad (6)$$

e

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{j2\pi(ux/M + vy/N)}. \quad (7)$$

A captura de amostras de uma função contínua é realizada sobre uma matriz bidimensional, com intervalos de amostragem  $\Delta x$  e  $\Delta y$  ao longo dos eixos  $x$  e  $y$ , respectivamente. A correspondência entre os incrementos de amostragem nos domínios espacial e de frequência é estabelecida pelas seguintes relações:

$$\Delta u = \frac{1}{M\Delta x} \quad (8)$$

e

$$\Delta v = \frac{1}{N\Delta y} \quad (9)$$

#### B. Teorema da Convolução

A operação matemática conhecida como convolução entre duas funções  $f$  e  $g$ , simbolizada por  $(f * g)(x)$ , é estabelecida através da seguinte expressão integral:

$$(f * g)(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha) \cdot g(x - \alpha) d\alpha. \quad (10)$$

No domínio da frequência, a convolução corresponde ao produto das transformadas de Fourier das funções originais, ou seja,

$$f(x) * g(x) \Leftrightarrow F(u)G(u). \quad (11)$$

Analogamente, a convolução no domínio da frequência se reduz a produtos no domínio  $x$ ; isto é,

$$f(x)g(x) \Leftrightarrow F(u) * G(u). \quad (12)$$

Similarmente, no domínio discreto, o teorema da convolução mantém a correspondência entre a convolução no domínio  $x$  e a multiplicação no domínio da frequência, ajustando-se às variáveis discretas apropriadas.

No contexto de funções discretas, em especial no caso bidimensional, a convolução entre duas funções  $f(x, y)$  e  $g(x, y)$  é definida por uma soma dupla sobre um conjunto de valores discretos. A convolução discreta 2-D pode ser formulada como:

$$f_e(x, y) * g_e(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_e(m, n) g_e(x-m, y-n). \quad (13)$$

em que  $M$  e  $N$  são períodos escolhidos de acordo com critérios que evitam o sobreposição dos períodos na convolução, denominado “erro de revestimento”. As funções estendidas  $f_e$  e  $g_e$  são versões periodicamente estendidas de  $f$  e  $g$ , respectivamente, com zeros adicionados para formar matrizes de tamanho  $M \times N$ .

#### C. Amostragem e o Teorema Homônimo

A Transformada de Fourier, em conjunto com o Teorema da Convolução, provê instrumental analítico para a exploração do processo de amostragem de imagens. Essencialmente, o foco da investigação reside na determinação da quantidade ótima de amostras requeridas para assegurar que a integridade informativa seja mantida durante a amostragem. Sob uma ótica alternativa, este desafio pode ser descrito como a definição de critérios de amostragem que permitam a reconstrução completa da imagem contínua a partir de suas amostras discretas [10].

Ao considerar uma função  $f(x)$  que é contínua, de banda limitada e definida sobre todo o conjunto dos números reais, estendendo-se de  $-\infty$  a  $\infty$ , a respectiva versão amostrada pode ser obtida através da multiplicação de  $f(x)$  por uma

função de amostragem  $s(x)$ . Esta função de amostragem é definida como um trem de impulsos com intervalos regulares de  $\Delta x$ . Segundo o teorema da convolução, tal multiplicação no domínio de  $x$  equivale a uma convolução no domínio da frequência [10].

A transformada resultante da mencionada multiplicação manifesta-se como uma função periódica, com um período expresso por  $1/\Delta x$ , e dependendo da taxa de amostragem, as repetições individuais de  $F(u)$  têm a possibilidade de sobreposição, um fenômeno conhecido como aliasing [10].

Diante dessa discussão, conforme delineado por Nyquist [11] e posteriormente formalizado por Shannon [2], a amostragem efetiva de um sinal requer uma taxa que seja pelo menos o dobro da frequência máxima presente no sinal analógico original para que a reconstrução seja teoricamente perfeita. Portanto, para evitar o efeito aliasing o intervalo de amostragem deve ser selecionado de forma que:

$$\Delta x \leq \frac{1}{2W}, \quad (14)$$

em que  $W$  é a máxima frequência do sinal.

Em situações práticas, a amostragem de uma função é comumente restringida a uma região finita, o que implica considerações adicionais mesmo quando o espaçamento entre as amostras atende ao teorema da amostragem para prevenção do aliasing. A limitação da extensão da amostragem, é operacionalizada pela multiplicação da função no domínio  $x$  com uma função janela que abrange o intervalo  $[0, X]$ . A transformada de Fourier desta função janela, devido à sua forma retangular, exibe lóbulos secundários que se estendem indefinidamente em ambas as direções do eixo da frequência. Essa característica impõe uma influência no espectro de frequência do sinal amostrado, uma vez que a convolução do espectro do sinal com a transformada de Fourier da função janela não se restringe ao lóbulo principal, mas também incorpora os lóbulos secundários. O espectro de frequência resultante, portanto, contém componentes adicionais que permeiam todo o domínio da frequência, comprometendo a capacidade de reconstrução fiel do sinal original a partir de suas amostras.

Portanto, ainda que se cumpra o teorema da amostragem, a recuperação integral de uma função confinada a um domínio finito  $x$  é intrinsecamente limitada. Esta observação fundamenta a conclusão de que nenhuma função  $f(x)$  de duração finita pode ser estritamente limitada em banda. Em contraste, uma função que apresenta limitação de banda deve, por necessidade teórica, estender-se de  $-\infty$  a  $\infty$  no domínio  $x$ . Esta conclusão é relevante, pois estabelece um limite fundamental na manipulação de funções digitais [10].

