

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ARTUR LOPES DE OLIVEIRA PINHEIRO

USO DE DRONE COMO FERRAMENTA PARA VOLUMETRIA DE MADEIRA EM
AMBIENTE DE FLORESTA

CURITIBA PR

2024

ARTUR LOPES DE OLIVEIRA PINHEIRO

USO DE DRONE COMO FERRAMENTA PARA VOLUMETRIA DE MADEIRA EM
AMBIENTE DE FLORESTA

Trabalho apresentado como requisito parcial à conclusão do Curso de Bacharelado em Ciência da Computação, Setor de Ciências Exatas, da Universidade Federal do Paraná.

Área de concentração: *Computação*.

Orientador: Eduardo Todt.

CURITIBA PR

2024

Ficha de aprovação

Substituir o arquivo 0-iniciais/aprovacao.pdf pela ficha de aprovação fornecida pela secretaria do programa, em formato PDF A4.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que me apoiaram durante toda minha vida acadêmica até então. Em principal a minha namorada Juliane Oliveira, que é meu alicerce em todas as dificuldades, que me apoiou e sempre me deu confiança para realizar aquilo que sou capaz, e ao meu enteadado Dante Oliveira, que enche minha vida de felicidade em todos os momentos. A existência de vocês 2 na minha vida é o que me manteve firme e me permitiu ir atrás das minhas conquistas, mesmo diante de todas as adversidades que a distancia da faculdade me causou.

Agradeço também minha mãe, Cecilia Oliveira, e meu irmão Hugo Oliveira, que me apoiaram durante toda a minha vida em todas as minhas empreitadas, mesmo em todas as dificuldades que vivemos. Agradeço ao meu falecido pai, Eduardo Pinheiro, que sei que está me guiando e me protegendo sempre que preciso, e que serve de modelo e inspiração para minha vida. Também expressei minha gratidão a todos os familiares que de alguma forma me auxiliaram e me apoiaram durante esse período.

Agradeço imensamente ao meu orientador Eduardo Todt, que ao longo de toda minha graduação foi um mentor para mim, desde meus primeiros momentos na universidade sempre me inspirou a buscar mais e sempre confiou na minha capacidade de desenvolver projetos e trabalhos cada vez maiores. Agradeço imensamente a confiança a parceria desenvolvida, e por me inspirar a seguir me aprofundando nos meus conhecimentos na área de robótica. Além disso, sou muito grato a todo o corpo de docentes, que me ensinaram durante essa jornada e para aqueles que se tornaram amigos pessoais ao longo dos anos compartilhados.

Agradeço aos meus amigos que dividiram esses últimos 3 anos comigo na Universidade Federal do Paraná, onde vivemos momentos alegres, tensos e tristes, porém a união da nossa amizade manteve as coisas mais agradáveis. Em especial, aos amigos mais próximos, com o qual dividi a maior parte do tempo, Marcus Vinícius e Muriki Yamanaka. Agradeço, enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para minha formação como pessoa e como estudante.

RESUMO

O ambiente florestal é um espaço crucial para a prática de inventário florestal, que visa à estimativa do volume de madeira em áreas específicas. Dado que a precisão na coleta de dados é fundamental para a gestão sustentável dos recursos naturais, é necessário desenvolver ferramentas que integrem tecnologias avançadas para esse fim. O objetivo geral deste estudo foi criar um protótipo robótico móvel utilizando um veículo aéreo não tripulado (UAV) e um sensor LIDAR, capaz de realizar o mapeamento de ambientes florestais. Tal objetivo foi motivado pela grande utilidade desse tipo de robô móvel em tarefas dessa natureza, visto que eles são capazes de operar autonomamente nesses ambientes, transportando um conjunto de sensores para a extração de métricas. A metodologia adotada consistiu em um estudo prático que envolveu a simulação de um ambiente florestal e a implementação de um sistema de comunicação baseado no Robot Operating System 2 (ROS2). O desenvolvimento do protótipo incluiu a criação de um ambiente simulado que apresentasse variação suficiente para servir como teste realista, a realização de voos autônomos do UAV utilizando informações dos sensores para se localizar e tomar decisões, a criação de todos os nós presentes na rede de comunicação e a coleta de dados para análise. Esses dados foram utilizados na geração de um mapa representando o ambiente percorrido, por meio da técnica de Simultaneous Localization and Mapping (SLAM), com posterior processamento de imagem para a extração de métricas florestais específicas. Os resultados demonstraram a eficácia e consistência da rede de comunicação ROS2 durante os experimentos, permitindo a integração de novos sensores e a adaptação do sistema para futuras pesquisas. Além disso, o protótipo obteve resultados significativos para a prática de inventário florestal, alcançando valores com precisão próxima a 100%, utilizando artifícios de processamento de imagem, fórmulas hipsométricas e volumétricas, e as informações capturadas pela simulação. Este trabalho evidencia a importância do uso de tecnologias como UAVs e LIDAR na melhoria da precisão do inventário florestal e demonstra a enorme capacidade de aprimoramento das pesquisas nessa área. Assim, espera-se que o protótipo desenvolvido contribua significativamente para a prática de inventário florestal, promovendo levantamentos mais eficientes e uma gestão mais sustentável dos recursos florestais.

Palavras-chave: Inventário Florestal. ROS2. UAV.

ABSTRACT

The forest environment is a crucial space for the practice of forest inventory, which aims to estimate the volume of wood in specific areas. Given that precision in data collection is essential for the sustainable management of natural resources, it is necessary to develop tools that integrate advanced technologies for this purpose. The general objective of this study was to create a mobile robotic prototype using an unmanned aerial vehicle (UAV) and a LIDAR sensor capable of mapping forest environments. This objective was motivated by the great utility of this type of mobile robot in such tasks, as they can operate autonomously in these environments, carrying a set of sensors to extract metrics. The adopted methodology consisted of a practical study that involved simulating a forest environment and implementing a communication system based on the Robot Operating System 2 (ROS2). The prototype development included the creation of a simulated environment that presented sufficient variability to serve as a realistic test, the execution of autonomous UAV flights using sensor data for localization and decision-making, the creation of all nodes in the communication network, and the collection of data for analysis. This data was used to generate a map representing the traversed environment through the Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) technique, with subsequent image processing for extracting specific forest metrics. The results demonstrated the efficiency and consistency of the ROS2 communication network during the experiments, enabling the integration of new sensors and system adaptation for future research. Additionally, the prototype achieved significant results in the practice of forest inventory, reaching values with precision close to 100%, using image processing techniques, hypsometric and volumetric formulas, and the information captured during the simulation. This work highlights the importance of using technologies such as UAVs and LIDAR to improve the accuracy of forest inventory and demonstrates the immense potential for advancing research in this area. Thus, the developed prototype is expected to contribute significantly to forest inventory practices, promoting more efficient surveys and fostering a more sustainable management of forest resources.

Keywords: Forest inventory. ROS2. UAV.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Exemplo de imagem gerada pelo Gazebo Ignition..	13
2.2	Exemplo de imagem gerada no RViz..	13
2.3	Exemplo de mapa criado pelo SLAM Toolbox	14
3.1	Exemplo de ambiente gerado para os testes	17
3.2	Modelo do drone utilizado nos testes	18
3.3	Exemplo de tela do Gazebo Ignition com o mapa proceduralmente gerado	19
3.4	Esquema demonstrando a estrutura dos nós do ROS2 criada para a execução do trabalho	21
3.5	Exemplo da tela do RViz durante a geração do mapa.	22
3.6	Exemplo de processamento do mapa gerado pelo Slam, com os círculos em azul demarcando a área do tronco no D_{ap}	23
4.1	Gráfico comparando a eficiência do D_{ap} obtido pelo drone com o real	25
4.2	Gráfico comparando a precisão utilizando o D_{ap} obtido pelo drone e com o D_{ap} real	26

LISTA DE TABELAS

2.1	Modelos Hipsométricos.	15
2.2	Modelos de Volume.	15
4.1	Métricas do modelo utilizado no experimento	24
4.2	Valores β obtidos para o modelo utilizado	24
4.3	Precisão obtida ao fim do experimento	25

LISTA DE ACRÔNIMOS

UAV	Unmanned Aerial Vehicle
ROS2	Robot Operating System 2
LIDAR	Light Detection And Ranging
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
RViz	ROS visualization
DDS	Data Distribution Service
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
SDF	Simulation Description Format
D_{ap}	Diâmetro à Altura do Peito
PGM	Portable Graymap

