

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**



**André Felipe Pereira Guimarães**

**METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE  
SISTEMA DE REDIRECIONAMENTO DINÂMICO NO  
BR-UTM**

Trabalho de Graduação  
2024

**Curso de Engenharia Aeronáutica**

**André Felipe Pereira Guimarães**

**METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE  
SISTEMA DE REDIRECIONAMENTO DINÂMICO NO  
BR-UTM**

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**

Guimarães, André Felipe Pereira  
Metodologia para implementação de sistema de redirecionamento dinâmico no BR-UTM /  
André Felipe Pereira Guimarães.  
São José dos Campos, 2024.  
42f.

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

1. Aeronave não-tripulada. 2. Planejamento de trajetória. 3. Rotas. 4. Defesa aérea.  
5. Segurança nacional. 6. Brasil. 7. Aeronaves teleguiadas. 8. Tomadas de decisão. 9. Engenharia  
aeronáutica. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

GUIMARÃES, André Felipe Pereira. **Metodologia para implementação de sistema de redirecionamento dinâmico no BR-UTM**. 2024. 42f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: André Felipe Pereira Guimarães

TÍTULO DO TRABALHO: Metodologia para implementação de sistema de redirecionamento dinâmico no BR-UTM.

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.

---

André Felipe Pereira Guimarães  
Rua H8A, Ap. 125  
12.228-460 – São José dos Campos–SP

# METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE REDIRECIONAMENTO DINÂMICO NO BR-UTM

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

*André F. P. Guimarães*

---

André Felipe Pereira Guimarães

Autor

*Christopher Shneider*

---

Prof. Dr. Christopher Shneider Cerqueira (ITA)

Orientador

*Vinicius Malatesta*

---

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

São José dos Campos, 31 de outubro de 2024.

# Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão ao Prof. Dr. Christopher Shneider Cerqueira, meu orientador, pela orientação, paciência e apoio ao longo deste projeto. Sua ajuda foi essencial para a realização deste trabalho.

Agradeço também à Força Aérea Brasileira pelo suporte, sem o qual este trabalho científico não seria possível, assim como esta formação ímpar.

Estendo meus sinceros agradecimentos ao corpo docente e aos meus colegas do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), principalmente meus companheiros de turma de Engenharia Aeronáutica. As discussões e o trabalho em equipe foram essenciais para minha formação e para a realização deste trabalho.

Não posso deixar de agradecer à família, em especial minha mãe Izabel, pelo amor, pelo incentivo e pela compreensão nos momentos em que mais precisei. Sem esquecer da minha namorada, Clara, que esteve ao meu lado durante os altos e baixos dessa longa jornada.

A todos vocês, meu mais sincero muito obrigado.

*"Innovation is the ability to see change as an opportunity, not a threat."*

— STEVE JOBS

# Resumo

Um Sistema de Gestão do Tráfego Aéreo de Aeronaves Não Tripuladas tem como um dos principais objetivos a capacidade de gestão e separação de conflitos entre elementos nesse espaço aéreo. Um serviço que contribui para esse objetivo é o de redirecionamento dinâmico, que inclui a negociação, a priorização e o rearranjo de volumes operacionais, ou rotas, enquanto uma aeronave não tripulada está em voo. Este trabalho visa contribuir para o desenvolvimento desse serviço no sistema de Gerenciamento de Tráfego Aéreo Não Tripulado do Brasil (BR-UTM).

A implementação de um sistema de redirecionamento dinâmico no BR-UTM requer uma abordagem robusta e integrada que combine infraestrutura escalável com técnicas avançadas de análise de dados. Este trabalho propõe a criação de um sistema utilizando conceitos do UTM Framework 4 da International Civil Aviation Organization (ICAO) para garantir a segurança e a eficiência do gerenciamento do espaço aéreo. A metodologia adotada foca na integração de dados em tempo real, análise preditiva e tomada de decisão automatizada para ajustar dinamicamente as rotas dos UAS (Unmanned Aircraft Systems), evitando congestionamentos e garantindo conformidade com as regulamentações. O estudo realizado até o momento demonstra que a abordagem proposta é viável e oferece uma base sólida para a continuação do projeto, proporcionando confiança na eficácia do sistema em um ambiente operacional.

# Abstract

One of the primary goals of the Unmanned Traffic Management is the ability to manage and separate conflicts between elements in this airspace. A service that contributes to this goal is dynamic rerouting, which includes negotiation, prioritization, and rearrangement of operational volumes or routes while an unmanned aircraft is in flight. This work aims to contribute to the development of this service within the Brazilian Unmanned Traffic Management System (BR-UTM).

The implementation of a dynamic rerouting system in the BR-UTM requires a robust and integrated approach that combines scalable infrastructure with advanced data analysis techniques. This paper proposes the creation of a system using concepts from International Civil Aviation Organization's UTM Framework 4 to ensure the safety and efficiency of airspace management. The adopted methodology focuses on the integration of real-time data, predictive analysis, and automated decision-making to dynamically adjust the routes of UAS (Unmanned Aircraft Systems), preventing congestion and ensuring regulatory compliance. The study conducted so far demonstrates that the proposed approach is feasible and provides a solid foundation for the continuation of the project, offering confidence in the system's effectiveness in an operational environment.

