

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Eduardo Soares e Silva Britto

**INTEGRAÇÃO DE SIMULADOR DE ENXAME DE
DRONES EM UM SIMULADOR DE MUNDO
UTILIZANDO O PROTOCOLO MQTT**

Trabalho de Graduação
2024

Curso de Engenharia Aeronáutica

Eduardo Soares e Silva Britto

**INTEGRAÇÃO DE SIMULADOR DE ENXAME DE
DRONES EM UM SIMULADOR DE MUNDO
UTILIZANDO O PROTOCOLO MQTT**

Orientador

Prof. Dr. Christopher Shneider Cerqueira. (ITA)

ENGENHARIA AERONÁUTICA

**SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Soares e Silva Britto, Eduardo
Integração de Simulador de Enxame de Drones em um Simulador de Mundo utilizando o Protocolo MQTT / Eduardo Soares e Silva Britto.
São José dos Campos, 2024.
40f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Aeronáutica– Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2024. Orientador: Prof. Dr. Christopher Shneider Cerqueira. .

1. Enxame de Drones. 2. Simulação Distribuída. 3. MQTT. 4. Conversão Coordenadas. 5. Aplicação Militar. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOARES E SILVA BRITTO, Eduardo. **Integração de Simulador de Enxame de Drones em um Simulador de Mundo utilizando o Protocolo MQTT**. 2024. 40f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Eduardo Soares e Silva Britto

TÍTULO DO TRABALHO: Integração de Simulador de Enxame de Drones em um Simulador de Mundo utilizando o Protocolo MQTT.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2024

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Eduardo Soares e Silva Britto
Casa
12.245-030 – São José dos Campos–SP

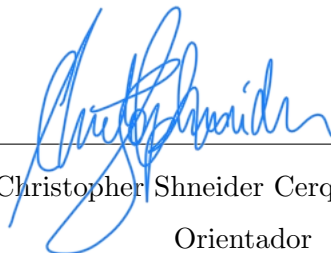
INTEGRAÇÃO DE SIMULADOR DE ENXAME DE DRONES EM UM SIMULADOR DE MUNDO UTILIZANDO O PROTOCOLO MQTT

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Eduardo Soares e Silva Britto

Autor



Christopher Shneider Cerqueira. (ITA)

Orientador



Prof. Dr. Vinicius Malatesta
Coordenador do Curso de Engenharia Aeronáutica

São José dos Campos, 31 de outubro de 2024.

A meus pais, meus irmãos e a todos os meus amigos por terem me acompanhado e apoiado ao longo dessa jornada.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à minha base, meus pais, por todo o apoio e dedicação ao longo dessa trajetória. Minha permanência no ITA foi um esforço que ultrapassou os limites acadêmicos e as notas no boletim. Enfrentei desafios que, sem eles, teriam sido intransponíveis. Minha mãe, em especial, foi extraordinária, não apenas me ajudando, mas também possibilitando que um colega conseguisse concluir essa jornada junto comigo.

Sou também grato a todos que estiveram presentes ao longo dessa caminhada. O ITA representou para mim um período de intenso crescimento em todas as esferas. Passei por momentos de dificuldades, incluindo desafios com a saúde, mas cada experiência e conversa que vivi aqui contribuiu para meu desenvolvimento não só como engenheiro, mas também como indivíduo.

Agradeço também às pessoas essenciais que contribuíram diretamente para meu desempenho acadêmico. Rafael Hauaisen foi o primeiro a me acolher quando ingressei em uma nova turma, apoiando-me e estudando ao meu lado. Mahmud, sou imensamente grato por ter sido meu parceiro constante, nunca me deixando para trás e sempre presente nos momentos difíceis, passando noites estudando comigo e muitas vezes me ensinando. Não poderia deixar de mencionar meu amigo irmão Vitor Borges, que sempre esteve ao meu lado em minhas ideias. Entramos juntos no curso de turma ITA há oito anos, trabalhamos juntos no desenvolvimento de um software, e, agora, mesmo separados por milhares de quilômetros, nos apoiamos mutuamente, cada um escrevendo seu trabalho de graduação e fazendo companhia um ao outro por ligação. Profundamente grato por essa amizade.

Por fim e não menos importante, agradeço a Deus. Não sou religioso, mas nos últimos anos minha relação com Ele tem florescido. Muito obrigado Deus, foi uma jornada extraordinária, maior do que jamais poderia imaginar.

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de simulação distribuída para enxames de drones, com foco em aplicações militares. O sistema integra a lógica e a transmissão dos dados dos drones em um arquivo *Python Notebook*, que se comunica com um servidor central utilizando o protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). A motivação para este estudo reside na crescente importância dos enxames de drones para missões críticas, onde a coordenação eficiente e a resposta rápida são essenciais. A metodologia envolve a implementação de uma arquitetura distribuída que permite a comunicação e a coordenação entre múltiplos drones de forma eficiente, além de também possibilitar interação com outras entidades do ambiente simulado. Os resultados demonstram a viabilidade do sistema proposto, destacando melhorias na escalabilidade e na capacidade de resposta em cenários simulados. Este trabalho contribui para a área de simulação distribuída, oferecendo uma solução robusta e escalável para a gestão de enxames de drones em operações militares.

Abstract

This paper presents the development of a distributed simulation system for drone swarms, focusing on military applications. The system integrates the logic and data transmission of drones within a *Python Notebook* file, which communicates with a central server using the MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) protocol. The motivation for this study stems from the growing importance of drone swarms in critical missions, where efficient coordination and rapid response are essential. The methodology involves implementing a distributed architecture that allows efficient communication and coordination among multiple drones, as well as enabling interaction with other entities in the simulated environment. The results demonstrate the feasibility of the proposed system, highlighting improvements in scalability and responsiveness in simulated scenarios. This work contributes to the field of distributed simulation by offering a robust and scalable solution for managing drone swarms in military operations.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Motivação	10
1.2	Objetivo	10
1.3	Organização do Trabalho	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Drones	13
2.2	Enxame de Drones	14
2.3	Simulação Distribuída	16
2.4	Formato dos Dados Transmítidos	18
2.5	Transformação de Coordenadas	18
3	METODOLOGIA – MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1	Server	21
3.1.1	FlightGear	22
3.1.2	<i>Jupyter Notebook</i>	24
3.2	Broker	25
3.3	Client	25
3.3.1	Localização e Posicionamento	26
3.3.2	Tópicos e Subtópicos	27
3.3.3	Formação de Enxame	27
4	RESULTADOS E APLICAÇÕES	29
4.1	Resultados	29

4.1.1	Latência	29
4.2	Aplicações	31
4.2.1	Operações Ofensivas e Estratégias Militares	32
4.2.2	Logística Militar e Suporte em Campo	33
4.2.3	Operações Humanitárias e Assistência em Desastres	34
4.2.4	Estudos de Dinâmica de Voo	35
4.2.5	Robótica e Inteligência Artificial	36
4.2.6	Desafios e Perspectivas Futuras	37
5	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	41

1 Introdução

1.1 Motivação

A evolução tecnológica no campo dos veículos aéreos não tripulados (VANTs), comumente conhecidos como drones, tem promovido avanços significativos em diversas áreas, especialmente na militar. O conceito de enxame de drones, inspirado no comportamento coletivo de insetos como abelhas e formigas, representa um dos desenvolvimentos mais promissores e estratégicos nessa área. Enxames de drones são compostos por múltiplos drones que operam de maneira coordenada e autônoma, utilizando algoritmos de comunicação para executar missões complexas de forma colaborativa.

No contexto militar, a aplicação de enxames de drones tem se mostrado extremamente vantajosa. Esses enxames podem realizar missões de reconhecimento, vigilância e ataque coordenado com alta eficiência, reduzindo o risco para os operadores humanos. Além disso, a capacidade de operar em ambientes hostis e de difícil acesso aumenta significativamente a eficácia das operações militares. A flexibilidade e a adaptabilidade dos enxames de drones permitem uma resposta rápida a situações dinâmicas, proporcionando uma vantagem estratégica crucial no campo de batalha.

O uso de simulações é essencial para o desenvolvimento e a avaliação de enxames de drones. Simulações permitem testar e validar algoritmos de controle, estratégias de comunicação e comportamentos emergentes dos drones em um ambiente controlado e seguro. No entanto, a complexidade e a escala dessas simulações frequentemente exigem uma abordagem distribuída, onde múltiplas instâncias de simuladores colaboram para criar um ambiente de simulação integrado e realista.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de simulação distribuída para enxames de drones utilizando o protocolo de comunicação MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). Este sistema visa integrar a lógica e a programação dos drones,

codificadas em um arquivo MATLAB, com um servidor central. A escolha do protocolo MQTT se dá pela sua eficiência em termos de largura de banda e consumo de energia, bem como pela sua capacidade de proporcionar uma comunicação confiável e escalável de baixa latência entre os componentes distribuídos.

Especificamente, este trabalho busca:

- Projetar e implementar um sistema de simulação distribuída que suporte a operação coordenada de múltiplos drones.
- Integrar a lógica de controle e comunicação dos drones, desenvolvida em MATLAB, com um servidor central utilizando o protocolo MQTT.
- Avaliar a performance e a escalabilidade do sistema de simulação, com foco na capacidade de coordenação e comunicação eficiente entre os drones.
- Demonstrar a aplicabilidade do sistema em cenários militares, destacando os benefícios e os desafios associados ao uso de enxames de drones em operações de reconhecimento e vigilância.