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVO GERAL	10
1.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	11
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO E TRABALHOS RELACIONADOS	12
2.1	ROBOT OPERATING SYSTEM 2 (ROS2)	12
2.2	MAPEAMENTO FLORESTAL UTILIZANDO UAVS	14
2.3	EQUAÇÕES PARA RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA E VOLUMETRIA	15
2.4	CONSIDERAÇÕES	16
3	DESENVOLVIMENTO DA PROPOSTA	17
3.1	PROPOSTA	17
3.2	METODOLOGIA	17
3.2.1	Simulação	17
3.2.2	Estrutura dos componentes do sistema	19
3.2.3	Rotina de mapeamento e geração do mapa	20
3.3	OBTENDO MÉTRICAS	21
4	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	24
4.1	EXPERIMENTOS	24
4.2	COEFICIENTES OBTIDOS	24
4.3	VALIDAÇÃO DAS MÉTRICAS	24
5	CONCLUSÃO	27
	REFERÊNCIAS	28

1 INTRODUÇÃO

A prática de inventário florestal é um dos principais desafios da exploração consciente dos recursos ambientais, em vias de maximizar o volume de matéria prima obtida, minimizando a área afetada. Ela consiste em estimar, de forma a ter o menor erro possível, o volume de madeira em uma determinada zona, normalmente um grande aglomerado de fauna e flora. Isso é útil para pesquisar tanto o crescimento de uma determinada zona florestal, quando esse inventário é aplicado recorrentemente em um determinado de tempo, quanto para determinar a quantidade de madeira que pode ser obtida ao explora-la, para fins de consumo sustentável da matéria prima vegetal (Araujo, 2006). A grande dificuldade desse processo é utilizar uma técnica que obtenha resultados próximos a realidade, enquanto seja facilmente replicável e rápido para processar uma área de grande extensão.

Uma parte importante de qualquer estudo que visa trabalhar com informações extraídas da realidade, é a forma como se obtém os dados. Existem diversas abordagens e técnicas para isso, mas o fator intrínseco a todas elas é que um grande volume de informações gera melhores resultados. Quanto mais dados, mais precisos ficam os métodos de computação para inferir informações do mundo real, de forma a manter a consistência entre os resultados obtidos e a realidade (Groetelaars e de Amorim, 2011).

Uma das ferramentas mais recorrentes utilizadas para a obtenção desses dados são os sensores do tipo Light Detection And Ranging (LIDAR), que vem tomando frente para o registro de nuvem de pontos, e, conseqüentemente, sendo utilizado para mapeamento e reconstrução de ambientes (Santos et al., 2019). Um dos motivos disso é, além da precisão e velocidade, a grande quantidade de informação que é possível se obter, comparado com outros métodos que exigem mais processamento dos dados e apresentam resultados não tão exatos, como sonares e câmeras RGB-D.

Outra ferramenta que vem sendo cada mais utilizada para essas técnicas são os veículos aéreos não tripulados (VANT/ UAV, Unmanned Aerial Vehicle/ DRONE), que se tornam muito atrativas pela sua capacidade de percorrer longas áreas de forma autônoma ou assistida, agilizando a captação de resultados e alcançando áreas previamente muito difíceis de serem alcançadas (dos Santos e Farina, 2022). Além disso, é capaz de ser usado como vetor para outros equipamentos, que podem ser utilizados de diversas aplicações de robótica móvel, como por exemplo, percorrer uma extensa zona carregando equipamentos de medição para capturar dados.

O uso de drones e sensores LIDAR em certas práticas da agricultura não é novidade, e é bem comum que sejam considerados em problemas que exijam grande cobertura de área ou obtenção de grande volume de dados (de Oliveira et al., 2020). As características que propiciam o uso dessas tecnologias também podem ser observadas no universo do inventário florestal. Portanto, é habitual considerar a utilização de ambos neste cenário.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um protótipo, utilizando um veículo aéreo não tripulado e o sensoriamento feito com base em um sensor LIDAR, capaz de efetuar o mapeamento de um ambiente florestal, a fim de obter uma técnica de inventário florestal que consiga estimar o volume de madeira dentro de uma zona avaliada.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Nesse contexto, este trabalho tem por objetivo específico:

- Criar um ambiente simulado no gazebo que corresponda a um corredor de árvores;
- Simular o voo autônomo de um UAV carregando sensores;
- Utilizar a tecnologia LIDAR para mapear um ambiente, utilizando SLAM;
- Obter, a partir de um mapeamento, a quantidade de árvores de um ambiente e o valores desejados de cada uma delas;

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos, seguindo a seguinte estrutura: O capítulo 1 será de introdução, o capítulo 2 de referencial teórico e trabalhos relacionados, onde serão trazidos a tona materiais pertinentes para a temática abordada, o capítulo 3 de desenvolvimento da proposta, onde serão abordadas os planejamentos, conceitos e metodologias utilizados para por em prática a ideia central do trabalho, o capítulo 4 de experimentos e resultados, onde serão discutidos as métricas obtidas e quais baterias de experimentações foram feitas para obter essas métricas, e por fim o capítulo 5 de conclusões, abordando tudo que foi realizado e as considerações finais sobre esse projeto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO E TRABALHOS RELACIONADOS

O presente capítulo tem por objetivo trazer uma coletânea de conceitos presentes na literatura sobre as ferramentas utilizadas na pesquisa e no desenvolvimento deste trabalho, a fim de subsidiar o projeto para a criação de um protótipo que faça o mapeamento de ambientes florestais.

2.1 ROBOT OPERATING SYSTEM 2 (ROS2)

Pensando no uso de ambientes simulados para prototipação e implementação de tecnologias para mapeamento de ambientes, foi usada a plataforma ROS2 (Robot Operating System), um framework de código aberto que permite a criação de projetos robóticos a nível individual ou grupal, operando com diversas linguagens de programação, além de propiciar a comunicação entre diferentes dispositivos e integração com outras funcionalidades para aumentar a gama de dados obtidos no teste (Macenski et al., 2022).

É importante destacar que o ROS2 é uma continuação do projeto do Robot Operating System (ROS), que melhora diversos aspectos da versão original, como a segurança da comunicação, consistência e tipo da conexão entre os diferentes hardwares ligados na rede, integração com outras ferramentas, permitindo maior autonomia e flexibilidade para o projeto (Bonci et al., 2023). Um dos principais responsáveis por isso é a conexão DDS (Data Distribution Service) como padrão para a comunicação entre os nós, que tem se tornado cada vez mais relevante para sistemas de distribuição de dados com o estilo cliente-servidor, principalmente no quesito da "Internet das Coisas", que se refere a uma rede de objetos e dispositivos que estão conectados e equipados com sensores e outras tecnologias, permitindo que recebam e transmitam dados, que utilizam muito este protocolo de comunicação devido a sua segurança, confiabilidade da integridade dos dados e sua alta capacidade de regulação do controle de fluxo. (Du et al., 2022) Os nós são um conceito importante dentro do desenvolvimento de aplicações com o ROS2, pois são eles as entidades que compõem o grafo da aplicação, se comunicando utilizando uma biblioteca pré-estabelecida para que alguns deles funcionem como cliente e outros funcionem como servidor, sendo o ROS2 uma integração entre os nós para que eles se comuniquem e apresentem os resultados. Os nós podem mandar comandos para outros nós, gerar representações visuais dos dados obtidos por outro nó ou ainda, mas não limitado a, servir como simulação do ambiente (Macenski et al., 2022).

Uma das principais ferramentas para criar o ambiente de simulação utilizando o ROS2 é o Gazebo, uma plataforma de simulação que compreende uma diversificada gama de sensores utilizados em robótica, como câmeras, LIDAR, GPS e IMU. Além disso, ele conta com um grande suporte de comunidade e atualizações constantes para manter a estabilidade e a performance do programa, agregando a modularidade para que diversos projetos de diferentes naturezas possam ser realizados nele. Ele permite aos desenvolvedores testarem algoritmos em um ambiente controlado, com mundos gerados em ambiente virtual para melhor atender as necessidades do projeto (Gazebo, 2024). O Gazebo utiliza um arquivo ".sdf" para carregar um mapa pré-definido, que traz diversas características de cada objeto presente no ambiente simulado, como posicionamento, se o objeto permite colisão com o robô do simulador, como é a forma física que aparece para os usuários, o tamanho da área de colisão, entre outras funcionalidades. Isso permite uma execução rápida de testes diversos no mesmo ambiente e permite a geração procedural do mundo a ser estudado, como mostra a figura 2.1.

