

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**



**Phellype Rerison Figueiredo de Freitas**

**MODELAGEM DE SARPS (SISTEMAS DE  
AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS) EM  
AMBIENTE DE REALIDADE VIRTUAL**

Trabalho de Graduação  
2024

**Curso de Engenharia Aeronáutica**

**Phellype Rerison Figueiredo de Freitas**

**MODELAGEM DE SARPS (SISTEMAS DE  
AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS) EM  
AMBIENTE DE REALIDADE VIRTUAL**

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**

Freitas, Phellype Rerison Figueiredo de  
Modelagem de SARPs (Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas) em ambiente de  
Realidade Virtual / Phellype Rerison Figueiredo de Freitas.  
São José dos Campos, 2024.  
55f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Aeronáutica– Instituto Tecnológico de  
Aeronáutica, 2024. Orientador: Prof. Dr. Christopher Shneider Cerqueira.  
1. Realidade virtual. 2. Aeronave não-tripulada. 3. Computação I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica.  
II. Título.

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

FREITAS, Phellype Rerison Figueiredo de. **Modelagem de SARPs (Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas) em ambiente de Realidade Virtual**. 2024. 55f.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica,  
São José dos Campos.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Phellype Rerison Figueiredo de Freitas

TÍTULO DO TRABALHO: Modelagem de SARPs (Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas) em ambiente de Realidade Virtual.

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.

---

Phellype Rerison Figueiredo de Freitas  
Rua H8B, Ap. 218  
12.228-461 – São José dos Campos–SP

# MODELAGEM DE SARPS (SISTEMAS DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS) EM AMBIENTE DE REALIDADE VIRTUAL

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

*Phellype Rerison Figueiredo de Freitas*

---

Phellype Rerison Figueiredo de Freitas

Autor

*Christopher Shneider*

---

Christopher Shneider Cerqueira (ITA)

Orientador

*Vinicius Malatesta*

---

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

São José dos Campos, 14 de novembro de 2024.



À minha família, por serem minha maior motivação e, mesmo após tantos momentos de dificuldade, me mostraram pelo que vale a pena buscar realizar todos os meus sonhos.

# Agradecimentos

Acima de tudo, gostaria de agradecer à minha família, em especial à minha mãe, meu maior símbolo de garra, minha maior apoiadora, minha razão de viver.

Aos meus colegas de apartamento no ITA, por fazerem do H8 minha segunda casa e por todos os momentos de risada inesquecíveis.

Aos meus parceiros de treinos João Raphael e Joaci Campos, por me proporcionarem momentos de crescimento pessoal que levarei para sempre em minhas lembranças.

Ao Prof. Christopher, por ter me aceitado como orientado e ter demonstrado tanta capacidade e confiança durante esses últimos meses.

Ao meu querido grupo de trabalhos na graduação, Beatriz, Bruno Henrique e Lisandra, e à minha dupla de sofrimento nas noites viradas estudando, Rafael Modesto, por terem me carregado nas costas até o último momento.

*"We must trust the dark,  
For showing us the stars."*  
— EARTH, WIND & FIRE

# Resumo

Este projeto teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de drones em tempo real utilizando realidade aumentada, integrando tecnologias como o Geospatial Creator da Google, Unity, e o protocolo MQTT para criar uma solução robusta e intuitiva. O sistema foi projetado para posicionar drones virtuais com base em coordenadas geográficas precisas, utilizando âncoras geoespaciais que permitem a sincronização do mundo virtual com o físico. Durante o desenvolvimento, um objeto denominado *GeospatialController* foi implementado para gerenciar a criação e atualização das âncoras, e outro, chamado *MQTT\_receiver*, foi utilizado para receber dados de localização em tempo real via protocolo MQTT. Testes foram realizados em uma trajetória simulada entre dois pontos no H8, alojamento do ITA, utilizando um tablet Samsung Galaxy Tab S9, para avaliar a precisão do sistema, a estabilidade das âncoras e a responsividade às mudanças de posição dos drones. Apesar de o sistema ter demonstrado alta precisão na representação das posições e fluidez nas transições, foi identificado que o processo de destruição e recriação das âncoras causava pequenas travadas na câmera, indicando que há espaço para otimizações no gerenciamento das âncoras. A integração entre MQTT e Geospatial Creator permitiu a atualização contínua e confiável das posições, demonstrando o potencial do sistema para aplicações práticas em monitoramento aéreo. Os resultados alcançados refletem a viabilidade de soluções baseadas em realidade aumentada para a gestão do espaço aéreo e oferecem uma base sólida para futuros aprimoramentos e expansões do sistema.

# Abstract

This project aimed to develop a real-time drone monitoring system using augmented reality, integrating technologies such as Google's Geospatial Creator, Unity, and the MQTT protocol to create a robust and intuitive solution. The system was designed to position virtual drones based on precise geographic coordinates using geospatial anchors that allow synchronization between the virtual and physical worlds. During development, an object named *GeospatialController* was implemented to manage the creation and updating of anchors, and another object, *MQTT\_receiver*, was used to receive real-time location data via the MQTT protocol. Tests were conducted on a simulated trajectory between two points at H8, the ITA student housing, using a Samsung Galaxy Tab S9 tablet to evaluate the system's accuracy, anchor stability, and responsiveness to drone position changes. Although the system demonstrated high precision in position representation and smooth transitions, it was noted that the process of destroying and recreating anchors caused slight stuttering in the camera feed, suggesting room for optimization in anchor management. The integration of MQTT and Geospatial Creator enabled continuous and reliable position updates, demonstrating the system's potential for practical applications in aerial monitoring. The achieved results reflect the feasibility of augmented reality-based solutions for airspace management and provide a solid foundation for future improvements and system expansions.

# Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – Níveis de serviço do U-Space. Retirado de (LAPPAS <i>et al.</i> , 2022) . . .	21
FIGURA 2.2 – Nós explorados na utilização do algoritmo A*. Retirado de (RUZ <i>et al.</i> , 2007) . . . . .	24
FIGURA 2.3 – Otimização de rota calculada pelo método MILP. Retirado de (RUZ <i>et al.</i> , 2007) . . . . .	24
FIGURA 2.4 – Campo potencial para um veículo específico. Retirado de (PAUL <i>et al.</i> , 2008) . . . . .	25
FIGURA 2.5 – Consideração de algoritmo geométrico para DAA. Retirado de (MIGLIACCIO <i>et al.</i> , 2016). . . . .	26
FIGURA 2.6 – Interface da aplicação de realidade aumentada desenvolvida pela nasa. Retirado de (NASA, 2023). . . . .	27
FIGURA 2.7 – Interface de realidade aumentada proposta por Bagassi e Corsi (2024) para monitoramento de drones em aeroportos. . . . .	28
FIGURA 2.8 – Projeto RETINA. Retirado de (RETINA Project, 2024) . . . . .	30
FIGURA 3.1 – Ilustração da interação via MQTT. Retirado de (Jason Bagby, 2020). . . . .	32
FIGURA 3.2 – Cena típica de utilização do Unity para RA. Retirado de (Unity Technologies, 2024) . . . . .	35
FIGURA 3.3 – Janela de instalação de pacotes do Unity. Retirado de (Google Developers, 2024). . . . .	42
FIGURA 3.4 – Janela de instalação do ARCore Extensions. . . . .	43
FIGURA 3.5 – Inserção do Geospatial Creator Origin. Retirado de (Google Developers, 2024). . . . .	44
FIGURA 3.6 – Objetos da cena na janela Hierarchy. . . . .	44
FIGURA 4.1 – Trajetória de voo simulado. . . . .	47

---

FIGURA 4.2 – Posicionamento do objeto 3D no início da trajetória. . . . .	48
FIGURA 4.3 – Objeto posicionado corretamente na trajetória definida durante seu percurso . . . . .	49
FIGURA 4.4 – Fluxo de dados publicados no MQTTX. . . . .	50

# Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – Requisitos de um sistema DAA. (HOTTMAN; BERRY, 2009) . . . . .	23
---	----



# Lista de Abreviaturas e Siglas

UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UAM	Urban Air Mobility
SARP	Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada
DAA	Detect and Avoid
DSA	Detect, Sense and Avoid

# Lista de Símbolos

$a$	Distância
$\mathbf{a}$	Vetor de distâncias
$\mathbf{e}_j$	Vetor unitário de dimensão $n$ e com o $j$ -ésimo componente igual a 1
$\mathbf{K}$	Matriz de rigidez
$m_1$	Massa do cumpim
$\delta_{k-k_f}$	Delta de Kronecker no instante $k_f$

# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	16
1.1	<b>Fundamentos e Aplicações da Realidade Aumentada no Controle de Tráfego de SARPs . . . . .</b>	16
1.2	<b>Benefícios e Desafios da Realidade Aumentada no Controle de Tráfego de SARPs . . . . .</b>	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA . . . . .	20
2.1	<b>Pesquisas e desenvolvimento em Urban Air Mobility . . . . .</b>	20
2.2	<b>Desafios e soluções de sistemas DAA . . . . .</b>	22
2.3	<b>Análise de Estudos sobre Realidade Aumentada no Gerenciamento e Monitoramento do Tráfego de Aeronaves . . . . .</b>	26
3	METODOLOGIA . . . . .	32
3.0.1	Descrição do Problema . . . . .	33
3.1	<b>Ferramentas utilizadas . . . . .</b>	34
3.1.1	Unity . . . . .	35
3.1.2	Google ARCore . . . . .	36
3.1.3	Geospatial Creator . . . . .	37
3.1.4	MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) . . . . .	40
3.2	<b>Implementação . . . . .</b>	41
3.2.1	Implementação do Projeto . . . . .	41
3.3	<b>Teste e Validação . . . . .</b>	46
4	RESULTADOS . . . . .	47
4.1	<b>Precisão e Estabilidade das Âncoras Geoespaciais . . . . .</b>	47

---

4.2	Desempenho em Tempo Real e Atualização de Posições . . . . .	49
4.3	Experiência do Usuário e Visualização dos Drones . . . . .	49
4.4	Limitações e Possíveis Melhorias . . . . .	50
4.5	Conclusão dos Resultados . . . . .	50
5	CONCLUSÃO . . . . .	52
	REFERÊNCIAS . . . . .	53

# 1 Introdução

A rápida evolução da tecnologia ao longo das últimas décadas tem proporcionado avanços significativos em diversas áreas, incluindo a aviação. Uma dessas inovações é a integração da realidade aumentada (RA) no controle do tráfego de aeronaves remotamente pilotadas (SARPs), também conhecidas como drones. A RA, ao combinar elementos virtuais com o ambiente físico, oferece um potencial extraordinário para melhorar a eficiência, a segurança e a tomada de decisões no gerenciamento do tráfego aéreo de SARPs. Esta introdução explora os fundamentos da RA, sua aplicação no controle de tráfego de SARPs, além dos benefícios e desafios associados a essa tecnologia emergente.

## 1.1 Fundamentos e Aplicações da Realidade Aumentada no Controle de Tráfego de SARPs

A realidade aumentada é uma tecnologia que sobrepõe informações digitais, como gráficos, vídeos ou dados, ao mundo físico, criando uma experiência interativa em tempo real (CHINIARA, 2019). Diferente da realidade virtual (RV), que imerge o usuário em um ambiente completamente virtual, a RA enriquece a percepção do usuário sobre o ambiente real, adicionando camadas de informações relevantes. Os dispositivos de RA podem incluir óculos inteligentes, smartphones, tablets e outras interfaces visuais que permitem a visualização de objetos virtuais integrados ao espaço físico. Os principais componentes da RA incluem dispositivos de exibição, sensores e câmeras, software de RA e interfaces de usuário (CRAIG, 2013). Os dispositivos de exibição são essenciais para a experiência de RA e podem ser dispositivos portáteis, como smartphones e tablets, que usam suas câmeras para captar o ambiente e sobrepor informações digitais na tela. Alternativamente, óculos de RA, como o Microsoft HoloLens ou o Google Glass, proporcionam uma experiência mais imersiva, projetando gráficos diretamente no campo de visão do usuário (KOUTROMANOS; KAZAKOU, 2023).

Sensores e câmeras são usados para captar dados do ambiente físico, podendo incluir câmeras RGB, câmeras de profundidade, acelerômetros, giroscópios e outros sensores que coletam informações sobre a posição e o movimento do usuário e dos objetos ao redor. O

software de RA processa os dados captados pelos sensores e câmeras e gera os gráficos e informações a serem sobrepostos ao ambiente físico. Este software deve ser capaz de realizar rastreamento de movimento em tempo real, reconhecimento de objetos e ambientes, e renderização gráfica eficiente para garantir uma experiência fluida e realista (CRAIG, 2013). As interfaces de usuário (UI) em RA devem ser intuitivas e fáceis de usar, permitindo que o usuário interaja facilmente com os elementos virtuais sobrepostos ao ambiente físico. O controle de tráfego aéreo tradicionalmente envolve a supervisão e o gerenciamento de aeronaves tripuladas em espaços aéreos compartilhados. Com o aumento do uso de SARP para diversos fins (HASSANALIAN; ABDELKEFI, 2017) – desde entregas de encomendas até inspeções de infraestrutura – há uma crescente necessidade de desenvolver sistemas eficientes para monitorar e coordenar essas aeronaves não tripuladas (MIGLIACCIO *et al.*, 2016). A RA oferece uma solução promissora ao permitir que operadores e controladores de tráfego aéreo visualizem e gerenciem SARP de maneira intuitiva e precisa.

