

Construção e Caracterização de Um Sensor LiDAR para Mapeamento 3D de Ambientes

Lucas Augusto Nacif Moura * Everthon de Souza Oliveira **,***
Túlio Charles de Oliveira Carvalho **,***

* Grupo de Pesquisa em Sinais, Controle e Automação em Engenharia (SCAE), (e-mail: lanacif@hotmail.com).

** Grupo de Pesquisa em IOT - ConecTe

*** Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG
(e-mail:oliveira@cefetmg.br;tulio@cefetmg.br)

Abstract: This study describes the development and implementation of a stationary terrestrial LiDAR scanner prototype, which was used to assess the impact of spatial aliasing as a function of spatial resolution and measurement distance. Experiments revealed a trend of increasing aliasing with increasing distance, highlighting the correlation between the measurement distance and a decrease in spatial resolution. This finding underscores the importance of carefully choosing a spatial sampling rate to ensure the integrity of the sampled signal. In addition to the experimental findings, data collected with the prototype emphasize its ability to create detailed point clouds, highlighting its effectiveness in capturing the most relevant details of mapped environments. Based on the results obtained, this work provides an understanding of the challenges associated with spatial aliasing, especially in the context of stationary terrestrial LiDAR scanners. Meanwhile, the developed prototype stands out for its effectiveness, demonstrating an optimized balance between cost, performance, functionality, lightweight, and real-time data transmission capability.

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 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 espacial 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.

Keywords: Electronic Instrumentation; Scanner LiDAR; Stationary Terrestrial; Aliasing; Spatial Resolution.

Palavras-chaves: Instrumentação Eletrônica; Scanner LiDAR; Estacionário Terrestre; Aliasing; Resolução Espacial.

1. 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.

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 (Melin et al., 2017).

* Esta pesquisa foi apoiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), sob o financiamento PCE-00383-24.

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 and Jamtsho (2006), 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 and Jamtsho (2006) introduzem 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 pautou desenvolvimento do aparelho. Ademais, 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.

2. ASPECTOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS DO SCANNER LIDAR

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.

Os scanners a laser terrestres geralmente empregam um sistema de varredura 2D, enquanto os aéreos usam uma direção de varredura com a outra realizada pelo movimento da aeronave. Existem três tipos principais de scanners terrestres: janela, panorâmicos e (hemi) esféricos. Os scanners de janela têm um campo de visão retangular e são operados por dois espelhos de galvanômetro. Os panorâmicos possuem visão horizontal de 360 graus e visão vertical entre 80 a 90 graus, geralmente usando uma roda poligonal para varredura vertical e rotação horizontal completa do dispositivo. Os (hemi) esféricos têm um campo de visão expandido, limitado apenas pelas auto-oclusões do instrumento e do tripé que o suporta.(Vosselman and Maas, 2010).

Estes 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 considerando 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 (Carter et al., 2012).

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 (1988). Este procedimento permite a parametrização da cena escaneada em termos de distância, ρ , sendo representada como uma função uniformemente amostrada baseada na direção horizontal, θ , e no ângulo de elevação, α :

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

em que ρ_s representa a cena contínua ρ_c após a amostragem, e δ 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. Nessa figura, é evidenciado um plano retangular e as amostras obtidas no espaço tridimensional, com incrementos uniformes para θ e α . O telêmetro está centrado no ponto (0,0,0), que é destacado na figura.

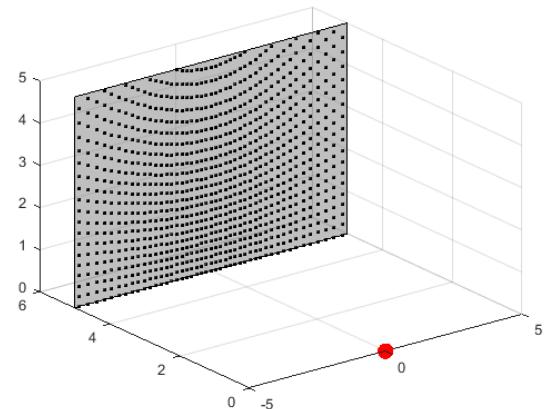


Figura 1. Visualização tridimensional da amostragem pelo LiDAR, destacando a variação do espaçamento entre as amostras com a distância.