Os conceitos de amostragem, após ajustes na notação, são diretamente aplicáveis a funções bidimensionais. O processo de amostragem para tais funções pode ser descrito matematicamente pelo emprego da função impulso 2-D,  $\delta(x, y)$ , definida como segue [10]:

$$\iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x - x_0, y - y_0) dx dy = f(x_0, y_0). \quad (15)$$

Na Figura 2, que representa uma função bidimensional de banda limitada amostrada no domínio da frequência, identifica-se que as medidas de largura  $2W_u$  e  $2W_v$  correspondem, respectivamente, às direções  $u$  e  $v$  do retângulo mínimo que engloba por completo a região  $R$ . Então, se  $1/\Delta x > 2W_u$  e  $1/\Delta y > 2W_v$ , evita-se o aliasing, o que torna a reconstrução do sinal possível.

Em diferentes termos, a reconstrução integral de uma função de banda limitada  $f(x, y)$  é possível quando se dispõe de um conjunto de amostras, cujos intervalos satisfazem, simultaneamente, as seguintes condições:

$$\Delta x \leq \frac{1}{2W_u} \quad (16)$$

$$\Delta y \leq \frac{1}{2W_v}. \quad (17)$$

Quando a função  $f(x, y)$  é espacialmente limitada por uma janela bidimensional, a transformada da função amostrada sofre distorção. Esta distorção, intrínseca à natureza espacialmente limitada das imagens digitais, restringe a recuperação completa de  $f(x, y)$  a partir do conjunto de suas amostras [10].

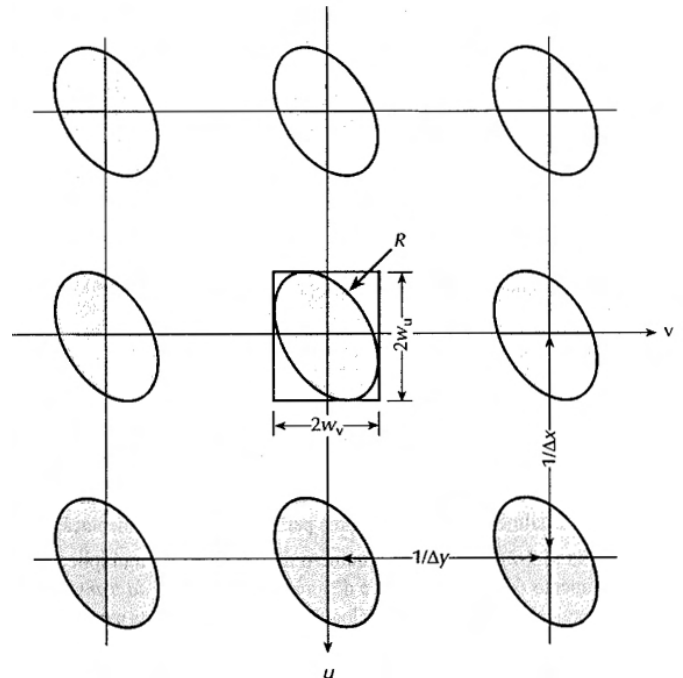


Figura 2. Visualização no domínio da frequência de uma função bidimensional de banda limitada amostrada. Fonte: Gonzalez e Woods [10].



#### IV. PROTÓTIPO DESENVOLVIDO

##### A. Objetivos e Requisitos

O protótipo desenvolvido apresenta como principal objetivo a representação fiel de pequenos ambientes através de nuvens de pontos. Esta representação leva em consideração as limitações dos sensores e equipamentos de baixo custo empregados. O foco está em alcançar uma fidelidade adequada na captura dos detalhes mais relevantes do ambiente.

Além disso, o projeto inclui a implementação de uma representação gráfica em tempo real e sincronizada em um computador, proporcionando uma visualização imediata dos dados adquiridos pelo sensor. Essa representação inclui tanto os dados já capturados quanto aqueles que estão sendo obtidos em tempo real.

Quanto aos requisitos do protótipo, destaca-se a importância de sua leveza. O design do protótipo objetiva ser suficientemente leve para ser transportado por drones comuns. Esta característica amplia significativamente as possibilidades de aplicação do sensor LiDAR em diversos contextos, como o mapeamento de áreas remotas ou de difícil acesso.

Outro aspecto importante é a eficiência na transmissão e processamento dos dados do sensor LiDAR, que deve garantir a representação gráfica em tempo real. Este recurso proporciona uma experiência imersiva e permite 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.

Considerando as condições ambientais, o protótipo, embora não apresente resistência à água ou poeira, foi desenvolvido para operar de maneira eficaz em condições ambientais normais. Esse design visa garantir tanto a integridade do sistema quanto a sua eficiência em ambientes controlados.

##### B. Componentes-chave e Integração Funcional

O protótipo desenvolvido, mostrado na Figura 7, faz uso dos seguintes componentes-chave:

- Servomotor SG92R TowerPro;
- Motor de passo 28BYJ-48;
- Sensor de distância TF-Luna baseado na técnica “Time of Flight” (ToF);
- Microcontrolador ESP32-WROOM-32D;
- Sensor de posição angular magnético AS5600.

Uma lista completa dos componentes utilizados, com com os preços encontrados para esse projeto, é mostrada na Tabela III, no apêndice.

O protótipo do scanner LiDAR foi projetado com um foco em desempenho, custo e funcionalidade. O microcontrolador ESP32 foi escolhido como controlador central do protótipo devido à sua robusta gama de recursos, incluindo suporte para modulação por largura de pulso (PWM), capacidade de conexão Wi-Fi, suporte ao protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), suporte a comunicação I2C (Inter-Integrated Circuit) e adequada capacidade de processamento, tornando-o ideal para o controle e comunicação do dispositivo.

O servomotor SG92R TowerPro foi modificado para permitir um giro contínuo, atendendo à necessidade de ajustar o ângulo horizontal  $\theta$ . A escolha do SG92R foi baseada em sua leveza e facilidade de controle. A posição do servomotor é determinada pelo sensor de posição magnético AS5600, selecionado pela sua capacidade de medição precisa sem contato físico.