Um dos principais benefícios da RA no controle de tráfego de SARP é a melhoria da conscientização situacional. Ao usar dispositivos de RA, os operadores podem visualizar em tempo real a posição, altitude, velocidade e outras informações críticas dos drones no espaço aéreo. Isso é particularmente útil em ambientes complexos ou congestionados, onde a rápida identificação de potenciais conflitos de tráfego é essencial para evitar colisões e garantir operações seguras. A conscientização situacional é aprimorada pela capacidade da RA de fornecer uma visualização tridimensional do espaço aéreo, onde os operadores podem ver os drones como ícones sobrepostos ao ambiente real. Isso permite uma compreensão mais clara da relação espacial entre os drones e outros objetos ou aeronaves no espaço aéreo.

A RA também facilita o planejamento e a coordenação de rotas de voo para SARP. Operadores podem usar interfaces de RA para traçar rotas ótimas, visualizar obstáculos e zonas de exclusão aérea e ajustar planos de voo conforme necessário (MOURTZIS *et al.*, 2022). A capacidade de visualizar esses elementos em um contexto espacial real melhora a precisão do planejamento e reduz o risco de erros que poderiam levar a incidentes de segurança. Além disso, a RA pode ser usada para simular diferentes cenários de tráfego aéreo, permitindo que os operadores testem e avaliem planos de voo antes de implementá-los. Isso é particularmente útil em situações onde é necessário coordenar múltiplos drones em um espaço aéreo limitado, como em operações de busca e salvamento ou em áreas urbanas densamente povoadas.

## 1.2 Benefícios e Desafios da Realidade Aumentada no Controle de Tráfego de SARPs

A integração da RA no controle de tráfego de SARPs oferece inúmeros benefícios que vão além da simples visualização de dados. Esses benefícios incluem a melhoria da eficiência operacional, a redução da carga de trabalho dos operadores, a minimização de erros humanos e a capacitação de uma tomada de decisão mais informada e rápida. Com a RA, os operadores podem acessar informações críticas de maneira rápida e intuitiva, sem a necessidade de alternar entre diferentes telas ou sistemas (MOURTZIS *et al.*, 2022). Isso acelera o processo de monitoramento e controle, permitindo uma gestão mais eficiente do tráfego de SARPs. A visualização em tempo real e a integração de dados de várias fontes em uma única interface reduzem a complexidade e melhoram a eficácia das operações.

A RA pode automatizar várias tarefas repetitivas e fornecer assistências visuais que simplificam o trabalho dos operadores. Isso reduz a carga de trabalho cognitiva e física, permitindo que os operadores se concentrem em aspectos mais críticos do gerenciamento de tráfego. Por exemplo, a RA pode fornecer alertas automáticos para mudanças nas condições de voo ou para a proximidade de obstáculos, permitindo uma resposta mais rápida e eficiente dos operadores. Além disso, a apresentação visual clara e intuitiva das informações reduz a probabilidade de erros humanos. A RA pode destacar automaticamente situações de risco, fornecer alertas em tempo real e sugerir ações corretivas, ajudando os operadores a tomarem decisões mais acertadas. A interface visual de RA pode ser personalizada para mostrar apenas as informações mais relevantes, reduzindo a sobrecarga de informações e ajudando os operadores a se concentrarem nas questões mais importantes.

A capacidade de integrar dados de múltiplas fontes e apresentá-los em um formato compreensível permite uma tomada de decisão mais informada. Operadores podem considerar todos os fatores relevantes de maneira holística, resultando em operações mais seguras e eficientes. A RA pode integrar dados meteorológicos, informações de tráfego aéreo e dados específicos do drone, proporcionando uma visão completa e detalhada da situação operacional.

Apesar dos inúmeros benefícios, a implementação da RA no controle de tráfego de SARPs também apresenta desafios. Questões relacionadas à precisão e confiabilidade dos dados, a integração com sistemas existentes, a formação e aceitação por parte dos operadores e as preocupações com a privacidade e a segurança cibernética precisam ser abordadas. Para que a RA seja eficaz, os dados apresentados devem ser precisos e confiáveis. Qualquer discrepância ou atraso na atualização das informações pode comprometer a segurança e a eficiência das operações de SARPs. A precisão dos dados depende da qualidade dos sensores e das tecnologias de rastreamento utilizadas, assim como da capacidade do sis-

tema de RA de processar e atualizar informações em tempo real. A integração da RA com sistemas de controle de tráfego aéreo existentes pode ser complexa e exigir investimentos significativos em infraestrutura e desenvolvimento de software. A compatibilidade entre diferentes sistemas e a interoperabilidade entre plataformas são aspectos críticos a serem considerados. Além disso, a transição para o uso de RA pode exigir atualizações ou substituições de hardware e software, bem como adaptações nos procedimentos operacionais. A formação adequada dos operadores e a aceitação da tecnologia são essenciais para o sucesso da implementação da RA. Isso pode envolver programas extensivos de treinamento e um período de adaptação para que os operadores se familiarizem com as novas ferramentas. A resistência à mudança pode ser um obstáculo, e é importante que os operadores entendam os benefícios da RA e se sintam confortáveis com sua utilização.

A RA, ao lidar com grandes volumes de dados sensíveis, deve garantir a proteção contra invasões e ataques cibernéticos. Além disso, a privacidade dos dados coletados e exibidos deve ser cuidadosamente gerida para evitar violações. As medidas de segurança devem incluir criptografia de dados, autenticação de usuários e monitoramento contínuo para detectar e responder a ameaças de segurança.



# 2 Fundamentação teórica e Revisão da literatura

## 2.1 Pesquisas e desenvolvimento em Urban Air Mobility

As aeronaves remotamente pilotadas (SARPs) se inserem no cenário mundial atual no que se refere ao avanço da mobilidade aérea urbana (UAM). A mobilidade aérea urbana é definida como um sistema de transporte de passageiros ou de carga em espaços aéreos urbanos (SCHUCHARDT *et al.*, 2023), ou seja, traduz a capacidade de uma cidade de se conectar por meio de veículos aéreos. Na vanguarda do desenvolvimento em UAM se situam os drones (ou SARP), uma vez que o mercado atual está em constante crescimento, com aeronaves cada vez mais robustas e econômicas, e o surgimento de operações beyond the visual line of sight (BVLOS), ou seja, aquelas em que o piloto atua remotamente, sem a capacidade de manter a aeronave dentro do seu campo de visão (STRAUBINGER *et al.*, 2020).

Um dos principais motivos da grande utilização de drones está no progresso tecnológico no que diz respeito à componentes eletrônicos, baterias e motores elétricos (SHAMIYEH *et al.*, 2018). A introdução desses sistemas remotamente pilotados é considerada uma nova era da aviação iniciada na década de 1990 (SCHUCHARDT *et al.*, 2023). No entanto, seu uso inicial era restrito à aplicações militares, mas com os avanços recentes na sua tecnologia se tornou possível uma grande gama de aplicações comerciais. Um reflexo desse potencial é mostrado por meio da criação da U-space, um framework criado pela European Commission, no intuito de integrar o crescente tráfego de drones de modo seguro ao espaço aéreo urbano. Estima-se que, até 2050, em torno de 400,000 drones estarão em operação na Europa (UNDERTAKING, 2017)

O U-space propõe a implementação de quatro conjuntos de serviços bem definidos para a integração de SARPs no espaço aéreo:

- U1: Serviços fundamentais do U-space cobrindo registro eletrônico, identificação eletrônica e geofencing.

- U2: Serviços iniciais do U-space para gerenciamento de operações de drones, incluindo planejamento de voo, aprovação de voo, rastreamento e interface com o controle de tráfego aéreo convencional.
- U3: Serviços avançados do U-space apoiando operações mais complexas em áreas densas, como assistência para detecção de conflitos e funcionalidades automatizadas de detectar e evitar.
- U4: Serviços completos do U-space, oferecendo níveis muito altos de automação, conectividade e digitalização tanto para o drone quanto para o sistema U-space.

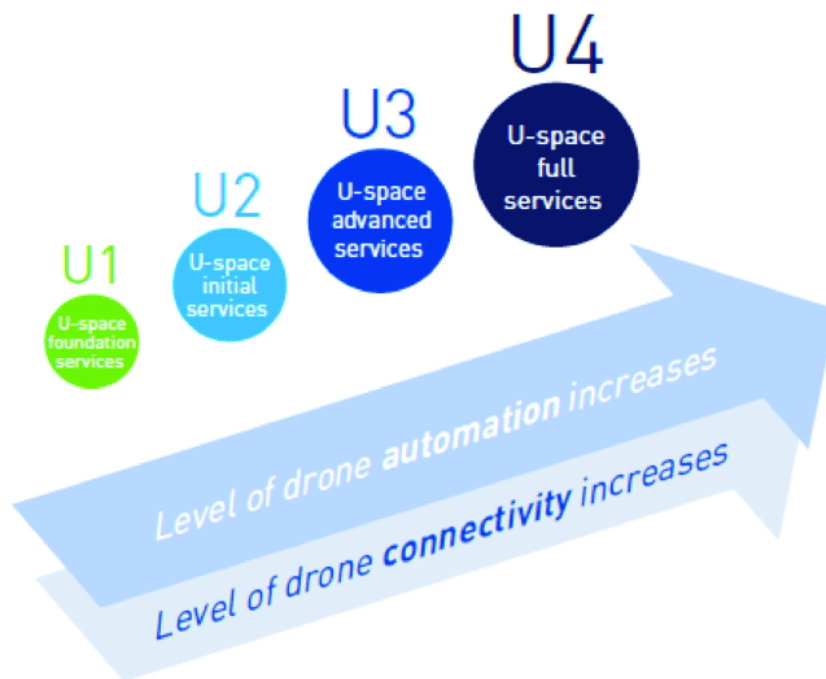


FIGURA 2.1 – Níveis de serviço do U-Space. Retirado de (LAPPAS *et al.*, 2022)

Para atuar no espaço aéreo urbano, no entanto, as aeronaves precisam atender à requisitos de missão bem definidos. Esses requisitos ditam as decisões no que se refere ao design e às funcionalidades de cada modelo. A aplicação de aeronaves para o serviço de táxi-aéreo, por exemplo, é bastante difundida, a NASA sugere a utilização de VTOLs capazes de realizarem voos de ida e volta de 70 km, altitude de 1200 m e velocidades entre 150 km/h e 200 km/h (PATTERSON KEVIN R. ANTCLIFF, 2018).

Outro fator de bastante relevância na introdução de drones no espaço aéreo é a aceitação pública da operação desses veículos, o que pode ser traduzido como demandas em níveis de poluição, principalmente sonora. Para uma operação aceitável de drones em áreas urbanas, seu funcionamento precisa fornecer um nível de ruído que se camufla no ruído urbano normal, ou seja, precisa ser em torno de 15 dB mais baixo que o nível emitido por helicópteros atualmente (ELEVATE, 2016). Uma forma de tornar isso possível é

reduzir o velocidade de ponta de pá das aeronaves. Isso pode ser feito reduzindo o comprimento dos rotores, mas aumentando o seu número, de forma a manter a sustentação (STRAUBINGER *et al.*, 2020).

A integração de aeronaves remotamente pilotadas no espaço aéreo é algo que precisa ser feito de maneira a construir um sistema completo de interação entre um ecossistema digital, com serviços de controle e tráfego completamente automatizados, e a população de aeronaves empregada, permitindo conectividade entre todos os integrantes do sistema (UNDERTAKING, 2020). Dessa forma, temos, entre os demais objetivos da implementação de um sistema de mobilidade aérea urbana, os seguintes desafios:

- Maturação, validação e implementação dos serviços básicos do framework U-Space
- Desenvolvimento dos serviços mais avançados do U-space, como sistemas de Detect and Avoid, evitar colisões e permitir operações em áreas populosas
- Criação de soluções para problemas de aceitação popular, como diminuição de níveis de poluição sonora e visual

## 2.2 Desafios e soluções de sistemas DAA

Um aspecto muito importante na operação de aeronaves remotamente pilotadas é a capacidade de detectar e evitar colisões, principalmente em áreas onde a população de drones é grande. Uma solução inicial envolvia o uso de tecnologias como ADS-B e comunicação móvel para transmissão de informações de posição (DAUER, 2022). O rápido crescimento no uso de drones, no entanto, gera a necessidade de surgimento de sistemas DAA (Detect and Avoid), com intuito de tornar a manipulação dessas aeronaves segura.

Um piloto tem responsabilidades definidas enquanto está no comando de uma aeronave, conforme detalhado nos CFRs e no Manual de Informações Aeronáuticas (AIM). Uma dessas responsabilidades é a DSA, que, na ausência de um piloto a bordo (como em um UAS), deve ser realizada por uma solução tecnológica ou por um observador humano externo ao UAS.