Este trabalho pretende contribuir para a construção de um mundo virtual no ITA (Instituto Tecnológico de Aeronáutica), que será utilizado para simulações de diferentes aplicações, tanto no quesito acadêmico como no quesito militar, sendo útil para diversas aplicações de defesa militar.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos principais, conforme descrito a seguir:

- **Capítulo 1 - Introdução:** Neste capítulo, são apresentados o contexto e a motivação para a pesquisa, destacando a importância dos enxames de drones em simulações, especialmente no contexto militar. Além disso, são definidos os objetivos do trabalho e a estrutura do documento.
- **Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica:** Este capítulo aborda a revisão da literatura relacionada aos temas centrais do trabalho. São explorados conceitos fundamentais sobre drones, enxames de drones e simulação distribuída, além de apresentar trabalhos anteriores relevantes e identificar lacunas na pesquisa atual.
- **Capítulo 3 - Metodologia:** Neste capítulo, é descrita a abordagem metodológica adotada para o desenvolvimento do sistema de simulação distribuída. São detalhados o processo de design e implementação do sistema, a integração da lógica e

programação dos drones em MATLAB com o protocolo de comunicação MQTT, bem como os critérios e procedimentos para a avaliação do sistema.

- **Capítulo 4 - Resultados e Aplicações:** Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da implementação e avaliação do sistema de simulação distribuída. São discutidos os testes realizados, a análise da performance e escalabilidade do sistema, e a demonstração da aplicabilidade em cenários militares. Os resultados são analisados à luz dos objetivos estabelecidos, destacando os principais achados e implicações da pesquisa.
- **Capítulo 5 - Conclusão:** No capítulo final, são apresentadas as conclusões do trabalho, resumindo os principais pontos discutidos e os resultados alcançados. São também destacadas as contribuições da pesquisa, as limitações identificadas e sugestões para trabalhos futuros.

A organização do trabalho foi estruturada de forma a proporcionar uma visão clara e coerente do desenvolvimento e dos resultados da pesquisa, facilitando a compreensão dos métodos e das contribuições do estudo na área de simulação distribuída e enxames de drones.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Drones

Os drones, também conhecidos como Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), são aeronaves que operam sem a presença de um piloto a bordo. Esses dispositivos podem ser controlados remotamente por um operador humano ou voar de maneira autônoma através de software embarcado, em conjunto com sensores e sistemas de navegação. Originalmente desenvolvidos para fins militares, os drones rapidamente expandiram seu uso para áreas civis, científicas e comerciais, transformando-se em ferramentas versáteis e indispensáveis em diversos setores.

Devido à sua capacidade de acessar áreas de difícil alcance para humanos e realizar uma variedade de tarefas, os drones têm uma ampla gama de aplicações. No monitoramento e inspeção, são amplamente utilizados para observar infraestruturas como pontes, linhas de transmissão de energia e oleodutos, permitindo uma inspeção rápida e segura e reduzindo o risco para os trabalhadores. Na agricultura de precisão, drones são utilizados para mapear campos, monitorar o crescimento das culturas e aplicar fertilizantes ou pesticidas de maneira precisa. Esse uso melhora a eficiência e reduz o consumo de insumos agrícolas, contribuindo para uma agricultura mais sustentável. Empresas como Amazon e UPS estão explorando o uso de drones para entregas rápidas de produtos, o que pode reduzir significativamente o tempo de entrega e os custos operacionais, especialmente em áreas urbanas densas. Em operações de resgate e situações de emergência, drones podem localizar vítimas, avaliar danos e entregar suprimentos médicos em locais inacessíveis, proporcionando uma resposta rápida e eficaz que pode salvar vidas.

Os drones incorporam diversas tecnologias avançadas para garantir seu funcionamento eficiente e seguro. Equipados com câmeras de alta resolução e sensores de temperatura, umidade e gás, eles podem coletar dados detalhados sobre o ambiente ao seu redor. Esses dados são essenciais para aplicações como monitoramento ambiental e inspeção de infraestrutura. A navegação precisa é crucial para o funcionamento dos drones, e sistemas de GPS avançados permitem que eles mantenham suas rotas planejadas e evitem obstáculos. Além disso, alguns drones utilizam sistemas de visão computacional para navegação

autônoma. A comunicação entre o drone e o operador ou entre drones em um enxame é realizada através de diversos protocolos de comunicação, como o MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). O MQTT é particularmente adequado para drones devido à sua eficiência em termos de largura de banda e consumo de energia.

Apesar das inúmeras aplicações e benefícios, o uso de drones enfrenta diversos desafios. A regulamentação do uso de drones é um desafio contínuo, especialmente em áreas urbanas. A criação de leis e regulamentos que equilibrem a inovação tecnológica com a segurança pública é crucial. Além disso, a segurança dos dados coletados por drones e a privacidade dos indivíduos são preocupações significativas, exigindo o desenvolvimento de tecnologias e políticas que protejam essas informações sensíveis. A autonomia dos drones é limitada pela capacidade das baterias, e o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia mais eficientes é uma área de pesquisa ativa, buscando aumentar o tempo de voo e a eficiência operacional dos drones.

Em resumo, os drones representam uma tecnologia emergente com potencial para revolucionar diversos setores da economia e da sociedade. Desde o monitoramento ambiental até a entrega de produtos, sua versatilidade e eficiência oferecem soluções inovadoras para problemas complexos. No entanto, é fundamental enfrentar os desafios regulatórios, de segurança e de autonomia para garantir que o uso de drones seja seguro, eficiente e sustentável no futuro.

2.2 Enxame de Drones

O conceito de enxame de drones refere-se a um conjunto de veículos aéreos não tripulados (VANTs) que operam de maneira coordenada, utilizando algoritmos avançados de inteligência artificial e comunicação para realizar tarefas complexas de forma colaborativa. Inspirados pelo comportamento coletivo observado em colônias de insetos como abelhas e formigas, esses enxames se beneficiam da coordenação descentralizada para executar tarefas de forma eficiente. Esse modelo de operação permite que os drones trabalhem em conjunto, otimizando suas capacidades e ampliando suas aplicações em diversos setores.

Os enxames de drones têm uma ampla gama de aplicações, tanto civis quanto militares, graças à sua capacidade de realizar missões com alta eficiência e flexibilidade. No contexto militar, esses enxames são utilizados para reconhecimento, vigilância, ataque coordenado e suporte logístico. A habilidade de operar de maneira autônoma e cooperativa permite que os enxames realizem missões em ambientes hostis e de alto risco, minimizando a necessidade de intervenção humana direta e aumentando a eficácia das operações militares. Em situações de desastre, um enxame de drones pode rapidamente cobrir grandes áreas, identificando vítimas e mapeando áreas afetadas. A coordenação entre os drones permite

uma varredura eficiente e detalhada, aumentando as chances de resgate bem-sucedido e resposta rápida às emergências. Na agricultura de precisão, enxames de drones são usados para monitoramento e gestão agrícola, coletando dados de grandes áreas em tempo real e otimizando o uso de recursos como água e fertilizantes, contribuindo para uma produção agrícola mais eficiente e sustentável.

O funcionamento de um enxame de drones depende de várias tecnologias avançadas que permitem a comunicação, coordenação e execução das tarefas planejadas. A comunicação eficaz entre os drones é fundamental para o sucesso do enxame. Protocolos como o MQTT são frequentemente utilizados devido à sua eficiência e baixa latência, permitindo uma troca rápida e segura de informações. A coordenação é geralmente realizada através de algoritmos de controle distribuído, onde cada drone toma decisões com base em informações locais e diretrizes gerais do enxame, garantindo uma operação harmoniosa e eficiente. Algoritmos de inteligência artificial desempenham um papel crucial na coordenação e tomada de decisões dentro do enxame. Técnicas de aprendizado de máquina e redes neurais são utilizadas para melhorar a autonomia e a capacidade de adaptação dos drones em tempo real, permitindo que o enxame se ajuste rapidamente a mudanças no ambiente e execute suas tarefas de forma mais eficaz. Cada drone no enxame está equipado com uma variedade de sensores, como câmeras, LIDAR e GPS, que permitem a navegação precisa e a coleta de dados. A integração desses sensores possibilita ao enxame operar de maneira coordenada, evitando obstáculos e adaptando-se às mudanças no ambiente, o que é crucial para o sucesso de suas missões.

Apesar das inúmeras vantagens, os enxames de drones também enfrentam desafios significativos que precisam ser abordados para uma implementação eficaz. A comunicação entre drones pode ser suscetível a interferências e ataques cibernéticos, o que torna crucial garantir a segurança das comunicações e a resiliência contra interferências. Isso envolve o desenvolvimento de protocolos de segurança robustos e técnicas avançadas de criptografia para proteger os dados transmitidos entre os drones. A gestão eficiente da energia é essencial para a operação de enxames de drones, especialmente em missões prolongadas. O desenvolvimento de baterias mais eficientes e técnicas de gerenciamento de energia continua a ser uma área de pesquisa ativa, buscando aumentar a autonomia dos drones e a eficiência de suas operações. A regulamentação do uso de enxames de drones, especialmente em espaços aéreos civis, é complexa e está em constante evolução. A criação de normas que garantam a segurança e a privacidade, enquanto permitem a inovação tecnológica, é fundamental para a integração segura e eficaz desses enxames no espaço aéreo.

2.3 Simulação Distribuída

A simulação distribuída é uma abordagem avançada para a modelagem e análise de sistemas complexos, onde múltiplas instâncias de simuladores, executando em diferentes locais, colaboram para criar uma simulação coesa e integrada. Esse paradigma permite a distribuição das cargas de processamento, aumentando a eficiência e a escalabilidade das simulações. Historicamente, a simulação distribuída surgiu para atender à necessidade de simular sistemas extensos e heterogêneos, como operações militares, sistemas de transporte e redes de comunicação, que seriam inviáveis de serem simulados em uma única máquina devido à complexidade e ao volume de dados envolvidos.

Um dos principais propósitos da simulação distribuída é permitir que diferentes partes de um sistema complexo sejam simuladas em paralelo, utilizando recursos computacionais distribuídos. Isso é particularmente útil em ambientes colaborativos, onde múltiplas organizações podem contribuir com seus próprios modelos e simuladores especializados, facilitando a integração e a interoperabilidade entre diferentes componentes do sistema. Por exemplo, em operações militares, simulações distribuídas permitem a integração de modelos de diferentes unidades, proporcionando uma visão abrangente e realista do campo de batalha.