Para o controle do ângulo de elevação  $\alpha$ , optou-se pelo uso do motor de passo 28BYJ-48. Este tipo de motor permite o controle preciso da posição angular, mesmo sem realimentação, o que reduz as incertezas nas medições angulares do scanner LiDAR.

O software Unity foi escolhido para a visualização de dados em tempo real devido ao seu amplo suporte a scripts, versatilidade e capacidade de renderizar ambientes tridimensionais complexos de maneira eficiente.

Para a comunicação entre o hardware e o software, optou-se pelo broker MQTT Eclipse Mosquitto, dada a sua gratuidade, robustez e conjunto completo de funcionalidades. Este broker facilita a transmissão eficiente de dados entre o scanner LiDAR e o sistema de visualização, suportando a comunicação em tempo real necessária para o projeto.

Finalmente, o sensor de distância TF-Luna foi escolhido para o protótipo devido à sua alta resolução, campo de visão (FOV) adequado e custo-benefício.

Para melhor compreensão do dispositivo elaborado, a Figura 3 ilustra o diagrama de conexões realizadas, com a supressão de alguns detalhes e componentes menos relevantes, como o circuito de inicialização e o circuito de bootloader. Além disso, a Figura 4 representa as lógicas de programação implementadas no ESP32 e no Unity, as quais detalham o funcionamento do sistema.

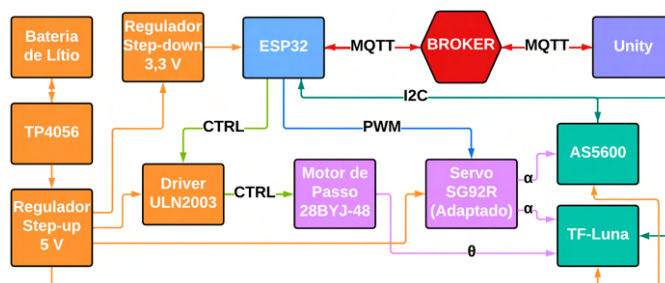


Figura 3. Diagrama de elementos e conexões.

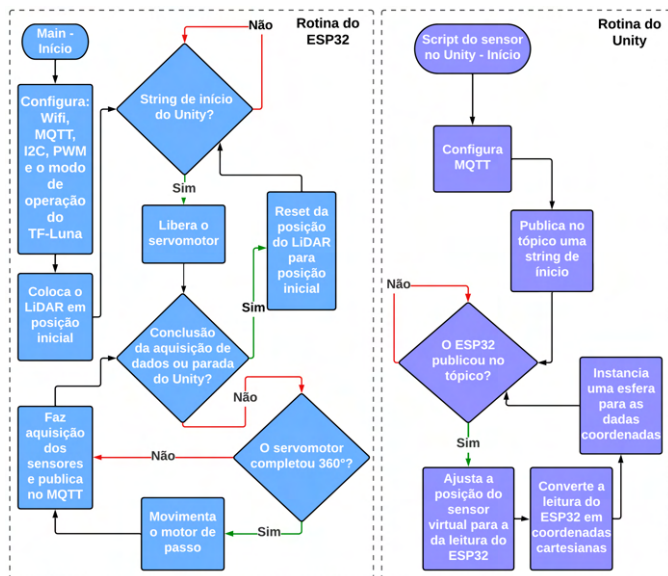


Figura 4. Fluxograma de funcionamento.

### C. Adaptação do Servomotor

Para possibilitar que o servo motor, designado para o ajuste do ângulo  $\theta$ , efetue uma rotação contínua de  $360^\circ$ , procedeu-se à remoção do potenciômetro de feedback, que estava mecanicamente acoplado ao eixo de saída. Em substituição, instalaram-se dois resistores de  $2\text{ k}\Omega$  em seus terminais, conforme ilustrado na Figura 5. Tal configuração induz o controlador do servo motor a interpretar uma posição fixa de  $90^\circ$ . Com essa modificação, a modulação por largura de pulso (PWM) é agora aplicada para controlar a velocidade e a direção de rotação do servo motor. Inicialmente, considerou-se a possibilidade de utilizar os terminais remanescentes do potenciômetro, já que o mesmo estava conectado mecanicamente ao eixo do servomotor, para determinar a posição angular do mesmo. Contudo, constatou-se que o alcance elétrico do potenciômetro limitava-se a  $330^\circ$ , o que não satisfazia a exigência de uma amplitude total de  $360^\circ$ . Dessa forma, tornou-se necessário identificar uma metodologia alternativa que permitisse a aferição da posição angular do servo motor. Para superar essa limitação, optou-se pela implementação do sensor de rotação sem contato AS5600. Um circuito específico foi concebido para prover o sensor com a tensão operacional de  $5\text{ V}$ , e a placa de circuito correspondente é apresentada na Figura 5. Esta placa de circuito foi projetada para ser facilmente incorporada à estrutura existente do servo motor. A utilização do sensor AS5600 demanda a instalação de um ímã de neodímio no eixo do motor, e o posicionamento subsequente do sensor a uma distância controlada de  $0,5$  a  $3\text{ mm}$  abaixo do ímã. Tal procedimento exigiu a remoção prévia de quaisquer componentes metálicos que compunham a estrutura original do potenciômetro. Posteriormente, procedeu-se com a fixação do ímã na parte móvel da estrutura do

potenciômetro, que se acopla perfeitamente ao eixo de saída do servo motor. A Figura 6 ilustra o servo motor após a execução das modificações necessárias.



Figura 6. Servo motor após as adaptações.