A Tabela 2.1 mostra os requisitos estabelecidos pela FAA em seu documento "Literature Review on Detect, Sense, and Avoid Technology for Unmanned Aircraft Systems"

Um sistema de Detect and Avoid deve ser capaz de evitar conflitos aéreos mesmo em situações que um piloto não está apto a manobrar seu veículo; isso é devido ao possibilidade de perda de conexão entre um drone e seu operador, uma vez que a comunicação do drone é feita de maneira remota. Isso significa que algoritmos de DAA devem ser planejados em

TABELA 2.1 – Requisitos de um sistema DAA. (HOTTMAN; BERRY, 2009)

Função No.	Função	Requisitos	Detectar	Senir	Evitar
1.0	Detectar tráfego conflitante	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escaneia continuamente em busca de ameaças</li> <li>• Minimiza falsos alarmes</li> <li>• Minimiza falhas</li> <li>• Fornece dados de ameaça ao operador</li> <li>• Cobre um campo de visão de 110° horizontal e ±15° de azimute</li> <li>• Acompanha todas as ameaças dentro de um alcance mínimo</li> <li>• Determina taxas de aproximação</li> </ul>	×	×	×
2.0	Determinar Direito de Passagem	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Move-se autonomamente de acordo com os regulamentos da FAA/Organização Internacional de Aviação Civil (OACI)</li> <li>• Operador faz movimento conforme regulamentos da FAA/OACI</li> </ul>		×	×
3.0	Analisar Trajetórias de Voo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determina se o alvo está indo em direção à zona de perigo (manter separação de 500 pés)</li> <li>• Calcula trajetórias de voo com base nas informações disponíveis dos sensores</li> <li>• Atualiza o tempo disponível para manobra</li> </ul>		×	×
4.0	Manobrar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manobra conforme diretrizes da FAA</li> <li>• Permite manobra pelo operador</li> <li>• Manobra continuamente em caso de perda de link/perda de controle de comando (<math>C^2</math>)</li> <li>• Mantém uma separação mínima de 500 pés</li> <li>• Retorna à trajetória de voo original após a manobra</li> </ul>		×	×
5.0	Comunicar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relata continuamente ao sistema em terra; permite sobreposição do operador</li> <li>• Existe largura de banda disponível para transportar pacotes de mensagens</li> <li>• Pode usar telemetria independente ou comunicações da plataforma</li> <li>• Comunicação prioritária para manter a segurança do voo</li> <li>• Relata alvos quando os parâmetros de ameaça são atendidos; atualiza a solução até que o alvo deixe de ser uma ameaça</li> </ul>	×	×	

SARPs de maneira tal que sejam implementados com algoritmos de detecção onboard e que planejem rotas de esquiva de colisão ao primeiro sinal de conflito.

Ao longo dos anos, vários algoritmos de desvio de conflitos foram propostos. Dentre os mais difundidos estão os algoritmos de otimização de funções de custo, algoritmos com uso de campos potenciais e algoritmos utilizando considerações geométricas na formulação

de planos de fuga (MIGLIACCIO *et al.*, 2016).

Dentre esses algoritmos, podemos destacar suas principais características:

- Algoritmos de otimização de custo: Na sua forma mais comum, esses algoritmos discretizam o espaço ao redor da aeronave e utilizam métricas específicas para definir o custo de uma rota utilizando os nós da discretização gerada. A partir dessa métrica, seu menor custo é calculado, definindo o caminho a ser seguido pela aeronave. Dois algoritmos bastante difundidos utilizando esse método são o algoritmo A\* e o algoritmo MILP (RUZ *et al.*, 2007). O principal desafio enfrentado por esses algoritmos de otimização é com relação ao tempo computacional. Muitas vezes o tempo para o cálculo do custo ótimo é longo, ou não encontrado, o que permite a colisão antes mesmo que o algoritmo convirja para algum valor ótimo. Alguns métodos propostos para esse custo de tempo foram implementados, mas reduzem a eficiência do cálculo (MIGLIACCIO *et al.*, 2016).

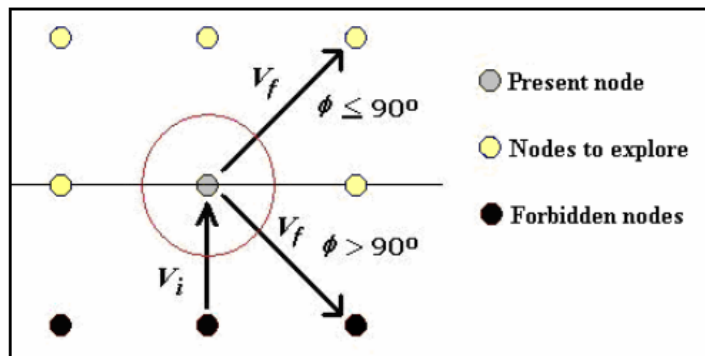


FIGURA 2.2 – Nós explorados na utilização do algoritmo A\*. Retirado de (RUZ *et al.*, 2007)

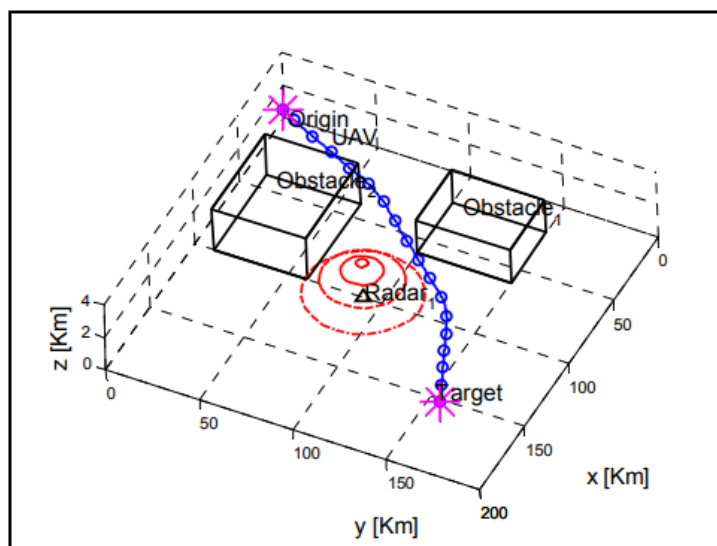
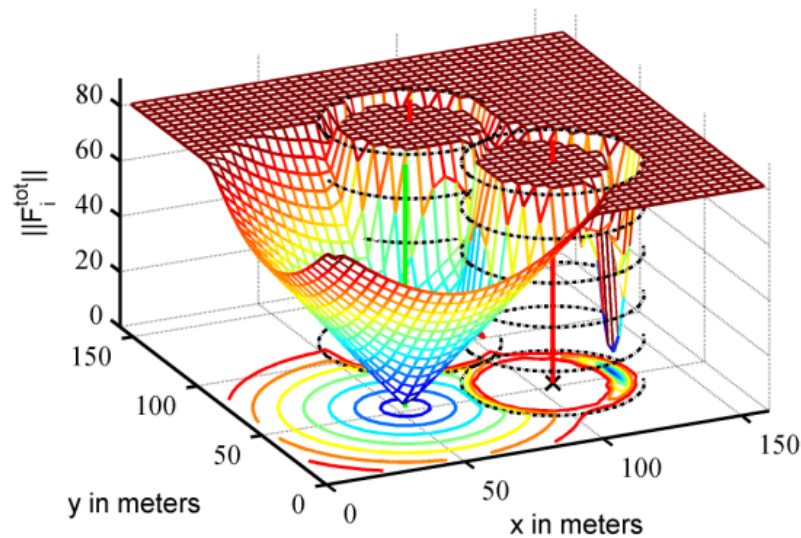
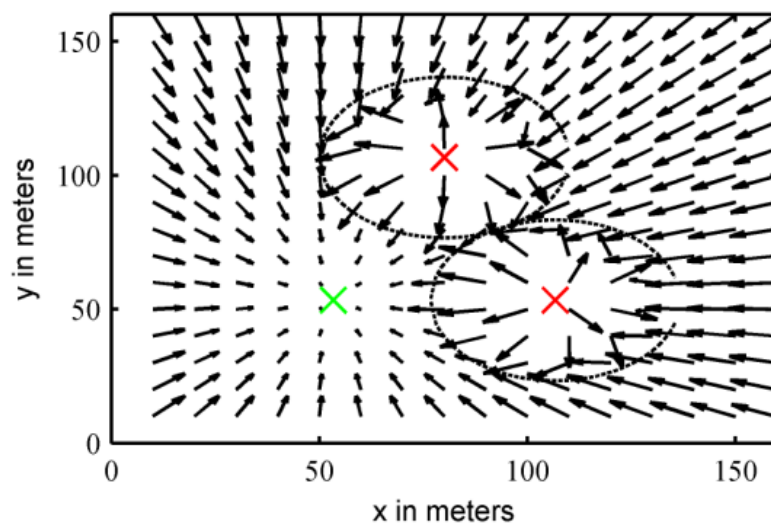


FIGURA 2.3 – Otimização de rota calculada pelo método MILP. Retirado de (RUZ *et al.*, 2007)

- Algoritmos com uso de campos potenciais: Nesse tipo de solução, há o emprego de equações conhecidas da eletrostática, porém de forma modificada para o uso em drones. Nesse contexto, os obstáculos enfrentados pelo drone são tratados como objetos carregados com mesma carga que a aeronave, ou seja, repelindo, enquanto o objetivo da trajetória é tratada como uma carga de sinal contrária, ou seja, atraindo o drone. Algumas dificuldades matemáticas pode surgir, como o aparecimento de mínimos locais e uma dificuldade se empregar um controle efetivo (MIGLIACCIO *et al.*, 2016).



(a)



(b)

FIGURA 2.4 – Campo potencial para um veículo específico. Retirado de (PAUL *et al.*, 2008)

- Algoritmos por considerações geométricas: Esse algoritmo faz uso de representações de vetores de velocidade e zonas de proteção para representar potenciais intrusos, e

a partir disso calcula uma saída por meio de alteração do vetor velocidade da aeronave controlada. Esse tipo de solução tem pouco custo computacional e geralmente encontram solução em tempo hábil para evitar colisões, tornando seu uso ideal para aplicações em tempo real (MIGLIACCIO *et al.*, 2016).

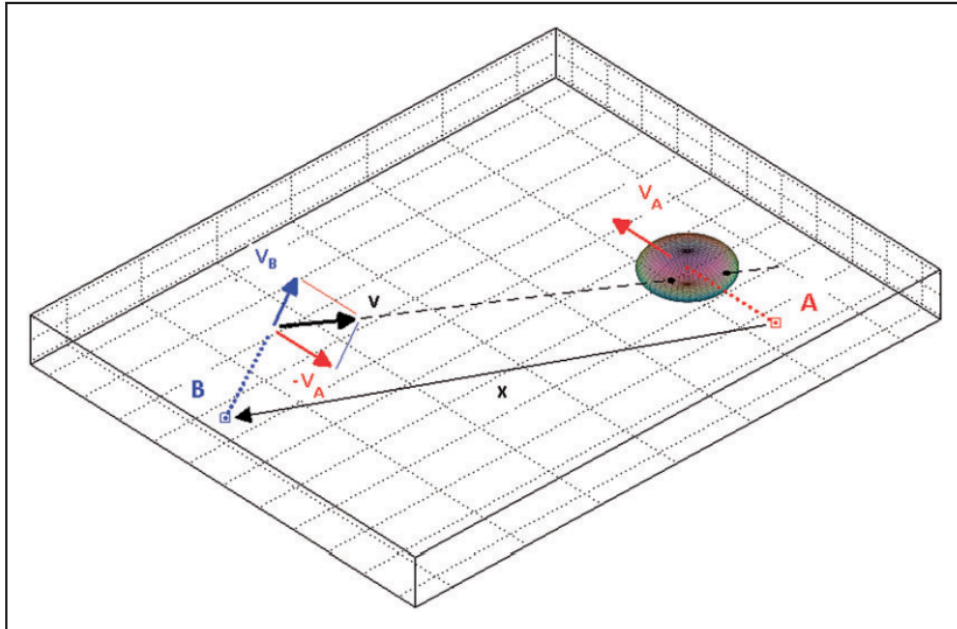


FIGURA 2.5 – Consideração de algoritmo geométrico para DAA. Retirado de (MIGLIACCIO *et al.*, 2016).

### 2.3 Análise de Estudos sobre Realidade Aumentada no Gerenciamento e Monitoramento do Tráfego de Aeronaves

Nos últimos anos, a realidade aumentada (RA) tem ganhado destaque como uma ferramenta promissora no controle e monitoramento de tráfego aéreo, abrangendo aeronaves tradicionais e drones. Diversas pesquisas e estudos buscam explorar como a RA pode melhorar a segurança, a eficiência e a experiência de usuários envolvidos no gerenciamento de tráfego aéreo, especialmente no contexto de Urban Air Mobility (UAM) e sistemas de Gerenciamento de Tráfego Não Tripulado (UTM).

Uma aplicação prática da RA neste contexto é a visualização em tempo real de rotas de voo e a identificação de aeronaves e drones no espaço aéreo. Com o auxílio de dispositivos móveis ou óculos de RA, operadores podem ver informações cruciais, como altitude, velocidade e trajetória dos veículos aéreos, sobrepostas ao ambiente real. Essa integração de dados e visualização pode permitir reações mais rápidas em situações de risco e um maior entendimento situacional para operadores e controladores de tráfego.

Instituições como a NASA têm explorado essas possibilidades em seus projetos de



pesquisa, utilizando a RA para transformar o gerenciamento do tráfego aéreo (NASA, 2023).

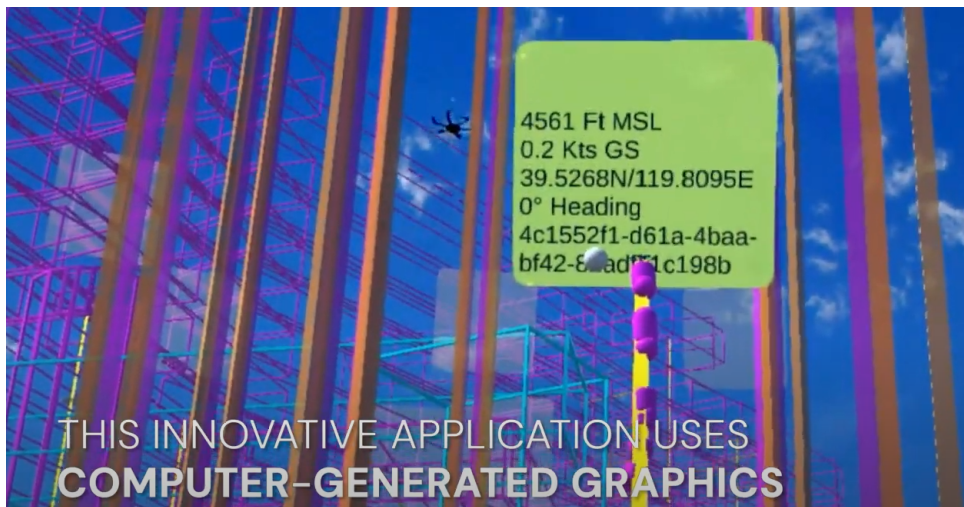


FIGURA 2.6 – Interface da aplicação de realidade aumentada desenvolvida pela nasa. Retirado de (NASA, 2023).