Existem diferentes tipos de simulação distribuída, cada um com suas vantagens e desvantagens. A simulação de eventos discretos distribuída (Distributed Discrete Event Simulation - DDESS) é uma abordagem comum, onde a evolução do sistema é modelada como uma série de eventos discretos ocorrendo ao longo do tempo. Nesta abordagem, cada simulador participante gerencia um subconjunto dos eventos, sincronizando-se com os demais para garantir a consistência temporal. Uma vantagem dessa abordagem é a capacidade de lidar com grandes volumes de eventos de forma eficiente. No entanto, a sincronização entre os simuladores pode ser complexa e exigir mecanismos sofisticados para evitar inconsistências.

Outro tipo é a simulação baseada em agentes, onde entidades autônomas, conhecidas como agentes, interagem dentro de um ambiente simulado. Cada agente pode operar em um nó de simulação diferente, permitindo a modelagem de comportamentos emergentes e interações complexas. A vantagem dessa abordagem é a flexibilidade e a capacidade de modelar sistemas onde a interação entre componentes é fundamental, como mercados econômicos ou ecossistemas naturais. Contudo, a simulação baseada em agentes pode demandar um alto poder computacional e estratégias eficientes de balanceamento de carga para manter a performance.

A simulação distribuída oferece várias vantagens significativas. Primeiramente, permite a utilização de recursos computacionais de maneira mais eficiente, distribuindo a carga de trabalho entre múltiplas máquinas. Isso resulta em uma maior escalabilidade e

na capacidade de simular sistemas maiores e mais complexos. Em segundo lugar, facilita a colaboração entre diferentes entidades, permitindo que cada uma contribua com seu próprio modelo ou simulador especializado. Essa interoperabilidade é crucial em áreas como a defesa e a gestão de desastres, onde múltiplas organizações precisam trabalhar juntas.

Entretanto, a simulação distribuída também apresenta desafios. A coordenação e a sincronização entre os diferentes simuladores podem ser complexas e suscetíveis a erros, especialmente em sistemas onde o tempo real é crítico. Além disso, a distribuição dos dados e a comunicação eficiente entre os simuladores requerem infraestruturas de rede robustas e confiáveis. Problemas de latência e largura de banda podem afetar significativamente a performance da simulação.

O protocolo MQTT desempenha um papel importante na simulação distribuída, especialmente em contextos onde a comunicação eficiente e confiável entre diferentes componentes é crucial. Ele é um protocolo leve de mensagens, projetado para comunicação em redes com largura de banda limitada e alta latência, o que o torna ideal para aplicações de simulação distribuída. Em um cenário de simulação de enxame de *drones*, por exemplo, o MQTT pode ser utilizado para coordenar a comunicação entre os diferentes *drones* e o servidor central, garantindo que todas as unidades compartilhem informações em tempo real e respondam de maneira coordenada.

A utilização de MQTT em simulações distribuídas oferece várias vantagens. Por ser um protocolo de baixo *overhead*, ele reduz a carga de comunicação na rede, permitindo que os simuladores se concentrem mais no processamento das simulações. Além disso, seu modelo de publicação/assinatura facilita a disseminação de informações relevantes apenas para os componentes que delas necessitam, aumentando a eficiência e a escalabilidade do sistema. A segurança também é um aspecto crucial, e esse protocolo oferece mecanismos robustos de autenticação e criptografia para proteger os dados transmitidos.

No entanto, a adoção de MQTT em simulações distribuídas também apresenta desafios. A configuração e a gestão do *broker* MQTT, que centraliza as mensagens, podem ser complexas, especialmente em ambientes de larga escala. Além disso, a latência na entrega das mensagens pode impactar a precisão temporal das simulações, requerendo estratégias de mitigação, como a utilização de múltiplos *brokers* ou a priorização de mensagens críticas.

Para ilustrar melhor o funcionamento e os benefícios da simulação distribuída, uma imagem demonstrando a arquitetura de um sistema de simulação distribuída utilizando MQTT pode ser inserida aqui. Esta imagem poderia mostrar os diferentes componentes do sistema, como simuladores locais, o *broker* MQTT, e a comunicação entre eles, destacando a fluidez e a eficiência da transmissão de dados.

Em resumo, a simulação distribuída é uma ferramenta poderosa para a modelagem e análise de sistemas complexos, oferecendo vantagens significativas em termos de escalabilidade, eficiência e colaboração. No entanto, também apresenta desafios que devem ser cuidadosamente gerenciados. A integração de tecnologias como o protocolo MQTT pode potencializar ainda mais esses sistemas, proporcionando uma comunicação eficiente e segura entre os componentes distribuídos, e abrindo novas possibilidades para aplicações em diversas áreas, incluindo a defesa, a agricultura, e a gestão de desastres.

2.4 Formato dos Dados Transmitidos

TABELA 2.1 – Exemplo de Estrutura de Dados

Campo	Valor
latitude_deg	63.991768
longitude_deg	-22.605425
altitude_ft	146.14
roll_deg	0.0
pitch_deg	0.0
yaw_deg	180.02
u	0.0
v	0.0
w	0.0

Na simulação distribuída, mensagens serão transmitidas de dispositivo a dispositivo. Desse modo, como a simulação do projeto se refere a um enxame de *drones*, suas posições, orientações e velocidades são variáveis suficientes para determinar sua movimentação. Desse modo, a estrutura das mensagens a serem enviadas está representada conforme Tabela 2.1.

2.5 Transformação de Coordenadas

No desenvolvimento deste projeto, é necessário converter coordenadas geográficas, latitude (φ), longitude (λ) e altitude (h) recebidas do servidor para coordenadas cartesianas utilizadas no *Unity*. Isso ocorre porque o *Unity* utiliza um sistema de coordenadas tridimensionais cartesianas, enquanto as informações de posição do servidor estão em coordenadas geográficas.

A conversão de coordenadas geográficas para cartesianas é realizada utilizando fórmulas que consideram a distância correspondente a um grau de latitude e longitude em metros. Para áreas de pequena extensão, como é o caso deste projeto, podemos utilizar aproximações planas, assumindo a Terra como esférica e desprezando a sua curvatura.

Primeiramente, calcula-se a diferença entre as coordenadas recebidas e uma coordenada de origem pré-definida:

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0 \quad (2.1)$$

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 \quad (2.2)$$

$$\Delta h = h - h_0 \quad (2.3)$$

Onde:

- $\Delta\varphi$ é a diferença de latitude em graus;
- $\Delta\lambda$ é a diferença de longitude em graus;
- Δh é a diferença de altitude em metros;
- φ, λ, h são a latitude, longitude e altitude atuais;
- $\varphi_0, \lambda_0, h_0$ são a latitude, longitude e altitude de origem.

Para converter essas diferenças angulares em distâncias em metros, utilizamos os seguintes fatores:

$$\text{fatorLat} = 111\,320 \text{ m}/^\circ \quad (2.4)$$

$$\text{fatorLon} = 111\,320 \times \cos(\varphi_0) \text{ m}/^\circ \quad (2.5)$$

As coordenadas cartesianas (x, y, z) são então calculadas por:

$$x = -\Delta\lambda \times \text{fatorLon} \quad (2.6)$$

$$y = \frac{\Delta h}{3,3} \quad (2.7)$$

$$z = -\Delta\varphi \times \text{fatorLat} \quad (2.8)$$

A conversão de unidades e o ajuste de parâmetros são essenciais para garantir a precisão e a proporcionalidade da simulação no *Unity*. A seguir, detalha-se os principais fatores utilizados neste processo:

Conversão de Graus para Metros

A conversão de graus para metros é fundamental para mapear corretamente as coordenadas geográficas no ambiente de simulação. A distância correspondente a um grau de

latitude é aproximadamente constante, sendo cerca de 111 320 metros. Este valor é derivado do formato quase esférico da Terra, onde a distância entre dois paralelos de latitude adjacentes permanece praticamente a mesma em qualquer ponto do globo.

Por outro lado, a distância correspondente a um grau de longitude varia conforme a latitude. Para calcular esta distância, multiplica-se 111 320 metros pelo cosseno da latitude de origem em radianos. Essa variação ocorre porque a distância entre os meridianos diminui à medida que se aproxima dos polos. Se esse fator não for corrigido de acordo com a latitude, o valor de guinada da aeronave será representado de forma incorreta, comprometendo a precisão da simulação.

Orientação dos Eixos

A orientação correta dos eixos no Unity é crucial para a representação fiel do movimento e da posição dos drones na simulação. Observou-se que o sistema de coordenadas do Unity é levógiro, o que difere de alguns sistemas de referência padrão. Para alinhar corretamente as direções dos eixos, aplicaram-se sinais negativos nas equações referentes aos eixos x e z . Essa correção garante que os movimentos e as rotações dos drones sejam representados de forma precisa, evitando discrepâncias entre a simulação e o comportamento real esperado.

3 Metodologia – Materiais e Métodos

Nesta seção será utilizada uma analogia à arquitetura WEB2 para explicar a arquitetura do projeto. Nela, cada computador conectado à rede torna-se tanto “cliente”, que pode fazer download de arquivos disponíveis na rede, quanto um “servidor”, que oferta seus próprios arquivos para que outros possam “baixá-lo” (PRIMO, 2007).

Desse modo, o projeto pode ser dividido entre *server* e *client*. A parte do *server* funciona como a parte lógica da dinâmica dos drones. Desse modo, o cálculo de sua posição, orientação e velocidade é inteiramente feita nessa parte do projeto. Já na parte do *client*, as informações referentes ao drone são recebidas e utilizadas para apresentar um drone em espaço virtual que pode ter outras entidades simuladas concomitantemente. Desse modo, para realizar a comunicação entre as partes foi escolhido o protocolo MQTT devido à sua leveza e eficiência na transmissão de mensagens. Além disso, o projeto faz parte de um conjunto de trabalhos com o objetivo de criar um simulador de mundo, no qual diversas entidades podem interagir entre si, representando o mundo real. Desse modo, helicópteros, aviões, drones e outras entidades serão criadas e integradas nesse projeto utilizando o mesmo protocolo de comunicação, o MQTT. Logo, o que diferencia essa arquitetura da WEB2 é a presença de um *broker*, que funciona como um intermediário entre o *server* e o *client*. Nele, as informações são movimentadas através de tópicos que podem ser publicados, no caso do servidor, e subscritos, no caso do client. Portanto, o projeto foi estruturado de forma a permitir a troca contínua de dados em tempo real a partir de mensagens publicadas e subscritas. A seguir, a metodologia será dividida em três partes: o *server*, o *broker* e o *client*, detalhando cada um dos componentes e tecnologias envolvidos.