### D. Estrutura do Protótipo

A estrutura física do protótipo foi concebida de modo que não ocorra o emaranhamento dos cabos, possibilitando uma rotação completa de  $360^\circ$  com relação à base do protótipo e de  $180^\circ$  ao longo do eixo do sensor. As partes que compõem essa estrutura são mostradas na Figura 18. O Polietileno Tereftalato de Glicol (PETG) foi escolhido como material de construção, devido à sua resistência e leveza. O sensor foi centralizado nos eixos rotativos, gerando um ponto cego onde o protótipo só consegue visualizar sua estrutura interna em certos ângulos de elevação  $\alpha$ . Diante disso, sugere-se o reposicionamento do eixo do servomotor superior para eliminar esses pontos cegos. Essa alteração requer ajustes nas coordenadas esféricas para garantir maior exatidão do sistema.

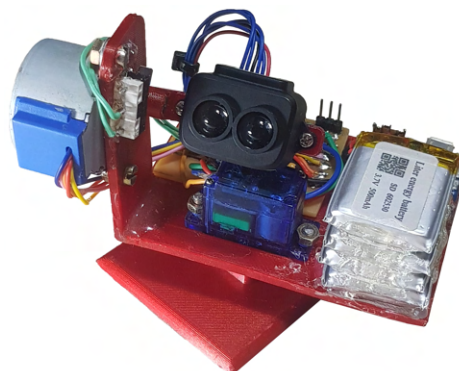


Figura 7. Protótipo desenvolvido.

Com um peso total de  $123\text{ gramas}$ , o protótipo demonstrou ser suficientemente leve para aplicações que exigem mobilidade, como o uso em drones. Esta característica satisfaz o requisito de portabilidade e amplia significativamente as possibilidades de uso do sensor LiDAR em variados contextos, incluindo mapeamentos em áreas remotas ou de difícil acesso.

## V. ANÁLISE DA RESOLUÇÃO

### A. Especificações de Alcance e Resolução dos Componentes Determinantes do Sistema

A eficácia de um scanner LiDAR é intrinsecamente ligada às características técnicas de seus componentes. Na Tabela I, são destacadas as especificações de alcance e resolução dos elementos essenciais que constituem o protótipo, sublinhando a importância de cada um para a acurácia e a performance do sistema. Estes parâmetros são cruciais, pois estabelecem os limites operacionais e a precisão das medições realizadas.

Tabela I  
COMPONENTES, VARIÁVEIS ASSOCIADAS E ESPECIFICAÇÕES DE RESOLUÇÃO

Componente	Variável	Alcance	Resolução
AS5600	$\theta$	0-360 °	0,0879 °
28BYJ-48	$\alpha$	0-180 °	0,0879 °
TF-Luna	$\rho$	0,2-8 m	1 cm

### B. Determinação da Resolução através do Método EIFOV

Ressalta-se que, na metodologia adotada a resolução do protótipo, considera a largura do feixe do laser. A dimensão deste feixe, no contexto do sensor implementado, é definida conforme a expressão matemática:

$$\delta = 2 \cdot D \cdot \tan \beta, \quad (18)$$

em que  $\delta$  é o diâmetro do feixe laser,  $D$  é a distância do objeto e  $\beta$  é metade do FOV de 2° do TF-Luna.

Além disso, é considerado o arco entre as amostras para a distância desejada. Que pode ser obtido como:

$$\Delta = D \cdot \frac{\theta \pi}{180}, \quad (19)$$

em que  $\theta$  representa o incremento angular uniforme entre as amostras na direção horizontal e no ângulo de elevação, isto é,  $\theta = \alpha$ .

Com base nesses parâmetros, calculou-se a resolução espacial do protótipo para quatro distâncias distintas utilizando o método EIFOV. Os resultados desses cálculos são apresentados de forma detalhada na Tabela II.

Tabela II  
RESOLUÇÃO ESPACIAL DO PROTÓTIPO CALCULADA PELO MÉTODO EIFOV PARA QUATRO DISTÂNCIAS DISTINTAS

Distância (m)	$\Delta$ (mm)	$\delta$ (mm)	EIFOV (mm)
1	1,53	34,91	30,05
2	3,07	69,82	60,09
4	6,14	139,64	120,19
8	12,27	279,28	240,38

## VI. ESTABELECIMENTO DE UM CENÁRIO ESPECÍFICO PARA AVALIAÇÃO

Para o estudo do fenômeno aliasing, blocos de isopor com dimensões de 15 cm x 15 cm x 4 cm foram dispostos a intervalos regulares de 15 cm em uma superfície vertical, a fim de simular uma onda quadrada.

Para as coletas de dados, o scanner LiDAR, com seu ângulo de elevação fixado em 90 °, foi posicionado em três distâncias – 1 m, 2 m e 4 m – em relação aos pontos inicial e final do sinal representado pela superfície e pelos blocos de isopor, como ilustrado na Figura 8. A Figura 9 apresenta a linha escaneada, destacada em vermelho, demonstrando visualmente a metodologia de aquisição dos dados para a análise do fenômeno de aliasing.

Nessa configuração específica, apesar da distância ser mantida linear entre o scanner e os pontos de início e término do sinal ser mantida constante, a natureza da aquisição estacionária resultou em variações de distância ao longo do sinal. Isso ocorre porque, em uma superfície plana, os pontos mais centrais ao campo de visão do LiDAR estão mais próximos do aparelho, enquanto os pontos mais distantes ao longo da extensão lateral do sinal estão mais afastados.

Para cada uma das distâncias estabelecidas foi realizada uma varredura do sinal desconsiderando o eixo da altura (eixo z), resultando na coleta de um conjunto específico de dados. Os três conjuntos de dados obtidos permitiram uma análise comparativa do impacto da distância no fenômeno de aliasing.