Diversos trabalhos exploram os problemas e desafios no uso de realidade aumentada (RA) para o monitoramento de drones, especialmente em contextos de alto risco, como o controle de tráfego aéreo em aeroportos. Um dos principais problemas é a integração precisa e em tempo real dos dados de localização dos drones na interface de RA. Segundo Bagassi e Corsi (2024), um desafio significativo é o alinhamento dos hologramas de RA com o ambiente físico para manter a precisão de posicionamento dos drones, especialmente em cenários onde há múltiplos dispositivos e aeronaves simultaneamente. Esse problema de alinhamento é abordado no artigo como uma questão técnica complexa, que envolve a necessidade de coordenar os dados de localização geoespacial com a visualização em RA, de modo que cada drone seja exibido no local exato em relação ao mundo físico. Para isso, a interface exige uma combinação de dados GNSS de alta precisão e técnicas de SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), que possibilitam um mapeamento em tempo real do ambiente, especialmente em dispositivos como o HoloLens 2.

Contudo, a aplicação desses métodos é desafiadora em ambientes externos, onde a performance dos dispositivos de RA é mais suscetível a oscilações devido às condições de luz e à ausência de pontos de referência visuais estáveis. Além disso, o monitoramento de múltiplos drones simultâneos requer um sistema eficiente de gerenciamento de etiquetas (tracking labels) em tempo real, onde cada drone recebe uma etiqueta visual com informações de posição, velocidade, direção e identificação. Essas etiquetas precisam ser dinâmicas, ajustando-se conforme os drones se movem, mas sem causar sobrecarga visual ao operador, o que constitui um desafio ergonômico significativo.

Para resolver o problema de visibilidade dos hologramas em condições de alta luminosidade, os autores propõem o uso de filmes fotocromáticos aplicados nas lentes dos



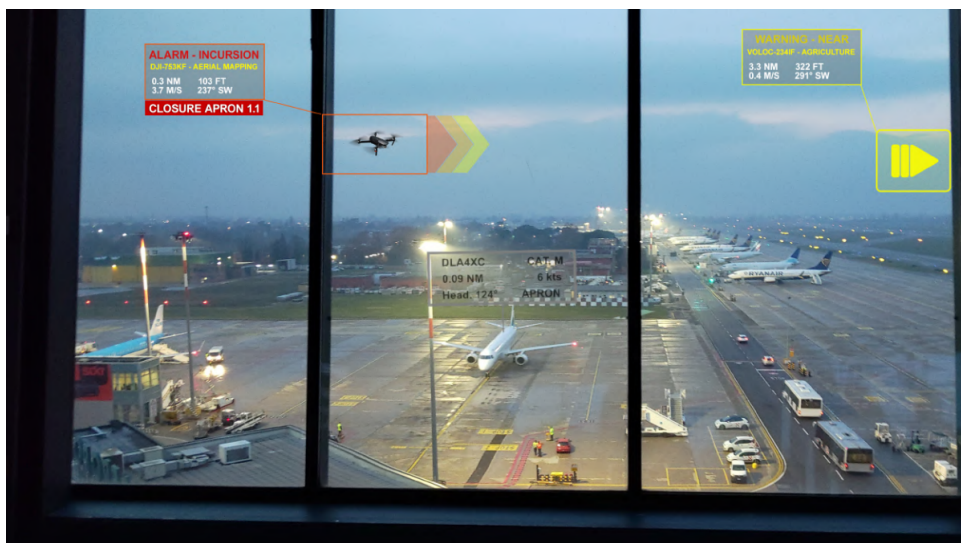


FIGURA 2.7 – Interface de realidade aumentada proposta por Bagassi e Corsi (2024) para monitoramento de drones em aeroportos.

dispositivos de RA, o que ajuda a tornar as projeções mais visíveis em ambientes muito iluminados. Além disso, a confiabilidade do sistema de RA depende de ajustes contínuos na calibração dos dados de geolocalização para garantir o alinhamento preciso entre o drone e seu holograma correspondente, um aspecto que ainda precisa ser aprimorado para atender aos requisitos de segurança e precisão dos cenários críticos de controle de tráfego aéreo em aeroportos. Esses desafios técnicos destacados por Bagassi e Corsi (2024) mostram que, embora a RA ofereça um potencial significativo para o monitoramento de drones, sua aplicação prática exige avanços contínuos em ergonomia e precisão de rastreamento para garantir uma operação segura e eficiente.

Outro problema apontado é o aumento da carga cognitiva dos operadores de tráfego aéreo ao utilizar interfaces de RA, que podem exigir que alternem entre a visualização direta (head-up) e as interfaces tradicionais (head-down) para acesso a informações complementares. Estudos como o de Fadda e Corsi (2023) mostram que a RA, apesar de ajudar na visualização direta de informações críticas, exige uma adaptação ergonômica adequada para evitar sobrecarga e garantir que as informações sejam exibidas de forma acessível e não intrusiva.

Por fim, a confiabilidade e a precisão dos sistemas de RA em condições de baixa visibilidade são ainda limitadas. Trabalhos dentro do projeto RETINA e DTT indicam que, embora a RA aumente a consciência situacional dos controladores em condições normais, as condições de visibilidade reduzida ainda representam um desafio técnico (BAGASSI; CORSI, 2024). Assim, esses estudos sugerem que melhorias nos sensores e nos algoritmos de registro são essenciais para suportar operações seguras e eficientes nesses contextos.

Esses desafios destacam a necessidade contínua de ajustes técnicos e ergonômicos para que a RA possa ser amplamente implementada no monitoramento de drones e no controle

de tráfego em áreas críticas.

Outros trabalhos que exploram a aplicação de realidade aumentada (RA) no controle de tráfego aéreo e no monitoramento de drones reforçam os benefícios e desafios dessa tecnologia. A análise da RA em sistemas de controle de transporte aéreo, como discutido em Gorbunov e Nechaev (2022), demonstra seu potencial para aumentar a eficiência e a segurança nas operações, particularmente ao fornecer uma interface mais intuitiva e informativa para os operadores. A RA permite a sobreposição de informações em tempo real diretamente no ambiente físico, ajudando os controladores a identificar riscos e a tomar decisões mais rápidas. Essa tecnologia reduz a necessidade de alternância entre visualizações head-up e head-down, promovendo uma maior continuidade na observação do tráfego aéreo e reduzindo o tempo de resposta dos operadores em situações de risco.

O estudo utilizou um experimento comparativo entre ambientes 2D convencionais e uma interface de RA em um sistema de simulação para controle de tráfego. O experimento envolveu 12 estudantes de controle de tráfego aéreo da Universidade Técnica de Aviação Civil de Moscou. Em cenários simulados, os participantes monitoraram a proximidade entre aeronaves e identificaram seis situações de perigo de aproximação, variando entre tráfegos cruzados, perseguição na mesma rota e aproximações a níveis distintos de altitude. Durante o experimento, os pesquisadores mediram três variáveis: o tempo médio para detecção de situações perigosas (T), o número médio de erros cometidos (E) e a carga cognitiva média (L) sobre os participantes, avaliada pelo índice NASA TLX.

Os resultados quantitativos indicaram que a interface de RA trouxe uma vantagem significativa em relação ao número de erros cometidos. Em média, os participantes cometeram 3,36 erros ao utilizar o sistema 2D, enquanto na interface de RA, o número de erros foi reduzido para 1,36. Essa diferença é considerada estatisticamente significativa ( $p = 0,025$ ) e sugere que a RA pode melhorar consideravelmente a precisão dos operadores, minimizando a possibilidade de falhas na identificação de situações de risco. A carga cognitiva também apresentou uma redução notável na interface de RA, com um índice médio de 46,91, em comparação a 57,58 no ambiente 2D, indicando uma diminuição de aproximadamente 22% na carga mental dos operadores, o que favorece uma tomada de decisão mais rápida e eficaz em condições de alto estresse.

Em relação ao tempo de detecção, a RA apresentou um desempenho ligeiramente superior, com uma média de 96,51 segundos no ambiente 2D contra 109,6 segundos na interface de RA. Embora essa diferença de tempo não seja estatisticamente significativa, ela sugere que a visualização mais natural proporcionada pela RA pode ajudar os controladores a reagir com mais agilidade a certos tipos de conflitos.

No entanto, apesar das vantagens observadas, o estudo destaca que a RA enfrenta desafios consideráveis em ambientes de tráfego aéreo intenso, onde a precisão dos dados

de geolocalização e a capacidade de processamento das interfaces de RA precisam ser otimizadas para evitar sobrecarga visual e erros operacionais. Esses resultados quantitativos confirmam que, embora promissora, a tecnologia de RA deve ser refinada para alcançar um desempenho ideal em cenários complexos e de alta demanda, como o controle de tráfego aéreo, onde a segurança e a eficiência são essenciais.

Esse contexto de operação em condições de visibilidade reduzida também é abordado em outro estudo, RETINA Project (2024), que analisa a aplicação da RA em ambientes adversos, como neblina, para auxiliar controladores de tráfego aéreo. A tecnologia permite que os controladores visualizem dados de trajetória e status de drones e aeronaves sobre o ambiente real, auxiliando na tomada de decisões em condições de baixa visibilidade. Embora promissora, essa aplicação ainda depende fortemente da precisão dos sensores e dos algoritmos de registro para que as informações virtuais se alinhem perfeitamente ao ambiente físico. Esse desafio técnico é um dos principais entraves para o uso da RA em cenários de controle de tráfego aéreo de alta demanda.



FIGURA 2.8 – Projeto RETINA. Retirado de (RETINA Project, 2024)

Além disso, uma visão geral de patentes recentes sobre o uso de RA no voo de drones, apresentada em "Revolutionising Drone Flying with Augmented Reality: A Patent Overview" (AirHud, 2023), destaca inovações que buscam integrar a RA aos sistemas de controle, facilitando a visualização de obstáculos e rotas de voo em tempo real. As patentes sugerem que a experiência de pilotagem pode se tornar mais intuitiva e segura com a RA, embora existam desafios práticos, como a integração eficiente de sensores e o equilíbrio entre a quantidade de informações exibidas e a usabilidade das interfaces.

Esses estudos, no conjunto, ressaltam que a RA representa um avanço significativo

para o monitoramento de drones e a gestão de tráfego aéreo. No entanto, a aplicação dessa tecnologia em contextos operacionais exige contínuos aprimoramentos, tanto em precisão dos sensores quanto em ergonomia das interfaces. Para que a RA seja amplamente implementada e se torne uma ferramenta segura e eficaz nesses ambientes, é fundamental superar esses desafios técnicos e adaptar a tecnologia às variáveis operacionais complexas e de alto risco presentes no controle de tráfego aéreo.

### 3 Metodologia

O objetivo deste projeto é desenvolver uma aplicação que utiliza serviços de localização em tempo real para posicionar marcadores de alvos em um ambiente tridimensional, proporcionando uma interface intuitiva para a visualização dinâmica do movimento de drones no espaço aéreo. A aplicação foi implementada utilizando Unity, uma plataforma amplamente empregada no desenvolvimento de jogos e aplicações interativas em 3D, com o código escrito em C# para maximizar a eficiência e a modularidade do sistema.

Para obter dados de localização precisos, foi integrado o Geospatial Creator da Google, que fornece informações geoespaciais detalhadas em tempo real, alinhando os marcadores de drones no ambiente virtual ao espaço real. A posição dos marcadores é atualizada continuamente com base na localização geográfica dos alvos, recebida por meio do protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), um protocolo leve de comunicação em tempo real, ideal para dispositivos com recursos limitados e redes instáveis. Essa integração com o MQTT permite que a aplicação atualize a posição dos drones de forma ágil e eficiente, refletindo seus movimentos ao vivo.

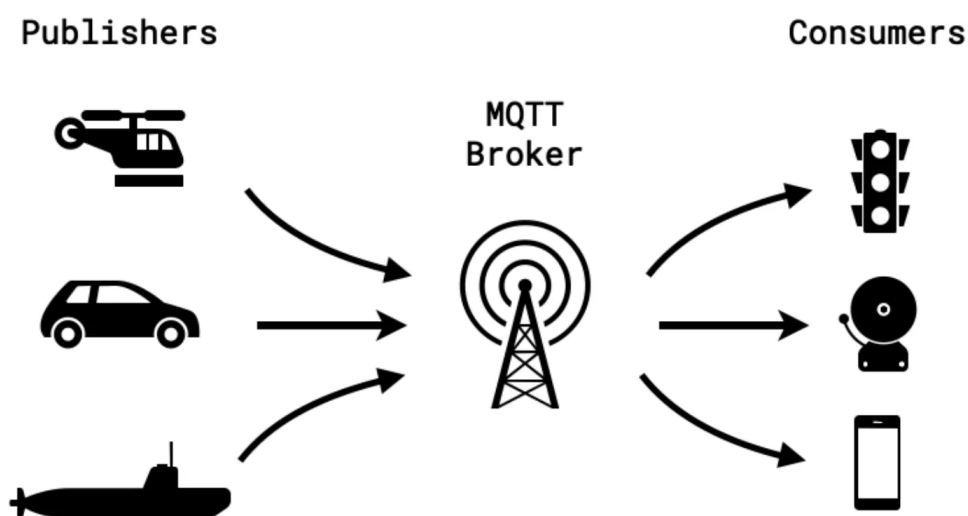


FIGURA 3.1 – Ilustração da interação via MQTT. Retirado de (Jason Bagby, 2020).