3.1 Server

Dentre os trabalhos relacionados ao simulador de mundo, o CTEDS(referencia) é responsável por criar um código para a dinâmica de um enxame de *drones*. Porém, como o projeto não está finalizado, foi escolhido o *software FlightGear* para realizar o cálculo da dinâmica da aeronave. Desse modo, é possível obter do programa os valores de posição,

orientação e velocidade a partir de uma comunicação entre ele e uma porta lógica na máquina local. Em seguida, por meio do uso do *Jupyter Notebook* foi possível desenvolver um código em *Python* que se conecta à mesma porta lógica que o *FlightGear* e, por conseguinte, consegue extrair os dados e enviá-los a um *broker* por meio de MQTT. A seguir, cada etapa será explicada de forma mais detalhada por meio dos próximos subtópicos.

3.1.1 FlightGear

O *FlightGear* é um simulador de voo de código aberto e gratuito, lançado inicialmente em 1997 e desenvolvido por uma comunidade global de entusiastas e programadores (FLIGHTGEAR, 2023). Ele oferece uma experiência de simulação realista, com uma ampla variedade de aeronaves disponíveis, que vão desde aviões comerciais e militares até helicópteros e planadores. O simulador utiliza dados reais de terreno e navegação, permitindo que os usuários voem em qualquer lugar do mundo com paisagens detalhadas e condições climáticas dinâmicas. Por ser de código aberto, o *FlightGear* permite que usuários contribuam para o seu desenvolvimento, adicionando novos recursos, aeronaves e melhorias contínuas, tornando-o uma plataforma versátil para treinamento, pesquisa e entretenimento.

No *FlightGear* é possível configurar uma conexão com uma porta lógica local através de uma linha de comando que é executada no início do programa. Ela está localizada em '*Settings*' na página principal do aplicativo conforme Figura 3.3.



FIGURA 3.1 – Comunicação Genérica

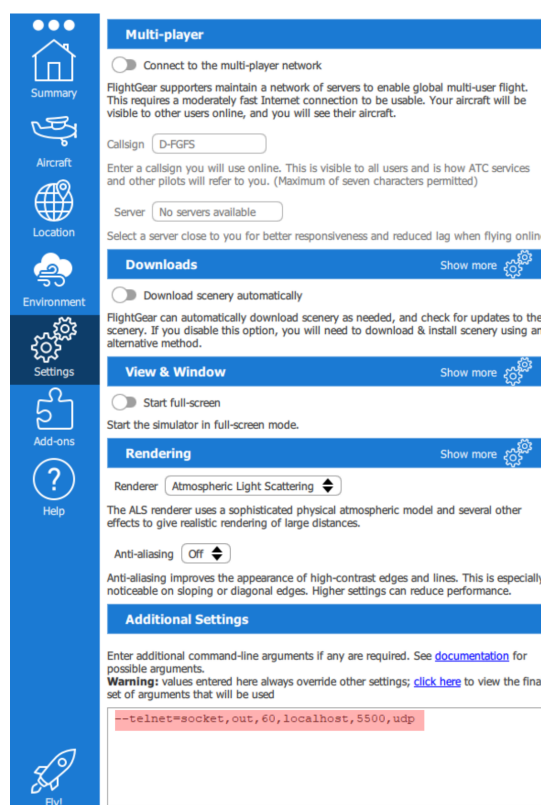


FIGURA 3.2 – Comunicação Telnet

FIGURA 3.3 – Configurações de Comunicação do Aplicativo com Porta Lógica

Dentre os parâmetros explicitados, o primeiro se refere ao tipo de comunicação que o aplicativo opera. Portanto, para esse projeto foram testados dois tipos de configuração de saída de dados, a *Telnetconnection* e a genérica, ambas configuradas para se conectar a um *socket*.

A conexão *Telnet* é um protocolo de rede que permite a comunicação interativa entre um usuário e um servidor remoto através da Internet ou de redes locais. O *Telnet* possibilita que os usuários acessem e controlem computadores remotos como se estivessem fisicamente presentes no local, permitindo a execução de comandos, a gestão de arquivos e a administração de sistemas. Embora tenha sido amplamente utilizado no passado para tarefas de administração de sistemas e desenvolvimento, o *Telnet* é considerado inseguro nos dias atuais, pois transmite dados, incluindo senhas, em texto simples, tornando-se vulnerável a interceptações e ataques. Entretanto, devido a existência de uma biblioteca já implementada em *Python* para comunicação com o *Flightgear*, ele foi utilizado inicialmente para testes comparativos pela facilidade de implementação.

Não obstante, devido a uma lentidão maior dessa configuração além de não ser um protocolo confiável, foi também testada a comunicação genérica, na qual exige um arquivo no formato XML que explicita como e quais variáveis devem ser enviadas à porta lógica conforme a documentação oficial (WIKI, 2024). Ademais, esse mesmo arquivo deve ser

referenciado no fim da linha de comando para instruir o programa, o que justifica a comunicação genérica ter um parâmetro a mais. Na sequência, ainda sobre os parâmetros da Figura 3.3, o segundo parâmetro indica se o aplicativo vai receber dados ou enviar dados e, portanto, foi configurado para enviar dados utilizando "out". O terceiro se refere à taxa de quadros por segundo e, como essa variável está diretamente relacionada com a frequência de envio de mensagens MQTT, foi escolhido um valor suficientemente grande de 60 fps. O quarto se refere à qual máquina se deve conectar, no caso a local. O quinto indica qual a porta lógica da conexão e o sexto configura o tipo de comunicação, no caso "udp".

Com o aplicativo configurado para se comunicar com uma porta lógica da máquina local, resta escolher um modelo de aeronave e iniciar o programa. Desse modo, foi escolhido a aeronave disponível que mais se aproxima da dinâmica de um *drone*, o bluecraft Hover conforme Figura 3.4.

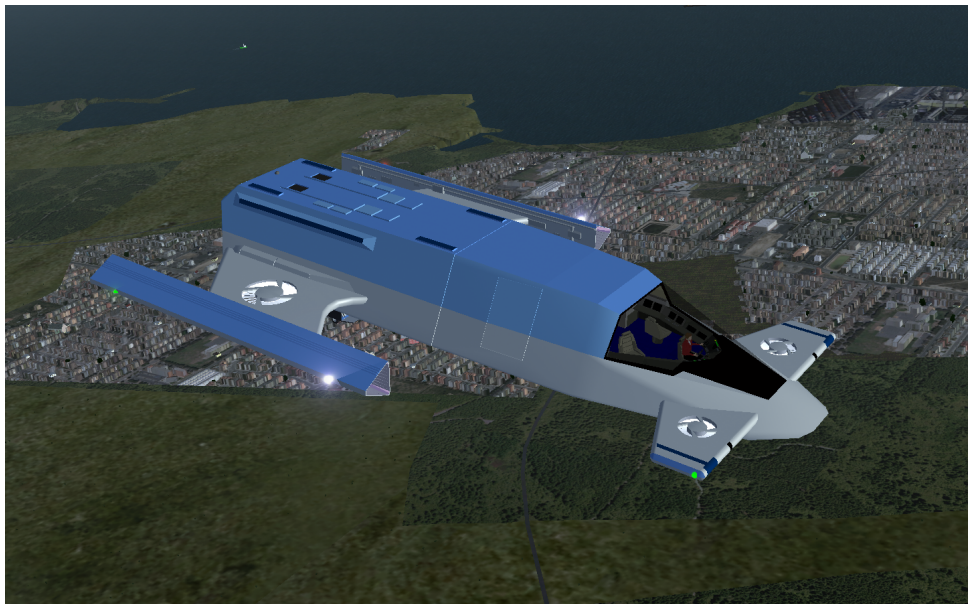


FIGURA 3.4 – Imagem da Aeronave Escolhida no *Flightgear*

3.1.2 *Jupyter Notebook*

O *Jupyter Notebook* é uma aplicação *web* de código aberto que permite a criação e compartilhamento de documentos que contêm código executável, equações, visualizações e texto narrativo (JUPYTER, 2023). Suportando várias linguagens de programação, como Python, R e Julia, o *Jupyter Notebook* é amplamente utilizado em ciência de dados, aprendizado de máquina, visualização de dados e computação científica. Ele facilita um fluxo de trabalho interativo, onde os usuários podem executar células de código individualmente, visualizar resultados imediatamente e combinar explicações textuais com códigos e gráficos, tornando-o uma ferramenta valiosa para pesquisa, ensino e desenvolvimento. Neste

caso será utilizada a linguagem de programação *Python* na aplicação.