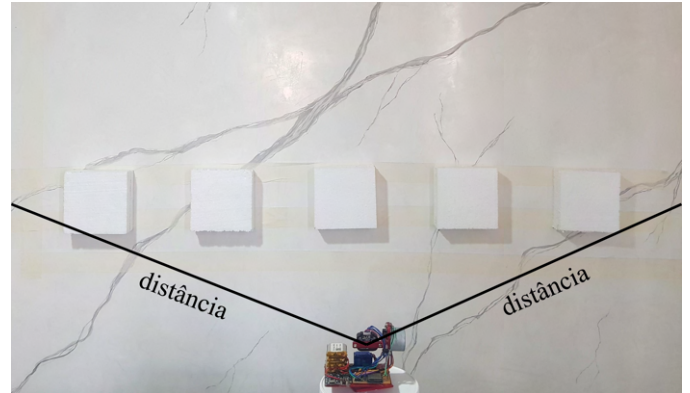


Figura 8. Configuração experimental concebida para o estudo do efeito aliasing em medições realizadas com o protótipo.

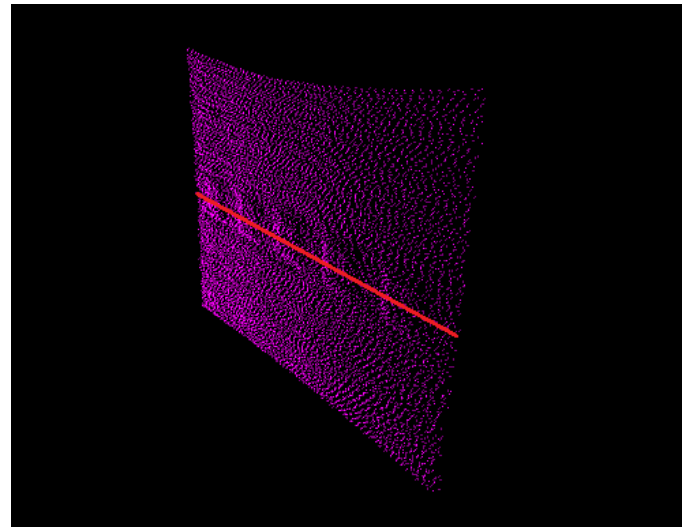


Figura 9. Nuvem de pontos capturada pelo protótipo, destacando em vermelho a linha escaneada para estudo do aliasing.



## VII. MANIPULAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

No conjunto de dados coletados, a posição angular da superfície plana em relação ao eixo  $x$  é influenciada pela posição angular do sensor no momento da varredura. Com base nessa consideração, realizou-se uma regressão linear com o objetivo de determinar a inclinação da superfície em relação ao eixo  $x$ , conforme ilustrado na Figura 10. Após essa análise, procedeu-se à rotação dos vetores  $x$  e  $y$ , de forma a alinhar o sinal perpendicularmente ao eixo  $x$ .

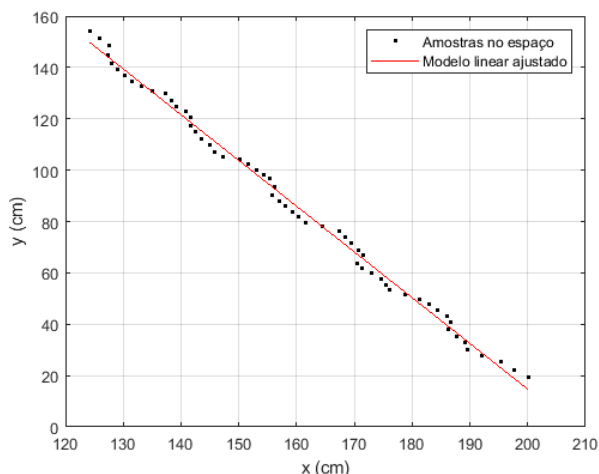


Figura 10. Ilustração da regressão linear para determinar a inclinação que alinha o sinal com o eixo  $x$ .

Na sequência de manipulação dos dados, realizou-se a subtração do menor valor da amplitude em  $y$  do conjunto de amplitudes, visando a normalização das medidas. A manipulação dos dados culminou na obtenção de um sinal corrigido que proporcionou uma base para a análise subsequente.

Na fase de análise, plotaram-se três sinais distintos: o sinal adquirido ajustado, uma onda quadrada cuja resolução corresponde à média da resolução observada nos dados adquiridos, e uma onda quadrada de alta resolução, esta última caracterizada por amostras espaçadas em intervalos extremamente reduzidos. Em sequência, executou-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT) foi aplicada a cada um desses sinais.

A realização da FFT possibilitou a avaliação das componentes de frequência dos sinais e a identificação de potenciais distorções devido ao aliasing espacial. Esta análise revelou como a resolução espacial do sensor LiDAR influencia a integridade da informação e contribui para a presença de artefatos no espectro de frequência.

## VIII. ANÁLISE DO EFEITO ALIASING

Conforme apresentado em seções anteriores, foram conduzidos experimentos em três distâncias-chave - 1 m, 2 m e 4 m - para avaliar o impacto da proximidade na incerteza dos dados coletados pelo sensor LiDAR e na manifestação de aliasing espacial. Para cada uma dessas distâncias, os resultados são representados por dois conjuntos de gráficos.

O primeiro conjunto inclui o sinal adquirido ajustado, uma onda quadrada com resolução equivalente à média do sinal adquirido ajustado e outra de alta resolução. O segundo conjunto de gráficos apresenta a análise realizada por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT) desses sinais. Os gráficos referentes à distância de 1 m estão disponíveis nas Figuras 11 e 12, para a distância de 2 m nas Figuras 13 e 14, e para a distância de 4 m nas Figuras 15 e 16.

### Distância de 1 m:

No gráfico do domínio espacial, Figura 11, o sinal adquirido a 1 metro apresenta um perfil significativamente diferente dos sinais simulados, indicando que a taxa de amostragem pode não ser suficiente para capturar a frequência espacial do sinal. Isso é um sinal de aliasing, em que altas frequências do sinal são interpretadas incorretamente como baixas frequências, resultando em distorções na forma de onda capturada.