# Lista de Figuras

FIGURA 1.1 – Dados de solicitações de acesso ao espaço aéreo brasileiro nos últimos anos. Fonte: (Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), 2024)	13
FIGURA 1.2 – Análise do primeiro trimestre de 2024 no SARPAS. Fonte: (Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), 2024)	14
FIGURA 2.1 – Ecossistema UTM internacional. Fonte: (ASTM International, 2021)	18
FIGURA 2.2 – Arquitetura do UTM no Brasil. Fonte: (Departamento de Controle do Espaço Aéreo, 2020)	21
FIGURA 2.3 – Desconflito estratégico no SARPAS em fase pré-voos. Fonte: (Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), 2024)	22
FIGURA 2.4 – Desconflito tático durante voo de drone. Fonte: (European Union Aviation Safety Agency (EASA), 2024b)	23
FIGURA 2.5 – Aplicação do conceito de geofence no UTM. Fonte: (KIM; ATKINS, 2022)	24
FIGURA 2.6 – Volumes 4D em área e trajetória. Fonte: (ASTM International, 2021)	25
FIGURA 2.7 – Consideração de erros de trajetória no volume 4D. Fonte: (ASTM International, 2021)	26
FIGURA 3.1 – Metodologia para implementação do redirecionamento dinâmico em caso de conflito em voo. Fonte: Autor	29
FIGURA 4.1 – Fase de voo de drone em simulação com trajetória sem obstáculos. Fonte: Autor	35
FIGURA 4.2 – Demonstração do surgimento de um obstáculo em uma trajetória. Fonte: Autor	35
FIGURA 4.3 – Surgimento de nova trajetória replanejada em voo. Fonte: Autor	36

---

FIGURA 4.4 – Validação de volume 4D para atender à metodologia de redirecionamento dinâmico. Fonte: Autor . . . . .	37
FIGURA 4.5 – Cenário de simulação computacional com múltiplos drones. Fonte: Autor . . . . .	38

# Lista de Abreviaturas e Siglas

ADS-B	Automatic Dependent Surveillance-Broadcast
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATM	Air Traffic Management
BVLOS	Beyond Visual Line of Sight
BR-UTM	Brazilian Unmanned Aircraft System Traffic Management
DCA	Diretriz do Comando da Aeronáutica
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DSS	Discovery and Synchronization Service
EASA	European Union Aviation Safety Agency
FAA	Federal Aviation Administration
FTE	Flight Technical Error
GNSS	Global Navigation Satellite System
IA	Inteligência Artificial
ICAO	International Civil Aviation Organization
LiDAR	Light Detection and Ranging
NSE	Navigation System Error
PDE	Path Definition Error
Remote ID	Identificação Remota
RPAS	Remotely Piloted Aircraft Systems
RPA	Remotely Piloted Aircraft
SARPAS	Sistema de Solicitação de Acesso ao Espaço Aéreo por RPAS
TCL	Technical Capability Level
TSE	Total System Error
UA	Unmanned Aircraft
UAS	Unmanned Aircraft Systems
USS	UAS Service Supplier
UTM	Unmanned Traffic Management
VLOS	Visual Line of Sight

# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	13
1.1	Motivação . . . . .	13
1.2	Objetivo . . . . .	15
1.3	Organização do Documento . . . . .	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .	17
2.1	O que é UTM? . . . . .	17
2.2	O Desenvolvimento UTM no Brasil . . . . .	20
2.3	Deconflitos tático e estratégico . . . . .	21
2.4	Tecnologias Utilizadas no Contexto UTM . . . . .	23
2.4.1	Geofencing . . . . .	23
2.4.2	Tecnologias de Rastreabilidade . . . . .	24
2.5	Volumes 4D . . . . .	25
3	METODOLOGIA . . . . .	27
3.1	Protocolo de Contingência . . . . .	28
3.1.1	Solicitação de Volume Emergencial . . . . .	29
3.1.2	Notificação e Solicitação de Parada . . . . .	30
3.1.3	Solicitação de Novo Trajeto com Base nas Restrições . . . . .	30
3.1.4	Novo Trajeto Aprovado . . . . .	31
3.1.5	Envio do Novo Trajeto ao UA em Voo . . . . .	31
3.1.6	Simulação . . . . .	31
4	RESULTADOS . . . . .	34

SUMÁRIO	xii
<hr/>	
5 CONCLUSÕES . . . . .	39
REFERÊNCIAS . . . . .	41

# 1 Introdução

A aviação não tripulada tem registrado um crescimento acelerado no Brasil e no mundo, impulsionada pelo uso crescente de RPAs, para aplicações comerciais, industriais, recreativas e de segurança. Com o aumento substancial dessas operações, tornou-se inviável limitar o uso de drones apenas ao voo em VLOS. O avanço das tecnologias de RPAs e a crescente necessidade de operações BVLOS impõem desafios significativos para a segurança e gestão eficiente do espaço aéreo, especialmente em áreas de tráfego denso e zonas controladas.

## 1.1 Motivação

No Brasil, o DECEA tem sido pioneiro na implementação de um sistema de UTM robusto e seguro, que visa integrar RPAs ao espaço aéreo até uma altitude de 400 pés. Parte essencial dessa estrutura é o SARPAS, que tem desempenhado um papel pioneiro na regulamentação e monitoramento das operações de drones no país. Até 2023, o SARPAS processou mais de 1.000.000 de solicitações de acesso ao espaço aéreo.