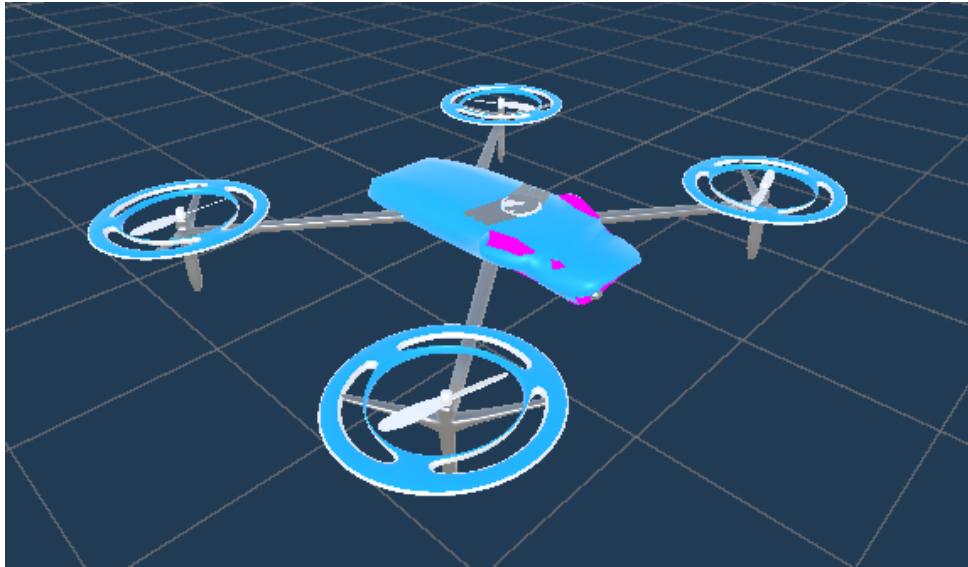
Ao iniciar o aplicativo do *FlightGear*, os dados referentes à aeronave já estão sendo enviados à porta lógica na configuração escolhida. Desse modo, utilizando *Jupyter Notebook* é possível gerar uma iteração para obter os dados enviados ao longo do tempo. No caso da *Tellnetconnection*, a biblioteca (DOCUMENTATION, 2024) foi utilizada para se conectar à mesma porta lógica e acessar as variáveis na árvore de resultados. Já no caso genérico, é importada a biblioteca *socket* (FOUNDATION, 2024c) para receber os dados. Em seguida, nos dois métodos os dados são organizados em formato JavaScript Object Notation (JSON) e enviados a um *broker* por meio de MQTT utilizando a biblioteca (FOUNDATION, 2024b).

3.2 Broker

No intermédio entre o *server* e *client*, há o broker no qual as mensagens são publicadas. Para testes desse projeto foi escolhido o *broker* publico do eclipse(FOUNDATION, 2024a). Nele se escolhe uma organização de tópicos para facilitar a simulação no *client*. Caso haja apenas um nível de subtópico como por exemplo 'drone/leader', é considerado a transmissão de dados de apenas um drone, o líder, e o enxame será gerado no *client*. Caso haja mais de um nível como por exemplo 'drone/swarm1/drone1', é considerado a transmissão de mais de um drone por meio de diferentes subtópicos sob o tópico principal 'drone/'. Desse modo, como o aplicativo *FlightGear* gera dados de apenas uma aeronave, a primeira configuração será utilizada para testes para posteriormente ser substituída pela segunda quando o projeto CTEDS estiver pronto para enviar dados de um enxame completo de drones.

3.3 Client

Já que o projeto objetiva a criação de um ambiente virtual simulado, foi escolhido o programa *Unity* que possui uma estrutura e diversas bibliotecas que auxiliam no desenvolvimento de um espaço 3D virtual (TECHNOLOGIES, 2024). Logo, para conectar o *Unity* ao broker e receber os dados MQTT, foi utilizada a biblioteca *M2MQTTClient* (CONTRIBUTORS, 2024). Ademais, em relação ao modelo 3D do drone, foi escolhido um já existente na loja do *Unity* como indica Figura 3.5.

FIGURA 3.5 – Imagem do *Drone* simulado em *Unity*

Em seguida, um conjunto de *scripts* são desenvolvidos para criar a lógica dessa etapa e são atribuídos a um mesmo objeto na cena *Unity*. Desse modo, o processo pode ser resumido da seguinte maneira, inicialmente busca-se a localização do dispositivo que está com o aplicativo ativo e o posiciona em relação a uma coordenada geográfica de origem, que pode ser escolhida antes de iniciar o programa. Em seguida, se estabelece a conexão MQTT e os dados são recebidos a cada atualização. Posteriormente, como descrito na seção 3.2, é identificado se apenas um *drone* ou mais de um estão sendo enviados via MQTT. Caso apenas um esteja sendo recebido, são criados *drones* seguidores cuja quantidade e formação do enxame pode ser escolhida antes de se iniciar o programa. Caso seja mais de um *drone* sendo recebido, não são criados *drones* seguidores e apenas os *drones* recebidos são simulados. Por fim, os dados recebidos são convertidos para as coordenadas no espaço 3D do *Unity* e são atribuídas ao *drone* correspondente. Assim, o programa consegue receber os dados de um módulo dinâmico enviados de outra máquina e representá-los corretamente em um espaço 3D. Nos subtópicos a seguir são explicados cada processo com maior detalhe.

3.3.1 Localização e Posicionamento

A localização nesse projeto é importante para simular um ambiente em que diversos dispositivos diferentes possam utilizar o aplicativo e visualizar os *drones* em uma mesma localização geográfica. Como esse trabalho objetiva contribuir na criação de um simulador de mundo, é necessário que todos os dispositivos concordem entre si. Porém, caso a localização do dispositivo não seja recebida, um posicionamento padrão é atribuído o colocando 10 unidades a frente da coordenada geográfica de origem.

A coordenada geográfica de origem representa a origem do espaço *Unity*. Logo, como o *FlightGear* possui seu próprio espaço com suas coordenadas, é necessário fazer a conversão de um espaço para o outro. A solução para esse problema foi de utilizar a coordenada inicial do *FlightGear* como origem no *Unity*. Assim, ao receber uma posição via MQTT, subtrai-se dela a coordenada de origem e posteriormente faz-se a conversão de coordenadas geográficas para o espaço *Unity* (ver Seção 2.5). Portanto, como a posição inicial do *FlightGear* pode ser escolhida, é possível realizar a simulação em qualquer coordenada geográfica ao definir a mesma coordenada como posição de origem, útil em casos de exposição para várias pessoas por exemplo.

Ademais, considerando que possa haver atrasos no recebimento de mensagens, foi utilizada uma biblioteca nativa do *Unity* para posicionamento dos *drones*. Nela, uma interpolação é feita entre a posição anterior e a atual, de modo a realizar uma movimentação mais fluida e realista.

3.3.2 Tópicos e Subtópicos

A classe *M2MQTTClient* a priori se conecta a apenas um tópico. Desse modo, para possibilitar a simulação de mais de um *drone*, foi feita uma subscrição a todos os subtópicos abaixo do tópico principal 'drone/' ao se utilizar a *wildcard* 'hashtag' (CEDALO, 2023). Desse modo, em um mesmo *buffer*, a informação de todos os *drones* que são enviados são recebidas. Portanto, para posicionar os *drones* corretamente, são criados em código *buffers* individuais para cada *drone*, que são identificados a partir de seu subtópico. Por exemplo, o subtópico 'drone/swarm1/drone1' terá seu próprio *buffer*, que será diferente do *buffer* do subtópico 'drone/swarm1/drone2'. Logo, a cada atualização do aplicativo, todos os *drones* têm sua posição atualizada conforme o valor de coordenada que é o primeiro elemento de seu *buffer*.

3.3.3 Formação de Enxame

Como o modelo dinâmico do CTEDS ainda não está disponível para ser integrado no projeto, foi desenvolvida em código uma forma de representar um enxame de *drones* a partir do recebimento dos dados de apenas um *drone*, o líder. Desse modo, são criados seguidores em código que possuem um posicionamento em relação ao líder para representação de enxame. Logo, são implementadas 4 formações diferentes, de modo que as 3 primeiras são estáticas e estão representadas conforme Figura 3.9. A última formação é dinâmica e os *drones* seguidores percorrem uma trajetória circular em torno do líder ao longo do tempo.

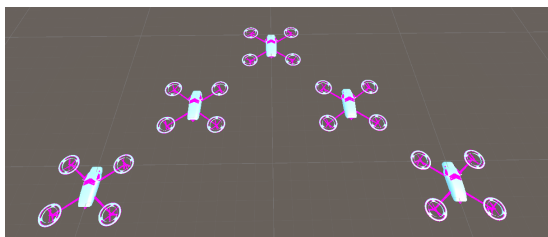


FIGURA 3.6 – Formação em V

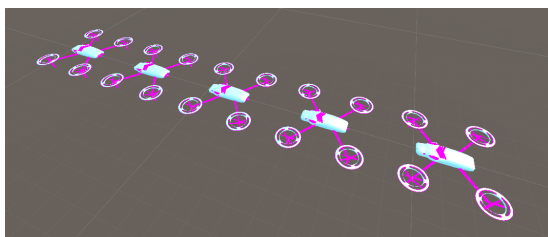


FIGURA 3.7 – Formação em Linha

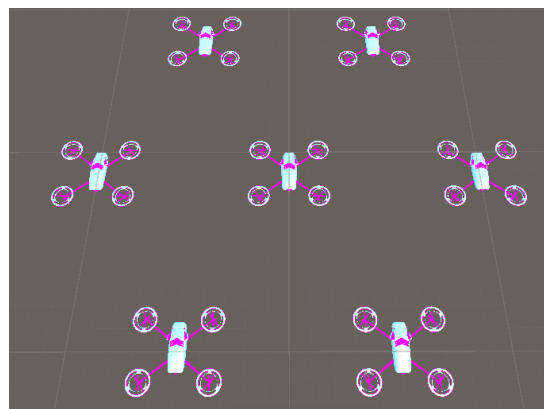


FIGURA 3.8 – Formação poligonal

FIGURA 3.9 – Diferentes formações de drones: (a) Formação em V, (b) Formação poligonal, (c) Formação em Linha.

4 Resultados e Aplicações

4.1 Resultados

4.1.1 Latência

A arquitetura do projeto se mostra efetiva na realização do projeto, pois a movimentação e a orientação do *drone* são corretamente comunicadas do *server* ao *client*. Não obstante, a simulação correta do *drone* não é suficiente para utilidade do aplicativo. Além disso, é necessário que a comunicação seja eficiente e tenha baixa latência. Desse modo, as duas configurações de comunicação entre o *Flightgear* e a porta lógica da máquina local foram testadas durante a execução do programa, analisando o intervalo de tempo entre as mensagens conforme Figura 4.3.