Esta seção detalha as abordagens adotadas, incluindo a estrutura do código, a integra-

ção da API de localização geoespacial e do protocolo MQTT, além das etapas de testes realizadas para assegurar a precisão e a responsividade do sistema na visualização dos voos.

### 3.0.1 Descrição do Problema

A capacidade de determinar e atualizar a localização de objetos em tempo real é essencial para várias aplicações modernas, especialmente em contextos como jogos, navegação, e monitoramento de tráfego aéreo. Em sistemas de realidade aumentada, essa precisão é ainda mais importante, pois os elementos virtuais devem ser alinhados com o ambiente físico para garantir uma experiência imersiva e informativa ao usuário. Diante disso, este projeto propõe a criação de um sistema de monitoramento de voos de drones em tempo real, utilizando realidade aumentada, para facilitar o acompanhamento de suas trajetórias e posições de maneira intuitiva e precisa.

Para que o sistema alcance esses objetivos com eficácia, uma série de requisitos técnicos foi estabelecida, os quais orientam as funcionalidades e a estruturação da aplicação. Estes requisitos cobrem desde a aquisição de dados geoespaciais e integração de comunicação em tempo real até a implementação de recursos de segurança e compatibilidade com dispositivos móveis. Em resumo, o projeto busca implementar um sistema que:

- **Ativação dos Sensores de Posicionamento do Dispositivo**

O aplicativo deve ser capaz de ativar e acessar os sensores de GPS e bússola do dispositivo para obter a posição geográfica e a orientação necessária para a visualização em realidade aumentada.

- **Integração com o Geospatial Creator da Google para Unity**

Utilizar o Geospatial Creator da Google para sincronizar e mapear a posição dos drones com precisão no ambiente virtual em 3D, alinhado ao espaço físico real.

- **Comunicação com o Protocolo MQTT**

Implementar o protocolo MQTT para receber constantemente as atualizações da posição geográfica dos drones em tempo real, garantindo a baixa latência na transmissão dos dados.

- **Atualização Contínua dos Marcadores de Drones**

Configurar os marcadores de drones na aplicação para que mudem de posição conforme as novas coordenadas de localização são recebidas via MQTT, refletindo o movimento dos drones no ambiente.

- **Exibição de Interface de Realidade Aumentada**

Implementar uma interface de AR que sobreponha as informações dos drones no

ambiente físico, permitindo ao usuário visualizar o posicionamento exato dos drones no espaço aéreo ao redor.

- **Implementação de Segurança e Controle de Acesso**

Garantir que o aplicativo esteja protegido e que o acesso aos dados de localização dos drones seja restrito a usuários autorizados.

- **Opção de Visualização em Tempo Real**

Prover uma experiência em tempo real na visualização dos drones, com atualizações frequentes que permitam um acompanhamento preciso dos voos.

- **Compatibilidade com Dispositivos Móveis Android**

Garantir que o aplicativo seja funcional em dispositivos móveis Android com suporte aos recursos de AR e localização.

- **Gerenciamento de Conexão com a Rede**

Implementar verificações para monitorar a estabilidade da conexão de rede e notificar o usuário em caso de falhas na transmissão de dados, mantendo a integridade das informações exibidas.

- **Testes de Precisão e Sincronização**

Realizar testes para validar a precisão e a sincronização entre a posição dos drones no mundo real e sua representação virtual no aplicativo, assegurando a confiabilidade da interface de AR.

## 3.1 Ferramentas utilizadas

Dentre as ferramentas utilizadas, destaca-se o Unity, uma das plataformas de desenvolvimento de jogos e aplicativos 3D mais populares do mercado, que oferece recursos avançados para a criação de ambientes interativos e a implementação de realidade aumentada. O Geospatial Creator da Google foi empregado para a obtenção e sincronização dos dados geoespaciais dos drones, permitindo que suas posições sejam mapeadas com precisão em um ambiente tridimensional. Além disso, o protocolo MQTT foi incorporado ao sistema para garantir uma comunicação ágil e de baixa latência, assegurando que as atualizações de localização dos drones sejam refletidas em tempo real na aplicação. Juntas, essas ferramentas formam a base tecnológica essencial para a construção de um sistema de monitoramento aéreo intuitivo e confiável.

Nas subseções a seguir, serão detalhadas as características específicas de cada uma dessas ferramentas, incluindo suas funcionalidades e o papel que desempenham na estrutura e funcionamento da aplicação.

### 3.1.1 Unity

Unity é uma plataforma poderosa e versátil para o desenvolvimento de aplicações de realidade aumentada (AR), proporcionando uma integração fluida entre o ambiente físico e elementos virtuais. No desenvolvimento de um aplicativo de AR para visualização de drones, o Unity oferece uma série de componentes e funcionalidades que facilitam essa integração. Entre os principais recursos está o **AR Foundation**, um framework essencial para desenvolver experiências de AR multiplataforma. O AR Foundation permite que o aplicativo aproveite as capacidades de AR em diferentes dispositivos, como smartphones Android e iOS, adaptando-se automaticamente às especificidades de cada um. Esse pacote atua como uma ponte entre Unity e as bibliotecas nativas de AR, como ARKit (iOS) e ARCore (Android).

Os elementos fundamentais da AR no Unity, como o **AR Session** e o **XR Origin**, desempenham papéis cruciais na estruturação da aplicação. O **AR Session** gerencia o ciclo de vida da experiência em AR, inicializando, pausando e retendo as configurações necessárias para capturar informações de sensores e ajustar a renderização dos objetos virtuais de acordo com o ambiente real. Já o **XR Origin** fornece um ponto de referência espacial, permitindo que objetos 3D sejam posicionados com precisão e mantendo uma relação estável com o usuário conforme ele se move no espaço físico. No contexto deste projeto, esses elementos asseguram que os drones virtuais apareçam na localização correta e se movam conforme as coordenadas atualizadas.

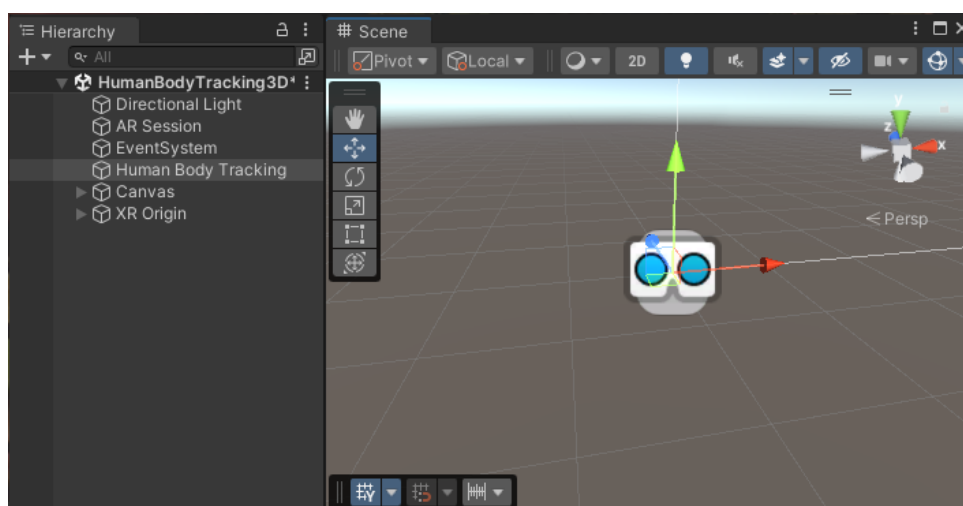


FIGURA 3.2 – Cena típica de utilização do Unity para RA. Retirado de (Unity Technologies, 2024)

Outro componente essencial é o **Plane Detection**, que detecta superfícies reais, como o chão ou mesas, onde objetos virtuais podem ser ancorados. Embora o foco deste projeto seja o posicionamento de drones no espaço aéreo, o uso de planos de referência pode ajudar na calibração inicial da cena AR, garantindo que os objetos virtuais sejam dimensionados



e posicionados corretamente.

Além disso, o Unity permite que a câmera do dispositivo seja usada como uma janela para a AR, capturando o ambiente físico e integrando os drones em movimento, recebendo constantemente dados de localização via MQTT para manter os marcadores em posição. Ao combinar o AR Foundation e o Geospatial Creator, o Unity capacita o aplicativo a renderizar os drones em tempo real, proporcionando uma visualização confiável e dinâmica dos movimentos de cada drone em voo.

Esses elementos trabalham em conjunto para criar uma experiência AR realista e interativa, onde o usuário pode acompanhar o posicionamento dos drones de forma precisa no espaço físico ao seu redor.

### 3.1.2 Google ARCore

O Google ARCore é um SDK avançado que permite a criação de experiências de realidade aumentada, utilizando sensores do dispositivo para integrar objetos virtuais ao ambiente físico de maneira precisa. No contexto deste projeto, o ARCore fornece as bases técnicas para posicionar e rastrear drones virtuais em tempo real, utilizando um sistema de âncoras e rastreamento espacial que garante estabilidade e precisão.

#### 3.1.2.1 Componentes Técnicos Relevantes

- **Rastreamento de Movimento**

O ARCore utiliza a câmera do dispositivo e sensores IMU (Inertial Measurement Unit) para estimar a posição e orientação do dispositivo em relação ao ambiente. Com isso, ele realiza o "motion tracking" (rastreamento de movimento) através de uma técnica chamada VIO (Visual-Inertial Odometry), que combina dados visuais com sensores de movimento para determinar a posição do dispositivo e manter uma referência constante no espaço 3D. Esse recurso é crucial para o desenvolvimento do aplicativo, pois permite que o posicionamento dos drones permaneça consistente, mesmo com o movimento do usuário no ambiente.

- **Âncoras (Anchors)**

As âncoras são objetos virtuais fixos no espaço que ARCore utiliza para manter uma posição estável para objetos em realidade aumentada. Quando uma âncora é criada em uma posição específica, o ARCore se esforça para manter a âncora naquele local, utilizando informações de rastreamento de movimento para recalibrar conforme necessário. No aplicativo, as âncoras são aplicadas para fixar os drones virtuais em locais específicos do espaço aéreo, permitindo que o usuário veja a posição dos

drones de maneira precisa e que eles permaneçam fixos em uma posição relativa, mesmo com a mudança de perspectiva ou movimento do dispositivo.

- **Detecção de Superfícies**

Embora o foco do projeto seja a visualização aérea, a detecção de superfícies planas (como o chão) pelo ARCore pode auxiliar na calibragem inicial do ambiente, garantindo que o sistema tenha uma compreensão precisa do ambiente físico ao redor. A detecção de superfícies também fornece um ponto de referência adicional para âncoras no espaço 3D, especialmente se o aplicativo requer uma referência ao nível do solo para posicionar drones em alturas específicas.

- **Pontos de Recursos (Feature Points)**

O ARCore identifica e rastreia pontos de recursos (feature points) visíveis através da câmera para construir um mapa 3D do ambiente, permitindo o rastreamento contínuo de objetos e âncoras. Esses pontos de referência são usados para recalibrar as âncoras, de modo que os drones virtuais permaneçam no local correto mesmo com possíveis interferências ou mudanças na orientação do dispositivo.

- **Estimativa de Luz**

ARCore captura informações sobre as condições de iluminação do ambiente e aplica essas informações aos objetos virtuais. No aplicativo, esse recurso ajusta o brilho e o sombreado dos drones virtuais para que pareçam integrados ao ambiente, independentemente das variações de luz ao redor.

### 3.1.2.2 Integração com Unity

Ao ser integrado com Unity, o ARCore trabalha juntamente com o AR Foundation, o que permite que os dados de âncoras e rastreamento de movimento sejam usados diretamente em Unity, simplificando a criação de uma cena de realidade aumentada. Isso possibilita que as posições dos drones sejam atualizadas constantemente conforme novas coordenadas são recebidas via MQTT, mantendo uma experiência em tempo real e garantindo que os drones permaneçam ancorados com precisão no espaço físico.

Essas funcionalidades do ARCore proporcionam uma estrutura robusta para o aplicativo, permitindo a criação de uma interface AR que reflita com precisão o posicionamento e o movimento de drones no ambiente aéreo ao redor do usuário.

### 3.1.3 Geospatial Creator

O Geospatial Creator da Google é uma ferramenta avançada de desenvolvimento de realidade aumentada (AR) baseada em localização, que permite o posicionamento preciso

de objetos virtuais no mundo físico através de coordenadas geográficas. Aproveitando a API Geospatial da Google, o Geospatial Creator possibilita que objetos em AR sejam ancorados em locais específicos e permaneçam alinhados com o ambiente real, independentemente da movimentação do usuário ou do dispositivo.

### 3.1.3.1 Principais Funcionalidades do Geospatial Creator

- **Âncoras Geoespaciais (Geospatial Anchors)**

As âncoras geoespaciais são um recurso essencial do Geospatial Creator, permitindo que objetos virtuais sejam posicionados com precisão em coordenadas específicas (latitude, longitude e altitude) do mundo real. Essas âncoras mantêm a estabilidade dos objetos em AR, o que é crucial para aplicações que exigem precisão geográfica, como o monitoramento de drones ou a visualização de pontos de interesse. Diferente das âncoras convencionais de AR, as geoespaciais permitem fixar objetos em ambientes externos e grandes áreas com alta precisão.