FIGURA 1.1 – Dados de solicitações de acesso ao espaço aéreo brasileiro nos últimos anos. Fonte: (Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), 2024)

Já no primeiro trimestre de 2024, 108.927 usuários — sendo 100.696 pessoas físicas e 8.231 organizações — estavam cadastrados no sistema, revelando a ampla adesão e a

crecente demanda por operações de RPAs. Além disso, foram solicitadas 90.522 áreas para operações, das quais 64.101 foram aprovadas, 24.180 negadas e 2.188 canceladas. O alto nível de automação no SARPAS NG, que chega a 92%, permite que análises sejam realizadas com maior eficiência, liberando recursos humanos para se concentrarem em casos de maior complexidade e riscos específicos das operações BVLOS. (Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), 2024)



FIGURA 1.2 – Análise do primeiro trimestre de 2024 no SARPAS. Fonte: (Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), 2024)

Globalmente, a ICAO tem estabelecido diretrizes detalhadas para a integração segura e eficiente dos drones no espaço aéreo, enfatizando a importância de um sistema robusto de UTM. O UTM Framework Edition 4 da ICAO apresenta recomendações para que os países desenvolvam sistemas adaptados às suas necessidades de segurança, com foco em componentes críticos, como o uso de IA e algoritmos avançados para previsão de conflitos e reconfiguração de rotas em tempo real (International Civil Aviation Organization, 2021). A integração da IA no UTM tem o potencial de transformar o gerenciamento do tráfego aéreo não tripulado ao permitir que sistemas prevejam e ajustem autonomamente as rotas de RPAs, otimizando a segurança e eficiência das operações. Esses avanços são particularmente relevantes para operações BVLOS, nas quais os drones operam além da linha de visão do operador, exigindo sistemas de monitoramento mais complexos para evitar colisões e manter a segurança no espaço aéreo.

O redirecionamento dinâmico de rotas, conforme proposto pela ICAO, é essencial para que operações BVLOS alcancem seu potencial máximo de segurança e eficiência. Essa capacidade permite que drones ajustem suas rotas em resposta a emergências ou mudanças no espaço aéreo, evitando zonas de conflito e promovendo a coexistência harmoniosa de RPAs e aeronaves tripuladas. A implementação efetiva desse redirecionamento dinâmico não apenas aumenta a segurança, mas também otimiza a utilização do espaço aéreo ao permitir uma maior densidade de operações. Dessa forma, um UTM com capacidade de redirecionamento dinâmico responde mais prontamente a situações imprevistas, proporcionando um nível adicional de segurança para as operações.

No Brasil, o desenvolvimento do BR-UTM, liderado pelo DECEA, tem como objetivo consolidar o país como um dos líderes no gerenciamento de tráfego aéreo não tripulado. A adoção de tecnologias como o redirecionamento dinâmico de rota em voo no BR-UTM permitirá prever e reconfigurar rotas de forma autônoma, respondendo a conflitos em tempo real e aumentando a segurança das operações de RPAs. Com o BR-UTM, o Brasil visa criar um ecossistema seguro e eficiente para operações de drones, alinhado às melhores práticas internacionais estabelecidas pela ICAO e adaptado aos desafios locais. Esse desenvolvimento é um passo essencial para garantir que o espaço aéreo brasileiro seja utilizado de maneira segura e sustentável, atendendo tanto às necessidades operacionais locais quanto às diretrizes globais de segurança.

Assim, a motivação deste trabalho reside na necessidade urgente de desenvolver e implementar soluções dentro do contexto UTM nacional, como o redirecionamento dinâmico de voo, aprimorando a segurança, eficiência e sustentabilidade do sistema de tráfego aéreo não tripulado no Brasil. Esse avanço contribui significativamente para a evolução do BR-UTM e para a promoção de um ambiente operacional mais seguro e eficiente para RPAs e aeronaves tripuladas no espaço aéreo brasileiro.

## 1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar soluções globais e definir uma metodologia inicial para a implementação de um serviço de redirecionamento dinâmico de volumes operacionais no contexto da Gestão do Tráfego Aéreo Não Tripulado (UTM), com foco nas operações BVLOS e na mitigação de conflitos táticos em tempo real. Adicionalmente, explora-se a aplicação de IA para o gerenciamento proativo de conflitos, promovendo a eficiência e segurança de aeronaves não tripuladas. A análise se baseará tanto no UTM Framework Edition 4 da ICAO, que estabelece diretrizes globais para integração segura dos sistemas UTM, quanto em recomendações da EASA, que destacam a necessidade de um desconflito eficiente para assegurar a segregação de tráfego e a adaptação do espaço aéreo em resposta a variáveis operacionais emergentes. Esses elementos são fundamentais para o desenvolvimento do BR-UTM, atualmente implementado pelo DECEA, contribuindo para um sistema robusto e eficaz de gerenciamento do tráfego aéreo não tripulado no Brasil.

## 1.3 Organização do Documento

Este documento está organizado da seguinte forma: A Seção 1 (Introdução) apresenta o contexto, os objetivos e a metodologia de pesquisa adotada para o desenvolvimento do

---

sistema de redirecionamento dinâmico no BR-UTM. A Seção 2 (Fundamentação Teórica) discute os conceitos básicos de UTM, revisa o Framework Edition 4 da ICAO e explora as tecnologias utilizadas no contexto do UTM. A Seção 3 (Metodologia) detalha a abordagem de pesquisa, os métodos de coleta de dados, as ferramentas e as tecnologias utilizadas para a implementação do sistema. A Seção 4 (Resultados e Discussão) analisa os resultados obtidos, comparando-os com soluções existentes e discutindo os benefícios e limitações do sistema proposto. Finalmente, a Seção 5 (Conclusão) resume as principais conclusões do trabalho, sugere direções para futuras pesquisas e apresenta as considerações finais.