O fenômeno de aliasing ocorre devido à dependência do espaçamento entre os pontos, em termos de distância linear, com a distância do scanner. Próximo ao LiDAR, uma pequena mudança angular pode resultar em um deslocamento linear relativamente pequeno. No entanto, à medida que a distância em relação ao LiDAR aumenta, essa mesma mudança angular pode levar a um deslocamento linear significativamente maior. Isso demonstra como a distância

entre o sensor e o ponto de reflexão do laser afeta a resolução efetiva de medição. A seção seguinte abordará o teorema da amostragem no contexto espacial para avaliar os efeitos da resolução na aquisição dos sinais.

2.1 Amostragem Espacial

A amostragem implica na discretização do sinal contínuo, resultando na geração de um sinal discreto tomadas em intervalos regulares. A fim de assegurar a reconstrução precisa do sinal original, ou dentro de margens de erro aceitáveis, é imperativo manter uma taxa de amostragem suficientemente elevada. A informação contida em um sinal contínuo amostrado equivale àquele presente em um sinal discreto (Lathi, 2008).

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 (Gonzalez and Woods, 2000):

$$\iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x - x_0, y - y_0) dx dy = f(x_0, y_0). \quad (2)$$

A reconstrução integral de uma função $f(x, y)$ de banda limitada pelas frequências máximas W_u e W_v é possível quando se dispõe de um conjunto de amostras, cujos intervalos Δx e Δy satisfazem, simultaneamente, as seguintes condições:

$$\Delta x \leq \frac{1}{2W_u} \quad (3)$$

$$\Delta y \leq \frac{1}{2W_v}. \quad (4)$$

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 Gonzalez and Woods (2000).

Este critério define os limites do detalhamento da cena espacial possíveis de serem captados por um sensor de amostragem espacial e representam seus limites operacionais. Superfícies definidas por funções contínuas com frequências maiores que estes limites implicarão em falseamento das imagens.

3. PROTÓTIPO DESENVOLVIDO

3.1 Objetivos e Requisitos

O protótipo desenvolvido tem como objetivo principal representar fielmente pequenos ambientes através de nuvens de pontos, considerando as limitações de sensores e equipamentos de baixo custo. Ele também inclui uma representação gráfica em tempo real e sincronizada em um computador para visualização imediata dos dados adquiridos, tanto os já capturados quanto os em tempo real. Leveza é uma característica essencial, visando possibilitar o transporte por drones comuns, ampliando as aplicações em mapeamento de áreas remotas. Eficiência na transmissão e processamento dos dados é garantida

para representação gráfica em tempo real, facilitando decisões ágeis. Embora não seja resistente à água ou poeira, o protótipo opera eficientemente em ambientes comuns, considerando condições típicas de umidade, temperatura e poluição atmosférica.

3.2 Componentes Principais e Integração Funcional

O protótipo desenvolvido, mostrado na Figura 4, 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.

O protótipo do scanner LiDAR foi projetado com foco em desempenho, custo e funcionalidade. O microcontrolador ESP32 foi selecionado como o controlador central devido à sua ampla gama de recursos, incluindo suporte para PWM, conexão Wi-Fi, protocolo MQTT, comunicação I2C e capacidade de processamento adequada. O servomotor SG92R TowerPro foi modificado para permitir um giro contínuo para ajuste do ângulo horizontal θ , devido à sua leveza e facilidade de controle. A posição do servomotor é determinada pelo sensor de posição magnético AS5600, escolhido pela sua capacidade de medição precisa sem contato físico. Para controle do ângulo de elevação α , foi escolhido o motor de passo 28BYJ-48, permitindo controle preciso da posição angular, mesmo sem realimentação. O software Unity foi selecionado para visualização de dados em tempo real, devido à sua versatilidade e capacidade de renderizar ambientes tridimensionais complexos de maneira eficiente. Para comunicação entre hardware e software, o broker MQTT Eclipse Mosquitto foi escolhido por sua gratuidade, robustez e conjunto completo de funcionalidades, facilitando a transmissão eficiente de dados em tempo real entre o scanner LiDAR e o sistema de visualização. Finalmente, o sensor de distância TF-Luna foi escolhido devido à sua alta resolução, campo de visão adequado e custo-benefício. Para o protótipo, não foram realizadas calibrações adicionais. Os sensores AS5600 e TF-Luna vêm pré-configurados e calibrados de fábrica, enquanto o motor de passo 28BYJ-48 opera em malha aberta, com o ângulo determinado pela contagem de passos solicitados pelo microcontrolador, sem aferição.