- **Integração com o Google Maps e Dados do Street View**

O Geospatial Creator utiliza dados de mapeamento do Google Maps e do Street View para oferecer um contexto geográfico detalhado. Essa integração permite que objetos virtuais sejam posicionados e alinhados com pontos de referência reais, como prédios, ruas e outros elementos urbanos. Isso aumenta a precisão do posicionamento e permite que o ambiente de AR se alinhe de forma coerente com o mundo físico ao redor.

- **Posicionamento em 3D com Altitude**

Além das coordenadas horizontais (latitude e longitude), o Geospatial Creator oferece suporte para especificação de altitude, permitindo o posicionamento preciso de objetos virtuais em diferentes elevações. Isso é particularmente útil em aplicativos que precisam simular a posição de objetos aéreos, como drones, que exigem representação em altura relativa para uma visualização 3D fiel.

- **Estabilidade Visual com Rastreamento de Movimento**

Combinado com o ARCore, o Geospatial Creator ajusta a posição dos objetos virtuais de acordo com a perspectiva e movimento do usuário, garantindo que as âncoras permaneçam no local correto. Esse rastreamento contínuo permite que os objetos virtuais pareçam fixos no ambiente físico, mesmo que o usuário se mova ou mude de ângulo.

- **Compatibilidade com Unity para Desenvolvimento Personalizado**

O Geospatial Creator integra-se ao Unity, permitindo que desenvolvedores incorporem âncoras geoespaciais em cenas 3D interativas. Através do AR Foundation,

é possível implementar o Geospatial Creator em dispositivos Android e iOS, facilitando o desenvolvimento de experiências de AR multiplataforma com gráficos personalizados e recursos interativos do Unity.

### 3.1.3.2 Tipos de Âncoras no Geospatial Creator

No Geospatial Creator, as âncoras geoespaciais permitem que objetos virtuais sejam fixados em pontos específicos do mundo real, proporcionando uma experiência de realidade aumentada precisa e integrada ao ambiente físico. Essas âncoras são definidas com base em coordenadas geográficas e utilizam informações de mapeamento detalhadas da Google para permanecerem alinhadas e ancoradas em locais específicos. Existem três tipos principais de âncoras: *rooftop*, *terrain*, e *WGS84*, cada uma com características próprias para diferentes cenários de posicionamento.

- **Âncoras Rooftop**

As âncoras *rooftop* são projetadas para posicionar objetos virtuais em superfícies elevadas, como telhados de edifícios. Elas utilizam dados detalhados de mapas e altimetria para garantir que os objetos fiquem alinhados com a altura e a estrutura de um edifício específico. Esse tipo de âncora é ideal para aplicações em áreas urbanas onde é necessário que objetos em AR sejam colocados em superfícies elevadas e específicas, como um drone visualizado sobre o topo de um prédio. As âncoras *rooftop* garantem que o objeto se ajuste corretamente à elevação e ao contorno da superfície, mantendo sua posição fixa sobre a estrutura escolhida.

- **Âncoras Terrain**

As âncoras *terrain* são usadas para posicionar objetos diretamente no solo, em terrenos ou superfícies niveladas. Esse tipo de âncora é útil em cenários onde o objeto virtual precisa estar posicionado em uma superfície de terra ou outra superfície natural, como em parques, campos ou áreas amplas ao ar livre. Ao utilizar dados de elevação e topografia do terreno, essas âncoras permitem que o objeto virtual siga com precisão a curvatura e variações de elevação do solo, garantindo um alinhamento natural.

- **Âncoras WGS84**

As âncoras *WGS84* utilizam o sistema de referência geodésico global (World Geodetic System 1984), que define uma referência global padronizada de latitude, longitude e altitude. Essas âncoras são especialmente úteis para posicionar objetos virtuais em coordenadas GPS precisas e são amplamente usadas em ambientes onde é necessária uma representação global e consistente. As âncoras *WGS84* são ideais para

representar objetos em qualquer lugar no mundo com precisão, pois baseiam-se em um modelo geométrico da Terra.

Esses tipos de âncoras oferecem flexibilidade para posicionar objetos virtuais em AR de forma precisa e adaptável ao contexto. No Geospatial Creator, as âncoras *rooftop*, *terrain* e *WGS84* proporcionam uma base robusta para criar experiências de realidade aumentada que se alinham de maneira natural ao ambiente físico, seja sobre estruturas, terrenos ou em um sistema global de coordenadas.

### 3.1.4 MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)

O MQTT é um protocolo de comunicação leve e eficiente, amplamente utilizado para transmitir dados em tempo real, especialmente em cenários onde a largura de banda e os recursos de rede são limitados. Originalmente projetado para redes de sensores e dispositivos IoT (Internet das Coisas), o MQTT tem se mostrado altamente eficaz em aplicações que demandam comunicação contínua e de baixa latência, como o monitoramento de drones.

#### 3.1.4.1 Funcionamento do MQTT

O MQTT opera em um modelo de publicação/assinatura (*publish/subscribe*), onde um servidor central, conhecido como "broker", gerencia a troca de mensagens entre dispositivos (clientes). Esse modelo permite que os dispositivos "publiquem" informações em tópicos específicos e que outros dispositivos "assinem" esses tópicos para receber atualizações. Esse sistema é vantajoso para cenários de monitoramento, onde múltiplos dispositivos podem receber dados em tempo real sem a necessidade de conexões diretas entre todos eles.

As principais etapas do funcionamento do MQTT são:

- **Conexão ao Broker**

Cada dispositivo cliente se conecta ao broker MQTT e pode escolher publicar dados, assinar tópicos ou ambos. A conexão ao broker é mantida ativa enquanto o dispositivo estiver ligado e em comunicação, facilitando a troca de mensagens de forma contínua.

- **Publicação e Assinatura em Tópicos**

No sistema de tópicos, cada mensagem enviada pelo dispositivo é direcionada a um tópico específico. Por exemplo, um drone pode publicar sua localização em um tópico como `drones/posição`, enquanto outro dispositivo (como um aplicativo de monitoramento) assina esse tópico para receber atualizações. Essa flexibilidade permite um fluxo de dados dinâmico e escalável entre diferentes dispositivos e aplicações.

- **Qualidade de Serviço (QoS)**

O MQTT oferece três níveis de Qualidade de Serviço (QoS) para controlar a confiabilidade da entrega de mensagens:

- **QoS 0:** "No confirmation"(sem confirmação), onde a mensagem é enviada uma única vez, sem garantir a entrega.
- **QoS 1:** "At least once"(ao menos uma vez), onde a entrega é garantida, mas a mensagem pode ser recebida mais de uma vez.
- **QoS 2:** "Exactly once"(exatamente uma vez), onde a entrega é garantida sem duplicações, ideal para dados críticos.

- **Manutenção da Conexão e Detecção de Falhas**

O protocolo MQTT inclui uma função chamada "Last Will and Testament"(última vontade), que notifica outros dispositivos quando um cliente perde a conexão inesperadamente. Essa função é útil em cenários de monitoramento de drones, pois permite que o sistema detecte rapidamente falhas na comunicação e reaja adequadamente, como ao sinalizar uma interrupção no monitoramento de um drone específico.

### 3.1.4.2 Aplicação do MQTT no Monitoramento de Drones

No contexto do monitoramento de drones, o MQTT é particularmente eficaz para receber dados de localização e atualizações de posição em tempo real. Drones podem publicar dados geoespaciais em intervalos curtos para tópicos específicos, e o aplicativo de monitoramento pode assinar esses tópicos para rastrear as mudanças de posição dos drones de forma contínua. A leveza e a baixa latência do protocolo MQTT garantem que o sistema mantenha um fluxo de dados constante, mesmo em condições de rede instáveis ou limitadas.

Essas características tornam o MQTT uma escolha ideal para aplicações que requerem comunicação eficiente e confiável em tempo real, sendo uma peça-chave para a atualização de âncoras geoespaciais em projetos de visualização e monitoramento de drones.

## 3.2 Implementação

### 3.2.1 Implementação do Projeto

A implementação do projeto de visualização de drones em realidade aumentada (AR) em tempo real seguiu as diretrizes recomendadas pelo Geospatial Creator no Unity. O processo envolveu diversas etapas, desde a configuração do ambiente de desenvolvimento

até a integração de âncoras geoespaciais e a renderização de objetos 3D. Cada etapa foi essencial para garantir que o aplicativo pudesse posicionar e atualizar drones com precisão, refletindo suas posições em coordenadas geográficas reais.

### 3.2.1.1 Etapas de Implementação

- **Configuração do Ambiente e Instalação de Pacotes Necessários**

A implementação começou com a configuração do ambiente de desenvolvimento no Unity para suporte a AR e integração com o Geospatial Creator. Para isso:

- Criou-se um novo projeto no Unity configurado para plataformas móveis (Android e iOS), instalando pacotes essenciais como o **AR Foundation** e o **ARCore Extensions**.

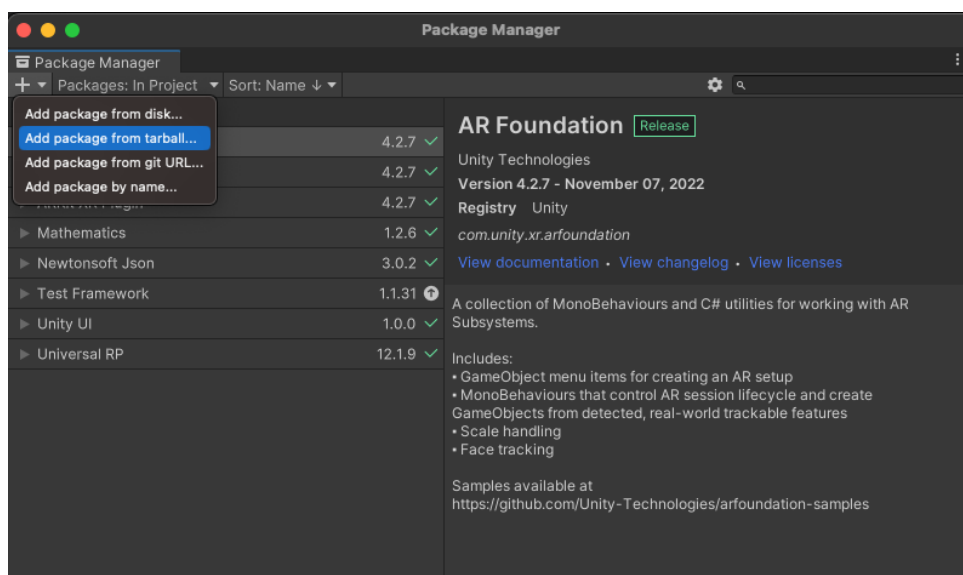


FIGURA 3.3 – Janela de instalação de pacotes do Unity. Retirado de (Google Developers, 2024).

- No menu **Project Settings > XR Plug-in Management**, ativou-se o suporte ao ARCore, permitindo que o aplicativo se conecte à API de AR nativa para Android.
- O **Geospatial Creator** foi instalado como extensão (via Github), e a API Geospatial da Google foi ativada na plataforma Google Cloud Console, permitindo acesso a dados de localização precisos.

- **Configuração da API Geoespacial e Permissões**

Em seguida, ativou-se a API Geoespacial da Google no Google Cloud Console, essencial para o uso de dados de mapeamento e localização em tempo real. Definiram-se permissões de localização, permitindo que o aplicativo acesse dados de GPS e utilize

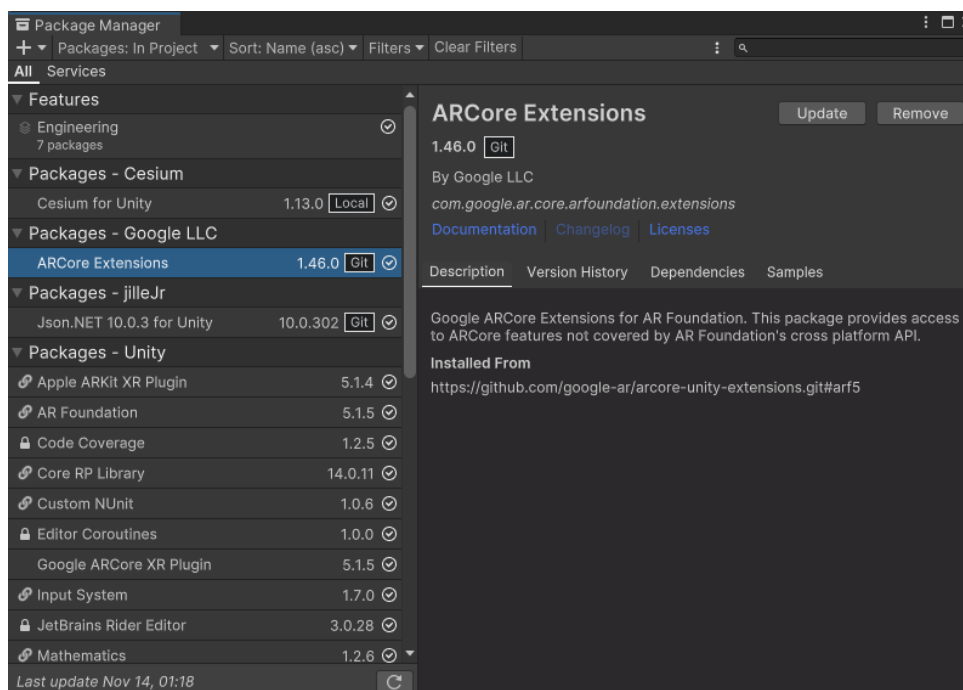


FIGURA 3.4 – Janela de instalação do ARCore Extensions.