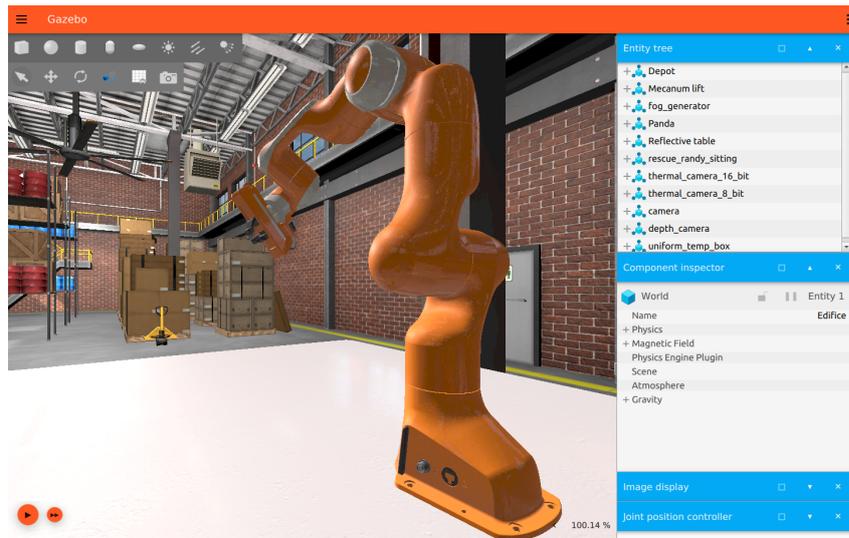


Figura 2.1: Exemplo de imagem gerada pelo Gazebo Ignition.

Outra ferramenta importante de visualização é o RViz (ROS visualization), que agrega as diversas informações do percurso realizado e gera uma nuvem de pontos que possa ser interpretada de forma objetiva (um modelo 3D, uma imagem ou ainda um grafo para ser processado), como exemplificado na figura 2.2. Outra grande característica do RViz é a simulação em tempo real dos dados obtidos pelos nós com sensores, aumentando a profundidade da utilização da ferramenta para o desenvolvimento e teste, principalmente aliada aos ambientes controlados de teste no Gazebo (Macenski et al., 2022).

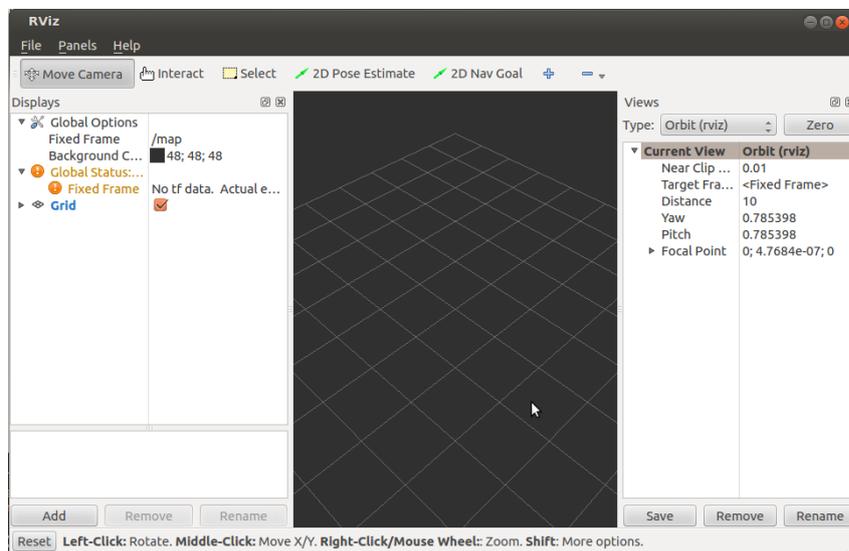


Figura 2.2: Exemplo de imagem gerada no RViz.

Entretanto, o RViz apenas permite a visualização, porém ele não tem nenhuma ferramenta de mapear a trajetória do robô a partir dos sensores que ele demonstra. Para isso, é necessário um método de SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), como o SLAM Toolbox (Macenski e Jambrecic, 2021) ou o Cartographer (Hess et al., 2016), ferramentas criadas e já integradas a algumas distribuições do ROS2, que permitem, utilizando as posições relativas entre as entidades e os dados dos sensores, criar uma representação visual dos sensores, principalmente os de 2 dimensões, como o LIDAR. Os SLAMs, em sua maioria, criam um nó na rede ROS2, escutando

os tópicos (normalmente, o tópico com informações das posições relativas dos componentes e o tópico com as informações de sensor) e a partir disso, cria uma imagem correspondente as leituras e o deslocamento pelo mapa do robô, como o exemplo da figura 2.3.



Figura 2.3: Exemplo de mapa criado pelo SLAM Toolbox

2.2 MAPEAMENTO FLORESTAL UTILIZANDO UAVS

As zonas de plantação florestal são majoritariamente cultivadas para fins do uso da madeira como matéria prima para a produção de papel e celulose, carvão vegetal, painéis de madeira e construção civil, entre outras aplicações industriais. Elas são organizadas normalmente em um ambiente controlado, com espaçamento regular entre elas e dispostas em corredores (Trentin et al., 2018). Uma particularidade importante a ser observada, para maximizar o aproveitamento da matéria-prima dessa zona plantio, é a mensuração florestal, onde se extrai diversas informações das árvores presentes no ambiente, como a quantidade de biomassa, volume de madeira presente, volume de madeira aproveitável, quantidade de árvores presentes na região, nível de crescimento, entre outros. Esses valores e informações são obtidos por meio de inferência estatística e análise de uma série de equipamentos, que são muitas vezes caros ou de difícil acesso, dificultando assim o trabalho de mensuração florestal (Van Laar e Akça, 2007).

A mensuração florestal, como definida por Prodan (Prodan, 1997), é o ramo da ciência florestal responsável por determinar, a partir de estimativas e dados obtidos, a quantidade de recursos de árvores, povoamentos e florestas, de seu crescimento e subprodutos florestais. Um dos objetivos a ser alcançado por esta área é o Rendimento sustentável, caracterizado por um equilíbrio entre a quantidade retirada de produtos florestais e o crescimento, mantendo a capacidade da floresta ou plantio para fornecer permanente e racionalmente seus produtos florestais. Diversos estudos têm o objetivo de diminuir os erros nas estimativas, enquanto reduzem também a quantidade de amostra necessária para realizar os cálculos, visto que abater uma árvore para estimar seu volume é um processo custoso que deve ser feito de forma controlada e precisa. Uma das técnicas de estimativa utilizadas para obter o volume das árvores é a observação de alguns espécimes e o uso de relações hipsométricas, equações volumétricas e de afilamento, ajustadas de tempos em tempos, para a estimativa dos outros indivíduos, bem como de diferentes espécies ou regiões. As principais medidas usadas para levantamentos florestais são a altura total e os diâmetros medidos em diversas alturas em relação ao solo. O Diâmetro à Altura do Peito

(D_{ap}) é a medida do diâmetro da árvore a 1,3m e a Altura Total (H_t) é a altura total da árvore, da base ao topo.