## 2 Fundamentação Teórica

### 2.1 O que é UTM?

O UTM foi desenvolvido para gerenciar operações de UAS em baixa altitude, garantindo a integração segura e eficiente desses veículos no espaço aéreo. Esse sistema surgiu inicialmente da colaboração entre NASA e FAA, que conduziram testes e implementações de capacidades técnicas organizadas nos TCLs. Cada nível de TCL testou tecnologias e abordagens específicas para validar os conceitos do UTM em diferentes cenários operacionais, desde operações VLOS até cenários complexos de BVLOS em áreas urbanas e de alta densidade operacional, conforme demonstrado no TCL4, focado em operações urbanas intensivas.(JUNG; CRAVEN, 2020)

Paralelamente, a ICAO desenvolveu o UTM Framework, que estabelece princípios globais para a implementação do UTM, destacando a importância da interoperabilidade com o ATM e a necessidade de tecnologias de rastreamento, comunicação, geofencing e de uma estrutura de gerenciamento de conflitos. O framework define serviços essenciais para o UTM, incluindo autorização de espaço aéreo, planejamento de voos, rastreamento, e gerenciamento dinâmico de rotas para acomodar mudanças operacionais em tempo real. (International Civil Aviation Organization, 2021)

Adicionalmente, a ASTM elaborou especificações técnicas para interoperabilidade entre UTM e fornecedores de serviços, detalhando requisitos para monitoramento de conformidade e gestão de restrições de espaço aéreo. Essas especificações visam garantir que o sistema UTM, ao integrar dados e serviços variados, mantenha um padrão de segurança e eficiência adequado para operações intensivas de UAS, mesmo em espaços aéreos complexos e compartilhados.(ASTM International, 2021)

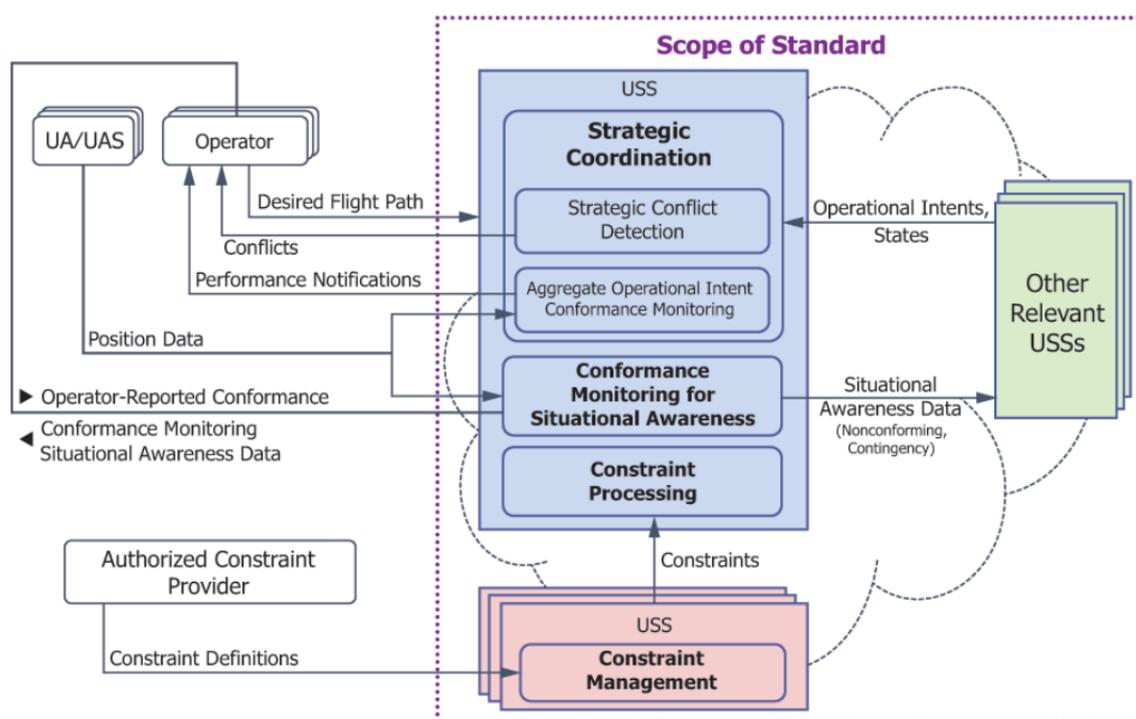


FIGURA 2.1 – Ecossistema UTM internacional. Fonte: (ASTM International, 2021)

O UTM representa um sistema colaborativo e dinâmico, no qual múltiplos agentes interagem para gerenciar com segurança as operações de UAS em espaços aéreos complexos e compartilhados. Este ecossistema integra UAS, operadores, UAS Service Suppliers (USS), Discovery and Synchronization Service (DSS), reguladores e outras entidades de suporte, cada qual desempenhando papéis específicos para garantir uma operação integrada, segura e eficiente.

No ecossistema UTM, os UAS são as aeronaves remotamente pilotadas que realizam as operações, podendo incluir drones de pequeno porte até sistemas mais complexos e de grande autonomia. Os operadores, responsáveis pelos UAS, têm o papel de planejar e gerenciar as missões de voo, submetendo planos de voo e monitorando suas aeronaves em tempo real. Eles devem assegurar que as operações estejam em conformidade com as normas locais, respondendo a notificações e ajustando trajetórias conforme necessário. No contexto das operações BVLOS, os operadores desempenham um papel crucial, utilizando os serviços do UTM para coordenar e ajustar trajetórias em resposta a conflitos ou restrições de espaço aéreo.