No gráfico do domínio da frequência, Figura 12, eram esperados picos claros correspondentes às frequências fundamentais da onda quadrada e seus harmônicos. No entanto, o sinal adquirido mostra picos em locais que não correspondem aos dos sinais simulados, o que é uma indicação de que está ocorrendo o fenômeno de aliasing nas frequências. A discrepância entre as magnitudes das componentes de frequência também sugere que as altas frequências estão dobrando para dentro da banda de frequência amostrada, manifestando-se como artefatos no espectro de frequência.

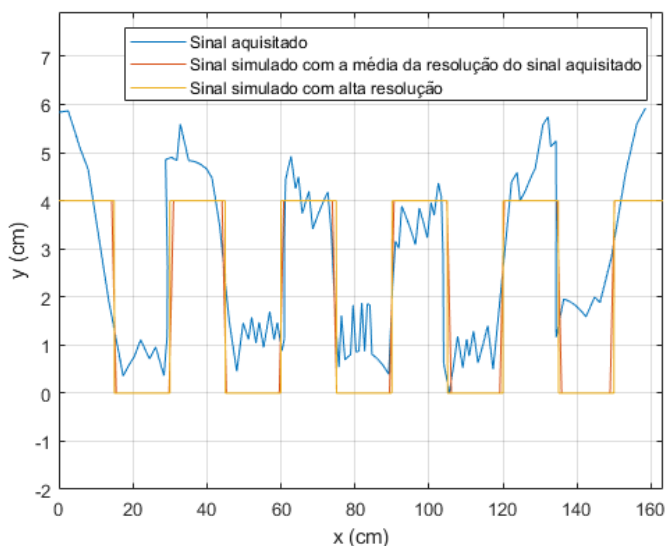


Figura 11. Comparação entre o sinal LiDAR adquirido, o sinal simulado com a média da resolução do sinal adquirido e o sinal simulado com alta resolução a 1 metro.



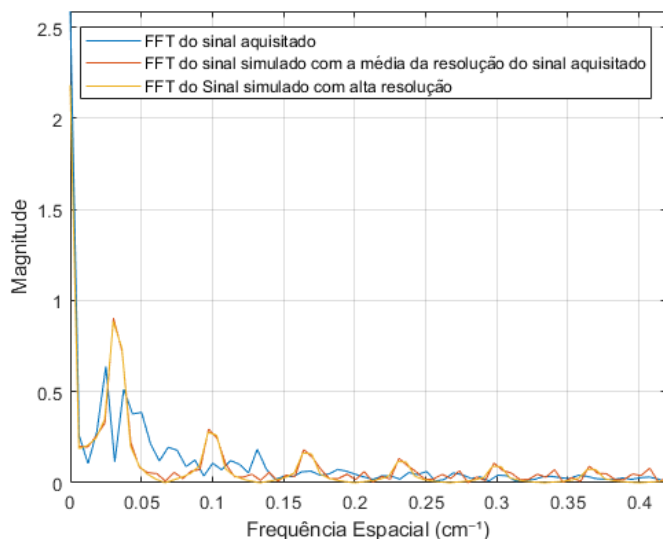


Figura 12. Espectro de frequência dos sinais a 1 metro dos sinais: adquirido, simulado com média da resolução e simulado de alta resolução.

### Distância de 2 m:

Com a distância em 2 metros visto na Figura 13, a discrepância entre o sinal adquirido e os sinais simulados no gráfico do domínio do tempo torna-se mais evidente. Isso pode indicar que a resolução espacial do LIDAR é ainda menos capaz de resolver detalhes menores a esta distância, exacerbando os efeitos de aliasing.

No gráfico da Figura 14, a FFT do sinal adquirido (azul) exibe picos de magnitude que não estão alinhados com a FFT do sinal de alta resolução (amarelo), sugerindo a ocorrência de aliasing. Os picos no sinal simulado com a média da taxa de amostragem (laranja) confirmam essa interpretação, já que ambos os sinais azul e laranja apresentam anomalias semelhantes em comparação a FFT do sinal de alta resolução (amarelo).

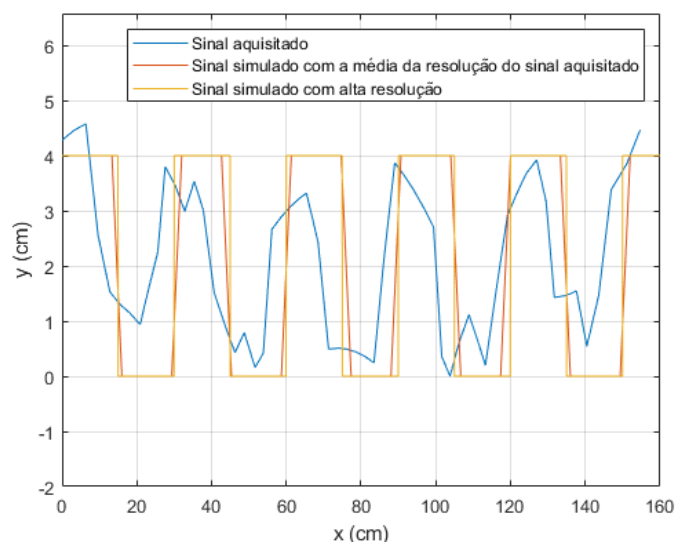


Figura 13. Comparação entre o sinal LiDAR adquirido, o sinal simulado com a média da resolução do sinal adquirido e o sinal simulado com alta resolução a 2 metros.