Para melhor compreensão do dispositivo elaborado, a Figura 2 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 3 representa as lógicas de programação implementadas no ESP32 e no Unity, as quais detalham o funcionamento do sistema.

Para permitir que o servo motor ajuste o ângulo θ com rotação contínua de 360 graus, o potenciômetro de feedback mecânico foi removido e substituído por dois resistores de 2 kΩ. Agora, a modulação por largura de pulso (PWM) é utilizada para controlar a velocidade e a direção de rotação do servo motor.

Inicialmente, considerou-se utilizar os terminais remanescentes do potenciômetro para determinar a posição angu-

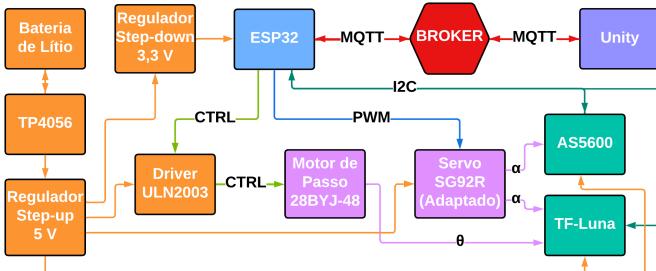


Figura 2. Diagrama de elementos e conexões.

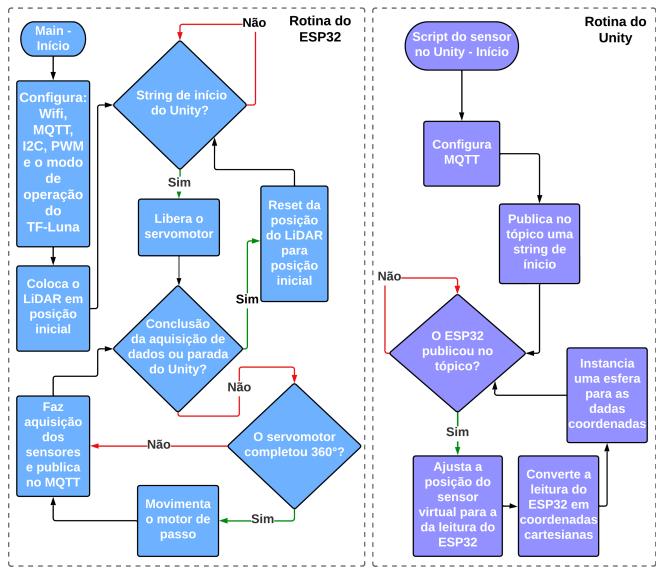


Figura 3. Fluxograma de funcionamento.

lar do servo motor. No entanto, o alcance elétrico do potenciômetro limitava-se a 330 graus, insuficiente para uma amplitude total de 360 graus. Para superar essa limitação, optou-se pela implementação do sensor de rotação sem contato AS5600, com um circuito específico para fornecer a tensão operacional de 5 V.

O uso do sensor AS5600 requer a instalação de um ímã de neodímio no eixo do motor e o posicionamento do sensor a uma distância controlada de 0,5 a 3 mm abaixo do ímã. Isso exigiu a remoção de componentes metálicos da estrutura original do potenciômetro e a fixação do ímã na parte móvel da estrutura, que se acopla ao eixo de saída do servo motor.

3.3 Estrutura do Protótipo

A estrutura física do protótipo foi fabricada com impressão 3D utilizando Polietileno Tereftalato de Glicol (PETG), escolhido pela sua resistência e leveza. Os cabos foram organizados para permitir rotação completa de 360 graus em relação à base e 180 graus ao longo do eixo do sensor. No entanto, a centralização do sensor nos eixos rotativos resulta em pontos cegos, onde a estrutura interna do protótipo é visível apenas em certos ângulos de elevação.