Os USS são plataformas de serviço que fornecem aos operadores os dados e serviços necessários para realizar operações seguras de UAS. Os USS garantem que os planos de voo dos operadores estejam em conformidade com as restrições de espaço aéreo e oferecem funcionalidades como monitoramento de conformidade, detecção de conflitos e gestão de restrições. A especificação ASTM F3548-21 define o USS como um provedor central de

serviços essenciais para o UTM, que inclui a Coordenação Estratégica e o Monitoramento de Conformidade Situacional, oferecendo suporte para decisões de redirecionamento dinâmico e replanejamento em tempo real.(CHAKRABARTY; IPPOLITO, 2020)

O DSS é uma infraestrutura fundamental para o compartilhamento de dados e sincronização entre USSs. Ele permite que múltiplos USSs e operadores compartilhem informações de tráfego, restrições e situações não conformes de forma coordenada. Essa função é essencial para manter a integridade dos dados de espaço aéreo e garantir que todos os envolvidos em uma determinada área estejam cientes das operações de UAS em andamento. A interoperabilidade garantida pelo DSS facilita o fluxo contínuo de informações entre os agentes, evitando conflitos e assegurando que as mudanças de rota, quando necessárias, sejam aplicadas de maneira sincronizada e segura. (Federal Aviation Administration (FAA), 2020)

Os órgãos reguladores, como FAA, EASA e DECEA, estabelecem e supervisionam as diretrizes e normas que regulamentam o uso de UAS no espaço aéreo. Esses órgãos definem as normas de conformidade e segurança que os operadores e USSs devem seguir, aprovam as áreas de operação e especificam os requisitos técnicos para cada região. Reguladores têm o papel adicional de monitorar a implementação de normas e ajustar diretrizes conforme o aumento de densidade de tráfego e o avanço das tecnologias de UTM. O framework UTM da ICAO serve como uma base de harmonização internacional, orientando os países na adoção de um ecossistema UTM que seja compatível com os sistemas tradicionais de ATM, promovendo segurança e eficiência em nível global.

Além dos agentes principais, o ecossistema UTM inclui outras entidades de suporte, como provedores de dados de localização, serviços de comunicação e segurança de dados. Essas tecnologias auxiliares, como o rastreamento remoto (Remote ID) e sistemas de monitoramento de redes, oferecem camadas adicionais de segurança e situational awareness. A ASTM F3548-21 especifica que essas entidades devem garantir a precisão e a segurança dos dados, mantendo a integridade das operações de UAS e contribuindo para um ambiente seguro e coordenado.

Além disso, o ecossistema UTM exige a implementação de capacidades e sistemas fundamentais que possibilitem o gerenciamento seguro, eficiente e dinâmico das operações de UAS em espaços aéreos complexos. Esses sistemas são essenciais para garantir a interoperabilidade entre diversos agentes e suportar uma resposta ágil a eventos imprevistos e conflitos em tempo real. A integração entre serviços, como autorização de espaço aéreo, rastreamento e redirecionamento dinâmico, é crítica para permitir o crescimento das operações BVLOS, especialmente em áreas de alta densidade operacional.

Capacidade	Descrição
Autorização de Espaço Aéreo	Serviços que garantem que as operações de UAS estejam de acordo com as restrições de espaço aéreo e regulamentações locais.
Planejamento e Monitoramento de Voo	Ferramentas que auxiliam operadores e USS a planejar rotas de voo com segurança e monitorar a conformidade das operações em tempo real.
Gerenciamento de Conflitos	Deteção de conflitos entre trajetórias de UAS e redirecionamento dinâmico para assegurar a separação e evitar colisões.
Rastreamento e Telemetria	Sistemas de rastreamento contínuo que fornecem dados de posição e status dos UAS para os operadores e o DSS.
Identificação Remota (Remote ID)	Capacidade de identificar e monitorar UAS em tempo real, garantindo segurança e responsabilidade nas operações.
Interoperabilidade entre Sistemas de Gerenciamento (UTM e ATM)	Comunicação fluida entre o UTM e os sistemas de ATM para assegurar a integração segura de UAS com aeronaves tripuladas.
Sincronização e Compartilhamento de Dados	DSS para permitir a troca de informações entre diferentes USS e agentes reguladores, assegurando a atualização contínua das operações em uma região.
Gestão de Restrições e Conformidade	Controle e atualização de restrições operacionais que assegurem que todos os UAS estejam em conformidade com as normas estabelecidas.

TABELA 2.1 – Capacidades e descrições essenciais para um ecossistema UTM seguro e eficiente. Fonte: (International Civil Aviation Organization, 2021)

## 2.2 O Desenvolvimento UTM no Brasil

No Brasil, o desenvolvimento do UTM teve início com a criação do ecossistema nacional chamado de BR-UTM e posteriormente o desenvolvimento do SARPAS, uma plataforma digital aprimorada para o registro, planejamento e autorização de voos de UAS. O SARPAS permite o gerenciamento eficiente de solicitações de acesso ao espaço aéreo para UAS, alinhando-se às diretrizes da ICAO e adaptando-as às particularidades do cenário nacional. Este sistema incorpora altos níveis de automação e integra capacidades essenciais, como autorização de voo e desconflito no planejamento de trajetória, elementos críticos para operações seguras e em grande escala. (DECEA, 2021)

Os principais desafios para o desenvolvimento do UTM no Brasil incluem a extensa diversidade geográfica, que demanda soluções diferenciadas para atender áreas urbanas densamente povoadas e regiões remotas. A infraestrutura tecnológica robusta é essencial para suportar o volume crescente de operações BVLOS e coordenar o acesso ao espaço aéreo de forma segura e eficiente. Além disso, a integração de diferentes stakeholders – desde órgãos reguladores e operadores de UAS até provedores de serviços como USS e DSS – é crucial para garantir um ecossistema harmonizado. A estrutura regulatória brasileira para o UTM está formalizada na DCA 351-7, que define as diretrizes operacionais e regulatórias para a gestão do tráfego aéreo não tripulado, proporcionando um arcabouço jurídico essencial para o crescimento desse setor. (DECEA, 2024)