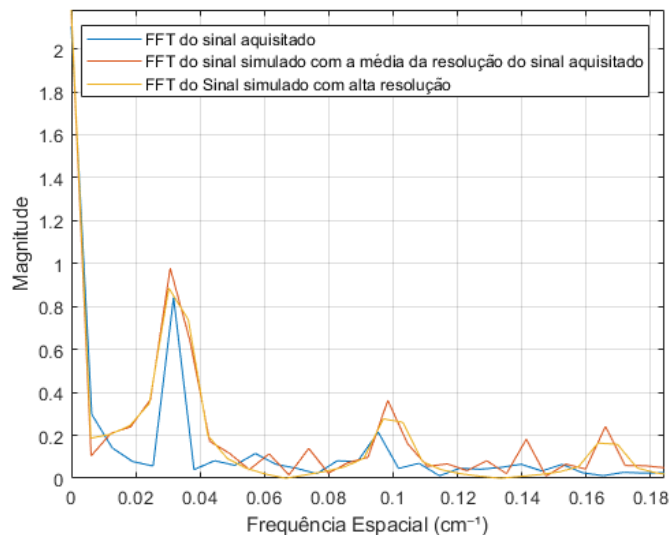


Figura 14. Espectro de frequência dos sinais a 2 metros dos sinais: adquirido, simulado com média da resolução e simulado de alta resolução.

### Distância de 4 m:

A 4 metros, Figura 15, o aliasing parece ser ainda mais pronunciado, com uma forma de onda capturada que não representa de maneira alguma a onda quadrada ideal. Isso é esperado, pois o efeito do aliasing se torna mais severo com o aumento da distância devido a deterioração da resolução.

O gráfico da Figura 16, mostra que o espectro de frequência do sinal adquirido difere significativamente do espectro de alta resolução, com as magnitudes das frequências aparecendo substancialmente alteradas. Isso reforça a noção de que o aliasing está afetando a fidelidade do sinal medido.

Ao comparar os gráficos contidos nas Figuras 11, 13 e 15 observa-se uma deterioração da resolução com o aumento da distância de medição, o que resulta em uma amplificação do fenômeno de aliasing.

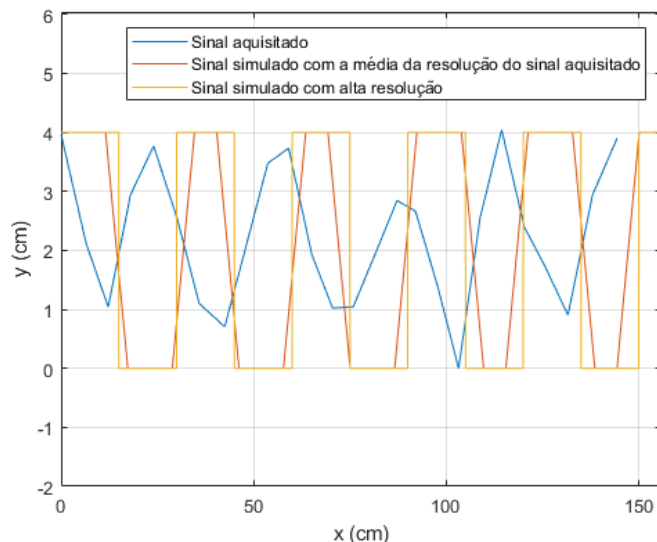


Figura 15. Comparação entre o sinal LiDAR adquirido, o sinal simulado com a média da resolução do sinal adquirido e o sinal simulado com alta resolução a 4 metros.

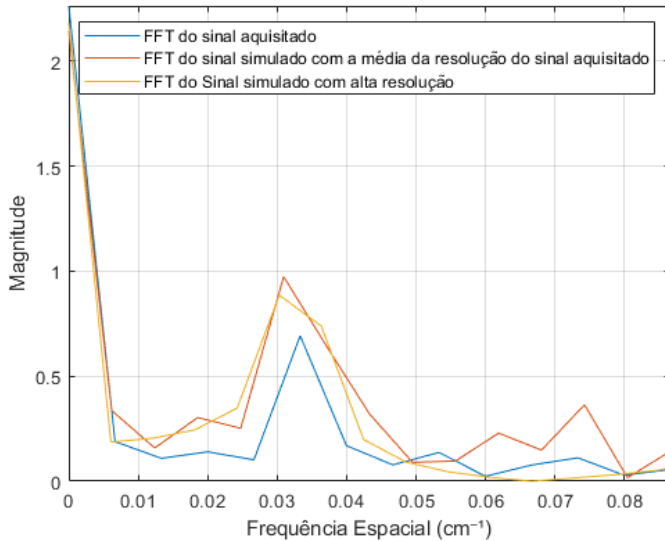


Figura 16. Espectro de frequência dos sinais a 4 metros dos sinais: adquirido, simulado com média da resolução e simulado de alta resolução.

## IX. CONCLUSÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentou o desenvolvimento e a análise de um protótipo de scanner LiDAR terrestre estacionário com o intuito de investigar a influência do aliasing espacial em função da resolução espacial e da distância de medição. A investigação foi conduzida por meio de uma metodologia que englobou tanto experimentos práticos quanto simulações computacionais.

Os dados coletados e as análises subsequentes evidenciaram que a resolução espacial se deteriora com o aumento da distância de medição, exacerbando o efeito de aliasing. Esses achados sublinham a necessidade de desenvolvimento contínuo de soluções que possam mitigar as limitações impostas pelo aliasing.

Em termos de fidelidade na representação de ambientes por meio de nuvens de pontos, o protótipo mostrou-se competente. A densidade da nuvem de pontos gerada foi substancial, permitindo uma visualização detalhada dos aspectos mais relevantes do ambiente escaneado. A qualidade da representação é evidenciada pela Figura 17, a qual ilustra a capacidade do protótipo de capturar detalhes do ambiente.

Contudo, é importante ressaltar que fatores, como o ponto de vista de observação dos dados, a renderização computacional e as limitações inerentes ao processamento gráfico, podem influenciar a percepção final dos dados visualizados. Estes fatores podem dificultar a visualização de detalhes mais finos, sugerindo que a realidade capturada pelo protótipo pode ser ainda mais rica em detalhes do que o apresentado na figura.