2.3 EQUAÇÕES PARA RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA E VOLUMETRIA

A relação hipsométrica é a relação obtida entre o D_{ap} e a altura da árvore, sendo assim, é possível obter a altura e o volume da árvore apenas a partir do D_{ap} , a partir da relação hipsométrica da espécie analisada. Dessa maneira, o processo de mensuração florestal obtém uma redução grande de custos, pois não necessita mais da derrubada de árvores para medição ou do uso de equipamentos de valor alto, como o Hipsômetro (Ker e Smith, 1956). Existem diversos modelos presentes na literatura para obter o valor dessa relação, como apresenta Caldeira et al. (2002). Extraindo os modelos que utilizam apenas o D_{ap} , algumas opções permanecem como alternativas para o cálculo, como demonstrado na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Modelos Hipsométricos

Nome	Modelo	Coefficientes
Parabólico/Trorey	$h = \beta_0 + \beta_1 \cdot dap + \beta_2 \cdot dap^2$	$\beta_0, \beta_1, \beta_2$
Stoffels	$\ln h = \beta_0 + \beta_1 \ln dap$	β_0, β_1
Curtis	$h = \beta_0 + \frac{\beta_1}{dap}$	β_0, β_1
Logarítmico	$\ln h = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{dap}\right) + \beta_2 \left(\frac{1}{dade}\right) + \beta_3 \left(\frac{dap}{dade}\right)$	$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$
Prodan	$h = \frac{dap^2}{\beta_0 + \beta_1 \ln dap + \beta_2 \cdot dap}$	$\beta_0, \beta_1, \beta_2$

As variáveis β são coeficientes de regressão obtidos através de experimentação para cada espécie de árvore, variando entre cada uma. Os modelos presentes na figura 2.1 foram selecionados por possuírem, além do critério citado, melhor coeficiente de determinação ajustado e menor erro padrão da estimativa e coeficiente de variação em percentagem. A partir da obtenção da altura, é possível utilizar os métodos de predição volumétrica para determinar o volume, como apresentado por Clutter (1983), usando diversas fórmulas, como as da tabela 2.2.

Tabela 2.2: Modelos de Volume

Autor	Modelo
Spurr	$v = \beta_0 + \beta_1 dap^2 h + \varepsilon$
Spurr (log)	$\ln v = \beta_0 + \beta_1 \ln(dap^2 h) + \varepsilon$
Schumacher-Hall	$v = \beta_0 dap^{\beta_1} h^{\beta_2} + \varepsilon$
Schumacher-Hall (log)	$\ln v = \beta_0 + \beta_1 \ln dap + \beta_2 \ln h + \varepsilon$
Honner	$v = \frac{dap^2}{\beta_0 + \beta_1 h} + \varepsilon$
Ogaya	$v = dap^2 (\beta_0 + \beta_1 h) + \varepsilon$
Stoate	$v = \beta_0 + \beta_1 dap^2 + \beta_2 dap^2 h + \beta_3 h + \varepsilon$
Naslund	$v = \beta_0 + \beta_1 dap^2 h + \beta_2 daph + \beta_3 h^2 + \varepsilon$
Takata	$v = \frac{dap^2 h}{\beta_0 + \beta_1 dap} + \varepsilon$
Meyer	$v = \beta_0 + \beta_1 dap + \beta_2 dap^2 + \beta_3 daph + \beta_4 dap^2 h + \beta_5 h + \varepsilon$

Com isso, é possível obter o volume das árvores a partir do D_{ap} (diâmetro a altura do peito) e dos coeficientes previamente obtidos pela espécie da árvore.

2.4 CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo, foi possível observar as principais abordagens teóricas relacionadas com a prática do inventário florestal e a utilização de técnicas de comunicação e simulação de robótica na automação de ferramentas para este fim. Destaca-se o ROS2 como ferramenta imprescindível para estabelecer rotinas e integração entre diversos componentes de um robô móvel. Também é importante destacar as equações volumétricas e hipsométricas catalogadas por Caldeira et al. (2002), que fazem um papel fundamental no quesito a validação das funcionalidades propostas e servem de alicerce para a proposta do presente trabalho, visto que a obtenção do volume a partir do D_{ap} é o princípio no qual se baseia a metodologia utilizada.

3 DESENVOLVIMENTO DA PROPOSTA

O seguinte capítulo se propõe a apresentar a metodologia utilizada para o desenvolvimento do protótipo com a finalidade anteriormente descrita.

3.1 PROPOSTA

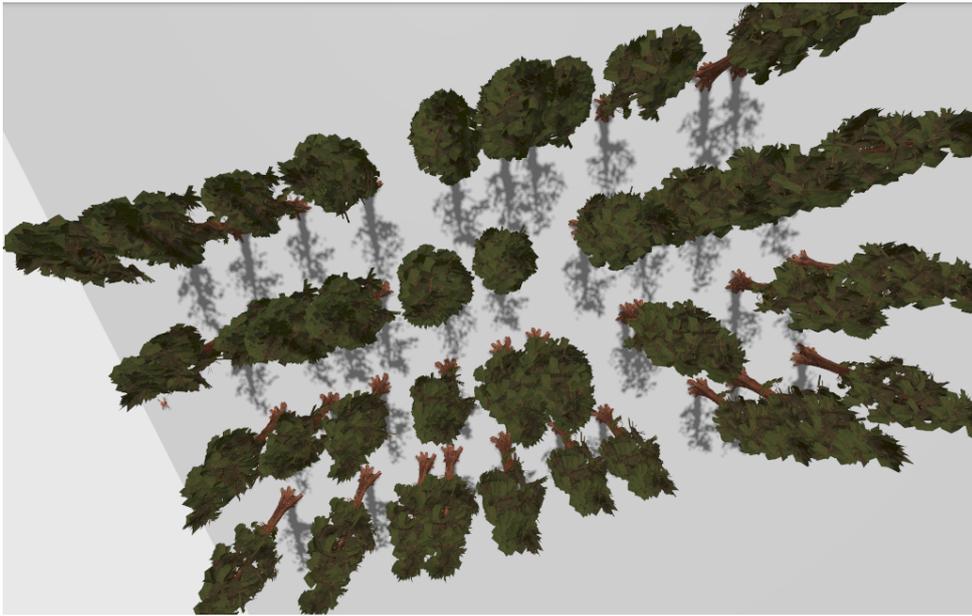


Figura 3.1: Exemplo de ambiente gerado para os testes

O ambiente a ser analisado consiste em um corredor, ou seja, um espaço vazio entre 2 fileiras de árvores, espaçadas de forma não homogênea, tanto entre a fileira de árvores quanto a seu par do outro lado do caminho. Pelo meio do corredor, passa um UAV, carregando um conjunto de sensores capazes de extrair dados relevantes para a navegação e para o mapeamento. Esses dados são então processados simultaneamente ao deslocamento do robótico móvel, para tanto enviar os comandos de deslocamento quanto para processar os dados e gerar uma nuvem de informação suficientemente necessária para, utilizando ferramentas de pós processamento, obter o D_{ap} de cada uma das árvores presentes no ambiente, como demonstrado na figura 3.1.

3.2 METODOLOGIA

Nesta seção, será apresentado todo o desenvolvimento realizado no experimento prático. Ele foi feito com a intenção de saciar a proposta, a fim de realizar uma validação da ideia utilizando os métodos a seguir descritos.

3.2.1 Simulação

Para o experimento prático, foi decidido utilizar o simulador gazebo, em conjunto com scripts e rotinas pré-programadas, para criar uma simulação do voo de um UAV em corredor florestal, a fim de mensurar o volume de madeira. Primeiramente, foi desenvolvido um programa