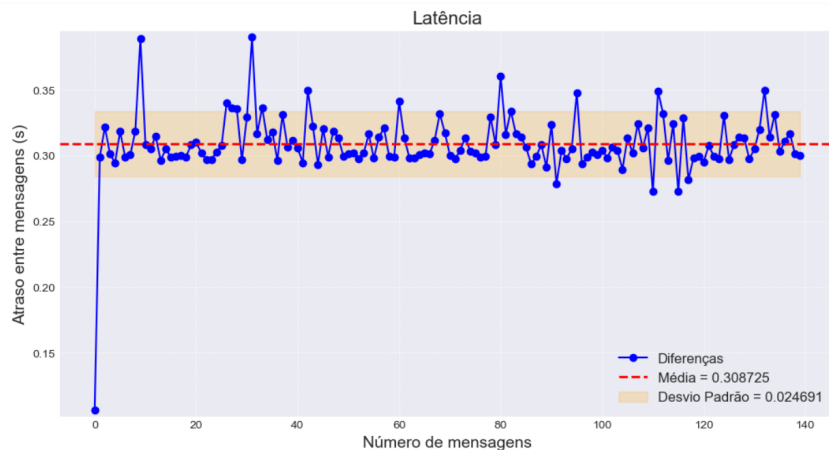


FIGURA 4.1 – Latência Telnet

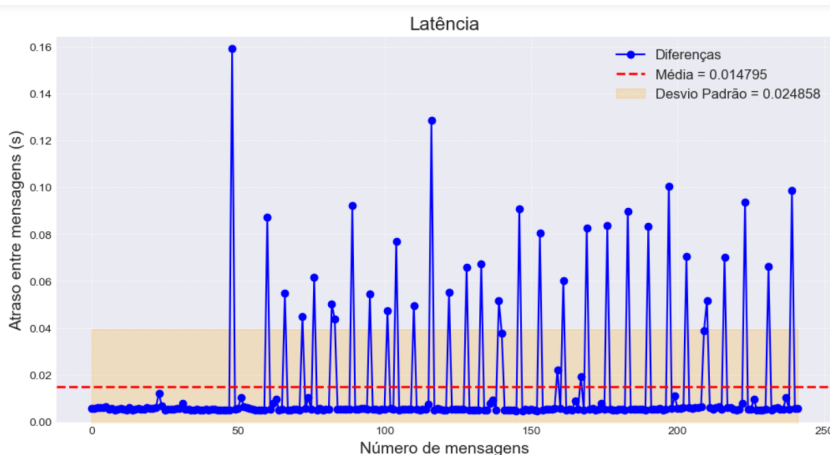


FIGURA 4.2 – Latência Genérica

FIGURA 4.3 – Comparação das Latências Telnet e Genérica

Pode-se notar um ganho considerável na eficácia da comunicação ao se utilizar a comunicação genérica entre o *Flightgear* e a porta lógica. Apesar de possuir mais atrasos fora do desvio padrão, a média da latência é muito menor, além de possuir valores de desvio padrão similares. Isso ocorre pois em *TelnetConnection*, é necessário realizar uma decodificação de toda a informação enviada na porta lógica em toda atribuição de variável. Como há três valores para posição, três para orientação e mais três para a velocidade, a eficiência de toda a comunicação fica comprometida devido ao atraso de buscar e atribuir os valores das variáveis de interesse. Já no caso da comunicação genérica, já são enviadas à porta lógica apenas as variáveis de interesse, eliminando o processo de decodificação e busca.

Portanto, se evidencia uma comunicação eficaz por meio do uso da comunicação genérica do *FlightGear* com a porta lógica. O protocolo MQTT, portanto, se mostra eficiente para a proposta de comunicar as movimentações dos *drones* em uma simulação de mundo. Desse modo, o projeto encontra-se pronto para posterior integração com o módulo dinâmico do CTEDS.

4.2 Aplicações

As aplicações de enxames de drones em ambientes virtuais simulados têm ganhado destaque significativo tanto no âmbito militar quanto no acadêmico. A evolução tecnológica desses sistemas permite a realização de operações complexas que vão desde missões de resgate até ataques coordenados, além de proporcionar um ambiente seguro para pesquisa e desenvolvimento em diversas áreas da engenharia e ciência da computação.

No contexto militar, os enxames de drones representam uma mudança paradigmática na condução de operações. Em missões de busca e resgate, por exemplo, a capacidade de mobilizar múltiplos drones simultaneamente permite uma cobertura mais ampla e eficiente de áreas afetadas por desastres naturais ou conflitos armados. Esses drones podem ser equipados com sensores térmicos e câmeras de alta resolução, facilitando a localização de sobreviventes em ambientes hostis ou de difícil acesso. A simulação em ambientes virtuais é essencial para o desenvolvimento e teste de algoritmos que coordenam essas operações, garantindo que os drones possam operar de forma autônoma e colaborativa sem a necessidade de intervenção humana constante.

Além das missões de resgate, os enxames de drones são utilizados em operações ofensivas. A capacidade de coordenar múltiplos drones para realizar ataques precisos contra alvos estratégicos aumenta significativamente a eficácia das forças armadas. Em ambientes simulados, é possível testar táticas de saturação das defesas inimigas, onde um grande número de drones é utilizado para sobrecarregar sistemas de defesa aérea. Esse tipo de simulação permite avaliar a eficiência de diferentes estratégias e aprimorar os algoritmos de inteligência artificial que governam o comportamento coletivo dos drones.

A simulação de missões e o treinamento são outras áreas cruciais onde os enxames de drones em ambientes virtuais desempenham um papel vital. As forças militares podem utilizar esses ambientes para planejar e ensaiar operações complexas sem os riscos e custos associados a exercícios reais. Os operadores de drones podem treinar em cenários realistas que replicam condições de combate, permitindo que desenvolvam habilidades essenciais para o sucesso das missões. Além disso, as simulações oferecem a possibilidade de análise pós-missão, onde o desempenho dos drones e dos operadores pode ser avaliado em detalhe, identificando áreas de melhoria e aperfeiçoamento.

No contexto acadêmico, os enxames de drones em ambientes virtuais simulados oferecem uma plataforma rica para pesquisa e desenvolvimento em diversas disciplinas. Estudos avançados de dinâmica de voo podem ser conduzidos sem a necessidade de recursos físicos dispendiosos, permitindo a investigação de novos modelos e configurações aeronáuticas. A interação aerodinâmica entre drones em proximidade, por exemplo, é um tópico de grande interesse que pode ser explorado em detalhes através de simulações.

4.2.1 Operações Ofensivas e Estratégias Militares

Ataques Coordenados

Os enxames de drones são capazes de realizar ataques precisos contra alvos estratégicos através da coordenação eficiente entre suas unidades. Utilizando algoritmos avançados de comunicação e inteligência artificial, os drones podem sincronizar suas ações em tempo real, permitindo a sobreposição de múltiplos ataques simultâneos. Essa precisão é alcançada pela análise contínua de dados de sensores e pela capacidade de ajustar trajetórias e estratégias de ataque de forma dinâmica, minimizando erros e maximizando a eficácia contra alvos específicos, como centros de comando, infraestrutura crítica ou instalações militares.

Saturação de Defesas Inimigas

Uma das táticas eficazes dos enxames de drones é a saturação das defesas inimigas. Ao enviar um grande número de drones simultaneamente, os sistemas de defesa convencionais podem ser rapidamente sobrecarregados, dificultando a detecção, rastreamento e neutralização de cada unidade individualmente. Essa abordagem aumenta significativamente as chances de alguns drones alcançarem seus objetivos, mesmo em ambientes altamente protegidos. Além disso, a diversidade de tipos e funções dos drones pode confundir e dispersar os esforços de defesa, tornando a operação mais eficaz.

Inteligência Artificial

A inteligência artificial desempenha um papel crucial na autonomia e coordenação dos drones dentro de um enxame. Através de algoritmos de aprendizado de máquina e processamento de dados em tempo real, os drones podem tomar decisões independentes e adaptativas sem a necessidade de controle humano constante. A IA permite que os drones identifiquem alvos, planejem rotas de ataque, evitem obstáculos e reajam a mudanças no ambiente operacional de forma rápida e eficiente. Essa autonomia não apenas aumenta a eficácia das operações ofensivas, mas também reduz a carga cognitiva sobre os operadores humanos.

Impacto Estratégico

As operações ofensivas baseadas em enxames de *drones* têm o potencial de alterar significativamente a balança de poder militar. A capacidade de realizar ataques coordenados

e saturar as defesas inimigas pode tornar forças armadas tradicionais menos eficazes, exigindo a adaptação e modernização das estratégias de defesa. Além disso, a dissuasão estratégica pode ser impactada, já que a ameaça de ataques massivos e difíceis de prever pode influenciar as decisões políticas e militares. A superioridade tecnológica na utilização de enxames de *drones* pode conferir uma vantagem decisiva a nações que investem em tais capacidades, redefinindo o equilíbrio geopolítico.

4.2.2 Logística Militar e Suporte em Campo

Os enxames de drones estão transformando significativamente a logística militar e o suporte em campo, oferecendo soluções inovadoras para desafios tradicionais enfrentados pelas forças armadas. A capacidade de coordenar múltiplos drones para realizar tarefas logísticas complexas representa um avanço estratégico, proporcionando agilidade, eficiência e segurança nas operações.

Em cenários de combate ou em ambientes hostis, o transporte de suprimentos e equipamentos é crucial para o sucesso das missões e a sobrevivência das tropas. Os enxames de drones podem ser programados para entregar munição, alimentos, medicamentos e outros materiais essenciais diretamente nas zonas de operação, superando obstáculos como terrenos inacessíveis ou áreas sob ameaça inimiga. A utilização de múltiplos drones reduz o risco associado ao transporte terrestre ou aéreo tripulado, minimizando a exposição de indivíduos a perigos iminentes.