Embora os pontos cegos não tenham sido uma preocupação para este trabalho, uma estratégia para mitigá-los seria deslocar o eixo do sensor de distância TF-Luna para a frente do protótipo, permitindo que a estrutura

interna não interfira nas medições quando o sensor estiver apontado para baixo. Isso exigirá ajustes nas coordenadas esféricas, pois a distância radial será medida a partir de uma nova posição em vez do centro da esfera.

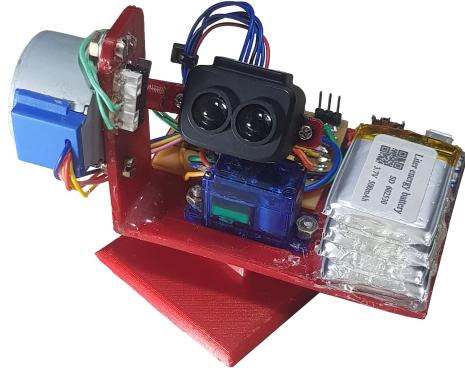


Figura 4. Protótipo desenvolvido.

Com um peso total de 123,0 g (gramas), o protótipo obtido 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.

A eficiência de um scanner LiDAR é intrinsecamente ligada às características técnicas de seus componentes. A fim de avaliar a qualidade do sensor construído, são apresentadas na próxima seção as principais métricas de desempenho calculadas.

4. ANÁLISE DA RESOLUÇÃO

Na Tabela 1, 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 1. Componentes, Variáveis Associadas e Especificações de Resolução

Componente	Variável	Alcance	Resolução
AS5600	θ	0-360 °	0,0879 °
28BYJ-48	α	0-180 °	0,0879 °
TF-Luna	ρ	0,2-8 m	1 cm

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 por:

$$\delta = 2 \cdot D \cdot \tan \beta, \quad (5)$$

em que δ é o diâmetro do feixe laser, D é a distância do objeto e β 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:

$$\Delta = D \cdot \frac{\theta\pi}{180}, \quad (6)$$

em que θ 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 como mostrado em Lichti and Jamtsho (2006). Os resultados desses cálculos são apresentados de forma detalhada na Tabela 2.

Tabela 2. Resolução espacial do protótipo calculada para quatro distâncias distintas.

Distância (m)	Δ (mm)	δ (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

Conforme descrito na Seção 2.1 a resolução obtida define a frequência espacial máxima possível de ser adequadamente amostrada pelo protótipo construído. Por exemplo, para a distância de 1 m e aplicando a Eq. 3 , o sensor é capaz de sinais com frequências espaciais de até $0,0166 \text{ mm}^{-1}$. Frequências superiores implicarão no falseamento do sinal com aparecimento de frequências devido à amostragem.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DO EFEITO ALIASING

Um aparato experimental foi concebido para estudar o fenômeno de aliasing, representando uma função espacial em forma de onda quadrada com comprimento de 30cm. Blocos de isopor de dimensões 15 cm x 15 cm x 4 cm foram dispostos a intervalos regulares de 15 cm em uma superfície vertical. O scanner LiDAR foi posicionado a 1 m e 4 m de distância em relação aos pontos inicial e final do sinal representado pelos blocos de isopor, com um ângulo de elevação fixado em 90 graus. A linha escaneada, destacada em vermelho, demonstra visualmente a metodologia de aquisição dos dados para análise do fenômeno de aliasing. Apesar da distância 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 devido à geometria da superfície plana. Cada varredura do sinal desconsiderou o eixo da altura (eixo z), resultando em dois conjuntos específicos de dados para análise comparativa do impacto da distância no fenômeno de aliasing.

Para cada distância, os resultados são representados por dois conjuntos de gráficos. O primeiro conjunto inclui o sinal aquisitado ajustado, uma onda quadrada com resolução equivalente à média do sinal aquisitado 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 6 e 7, e para a distância de 4 m nas Figuras 8 e 9.