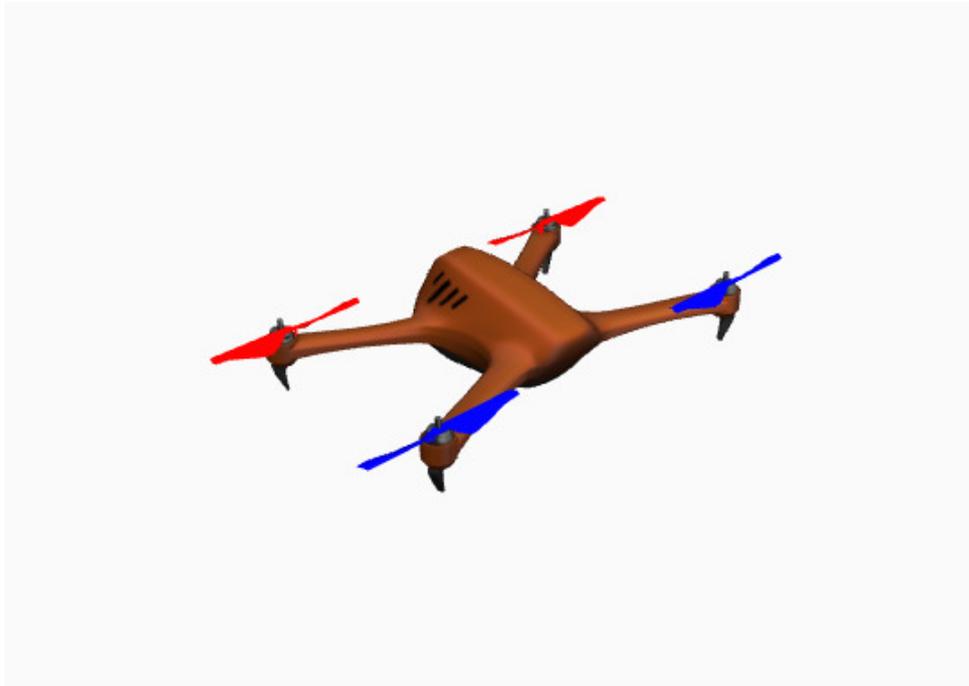


Figura 3.2: Modelo do drone utilizado nos testes

em Python para gerar os ambientes de teste da simulação. Esse programa cria um arquivo ".sdf", usando alguns parâmetros passados na chamada e montando de forma que ele tenha diferenças entre os mapas gerados. Esses parâmetros são a quantidade de pares de árvores que serão incluídos no arquivo, uma de cada lado do drone, e o nome do arquivo sdf a ser gerado após a execução do programa. Por padrão, esses argumentos são 10 e "map.sdf", respectivamente. Ao executar o programa, ele inicia pelo cabeçalho do arquivo SDF, colocando as informações necessárias para que o mapa seja carregado corretamente. Logo após isso, ele carrega o solo e o modelo do drone a ser usado, alinhado ao centro do corredor e antes da primeira árvore. O modelo do drone foi obtido da biblioteca do Gazebo Ignition, que está sendo utilizado nesse trabalho para rodar as simulações. O modelo escolhido (OpenRobotics, 2023), mostrado na figura 3.2, é composto por uma base com 4 hélices separadas entre si, com 2 sensores adicionados na parte inferior do modelo, e não possui um IMU, portanto foi considerada a posição do modelo no ambiente simulado como as informações de odometria. Ele foi configurado para traduzir informações de deslocamento linear e angular para rotações das hélices. Para o experimento, foi considerada velocidade de 1 m/s de deslocamento linear, e não foram feitas rotações angulares durante o percurso, portanto essa velocidade não foi definida.

A escolha desta distribuição do Gazebo se dá pela estrutura de plugins e rede de comunicação, similar a estrutura do ROS2, permitindo assim simplificar algumas comunicações entre os sensores e para comandar o voo do drone. Utilizando o plugin teleop é possível definir a velocidade linear e angular do modelo, publicando mensagens do tipo twist, que pela configuração escolhida, define o movimento do drone linearmente apenas em 2 direções, no eixo X do drone e no eixo Z, e o movimento angular ao redor do eixo Z, permitindo assim mover o drone em todas as direções desejadas. Além disso, para fazer o mapeamento do ambiente, foi realizada a adição de dois sensores do tipo "gpu_lidar" ao modelo, importados dos tipos de sensores padrão do Gazebo. O primeiro, fazendo a leitura na horizontal, com 1440 pontos de informação ao redor dos 360 graus, enquanto o segundo faz a medição na vertical, com apenas um ponto de informação, apontando para o chão. Logo após, o programa carrega as árvores no mapa, em

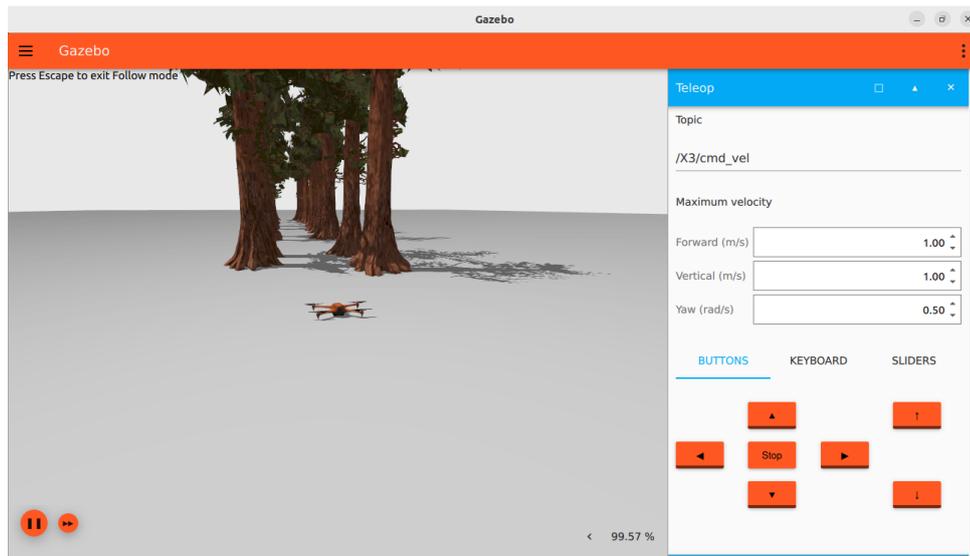


Figura 3.3: Exemplo de tela do Gazebo Ignition com o mapa proceduralmente gerado

pares, até a quantidade de pares definida na entrada. As árvores da esquerda são colocadas na coordenada -1 e as da direita são colocadas na 1, com um leve desvio de até 0,5 para cada um delas, definido de forma pseudoaleatória pela biblioteca "Random". Cada par é colocado a 2,5 unidades de distancia do próximo, usando um desvio de até 1 para cada lado definido de forma pseudoaleatória, a fim de criar um padrão de posicionamento não uniforme, com o intuito de simular a realidade. As árvores também são rotacionados em um angulo pseudo aleatório no eixo Z, permitindo que o drone obtenha leituras diferentes da superfície das árvores. Por fim, as árvores são redimensionadas em um valor entre 125% a 150% do tamanho original do modelo, para ter uma variação do volume entre cada amostra. Os valores de redimensionamento são salvos e armazenados em um arquivo ".txt" com o mesmo nome do mapa gerado. Além da variação de volume, o arquivo também registra outras informações importantes para a próxima etapa do desenvolvimento do experimento, como altura do primeiro par de árvores e o volume total da floresta gerada. Os modelos das árvores foram extraídos do repositório de Kubja (2024) e com o auxílio da ferramenta Blender, foram removidas as folhas e extraídos do modelo Tree_4.obj (que foi utilizado na geração dos mapas) as informações de volume da malha do objeto 3D e a altura do modelo sem redimensionamento. A extração das folhas se fez necessário para obter informações precisas sobre o volume de madeira presente no modelo, visto que elas representavam 45,8% do volume do modelo. Uma representação do software pode ser vista na figura 3.3, enquanto uma visualização do ambiente criado está presente na figura 3.1.

3.2.2 Estrutura dos componentes do sistema

Foi utilizado o Gazebo Ignition em conjunto com o ROS2 para estabelecer a comunicação entre os processos e os componentes do sistema. A distribuição do ROS2 escolhida foi o ROS Humble, devido a ser uma distribuição mais estável e com amplo suporte, já possuindo diversas ferramentas integradas e com garantia de manutenção por um período prolongado, permitindo integração deste projeto com outros futuros.

No desenvolvimento do projeto, se observou que o Gazebo Ignition já cria uma estrutura de tópicos e uma rede de comunicação que se assemelha a do ROS2, porem os tópicos não são equivalentes, pois trocam mensagens com estruturas diferentes. Por exemplo, as mensagens de laser do Gazebo Ignition, que são do tipo `ignition::msgs::LaserScan`, não possuem o mesmo

cabeçalho que as mensagens `sensor_msgs/msg/LaserScan`, utilizadas pelo `achandoROS2`, e serviços e processos que utilizam as informações dos tópicos (como o `RViz` e o `Slam Toolbox`) não são capazes de ler as informações publicadas nos tópicos do `Ignition`. Por isso, foi criada uma estrutura de ponte entre essas informações, que é uma tradução direta feita pelo `ROS2` utilizando o pacote `ros_gz_bridge`, como para o tempo da simulação (do tópico `/clock`) e para os dados do laser (que foi convertido para o tópico `/laser_scan`). Outros tópicos não tem tradução direta com essa biblioteca, por isso foi criado um programa que cria e publica no tópico, servindo como um tradutor entre o `Gazebo` e o `ROS2`. Isso foi usado para o tópico `/Odometry`, que publica a posição do robô em relação ao mapa (que é usada posteriormente no `Slam Toolbox` para fazer o mapeamento do ambiente). Outro programa criado para fazer tradução entre os tópicos é um programa que faz a conversão dos frames. Frames no `ROS2` são as referências de posição dos elementos, que são associados a outros frames para assim criar uma relação entre eles. Esses frames são de suma importância pois são eles que determinam o posicionamento do robô em relação ao mundo, o posicionamento dos sensores em relação ao corpo do robô e o posicionamento da medição em relação ao robô, para que seja possível calcular o mapa. Essas informações são todas publicadas no tópico `/TF`. Um esquema representando essas traduções se encontra na Figura 3.4, onde é possível notar a estrutura da rede criada.