A aplicação de enxames de drones na logística militar também permite a otimização de rotas e a distribuição inteligente de cargas. Por meio de algoritmos avançados e sistemas de inteligência artificial, os drones podem ajustar suas trajetórias em tempo real, evitando ameaças detectadas ou adaptando-se a mudanças nas condições climáticas. Essa adaptabilidade aumenta a resiliência das operações logísticas, garantindo que os suprimentos cheguem ao destino mesmo diante de imprevistos.

Ambientes virtuais simulados desempenham um papel fundamental no desenvolvimento e aprimoramento dessas aplicações logísticas. Através da simulação, é possível testar diferentes configurações de enxames, avaliar a eficácia de estratégias de entrega e identificar potenciais vulnerabilidades sem os custos e riscos associados a testes no mundo real. Essas simulações permitem que militares e engenheiros experimentem com variáveis como número de drones, capacidades de carga, autonomia de voo e protocolos de comunicação, refinando continuamente as operações logísticas.

Além disso, os enxames de drones podem ser integrados a sistemas de gestão logística mais amplos, contribuindo para uma cadeia de suprimentos militar mais eficiente e responsiva. A capacidade de monitorar em tempo real o status das entregas e a localiza-

ção dos drones proporciona aos comandantes maior controle e capacidade de tomada de decisão informada.

Em suma, a implementação de enxames de drones na logística militar e no suporte em campo representa uma evolução significativa nas capacidades operacionais das forças armadas. Ao reduzir riscos, aumentar a eficiência e proporcionar maior flexibilidade, esses sistemas contribuem para o fortalecimento estratégico e tático das operações militares modernas. A continuidade do investimento em pesquisa e desenvolvimento nessa área, especialmente por meio de simulações virtuais, é essencial para explorar todo o potencial que os enxames de drones oferecem à logística militar.

4.2.3 Operações Humanitárias e Assistência em Desastres

Os enxames de drones têm emergido como ferramentas essenciais em operações humanitárias e de assistência em desastres, ampliando a capacidade de resposta rápida e eficaz a crises. Em situações de emergência, como terremotos, inundações, furacões ou conflitos armados, a rapidez na avaliação de danos e na prestação de auxílio pode salvar inúmeras vidas. Os drones em enxame oferecem soluções inovadoras para superar os desafios impostos por tais cenários, onde a infraestrutura frequentemente está comprometida ou é inexistente.

Uma das principais contribuições dos enxames de drones em operações humanitárias é a capacidade de realizar mapeamento e reconhecimento rápidos de áreas afetadas. Equipados com câmeras de alta resolução, sensores térmicos e outros dispositivos de coleta de dados, os drones podem fornecer imagens e informações detalhadas em tempo real. Isso permite que equipes de resgate e organizações humanitárias identifiquem as áreas mais críticas, localizem sobreviventes e planejem rotas de acesso seguras. A utilização de enxames acelera esse processo, pois múltiplos drones podem cobrir extensões geográficas amplas simultaneamente.

Além do reconhecimento, os enxames de drones são fundamentais para a entrega de suprimentos essenciais. Em situações onde estradas estão bloqueadas ou inacessíveis, os drones podem transportar medicamentos, água potável, alimentos e outros itens de primeira necessidade diretamente às populações isoladas. A coordenação entre os drones garante que as entregas sejam realizadas de forma eficiente e organizada, evitando duplicações ou omissões. A capacidade de voo autônomo e a programação de rotas otimizadas tornam o processo de distribuição mais rápido e menos suscetível a erros humanos.

Os ambientes virtuais simulados desempenham um papel crucial na preparação para essas operações. Por meio de simulações, é possível treinar equipes, testar protocolos de resposta e aperfeiçoar os sistemas de controle dos drones. Cenários virtuais permitem

que operadores e planejadores antecipem desafios específicos de diferentes tipos de desastres, como terremotos em áreas urbanas densas ou inundações em regiões rurais. Essa preparação aumenta a eficácia das intervenções reais, reduzindo o tempo de resposta e melhorando a coordenação entre diferentes agentes envolvidos na assistência.

Outro aspecto relevante é a monitorização ambiental pós-desastre. Enxames de drones podem ser utilizados para avaliar continuamente as condições das áreas afetadas, identificando riscos secundários como deslizamentos de terra, vazamentos de substâncias perigosas ou surgimento de epidemias. Essas informações são vitais para a tomada de decisões informadas e para a alocação eficiente de recursos de socorro.

Desse modo, os enxames de drones representam um avanço significativo nas operações humanitárias e de assistência em desastres, oferecendo soluções eficazes para desafios complexos. A combinação de tecnologia avançada, capacidade de coordenação e uso de simulações virtuais posiciona esses sistemas como componentes indispensáveis nas estratégias modernas de resposta a emergências. Investir no desenvolvimento e na integração dos enxames de drones nessas operações é fundamental para aumentar a resiliência das sociedades frente a desastres naturais e crises humanitárias.

4.2.4 Estudos de Dinâmica de Voo

Modelagem e Simulação

Ambientes virtuais são ferramentas indispensáveis na pesquisa de dinâmica de voo de drones, permitindo a modelagem e simulação de cenários complexos sem os altos custos associados a testes físicos. Através de softwares, é possível criar modelos tridimensionais detalhados e simular condições ambientais diversas, como vento, turbulência e interferências eletromagnéticas. Isso facilita a experimentação com diferentes configurações e estratégias de voo, acelerando o desenvolvimento e a otimização de tecnologias de drones antes de sua implementação no mundo real.

Novos Modelos Aeronáuticos

A investigação de configurações inovadoras de drones é essencial para aprimorar suas capacidades e eficiência. Pesquisas estão focadas no desenvolvimento de designs biomiméticos, inspirados em aves e insetos, que oferecem melhor manobrabilidade e adaptabilidade a diferentes ambientes. Além disso, novas arquiteturas modulares permitem que drones sejam reconfigurados para diversas missões, aumentando sua versatilidade. Essas inovações aeronáuticas não apenas melhoram o desempenho dos drones, mas também expandem suas aplicações em áreas como vigilância, transporte de carga e resgate em desastres.

Interação Aerodinâmica

Estudar o comportamento de drones em proximidade é fundamental para a operação segura e eficiente de enxames. A interação aerodinâmica entre múltiplos drones pode gerar fenômenos complexos, como turbulência e interferências nas trajetórias de voo. Pesquisas nessa área visam entender e mitigar esses efeitos, garantindo que os drones possam operar em formação apertada sem comprometer sua estabilidade ou desempenho. Além disso, o conhecimento sobre interação aerodinâmica contribui para o desenvolvimento de estratégias de voo coletivo que otimizam o consumo de energia e aumentam a eficiência aerodinâmica dos enxames.

4.2.5 Robótica e Inteligência Artificial

Algoritmos de Enxame

O desenvolvimento de algoritmos de enxame é essencial para a criação de comportamentos coletivos emergentes em drones. Esses algoritmos permitem que cada drone, operando de forma autônoma, siga regras simples de interação local, resultando em comportamentos complexos e coordenados a nível de enxame. Exemplos incluem formação de padrões, dispersão em resposta a ameaças e movimentação em direção a alvos. A eficácia desses algoritmos está diretamente relacionada à sua capacidade de promover a resiliência e adaptabilidade do enxame diante de mudanças no ambiente ou na missão.

Aprendizado de Máquina

Técnicas de aprendizado de máquina são aplicadas para aprimorar a autonomia dos drones, permitindo que eles aprendam e se adaptem a novas situações sem intervenção humana. Algoritmos de reforço, redes neurais e outras abordagens de inteligência artificial possibilitam que os drones melhorem seu desempenho através da experiência, otimizando rotas, detectando e evitando obstáculos de forma mais eficiente e adaptando-se a condições ambientais variáveis. Isso resulta em sistemas de drones mais robustos e capazes de operar de maneira independente em missões complexas.

Sistemas Multiagentes

A cooperação entre drones para atingir objetivos comuns é facilitada por sistemas multiagentes, onde cada drone atua como um agente individual que contribui para a missão coletiva. Esses sistemas permitem a distribuição de tarefas, como reconhecimento,

vigilância e ataque, garantindo que o enxame opere de forma coordenada e eficiente. A comunicação entre agentes é fundamental para a troca de informações e a tomada de decisões conjunta, permitindo que o enxame se adapte dinamicamente às mudanças nas condições de missão e aos desafios encontrados no campo de operação.

Contribuições Interdisciplinares

O avanço dos enxames de drones e suas aplicações militares é resultado da colaboração entre diferentes áreas da ciência e engenharia. Engenharia aeronáutica, ciência da computação, robótica, inteligência artificial, matemática e ciências de materiais são apenas algumas das disciplinas envolvidas. Essa abordagem interdisciplinar promove inovações tecnológicas, permitindo o desenvolvimento de sistemas mais sofisticados e eficazes. Além disso, é possível ainda a integração de conhecimentos para a criação de interfaces mais intuitivas e estratégias de operação que considerem fatores humanos e comportamentais.

4.2.6 Desafios e Perspectivas Futuras

Limitações Tecnológicas

Apesar dos avanços significativos no desenvolvimento de enxames de drones, ainda existem desafios tecnológicos consideráveis que precisam ser superados. A autonomia energética é uma das principais limitações, já que a duração das baterias atualmente restringe o tempo de operação dos drones. Pesquisas em novas tecnologias de baterias e fontes de energia renovável são essenciais para aumentar a autonomia e a eficiência energética dos enxames. Além disso, o processamento de dados em tempo real apresenta desafios devido à enorme quantidade de informações que os drones devem analisar e compartilhar constantemente. A necessidade de hardware mais potente e algoritmos mais eficientes de processamento de dados é crucial para garantir respostas rápidas e precisas durante as operações.

Questões Éticas e Legais

O uso de enxames de drones em operações militares levanta importantes questões éticas e necessidades de regulamentação. A possibilidade de ataques automatizados e autônomos sem intervenção humana direta suscita debates sobre responsabilidade em caso de erros ou danos colaterais. Além disso, há preocupações sobre a privacidade e o uso indevido da tecnologia em contextos civis. É imperativo desenvolver quadros legais claros e abrangentes que regulem o uso de drones militares, assegurando que sua aplicação

esteja alinhada com os princípios de direito internacional humanitário e respeite os direitos humanos.