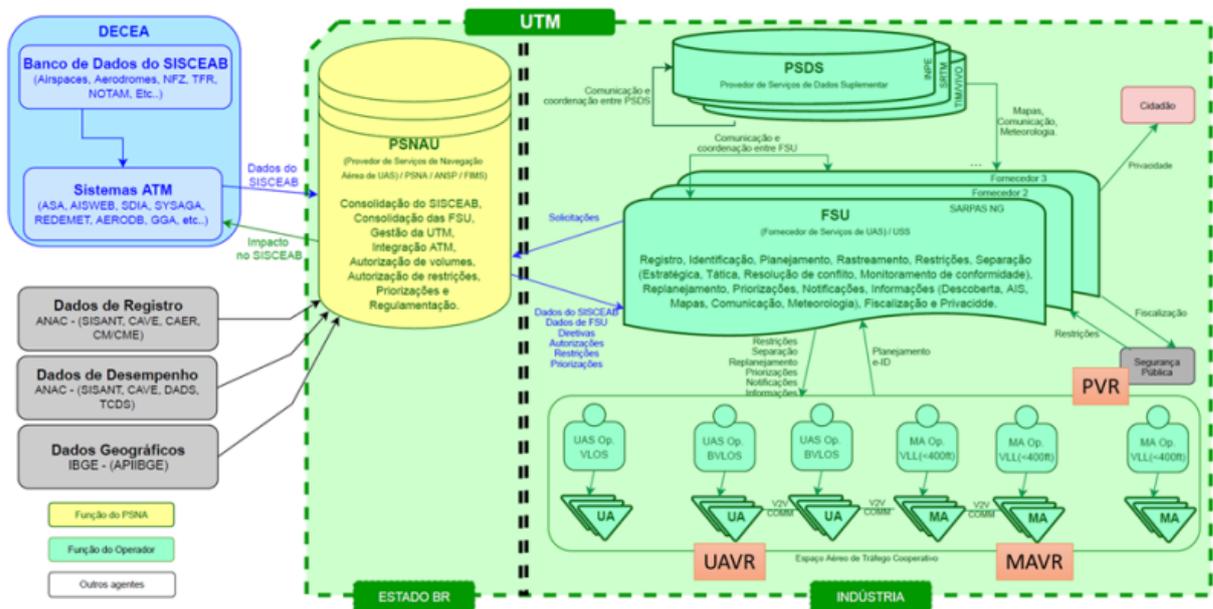


FIGURA 2.2 – Arquitetura do UTM no Brasil. Fonte: (Departamento de Controle do Espaço Aéreo, 2020)

## 2.3 Deconflitos tático e estratégico

No contexto do UTM, o desconflito estratégico e o desconflito tático são abordagens distintas, porém complementares, para garantir a segurança e a eficiência das operações de UAS em um espaço aéreo compartilhado. O desconflito estratégico é uma medida preventiva adotada durante a fase de planejamento de voo, antes de o UAS decolar. Nesse estágio, as trajetórias de voo são cuidadosamente analisadas e ajustadas para evitar possíveis conflitos com outras operações previstas, levando em conta o Operational Intent e as restrições espaciais e temporais estabelecidas nos volumes 4D. Por exemplo, se dois UAS planejarem trajetórias que passam pela mesma área ao mesmo tempo, ajustes são realizados preventivamente para evitar a sobreposição de trajetórias e reduzir o risco de colisões. Esse tipo de desconflito é particularmente importante em operações de alta densidade, onde pequenas sobreposições de rota podem representar riscos substanciais devido ao volume de tráfego.