No que concerne à eficiência na transmissão e processamento dos dados em tempo real, o protótipo atendeu às expectativas. A transmissão de dados do sensor LiDAR para o sistema de visualização, facilitada pelo uso do protocolo MQTT, ocorreu de forma fluida e eficiente.

## X. AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo meu ser e pela providência em minha vida. Aos meus pais, pelo amor incondicional, apoio e sacrifícios incansáveis. Aos meus irmãos, pelo companheirismo, apoio e por estarem sempre ao meu lado. Aos meus amigos de república, que são uma família que escolhi ter em minha vida e sou muito grato por cada momento compartilhado. Ao meu colega de curso Frederico, pela sua ajuda e apoio no desenvolvimento deste trabalho. 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. Aos professores Everthon e Túlio, pelo ensino, orientação e inspiração. 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.

## REFERÊNCIAS

- [1] D. D. Lichti and S. Jantso, "Angular Resolution of Terrestrial Laser Scanners," *The Photogrammetric Record*, vol. 21, no. 114, pp. 141-160, Jun. 2006. Disponível em: <https://bit.ly/46X6HIW>
- [2] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," *IEEE*, vol. 86, no. 2, pp. 447-457, Feb. 1998. Disponível em: <https://bit.ly/3tFiltI>
- [3] J. Carter, et al., "Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications," NOAA Coastal Services Center, Charleston, SC, USA, Nov. 2012.
- [4] P. J. Besl, "Surfaces in Range Image Understanding," Springer-Verlag, New York, 1988.
- [5] D. A. P. Ferreira, "Análise e processamento de sinais," Editora e Distribuidora Educacional S/A, Londrina, 2018.
- [6] S. Haykin e B. Van Veen, "Sinais e Sistemas," Bookman, Porto Alegre, 2001.
- [7] R. T. Higuti e C. Kitano, "Sinais e sistemas," Editora UNESP, São Paulo, 2003.
- [8] B. P. Lathi, "Sinais e sistemas lineares," Bookman, Porto Alegre, 2008.
- [9] A. V. Oppenheim and A. S. Willsky, "Sinais e sistemas," Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2010.
- [10] R. C. Gonzalez e R. E. Woods, "Processamento de Imagens Digitais," Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, Brasil, 2000.
- [11] H. Nyquist, "Certain topics in telegraph transmission theory," *Trans. AIEE*, vol. 47, pp. 617-644, 1928. Reprinted as a classic paper in: *Proc. IEEE*, vol. 90, no. 2, Feb. 2002.
- [12] M. Melin et al., "Conservation Technology Remote Sensing: LiDAR," Vol. 1 N.3, WWF Conservation Technology Series, Woking, Surrey, United Kingdom, 2017.
- [13] G. Vosselman and H.-G. Maas, "Airborne and Terrestrial Laser Scanning," Whittles Publishing, Dunbeath, Caithness, Scotland, UK, 2010.

APÊNDICE

Tabela III

TABELA DE COMPONENTES ELETRÔNICOS COM PREÇOS LOCAIS DE 2023

Componente	Un.	Preço por Un. (R\$)
Motor de Passo 28BYJ-48	1	13,77
Servomotor SG92R	1	28,41
Sensor AS5600	1	28,00
Sensor TF-Luna	1	228,00
Célula de Lítio 500 mAh	4	36,00
Modulo Carregador TP4056	1	9,99
Módulo Regulador Step-up 5 V XR2981	1	28,46
Regulador Step-down 3,3 V AMS1117	1	3,00
Driver ULN2003AD	1	1,45
ESP32-WROOM-32D	1	44,56
Fim de Curso	1	2,90
Capacitor de Tântalo 100 nF	1	5,32
Chave Tátil SMD KFC-A06	1	0,35
Chave SS12D07VG4	1	0,57
Resistor SMD 120 kΩ	2	0,48
Resistor SMD 10 kΩ	1	0,05
Capacitor Cerâmico SMD 0,1 uF	3	0,26
Capacitor Cerâmico SMD 1 uF	1	0,30
Capacitor Cerâmico SMD 10 uF	1	0,22
Impressão 3D	-	5,00
Placas de Circuito Impresso	-	10,00
Cabos	-	2,00
<b>Total</b>		<b>R\$ 558,09</b>



Figura 17. Comparativos entre captura do protótipo e imagem original da cena.

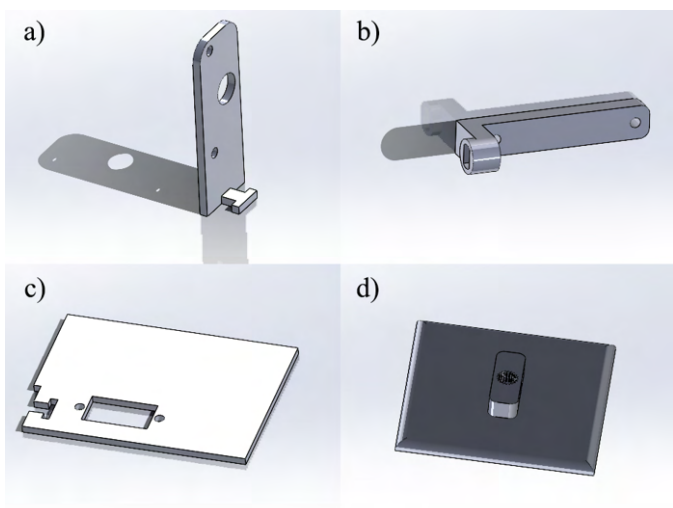


Figura 18. Componentes da estrutura do protótipo: a) Suporte do motor de passo; b) Eixo do motor de passo e suporte do sensor TF-Luna; c) Plataforma base do protótipo com encaixes para o servomotor e para o suporte do motor de passo; d) Suporte base do protótipo.