âncoras geoespaciais para posicionar drones com precisão. Habilitaram-se permissões para o uso de GPS e localização em segundo plano, garantindo a coleta contínua de dados durante a execução.

- **Criação do Objeto Geospatial Creator Origin**

Após configurar o ambiente, adicionou-se um objeto especial chamado **Geospatial Creator Origin** à cena do Unity. Esse objeto serve como referência central para todos os outros elementos em AR, alinhando o sistema de coordenadas do Unity com coordenadas do mundo real (latitude, longitude e altitude). Este passo é fundamental para o mapeamento correto das posições dos drones no espaço físico.

- **Definição de Âncoras Geoespaciais (Geospatial Anchors)**

Um objeto vazio, denominado **GeospatialController**, foi adicionado à cena e configurado para gerenciar as âncoras geoespaciais dos drones. Um script em C# foi anexado ao **GeospatialController**, permitindo que ele criasse e destruísse âncoras dinamicamente com base em atualizações de posição em tempo real. Esse controle automatizado possibilitou que o **GeospatialController** atualizasse a posição das âncoras ao receber novas coordenadas de latitude, longitude e altitude: a âncora anterior era destruída e uma nova âncora era criada na posição atualizada, simulando o movimento do drone no espaço.

O **Geospatial Creator** oferece diferentes tipos de âncoras de acordo com o ambiente:

- **Rooftop** para drones visualizados sobre edifícios.



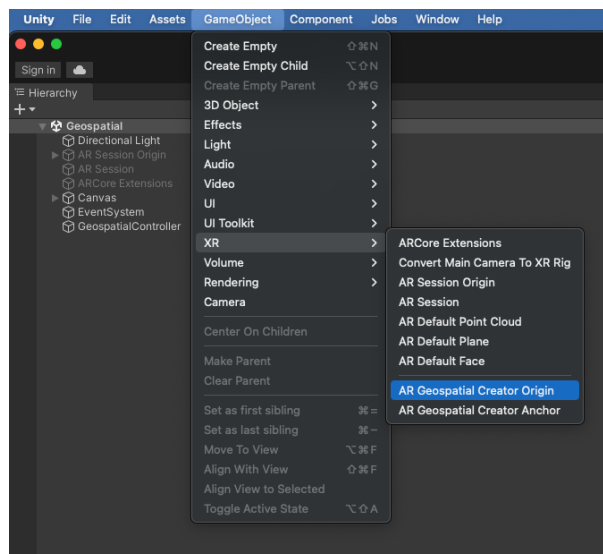


FIGURA 3.5 – Inserção do Geospatial Creator Origin. Retirado de (Google Developers, 2024).

- **Terrain** para drones posicionados ao nível do solo.
- **WGS84** para ancoragem em coordenadas globais, permitindo um mapeamento geoespacial mais amplo.

Através do GeospatialController, o aplicativo utiliza o tipo de âncora apropriado para cada situação e a atualiza conforme novas informações de localização são recebidas, garantindo que a posição dos drones seja refletida com precisão em tempo real.

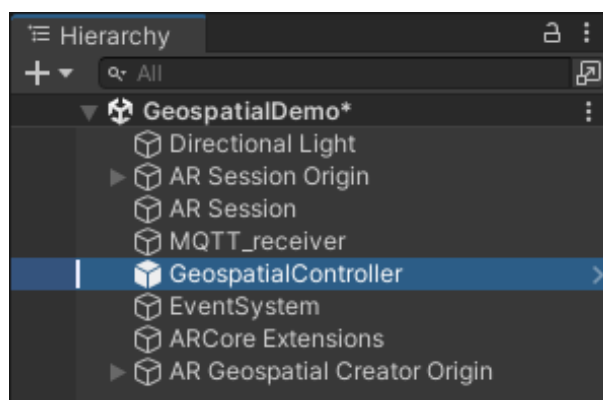


FIGURA 3.6 – Objetos da cena na janela Hierarchy.

### • Implementação da Geometria e Renderização dos Drones

Após a configuração do GeospatialController e das âncoras, foram adicionados objetos 3D representando os drones, que são posicionados sobre as âncoras geoespaciais criadas pelo GeospatialController. Esses objetos foram importados para o Unity e renderizados na posição correta em relação às âncoras. Ajustes de tamanho, rotação e aparência garantiram que os drones estivessem alinhados ao ambiente físico,

proporcionando uma visualização coerente.

- **Integração de Dados em Tempo Real para Atualização de Âncoras**

Com o `GeospatialController` em operação, o sistema recebe dados de localização em tempo real para atualizar continuamente as posições dos drones. A cada nova informação de localização recebida, o `GeospatialController` destrói a âncora anterior do drone e cria uma nova âncora na posição atualizada. Esse processo garante que a visualização dos drones seja rápida, precisa e responsiva às mudanças de localização em tempo real.

- **MQTT Receiver para Recebimento de Dados em Tempo Real**

Para gerenciar a comunicação via protocolo MQTT, foi criado um objeto vazio na cena chamado `MQTT_receiver`. A esse objeto, foi anexado um script em C# que controla tanto a conexão ao broker MQTT quanto a subscrição aos tópicos necessários para o monitoramento dos drones.

O script permite que o `MQTT_receiver` se conecte automaticamente ao broker MQTT, autentique a sessão e assine tópicos específicos configurados para o recebimento de dados de localização dos drones. Ao receber uma nova mensagem de localização, o script a decodifica e aciona uma atualização das âncoras geoespaciais por meio do `GeospatialController`. Além disso, o script implementa métodos para:

- **Publicação e Subscrição em Tópicos:** Permite configurar o tópico de subscrição (`topicSubscribe`), para monitoramento de dados, e o tópico de publicação (`topicPublish`), se necessário enviar dados de controle.
- **Gestão de Conexão:** Monitora o status de conexão com o broker, incluindo eventos de conexão bem-sucedida, perda de conexão e desconexão manual. Em caso de falha de conexão, o script registra uma mensagem de erro para diagnóstico.
- **Armazenamento de Mensagens:** Armazena as mensagens recebidas em uma lista de eventos, garantindo que um histórico recente esteja disponível para análise e que o sistema de monitoramento possa acessar os dados mais recentes.

A estrutura do script permite uma atualização constante e automática das posições dos drones na cena, de acordo com os dados recebidos em tempo real, garantindo que as âncoras geoespaciais estejam sempre alinhadas com a localização atual dos drones.

- **Testes e Ajustes no Dispositivo**

A última etapa envolveu a compilação do aplicativo para dispositivos Android e iOS para testes práticos. Durante os testes:

- Avaliou-se a precisão e estabilidade das âncoras geoespaciais gerenciadas pelo GeospatialController, com ajustes na frequência de atualização e permissões de localização para otimização.
- Testou-se a responsividade das âncoras e a consistência visual dos drones ao movimento do dispositivo, verificando que os objetos permanecessem ancorados corretamente em suas posições geográficas.

### 3.2.1.2 Conclusão da Implementação

Seguindo essas etapas, o aplicativo foi implementado com sucesso, utilizando o Geospatial Creator no Unity para proporcionar uma visualização de drones em tempo real, posicionados com precisão no ambiente físico. A combinação de âncoras geoespaciais, atualização em tempo real e integração com Unity resulta em uma experiência de realidade aumentada imersiva para o monitoramento de drones no espaço aéreo.

## 3.3 Teste e Validação

Para testar e validar o funcionamento do sistema de monitoramento de drones em realidade aumentada, foi desenvolvido um script em Python que simula a trajetória de um drone entre duas localizações predefinidas. Esse script publica atualizações de posição em intervalos regulares, replicando o comportamento de um drone em movimento. A cada atualização, a nova posição é enviada ao tópico específico de localização via protocolo MQTT, possibilitando que o aplicativo receba e atualize a âncora do drone em tempo real.

As mensagens de atualização de posição são monitoradas usando o cliente MQTT **MQTTX**, permitindo a visualização em tempo real do fluxo de dados. Dessa forma, os usuários podem verificar se as posições estão sendo publicadas corretamente e com a frequência adequada. A interface do MQTTX exibe cada mensagem publicada, facilitando a análise do comportamento do sistema e o acompanhamento da trajetória simulada.

Os testes foram realizados em um tablet **Samsung Galaxy Tab S9**, que permitiu verificar o desempenho do aplicativo em um dispositivo móvel de alta capacidade, garantindo que as atualizações de posição fossem refletidas de forma precisa e em tempo real na visualização de realidade aumentada. Este teste foi essencial para avaliar a responsividade do sistema e a qualidade da experiência do usuário ao monitorar a trajetória do drone.

## 4 Resultados

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos a partir dos testes e validações realizados no sistema de monitoramento de drones em realidade aumentada. Os testes foram baseados em uma trajetória linear simulada entre dois pontos no H8, alojamento dos alunos do ITA. Essa trajetória foi planejada e visualizada a partir de um print do mapa do local, retirado do Google Maps e mostrado na Figura 4.1. Utilizando essa trajetória de referência, foi possível avaliar a precisão do posicionamento, a estabilidade das âncoras geoespaciais e o desempenho do sistema em tempo real, além de considerar a experiência do usuário.

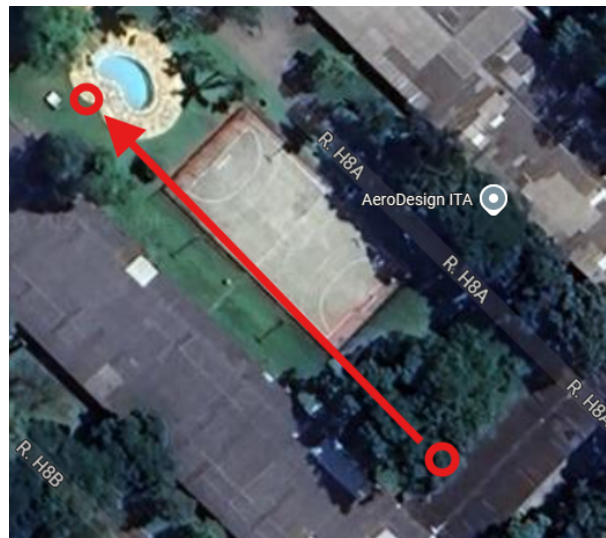


FIGURA 4.1 – Trajetória de voo simulado.

Os resultados são apresentados com base nos dados coletados durante essa simulação de trajetória e na observação do comportamento do aplicativo em um dispositivo móvel, especificamente o tablet Samsung Galaxy Tab S9.

### 4.1 Precisão e Estabilidade das Âncoras Geoespaciais

Os resultados mostraram que o sistema foi capaz de manter uma alta precisão no posicionamento dos drones em relação às coordenadas geográficas definidas, utilizando as

âncoras geospaciais do Geospatial Creator. Em testes de simulação de trajetória, cada atualização de posição foi refletida no ambiente de realidade aumentada com uma margem de erro mínima, sendo visível a transição suave entre as posições. A precisão do sistema foi estável para as âncoras geospaciais estabelecidas.

A Figura 4.2 mostra o posicionamento do objeto de teste (cubo) no início da trajetória, como determinado anteriormente.



FIGURA 4.2 – Posicionamento do objeto 3D no início da trajetória.

No entanto, durante o processo de atualização das âncoras, foi observado que a câmera apresentava pequenas travadas a cada vez que uma âncora era destruída para ser recriada em uma nova posição. Esse efeito se manifestou como interrupções momentâneas na fluidez da visualização em AR, indicando que o gerenciamento de âncoras em tempo real pode ser aprimorado para minimizar esses atrasos. A implementação de métodos de atualização menos invasivos pode ajudar a resolver esse problema, garantindo transições mais suaves ao mover drones.

É importante observar também que, em áreas com sinal GPS mais fraco, pequenas flutuações nas posições das âncoras foram observadas, o que ocasionalmente causou leves deslocamentos dos drones na visualização de realidade aumentada. Esse efeito foi minimizado pelo algoritmo de atualização das âncoras, que destrói e recria as âncoras na nova posição, garantindo que o drone virtual sempre acompanhe a trajetória definida de forma precisa.



FIGURA 4.3 – Objeto posicionado corretamente na trajetória definida durante seu percurso

## 4.2 Desempenho em Tempo Real e Atualização de Posições

A atualização das posições em tempo real, utilizando o protocolo MQTT, demonstrou-se eficaz na manutenção de uma visualização dinâmica dos drones em movimento. O **MQTT\_receiver** foi capaz de receber e processar dados de localização em tempo real, e o **GeospatialController** atualizou as âncoras de forma responsiva, sem atrasos perceptíveis. Em média, o tempo de latência entre a publicação da nova posição pelo script Python e a visualização dessa atualização no aplicativo foi bastante baixo, o que assegurou uma experiência de monitoramento fluida e responsiva.

Além disso, o uso do cliente MQTTX permitiu observar o fluxo de dados e verificar a consistência das mensagens publicadas, como mostrado na Figura 4.4, o que confirmou a integridade da comunicação MQTT e a estabilidade do sistema durante o teste de simulação de trajetória.