Distância de 1 m: No gráfico do domínio espacial, Figura 6, 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 7, eram esperados picos claros correspondentes às frequências funda-

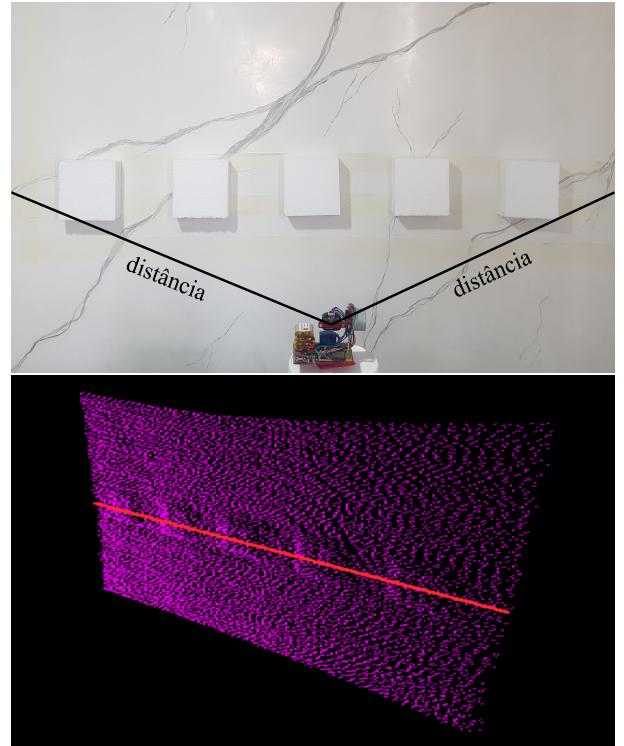


Figura 5. Configuração experimental concebida para o estudo do efeito aliasing em medições realizadas com o protótipo e nuvem de pontos capturada pelo protótipo, destacando em vermelho a linha escaneada para estudo do aliasing.

mentais 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.

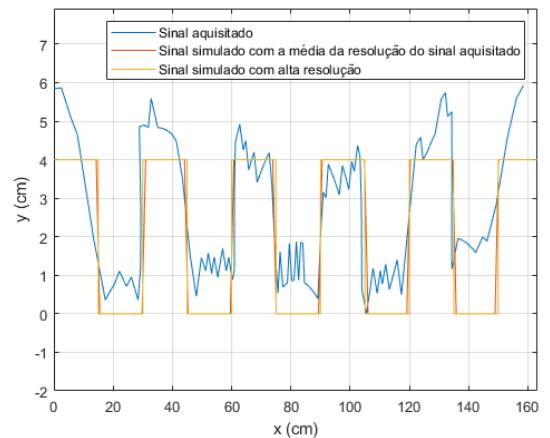


Figura 6. Comparação entre o sinal LiDAR adquirido, o sinal simulado com a média da resolução do sinal adquirido e o simulado com alta resolução a 1 metro.

Distância de 4 m: A 4 metros, Figura 8, o aliasing parece ser ainda mais pronunciado, com uma forma de

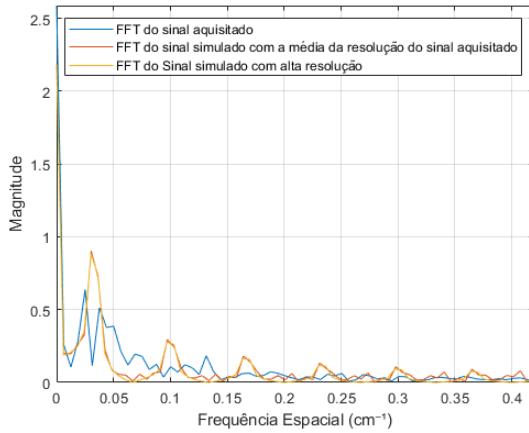


Figura 7. Espectro de frequência dos sinais a 1 metro dos sinais: adquirido, simulado com média da resolução e simulado de alta resolução.

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 9, 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 6 e 8 observa-se uma deterioração da resolução com o aumento da distância de medição, o que resulta em uma amplificação do fenômeno de aliasing.