Dessa maneira, a estrutura do trabalho pode ser descrita com 3 grande nós operando, cada um sendo um processo a parte, que utilizam o espaço de troca de mensagens do `ROS2` para fazer a comunicação. O primeiro processo, o `Gazebo`, traz um grande número de tópicos internos a ele, porém que não se integram a estrutura iniciada pelo `ROS2`. Essa integração se dá pelas pontes, que traduzem as informações e fazem a conversão dos tipos das mensagens para garantir compatibilidade. Existem outros tópicos além dos representados na figura 3.4, porém eles não são relevantes para o experimento. Além das bridges, existem 3 programas interagindo com os tópicos do `ignition`, que é o `lidar_control`, que utiliza as informações do laser vertical para comandar o voo autônomo do UAV, e o `get_pose` e `transform_publisher`, responsáveis por fazer a conversão e adaptação das posições dos componentes da simulação para a estrutura necessária pelo segundo nó operando, o `SLAM Toolbox`. Por fim, o `RVIZ` obtém as informações necessárias e faz a conversão dos dados em imagem, para que possa ser acompanhado em tempo real a criação do mapa, como ilustra a Figura 3.5.

A Figura 3.4 trás as informações de alguns processos e seus serviços que utilizam as informações desses tópicos, como o `RViz`, que lê o tópico `/TF`, `/Map` e `/Laser` para obter as informações da visualização, e o `Slam Toolbox`, que lê o tópico `/TF`, em conjunto com o `/Laser`, `/clock` e o `/Odometry` para criar o mapa (ele é quem publica no tópico `/Map`). É possível reparar isso pelo direcionamento das setas, indicando quem publica no tópico (com a seta apontando para o tópico) ou quem recebe as informações (com a seta apontando para o barramento do nó).

3.2.3 Rotina de mapeamento e geração do mapa

Após o desenvolvimento dos programas de conversão, foi trabalhado o algoritmo de voo autônomo do drone, para que ele consiga fazer o mapeamento autônomo do ambiente, e para que ele se mantenha a uma altura constante, a fim de manter as medições o mais precisas possível. Inicialmente, o drone se eleva verticalmente, até a altura de 1,3 metros e viaja através do corredor de árvores, sempre analisando o lidar vertical para se manter na altura desejada. Ao chegar ao final do corredor, que ele detecta ao receber leituras infinitas de todos os sensores horizontais, indicando que não existem árvores ao redor, ele desce verticalmente, encerrando as medições, e salvando o mapa gerado pelo `Slam Toolbox`. Os parâmetros de configuração dos frames e do mapeador, estão presentes em um arquivo `YAML`, que conta também com diversas informações sobre tempo de atualização do mapa (0,2 segundos), tempo de armazenar uma informação antes

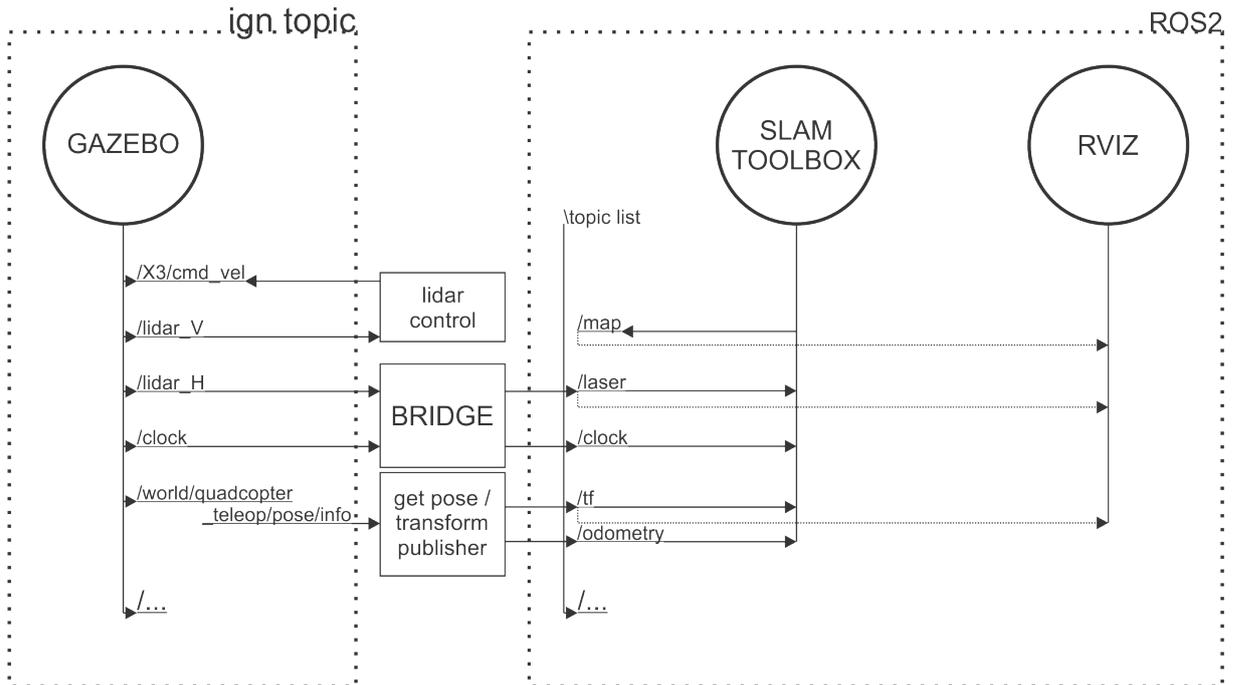


Figura 3.4: Esquema demonstrando a estrutura dos nós do ROS2 criada para a execução do trabalho

de descartar (2 segundos) e resolução do mapa (5cm por pixel), que são importantes para definir a quantidade de informações obtidas no mapa.

Com isso, o mapa é automaticamente salvo pelo programa que cria o voo, gerando uma imagem ".pgm"(Portable Graymap), que possui em pontos pretos os obstáculos localizadas pelo sensor do Drone simulado. Cada um dos pixels da imagem representa 5 centímetros no mundo simulado, sendo assim, aplicando as conversões, é possível obter as valorações da simulação, a partir de técnicas de processamento de imagem.

3.3 OBTENDO MÉTRICAS

Com os dados obtidos durante a simulação, é utilizado um programa em Python para obter o valor de circunferência das semi-circunferências presentes na imagem. Esses valores são então aplicadas nas equações escolhidas, que combina a relação hipsométrica e a formula de cálculo volumétrico, para a partir apenas do D_{ap} , obter o volume total de madeira de cada uma das árvores presentes na medição. As fórmulas usadas como base foram Curtis e Spurr, das tabelas 2.1 e 2.2 respectivamente, por apresentarem menor desvio padrão nos testes realizados.

O algoritmo utilizado para obtenção dos diâmetros das árvores da simulação, faz um processamento dos dados obtidos, com uma busca em profundidade para detectar um conjunto de pontos pretos. Assim que localizar o primeiro ponto, busca entre os vizinhos dele outros pontos pretos. Assim que achar todos os pontos conectados, ele armazena o conjunto e continua processando a imagem. Ao fim da busca, para cada um dos conjuntos detectados, se aplica uma função que detecta, dentro desses pontos, um par de pontos que estejam mais distantes entre si dentre todos os pares. Após isso, obter um ponto médio entre eles e detectar um terceiro ponto, dentre o conjunto de pontos pretos, que esteja mais distante do ponto médio. Com as coordenadas dos 3 pontos, aplicar os valores deles em um sistema de equações para obter a fórmula que descreve a circunferência que passa pelos 3 pontos. O diâmetro desta circunferência é o D_{ap} da árvore analisada, representados pelos círculos azuis presente na figura 3.6. O pseudocódigo que descreve essas ações está disposto no algoritmo 1.