## 4.3 Experiência do Usuário e Visualização dos Drones

O sistema foi testado no tablet Samsung Galaxy Tab S9, permitindo avaliar a experiência do usuário em um dispositivo de alta capacidade. Os testes mostraram que a interface de realidade aumentada era intuitiva e de fácil visualização, com os drones virtualmente ancorados nas posições corretas ao longo da trajetória simulada. No entanto, as pequenas travadas observadas durante a atualização das âncoras foram perceptíveis para os usuários, reduzindo a sensação de fluidez na visualização. Esse problema não comprometeu a

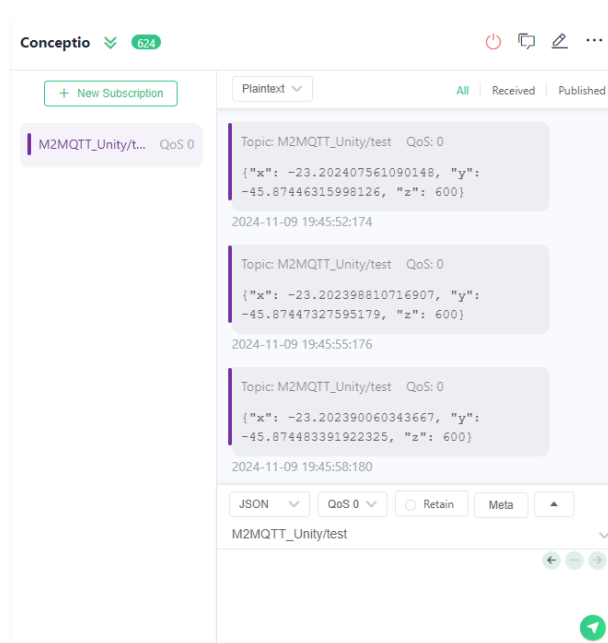


FIGURA 4.4 – Fluxo de dados publicados no MQTTX.

precisão do posicionamento dos drones, mas impactou a naturalidade do movimento.

Mesmo com esse contratempo, o sistema ofereceu uma experiência satisfatória no monitoramento de trajetórias, e é possível destacar a clareza da interface e a precisão da visualização dos drones. Com uma otimização no processo de atualização das âncoras, é provável que a experiência de monitoramento em AR possa ser ainda mais fluida.

## 4.4 Limitações e Possíveis Melhorias

Além das travadas observadas ao atualizar as âncoras, algumas outras limitações foram identificadas. Em áreas com cobertura de GPS limitada, pequenos desvios nas âncoras foram notados, podendo impactar a precisão em ambientes com sinal mais fraco.

Para resolver o problema de travamento, uma possível melhoria seria implementar um método de atualização das âncoras que não exija a destruição e recriação constante dos objetos, reduzindo o impacto no desempenho visual. A aplicação de algoritmos de suavização de posição também pode ajudar a estabilizar as âncoras em condições de sinal GPS variado.

## 4.5 Conclusão dos Resultados

Os resultados obtidos indicam que o sistema de monitoramento de drones em realidade aumentada desenvolvido atende aos requisitos de precisão e atualização em tempo real. A

---

experiência de usuário foi satisfatória, especialmente no que diz respeito à responsividade e estabilidade da visualização AR. Com algumas melhorias, o sistema pode alcançar níveis ainda mais elevados de precisão e estabilidade, sendo adequado para aplicações práticas de monitoramento de drones em diversos contextos.



## 5 Conclusão

Este projeto teve como objetivo desenvolver um sistema de monitoramento de drones em tempo real utilizando realidade aumentada, combinando tecnologias como o Geospatial Creator da Google, Unity, e o protocolo MQTT. Ao longo do processo, foi possível implementar um aplicativo funcional que posiciona e atualiza drones virtualmente ancorados em coordenadas geográficas precisas, criando uma interface intuitiva e imersiva para monitoramento no espaço aéreo. Os resultados obtidos demonstraram a eficácia do sistema em termos de precisão de posicionamento e atualização em tempo real, mesmo em um cenário desafiador de integração entre múltiplas tecnologias. Apesar de algumas limitações observadas, o sistema mostrou grande potencial para aplicações práticas e futuras expansões.

O sistema apresentou uma alta precisão na representação das posições dos drones, especialmente em cenários com boa cobertura de GPS. A utilização do Geospatial Creator para gerenciar âncoras geoespaciais garantiu que os drones fossem posicionados corretamente e atualizados de maneira responsiva à medida que seus dados de localização eram transmitidos. No entanto, o processo de destruição e recriação das âncoras causou pequenas interrupções na fluidez da experiência, o que impactou a naturalidade da visualização em realidade aumentada. Esse desafio revelou a necessidade de otimizar o gerenciamento das âncoras, sugerindo que abordagens menos disruptivas podem ser exploradas para manter a estabilidade visual e o desempenho do aplicativo. Ainda assim, o sistema foi avaliado como funcional e bem adaptado ao propósito principal de monitoramento de drones.

Além das questões técnicas, o projeto destacou o potencial de integração entre diferentes ferramentas e frameworks, como Unity, ARCore, e o protocolo MQTT, para criar soluções inovadoras em monitoramento aéreo. A comunicação em tempo real implementada pelo MQTT permitiu que dados de localização fossem transmitidos com baixa latência e confiabilidade, garantindo a sincronização das posições dos drones com o ambiente virtual. Esses avanços representam não apenas uma contribuição prática para o monitoramento de drones, mas também uma base sólida para futuros desenvolvimentos na área de sistemas baseados em AR e IoT. Com ajustes adicionais e otimizações, o sistema tem o potencial de ser expandido para cenários mais complexos e de maior escala, consolidando-se como uma solução robusta e versátil para a gestão do espaço aéreo.

# Referências

BAGASSI, T. F. S.; CORSI, M. Advanced human machine interfaces for drone monitoring: Assessment of the technological framework for the design of an augmented reality interface. **ICAS PROCEEDINGS 34th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences**, v. 55, n. 10, 2024.

Index. *In*: CHINIARA, G. (Ed.). **Clinical Simulation (Second Edition)**. Second edition. Academic Press, 2019. p. 917–940. ISBN 978-0-12-815657-5. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128156575000747>.

CRAIG, A. B. Chapter 3 - augmented reality hardware. *In*: CRAIG, A. B. (Ed.). **Understanding Augmented Reality**. Boston: Morgan Kaufmann, 2013. p. 69–124. ISBN 978-0-240-82408-6. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780240824086000035>.

DAUER, J. C. **Automated Low-Altitude Air Delivery**. [*S.l.*]: Springer Cham, 2022.

ELEVATE, U. **Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation**. [*S.l.*], 10 2016. 98 p.

FADDA, S. B. T.; CORSI, M. Ads-b driven implementation of an augmented reality airport control tower platform. **Materials Research Proceedings**, v. 37, p. 767–770, 2023.

Google Developers. **Geospatial Creator in Unity Quickstart Guide**. 2024. Accessed: 2024-11-11. Available at: <https://developers.google.com/ar/geospatialcreator/unity/quickstart>.

GORBUNOV, A. L.; NECHAEV, E. E. Augmented reality technologies in air transport control systems. *In*: **2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. Proceedings** [...]. [*S.l.: s.n.*], 2022. p. 1–5.

HASSANALIAN, M.; ABDELKEFI, A. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 91, p. 99–131, 2017. ISSN 0376-0421. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042116301348>.

HOTTMAN, K. H. S.; BERRY, M. Literature review on detect, sense, and avoid technology for unmanned aircraft systems. **Federal Aviation Administration**, 09 2009. ISSN 2226-4310.

Jason Bagby. **Chasing Drones with MQTT & GraphQL**. 2020. Accessed: 2024-11-11. Available at:

<https://medium.com/swlh/chasing-drones-with-mqtt-graphql-497ed8c90e32>.

KOUTROMANOS, G.; KAZAKOU, G. Augmented reality smart glasses use and acceptance: literature review. **Computers Education: X Reality**, v. 2, p. 100028, 2023. ISSN 2949-6780. Available at:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949678023000223>.

LAPPAS, V.; ZOUMPONOS, G.; KOSTOPOULOS, V.; LEE, H.; SHIN, H.-S.; TSOURDOS, A.; TANTARDINI, M.; SHOMKO, D.; MUNOZ, J.; AMORATIS, E.; MARAGKAKIS, A.; MACHAIRAS, T.; TRIFAS, A. Eurodrone, a european unmanned traffic management testbed for u-space. **Drones**, v. 6, p. 53, 02 2022.

MIGLIACCIO, G.; MENGALI, G.; GALATOLO, R. A solution to detect and avoid conflicts for civil remotely piloted aircraft systems into non-segregated airspaces.

**Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering**, v. 230, 01 2016.

MOURTZIS, D.; ANGELOPOULOS, J.; PANOPOULOS, N. Unmanned aerial vehicle (uav) manipulation assisted by augmented reality (ar): The case of a drone.

**IFAC-PapersOnLine**, v. 55, n. 10, p. 983–988, 10th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2022, 2022. ISSN 2405-8963. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896322017785>.

NASA. **NASA's Using Augmented Reality to Transform Air Traffic Management**. 2023. Accessed: 2024-11-11. Available at: <https://www.nasa.gov/aeronautics/nasas-using-augmented-reality-to-transform-air-traffic-management/>.

PATTERSON KEVIN R. ANTCLIFF, L. W. K. E. M. D. A proposed approach to studying urban air mobility missions including an initial exploration of mission requirements. *In: . Proceedings [...]. [S.l.: s.n.]*, 2018.

PAUL, T.; KROGSTAD, T. R.; GRAVDAHL, J. T. Uav formation flight using 3d potential field. *In: 2008 16th Mediterranean Conference on Control and Automation. Proceedings [...]. [S.l.: s.n.]*, 2008. p. 1240–1245.

RETINA Project. **Resilient Synthetic Vision for Advanced Control Tower Air Navigation Service Provision (RETINA)**. 2024. Accessed: 2024-11-11. Available at: <http://www.retina-atm.eu/>.

RUZ, J. J.; AREVALO, O.; PAJARES, G.; CRUZ, J. M. de la. Decision making among alternative routes for uavs in dynamic environments. *In: 2007 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (EFTA 2007). Proceedings [...]. [S.l.: s.n.]*, 2007. p. 997–1004.

SCHUCHARDT, B. I.; GEISTER, D.; LÜKEN, T.; KNABE, F.; METZ, I. C.; PEINECKE, N.; SCHWEIGER, K. Air traffic management as a vital part of urban air mobility—a review of dlr's research work from 1995 to 2022. **Aerospace**, v. 10, n. 1, 2023. ISSN 2226-4310. Available at: <https://www.mdpi.com/2226-4310/10/1/81>.

SHAMIYEH, M.; ROTHFELD, R.; HORNUNG, M. A performance benchmark of recent personal air vehicle concepts. *In: . Proceedings [...]. [S.l.: s.n.], 2018.*

STRAUBINGER, A.; ROTHFELD, R.; SHAMIYEH, M.; BÜCHTER, K.-D.; KAISER, J.; PLÖTNER, K. O. An overview of current research and developments in urban air mobility – setting the scene for uam introduction. **Journal of Air Transport Management**, v. 87, p. 101852, 2020. ISSN 0969-6997. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969699719304302>.

UNDERTAKING and S. E. S. A. R. . J. **European drones outlook study – Unlocking the value for Europe**. [S.l.]: Publications Office, 2017.

UNDERTAKING and S. E. S. A. R. . J. **European ATM master plan – Digitalising Europe’s aviation infrastructure – Executive view – 2020 edition**. [S.l.]: Publications Office, 2020.

Unity Technologies. **Augmented Reality Overview - Unity Manual**. 2024. Accessed: 2024-11-11. Available at: <https://docs.unity3d.com/Manual/AROverview.html>.

## FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TC</p>	2. DATA <p style="text-align: center;">27 de novembro de 2024</p>	3. REGISTRO N° <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/TC-137/2024</p>	4. N° DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">55</p>
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: <p>Modelagem de SARPs (Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas) em ambiente de Realidade Virtual</p>			
6. AUTOR(ES): <p><b>Phellype Rerison Figueiredo de Freitas</b></p>			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): <p>Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA</p>			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: <p>Realidade Aumentada; Drones; UAV; SARPs; Unity; Geospatial Creator; MQTT; Modelagem</p>			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: <p>1. Realidade virtual 2. Veículos pilotados remotamente 3. Aeronave não-tripulada 4. Protocolos de comunicação 5. Engenharia aeronáutica 6. Computação</p>			
10. APRESENTAÇÃO: <span style="float: right;"><input checked="" type="checkbox"/> Nacional      ( ) Internacional</span> <p>ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica. Orientador: Prof. Dr. Christopher Shneider Cerqueira. Publicado em 2024.</p>			
11. RESUMO: <p>Este projeto teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de drones em tempo real utilizando realidade aumentada, integrando tecnologias como o Geospatial Creator da Google, Unity, e o protocolo MQTT para criar uma solução robusta e intuitiva. O sistema foi projetado para posicionar drones virtuais com base em coordenadas geográficas precisas, utilizando âncoras geoespaciais que permitem a sincronização do mundo virtual com o físico. Durante o desenvolvimento, um objeto denominado GeospatialController foi implementado para gerenciar a criação e atualização das âncoras, e outro, chamado MQTT_receiver, foi utilizado para receber dados de localização em tempo real via protocolo MQTT. Testes foram realizados em uma trajetória simulada entre dois pontos no H8, alojamento do ITA, utilizando um tablet Samsung Galaxy Tab S9, para avaliar a precisão do sistema, a estabilidade das âncoras e a responsividade às mudanças de posição dos drones. Apesar de o sistema ter demonstrado alta precisão na representação das posições e fluidez nas transições, foi identificado que o processo de destruição e recriação das âncoras causava pequenas travadas na câmera, indicando que há espaço para otimizações no gerenciamento das âncoras. A integração entre MQTT e Geospatial Creator permitiu a atualização contínua e confiável das posições, demonstrando o potencial do sistema para aplicações práticas em monitoramento aéreo. Os resultados alcançados refletem a viabilidade de soluções baseadas em realidade aumentada para a gestão do espaço aéreo e oferecem uma base sólida para futuros aprimoramentos e expansões do sistema.</p>			
12. GRAU DE SIGILO: <p style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO      ( ) RESERVADO      ( ) SECRETO</p>			