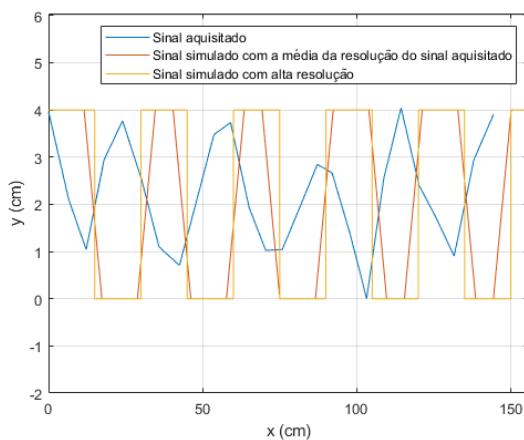


Figura 8. Comparação entre o sinal LiDAR adquirido, o sinal simulado com a média da resolução do sinal adquirido e o simulado com alta resolução a 4 metros.

6. CONCLUSÃO

O trabalho apresentou o desenvolvimento e análise de um protótipo de scanner LiDAR terrestre estacionário para investigar o aliasing espacial em relação à resolução espacial e a distância de medição. A metodologia englobou experimentos práticos e simulações computacionais.

Os resultados indicaram que a resolução espacial degradada com o aumento da distância de medição, intensificando o

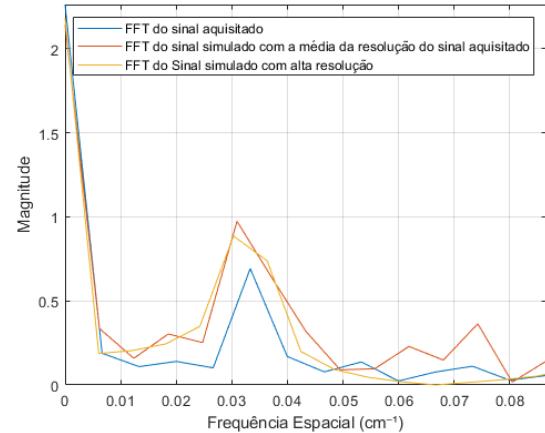


Figura 9. Espectro de frequência dos sinais a 4 metros dos sinais: adquirido, simulado com média da resolução e simulado de alta resolução.

efeito de aliasing. Isso destaca a necessidade de soluções para mitigar essas limitações. O protótipo reproduziu digitalmente os ambientes por meio de nuvens de pontos, com densidade suficiente para visualização detalhada dos aspectos relevantes. No entanto, fatores como ponto de vista, renderização e limitações de processamento podem influenciar a percepção final dos dados.

Em termos de transmissão e processamento de dados em tempo real, o protótipo atendeu às expectativas, com transmissão fluida e eficiente dos dados do sensor LiDAR para o sistema de visualização, via protocolo MQTT.

Trabalhos futuros podem explorar alternativas de uso dos sensores LiDAR considerando a variação da resolução com a distância, indicando protocolos de utilização conforme o nível de detalhamento requerido.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos membros do Grupo de Pesquisa em Sinais, Controle e Automação em Engenharia (SCAE) e do Grupo de Pesquisa em IOT - Conecte, pelas colaborações nas discussões e experimentos.

REFERÊNCIAS

- Besl, P.J. (1988). *Surfaces in Range Image Understanding*. Springer-Verlag, New York.
- Carter, J. et al. (2012). Lidar 101: An introduction to lidar technology, data, and applications. Technical report, NOAA Coastal Services Center, Charleston, SC, USA.
- Gonzalez, R.C. and Woods, R.E. (2000). *Processamento de Imagens Digitais*. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, Brasil.
- Lathi, B.P. (2008). *Sinais e sistemas lineares*. Bookman, Porto Alegre.
- Lichti, D.D. and Jamtsho, S. (2006). Angular resolution of terrestrial laser scanners. *The Photogrammetric Record*, 21(114), 141–160.
- Melin, M. et al. (2017). *Conservation Technology Remote Sensing: LiDAR*, volume 1 of *WWF Conservation Technology Series*. Woking, Surrey, United Kingdom.
- Vosselman, G. and Maas, H.G. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing, Dunbeath, Caithness, Scotland, UK.