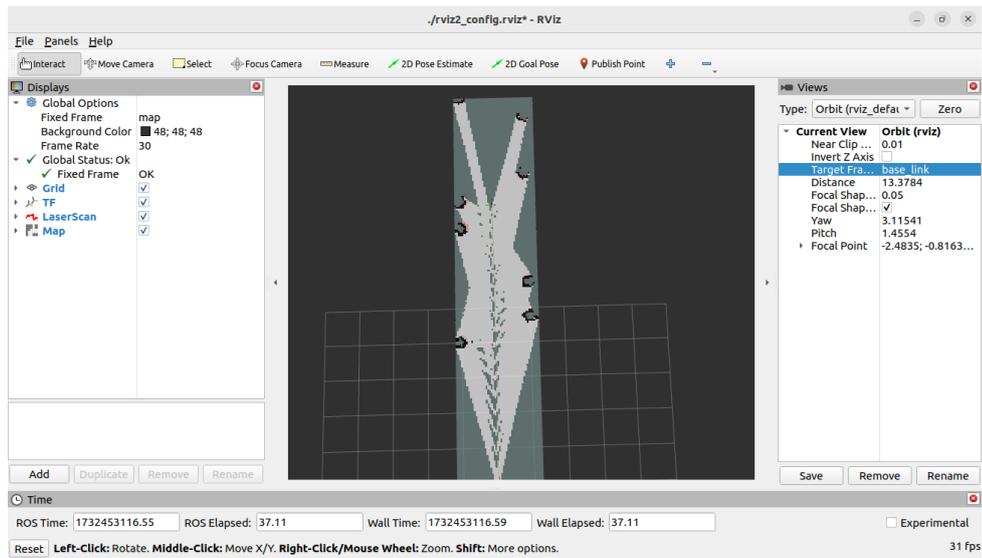


Figura 3.5: Exemplo da tela do RViz durante a geração do mapa.

Algoritmo 1 Cálculo do Diâmetro das Árvores (D_{ap})

Entrada: Conjunto de pixels \mathcal{P} da imagem

Saída: Diâmetros D_{ap} das circunferências das árvores

Inicializar $C \leftarrow \emptyset$ // Conjuntos detectados

Inicializar $\mathcal{M} \leftarrow \emptyset$ // Pontos já processados

for all $p \in \mathcal{P}$ **do**

if $p \notin \mathcal{M}$ e p é preto **then**

 Inicializar $C \leftarrow \emptyset$ // Novo conjunto de pontos conectados

 Fazer busca em profundidade (DFS) a partir de p

 Adicionar todos os pontos conectados a C

$C \leftarrow C \cup \{C\}$

$\mathcal{M} \leftarrow \mathcal{M} \cup C$

end if

end for

for all $C \in \mathcal{C}$ **do**

$d(p_i, p_j) \leftarrow \max\{d(p, q) \mid p, q \in C\}$ // Maior distância

 Sejam $p_1, p_2 \in C$ tal que $d(p_1, p_2)$ é máximo

 Calcular ponto médio $p_M \leftarrow \frac{p_1 + p_2}{2}$

 Encontrar $p_3 \in C$ tal que $d(p_M, p_3) = \max\{d(p_M, p) \mid p \in C\}$

 Resolver sistema de equações para determinar a circunferência que passa por p_1, p_2 e p_3

$$\begin{cases} (x_1 - h)^2 + (y_1 - k)^2 = r^2 \\ (x_2 - h)^2 + (y_2 - k)^2 = r^2 \\ (x_3 - h)^2 + (y_3 - k)^2 = r^2 \end{cases}$$

 Determinar $D_{ap} \leftarrow 2r$

 Armazenar D_{ap}

end for

Retornar $\{D_{ap} \mid C \in \mathcal{C}\}$

Por fim, para identificar a qualidade do método, vão ser comparados os valores obtidos com drone com os valores reais do modelo, divididos em 2 tipos: Volume calculado e Volume

real. O Volume calculado será obtido utilizando o D_{ap} real dos modelos nas equações. Utilizando um algoritmo de busca em profundidade, são detectadas as árvores no arquivo ".pgm" gerado, que contem as informações obtidas pelo LIDAR e pelos sensores de odometria.



Figura 3.6: Exemplo de processamento do mapa gerado pelo Slam, com os círculos em azul demarcando a área do tronco no D_{ap}

4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

4.1 EXPERIMENTOS

Utilizando a ferramenta Blender (Community, 2018), foi extraído as informações para calcular os valores β para as formulas utilizadas adiante. Utilizando a extensão "3D print preview", foi obtido o volume do objeto, após a retirada das folhas utilizando o mode de edição de malhas 3D nativo da aplicação. Também foi extraída a altura do objeto, sem as folhas, e foram feitas seções horizontais em uma altura de 1,3m em 2 escalas do modelo, para se obter o D_{ap} real dos modelos em seu tamanho mínimo e máximo na simulação. Foram realizados os testes de 100 modelos de árvores dispostos em 5 mapas de medição diferentes, cada um contendo 20 árvores. Para o cálculo do D_{ap} , foi comparado o resultado calculado a partir da imagem ".pgm" com os valores reais de D_{ap} fornecidos pelo gerador de mapa. Para altura e para volume, foram feitas as comparações entre o cálculo a partir da medição com os valores reais fornecidos pelo programa (altura e volume reais dos modelos), e a comparação entre as medições e o valor calculado a partir do D_{ap} real do modelo, afim de comparar com a eficiência de técnicas de equação volumétrica e equação hipsométrica reais.

4.2 COEFICIENTES OBTIDOS

Utilizando o Blender, os seguintes valores para D_{ap} , Altura e Volume do modelo utilizado na simulação foram obtidos, nas proporções mínimas e máximas que os modelos podem assumir dentro da simulação (modelo com 100% e 125% do tamanho, respectivamente).

Variável	Valor Mínimo	Valor Máximo
$D_{ap}(m)$	0,372	0,443
$H_t(m)$	5,35	6,42
$v(m^3)$	25,76	44,59

Tabela 4.1: Métricas do modelo utilizado no experimento

Utilizando esses valores e aplicando em um sistema simples, foram obtidos os seguintes valores para determinar os β da equação hipsométrica de Curtis e para a equação volumétrica de Spurr.

Nome	Fórmula	β_0	β_1
Curtis	$h_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot \frac{1}{D_{ap}}$	12,026	-2,483
Spurr	$v = \beta_0 + \beta_1 \cdot D_{ap}^2 \cdot h_t$	-1,264	36,421

Tabela 4.2: Valores β obtidos para o modelo utilizado

4.3 VALIDAÇÃO DAS MÉTRICAS

Foram catalogados cada um dos valores obtidos das 100 árvores analisadas, e, após aplicar os valores nas equações, foi calculado a média da precisão entre os valores, utilizando a seguinte fórmula:

$$Media_p = \left(\frac{D_{apD}}{D_{apR}} \right) \times 100$$

Onde D_{apD} é o D_{ap} obtido pelo processamento de imagem do drone e D_{apR} é o D_{ap} real da árvore comparada.

Foi também extraído o desvio padrão dos resultados, para melhor demonstrar a precisão do experimento em relação a realidade. Estes dados estão dispostos na Tabela 4.3, e demonstram uma boa precisão do método de obtenção de D_{ap} e por consequência de obtenção da altura. Entretanto, pela natureza cúbica da equação volumétrica, a propagação de erros acaba gerando uma precisão menor na estimativa do volume.

Métrica	Média de precisão (%)	Desvio padrão (%)
$D_{ap}(m)$	101,39	4,95
$H_t(m)$	101,91	4,85
$v(m^3)$	104,63	18,69

Tabela 4.3: Precisão obtida ao fim do experimento

Os resultados apresentam uma precisão satisfatória, principalmente utilizando os métodos de processamento de imagem utilizados, que foram mais simplificados e buscavam um valor aproximado para o D_{ap} . Outra informação importante a ser extraída é que, apesar de apresentar um alto desvio padrão, o valor médio das predições volumétricas manteve uma distancia baixa em relação ao valor original. Abaixo, também é possível visualizar graficamente os resultados, além da comparação com os resultados que seriam obtidos utilizando técnicas tradicionais, usando a medição verdadeira do D_{ap} e aplicando nas equações anteriormente propostas.