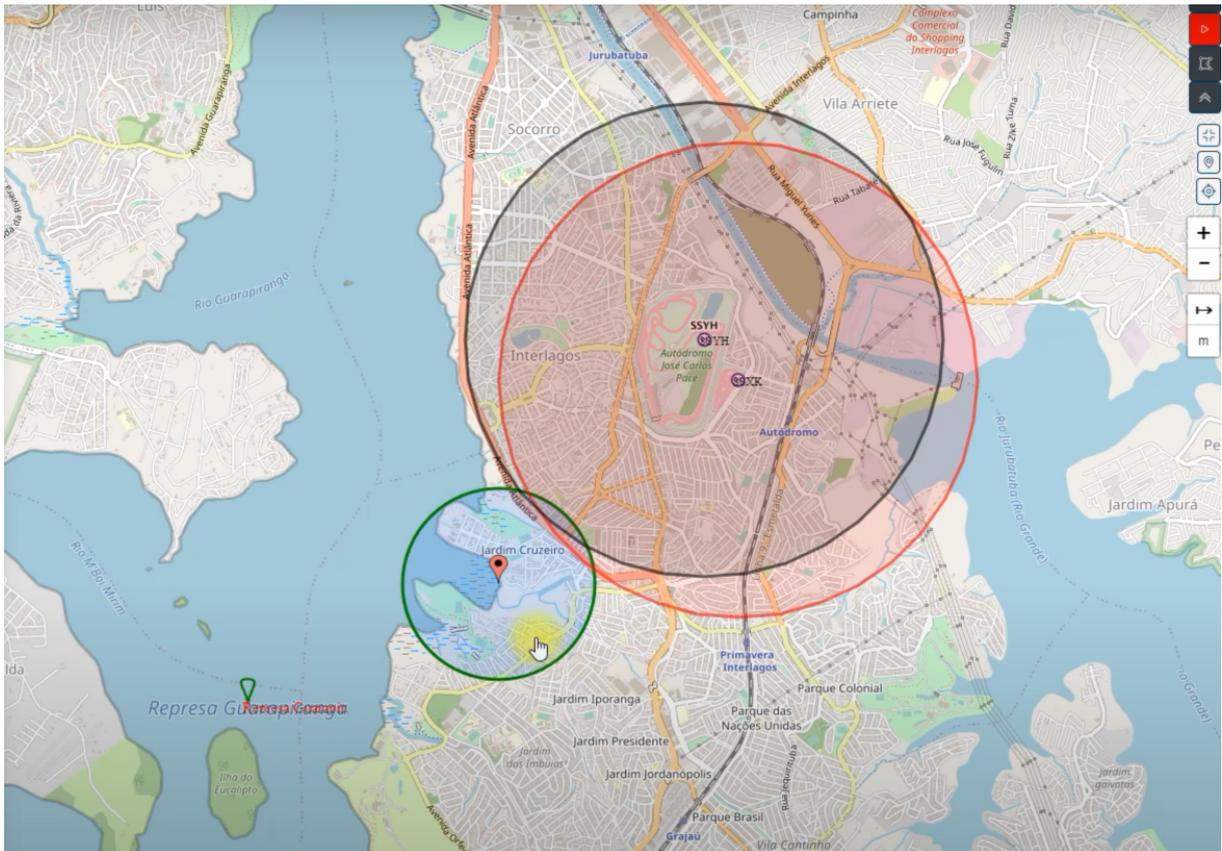


FIGURA 2.3 – Desconflito estratégico no SARPAS em fase pré-voo. Fonte: (Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), 2024)

Por outro lado, o desconflito tático ocorre em tempo real, enquanto os UAS estão em voo. Esse tipo de desconflito é necessário quando desvios imprevistos ocorrem, como mudanças na trajetória devido a falhas de sistema ou mudanças meteorológicas repentinas, que levam um UAS a sair de sua rota planejada. O desconflito tático utiliza dados de rastreamento e comunicação em tempo real para monitorar e ajustar as trajetórias dos UAS ativos, minimizando o impacto de desvios e respondendo rapidamente a possíveis conflitos. Por exemplo, se um UAS apresentar uma falha de navegação e se desviar de sua trajetória, sistemas de monitoramento e redirecionamento dinâmico acionam volumes Off-Nominal que redefinem a zona de segurança ao redor da aeronave até que ela retorne à sua rota inicial ou siga para uma rota alternativa segura. Esse tipo de desconflito é crucial em áreas urbanas ou com tráfego intenso, onde a resposta ágil e coordenada previne situações de risco para outras operações e aumenta a confiabilidade do UTM em ambientes dinâmicos. (European Union Aviation Safety Agency (EASA), 2024b)

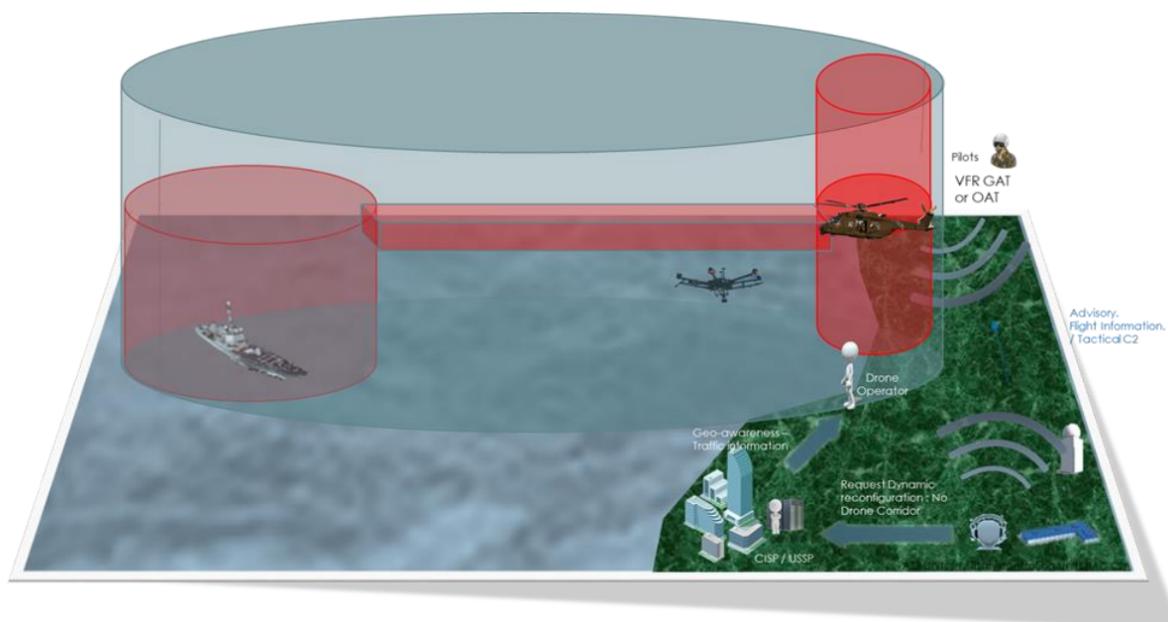


FIGURA 2.4 – Desconfito tático durante voo de drone. Fonte: (European Union Aviation Safety Agency (EASA), 2024b)