Integração com Tecnologias Emergentes

A convergência com tecnologias emergentes como a Internet das Coisas (IoT), 5G e inteligência artificial avançada promete transformar ainda mais as capacidades dos enxames de drones. A integração com IoT permitirá uma comunicação mais ampla e eficiente entre os drones e outros dispositivos conectados, facilitando a troca de informações e a coordenação em tempo real. A implementação de redes 5G proporcionará maior largura de banda e menor latência, essencial para a operação sincronizada de grandes enxames. Além disso, avanços em IA permitirão níveis superiores de autonomia e tomada de decisão dos drones, tornando-os mais adaptáveis e resilientes em ambientes dinâmicos e complexos.

Perspectivas de Pesquisa

As perspectivas de pesquisa para os enxames de drones são vastas e promissoras, abrangendo diversas áreas interdisciplinares. Estudos sobre comportamentos emergentes e algoritmos de otimização continuarão a aprimorar a eficiência e a robustez dos enxames. A robótica avançada e a biomimética oferecem caminhos para o desenvolvimento de drones com capacidades de adaptação semelhantes às de organismos vivos, aumentando sua versatilidade em diferentes missões. Além disso, a cibersegurança se torna uma área crítica, garantindo que os sistemas de drones sejam protegidos contra ataques cibernéticos e manipulações externas. A pesquisa em materialização leve e resistente também é fundamental para melhorar a durabilidade e a eficiência energética dos drones. Finalmente, a colaboração entre diferentes disciplinas científicas continuará a impulsionar inovações tecnológicas, abrindo novas fronteiras para o uso e a aplicação dos enxames de drones em contextos militares e civis.

5 Conclusão

O objetivo principal deste trabalho foi integrar dados de simulação de voo provenientes do FlightGear com o ambiente de desenvolvimento Unity, permitindo a visualização e interação em tempo real de múltiplas aeronaves em um espaço tridimensional. Para alcançar esse objetivo, foram abordados diversos aspectos técnicos, incluindo a transformação de coordenadas geográficas para coordenadas cartesianas, a comunicação entre diferentes módulos via protocolos de comunicação e a implementação de algoritmos de conversão e visualização.

Os resultados obtidos demonstraram que o uso de comunicação genérica, utilizando um protocolo como o MQTT, foi significativamente mais efetivo do que a conexão *Telnet* na transmissão e recepção dos dados do *FlightGear* na porta lógica da máquina local. Essa abordagem proporcionou uma redução na latência, apresentando uma média de latência de 15 milissegundos com um desvio padrão de 25 milissegundos, melhorando a responsividade e a sincronização dos dados entre o *FlightGear* e o *Unity*. Essa melhoria é crucial para aplicações que exigem atualizações em tempo real e precisão na representação dos movimentos das aeronaves.

Ademais, a transformação de coordenadas, detalhada na Seção 2.5, foi essencial para garantir que a representação das aeronaves no *Unity* correspondesse com precisão às posições fornecidas pelo *FlightGear*. A implementação adequada dessas conversões contribuiu para a precisão espacial e a integridade visual da simulação.

Trabalhos Futuros

Como continuidade deste projeto, várias ações podem ser implementadas para aprimorar e expandir as funcionalidades do sistema desenvolvido.

Uma das principais propostas é o Desenvolvimento em Realidade Aumentada (AR). Expandir a aplicação para incluir representações em AR permitiria que múltiplos usuários visualizassem e interagissem com as aeronaves utilizando dispositivos móveis, como smartphones. Essa abordagem possibilitaria experiências mais imersivas e colaborativas,

ampliando o alcance e a aplicabilidade do sistema em contextos educacionais e profissionais. A integração da AR não apenas tornaria a simulação mais acessível a diferentes públicos, mas também abriria oportunidades para o desenvolvimento de novas funcionalidades e métodos de interação entre usuários e o ambiente simulado.

Outra direção importante é a integração bidirecional de dados. Atualmente, o sistema representa uma entidade que não interage com outros elementos no ambiente simulado. Implementar a conexão de *outputs*, como colisões e interações do cliente de volta para o servidor, permitiria que o enxame de drones interagisse com outras entidades no ambiente. A inclusão dessa funcionalidade enriqueceria a dinâmica da simulação e possibilitaria a implementação de comportamentos mais complexos, como esquemas de prevenção de colisões, formação de padrões de voo e respostas a eventos externos. Isso tornaria o sistema mais robusto e aplicável em cenários que exigem interações mais sofisticadas entre múltiplas entidades.

A análise de escalabilidade também se apresenta como uma área de grande interesse. Investigar e implementar técnicas de otimização para identificar e possivelmente aumentar o limite de número de drones é fundamental. Isso pode incluir a otimização de algoritmos, melhor gerenciamento de recursos e a possível utilização de processamento distribuído ou paralelo. Ao ampliar a capacidade de simular um maior número de drones, o sistema poderia ser aplicado em estudos de tráfego aéreo, coordenação de enxames em grande escala e outras aplicações que exigem a simulação simultânea de múltiplas entidades.

Por fim, recomenda-se a realização de uma Análise Detalhada de Performance. Estudos mais aprofundados sobre a latência e o desempenho geral do sistema são essenciais para identificar e mitigar possíveis gargalos no processamento e na comunicação de dados. Buscando reduzir ainda mais a latência média e o desvio padrão, pode-se melhorar significativamente a responsividade e a precisão do sistema. Essa análise permitiria otimizar a eficiência do sistema, garantindo que ele atenda aos requisitos de desempenho necessários para aplicações em tempo real e em ambientes críticos.

Essas ações propostas visam não apenas aprimorar o sistema atual, mas também expandir seu potencial de aplicação em diferentes contextos. A implementação dessas melhorias contribuiria para o avanço na área de simulação de voos e desenvolvimento de ambientes virtuais interativos, oferecendo soluções inovadoras e eficazes para desafios complexos no campo da aviação e tecnologia da informação.

Referências

CEDALO. **MQTT Topics and MQTT Wildcards Explained**. 2023. Artigo de Blog.

Available at:

https://cedalo.com/blog/mqtt-topics-and-mqtt-wildcards-explained/Hash_Wildcards.

CONTRIBUTORS, E. P. **paho.mqtt.m2mqtt**. 2024.

<https://github.com/eclipse/paho.mqtt.m2mqtt>. Repositório no GitHub.

DOCUMENTATION, F. P. **TelnetConnection**. 2024. Available at:

https://flightgear-python.readthedocs.io/en/latest/_autosummary/flightgear_python_fg_if.TelnetConnection.html.

FLIGHTGEAR. **FlightGear Flight Simulator**. 2023. <https://www.flightgear.org>.

Acesso em: 28 out. 2023.

FOUNDATION, E. **Mosquitto Test Server**. 2024. Servidor de teste para o broker

MQTT Mosquitto. Available at: <https://test.mosquitto.org/>.

FOUNDATION, E. **paho-mqtt**. 2024. Versão 1.6.1. Available at:

<https://pypi.org/project/paho-mqtt/>.

FOUNDATION, P. S. **socket — Low-level networking interface**. 2024. Versão 3.x.

Available at: <https://docs.python.org/3/library/socket.html>.

JUPYTER. **Project Jupyter**. 2023. <https://jupyter.org/>. Acesso em: 28 out. 2023.

PRIMO, A. O aspecto relacional das interações na web 2.0. **E-Compós**, v. 9, acesso em:

28 out. 2023, 2007. Available at:

<http://www.compos.org.br/seer/index.php/e-compos/article/view->

[/279](http://www.compos.org.br/seer/index.php/e-compos/article/view/279)<http://www.compos.org.br/seer/index.php/e-compos/article/view/279>.

TECHNOLOGIES, U. **Unity**. 2024. Plataforma de desenvolvimento de jogos e aplicações

interativas. Available at: <https://unity.com/>.

WIKI, F. **Generic Protocol**. 2024. Available at:

https://wiki.flightgear.org/Generic_protocol.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

^{1.} CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TC</p>	^{2.} DATA <p style="text-align: center;">12 de novembro de 2024</p>	^{3.} REGISTRO N° <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/TC-076/2024</p>	^{4.} N° DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">42</p>
^{5.} TÍTULO E SUBTÍTULO: Integração de simulador de enxame de drones em um simulador de mundo utilizando o protocolo MQTT			
^{6.} AUTOR(ES): Eduardo Soares e Silva Britto			
^{7.} INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
^{8.} PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Enxame de Drones; Simulação Distribuída; MQTT; Conversão Coordenadas; Aplicação Militar			
^{9.} PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Veículos não-tripulados; Simulação; Protocolo de comunicação; Operações militares; Veículos pilotados remotamente; Engenharia aeroespacial.			
^{10.} APRESENTAÇÃO: <input checked="" type="checkbox"/> Nacional <input type="checkbox"/> Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica. Orientador: Christopher Shneider Cerqueira. Publicado em 2024.			
^{11.} RESUMO: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de simulação distribuída para enxames de drones, com foco em aplicações militares. O sistema integra a lógica e a transmissão dos dados dos drones em um arquivo <i>Python Notebook</i> , que se comunica com um servidor central utilizando o protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). A motivação para este estudo reside na crescente importância dos enxames de drones para missões críticas, onde a coordenação eficiente e a resposta rápida são essenciais. A metodologia envolve a implementação de uma arquitetura distribuída que permite a comunicação e a coordenação entre múltiplos drones de forma eficiente, além de também possibilitar interação com outras entidades do ambiente simulado. Os resultados demonstram a viabilidade do sistema proposto, destacando melhorias na escalabilidade e na capacidade de resposta em cenários simulados. Este trabalho contribui para a área de simulação distribuída, oferecendo uma solução robusta e escalável para a gestão de enxames de drones em operações militares.			
^{12.} GRAU DE SIGILO: <p style="text-align: center;"> <input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> SECRETO </p>			