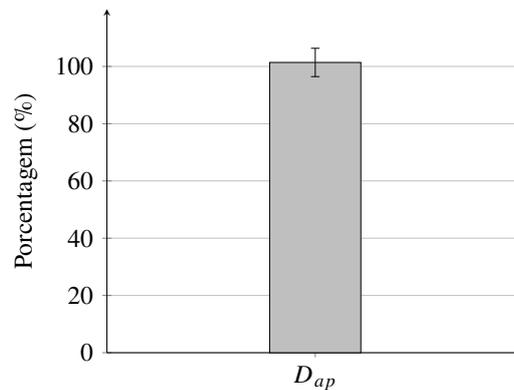


Figura 4.1: Gráfico comparando a eficiência do D_{ap} obtido pelo drone com o real

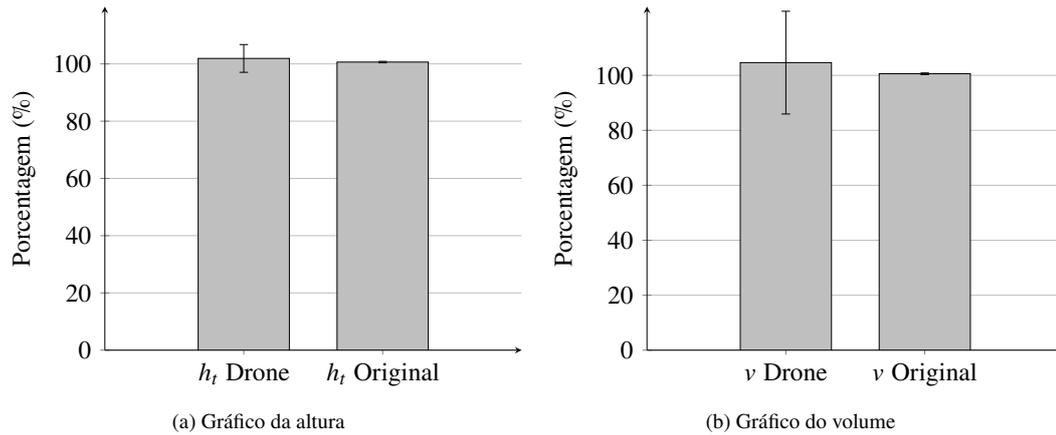


Figura 4.2: Gráfico comparando a precisão utilizando o D_{ap} obtido pelo drone e com o D_{ap} real

Portanto, é possível perceber que, para a prática de inventário florestal, que estima o volume de um conjunto de árvores, os resultados do experimento e de práticas normais é bastante semelhante. Entretanto, a medição individualizada não apresenta uma valoração muito precisa, como indica o desvio padrão, principalmente para a estimativa do volume, devido a propagação de erros entre as variáveis.

5 CONCLUSÃO

Considerando o objetivo original deste trabalho, que é desenvolver um protótipo e realizar experimentações em relação à prática de inventário florestal com UAVs, é possível considerar os resultados satisfatórios. A rede de comunicação ROS2 estabelecida apresentou consistência durante os experimentos, e se estabeleceu de forma que sua ampliação e adaptação para outros experimentos seja simples e prática. A adição de mais nós na rede de comunicação é simples e permite que sejam adicionados mais elementos em experimentos futuros, como câmeras para interpretar obstáculos no caminho, sensores de odometria propriamente ditos, formas mais inteligentes de algoritmos de navegação, substituição do lidar 3D por outra ferramenta de medição, entre outros.

Os resultados obtidos das equações volumétricas e da fórmula hipsométrica também resultaram em uma avaliação positiva do experimento. Apesar do desvio padrão elevado na predição do volume, isso se dá pela propagação de erros presente na relação das fórmulas, fazendo com que pequenos erros na medição do D_{ap} se tornassem grandes erros na média final. Entretanto, técnicas de processamento de imagens mais adequadas para minimização de erros, podem eliminar as diferenças obtidas no experimento. Mesmo considerando isso, os resultados apresentarem uma média muito próxima ao valor original é um indicativo de que, para a proposta, ele é um método já aplicável, pois, no conjunto geral, ele acertará o volume médio do ambiente com uma precisão de 95%.

Considerando isso, o trabalho apresenta resultados valiosos para o mapeamento de ambientes florestados. A grande vantagem de utilizar UAVs e SLAMs para essa prática, além do corte de recursos necessários por dispensar o uso de hipsômetros, apresenta também uma nova gama de possibilidades para a área, que aprecia o uso de tecnologias de robótica autônoma, principalmente, pois ela pode ser combinada com outras funcionalidades, como monitoramento de pragas, cálculo de altura, identificação de possíveis danificações nas árvores, entre outras possibilidades. Portanto, a partir dos estudos apresentados nesse trabalho, existe uma gama de integrações e evoluções das ideias aqui propostas, como, por exemplo, pesquisar algoritmos mais precisos para a visão computacional, otimização da trajetória para captura de imagens dos troncos, testes em ambiente real e subsequente resolução de problemas, tais como obstáculos difíceis de detectar (galhos finos) e fusão com outros sensores.

REFERÊNCIAS

- Araujo, H. J. B. d. (2006). Inventário florestal a 100% em pequenas áreas sob manejo florestal madeireiro. *Acta Amazônica*, 36:447–464.
- Bonci, A., Gaudeni, F., Giannini, M. C. e Longhi, S. (2023). Robot operating system 2 (ros2)-based frameworks for increasing robot autonomy: A survey. *applied sciences*, 13(23):12796.
- Caldeira, M. V. W., Schumacher, M. V., Scheeren, L. W., Barichello, L. R. e Watzlawick, L. F. (2002). Relação hipsométrica para acacia mearnsii com diferentes idades. *Pesquisa Florestal Brasileira*, (45):57–68.
- Clutter, J. (1983). *Timber Management: A Quantitative Approach*. Wiley.
- Community, B. O. (2018). *Blender - a 3D modelling and rendering package*. Blender Foundation, Stichting Blender Foundation, Amsterdam.
- de Oliveira, A. J., da Silva, G. F., da Silva, G. R., dos Santos, A. A. C., Caldeira, D. S. A., Vilarinho, M. K. C., Barelli, M. A. A. e de Oliveira, T. C. (2020). Potencialidades da utilização de drones na agricultura de precisão. *Brazilian Journal of Development*, 6(9):64140–64149.
- dos Santos, G. A. e Farina, R. M. (2022). Mapeamento geográfico por drone. *RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218*, 3(9):e391901–e391901.
- Du, J., Gao, C. e Feng, T. (2022). Formal safety assessment and improvement of dds protocol for industrial data distribution service. *Future Internet*, 15(1):24.
- Gazebo (2024). Gazebo. <https://gazebo-sim.org/home> Acessado em: (15 Setembro de 2024).
- Groetelaars, N. J. e de Amorim, A. L. (2011). Tecnologia 3d laser scanning: características, processos e ferramentas para manipulação de nuvens de pontos. Em *XV Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital-SIGRADI. Santa Fé: Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo da Universidad Nacional del Litoral*, páginas 1–5.
- Hess, W., Kohler, D., Rapp, H. e Andor, D. (2016). Real-time loop closure in 2d lidar slam. Em *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, páginas 1271–1278. IEEE.
- Ker, J. e Smith, J. G. (1956). Sampling for height-diameter relationships.
- Kubja (2024). gazebo-vegetation. Acesso em: 23 nov. 2024.
- Macenski, S., Foote, T., Gerkey, B., Lalancette, C. e Woodall, W. (2022). Robot operating system 2: Design, architecture, and uses in the wild. *Science Robotics*, 7(66):eabm6074.
- Macenski, S. e Jambrecic, I. (2021). Slam toolbox: Slam for the dynamic world. *Journal of Open Source Software*, 6(61):2783.
- OpenRobotics (2023). X3 uav.
- Prodan, M. (1997). *Mensura florestal*. Número 1. Agroamerica.

- Santos, J. T., Forte, M. D. d. N., Paula, A. R. d., Sousa, N. R. T. d., Lima, T. A., Almeida Filho, M. P. d., Castelo Branco, I. R. A., Nogueira, F. G., Torrico, B. C. e Correia, W. B. (2019). Desenvolvimento de instrumentação para geração de nuvem de pontos usando sensores inerciais e lidar.
- Trentin, B. E., Estevan, D. A., Rossetto, E. F. S., Gorenstein, M. R., Brizola, G. P. e Bechara, F. C. (2018). Restauração florestal na mata atlântica: passiva, nucleação e plantio de alta diversidade. *Ciência Florestal*, 28:160–174.
- Van Laar, A. e Akça, A. (2007). *Forest mensuration*, volume 13. Springer Science & Business Media.