## 2.4 Tecnologias Utilizadas no Contexto UTM

### 2.4.1 Geofencing

O conceito de geofencing, refere-se à criação de "cercas" virtuais no espaço aéreo que delimitam áreas específicas onde as operações de UAS são restritas ou monitoradas de forma mais rigorosa. Esse mecanismo utiliza coordenadas geográficas para definir limites de acesso, que podem variar em altitude e extensão horizontal, formando um volume de espaço aéreo protegido. A tecnologia de geofencing permite que UAS detectem esses limites virtuais e ajustem suas trajetórias ou comportamento ao se aproximarem de áreas sensíveis, como aeroportos, instalações militares e outras zonas de segurança, aumentando a segurança e organização do espaço aéreo. (KIM; ATKINS, 2022)

No contexto do UTM, o geofencing desempenha um papel fundamental ao permitir a criação de restrições dinâmicas no espaço aéreo, controlando o acesso e guiando as trajetórias de UAS em tempo real. Esse recurso é essencial para gerenciar áreas de exclusão temporárias ou permanentes, como zonas de emergência ou locais com alta concentração de tráfego. No ecossistema UTM, os sistemas de geofencing podem ser integrados ao planejamento de trajetórias e ao monitoramento em tempo real, assegurando que os UAS permaneçam dentro dos limites estabelecidos e evitem áreas restritas. Essa funcionalidade não apenas facilita o cumprimento das regulamentações, mas também contribui para uma gestão mais segura e eficiente do espaço aéreo.

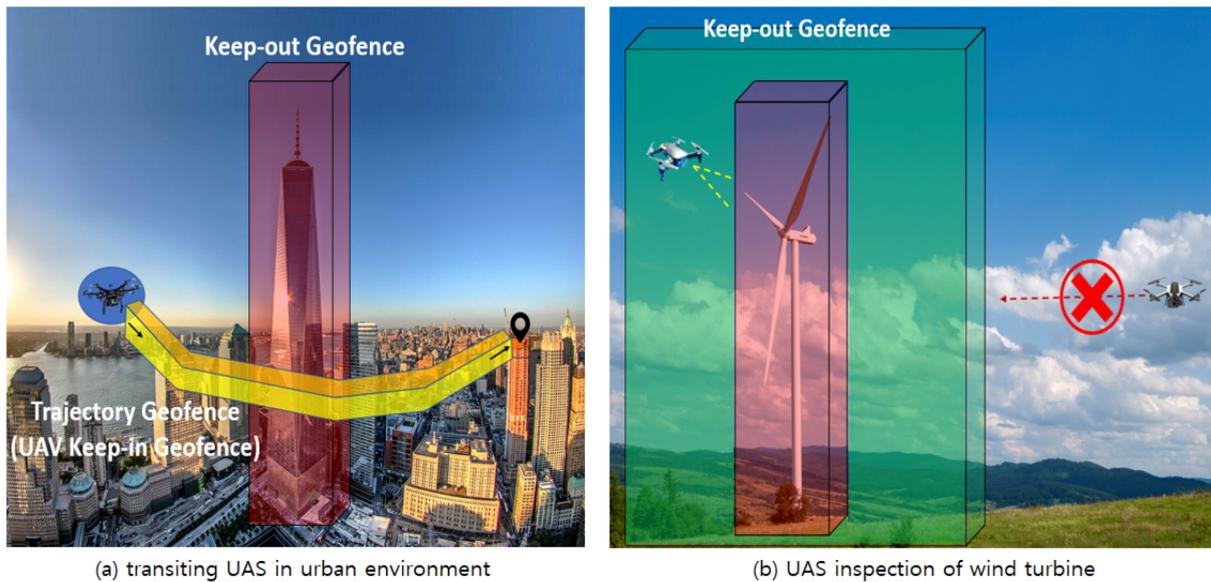


FIGURA 2.5 – Aplicação do conceito de geofence no UTM. Fonte: (KIM; ATKINS, 2022)

## 2.4.2 Tecnologias de Rastreabilidade

Os sistemas de rastreamento no contexto do UTM são essenciais para fornecer dados de localização em tempo real dos UAS, o que possibilita o monitoramento e o gerenciamento eficaz de operações no espaço aéreo de baixa altitude. Esses sistemas são compostos por dispositivos de monitoramento embarcados e redes de comunicação que transmitem informações contínuas de posição, velocidade e altitude. Eles oferecem visibilidade constante da trajetória dos UAS, permitindo que os operadores e os USSs acompanhem e verifiquem o cumprimento das trajetórias autorizadas e as restrições geográficas definidas nos volumes 4D. O rastreamento de UAS é implementado por meio de tecnologias como ADS-B, multilateração e GNSS, que garantem um nível de precisão adequado para operações VLOS e BVLOS.

A importância do rastreamento para o monitoramento de conformidade de trajetória está diretamente relacionada ao serviço de Conformance Monitoring do UTM, que compara a trajetória real do UAS com o Operational Intent autorizado. O rastreamento contínuo permite detectar automaticamente desvios da trajetória, ativando alertas e desencadeando ações corretivas antes que uma situação de desconformidade se agrave. Através dessa verificação em tempo real, o sistema de rastreamento auxilia no cumprimento das normas de segurança, minimizando o risco de violação de zonas restritas e aumentando a eficiência operacional. Esse monitoramento contínuo é especialmente crítico em áreas de alta densidade de tráfego, onde um desvio mínimo pode comprometer a segurança e o fluxo de operações no espaço aéreo compartilhado.

Em situações de conflito tático, onde é necessário um replanejamento dinâmico das

trajetórias, os sistemas de rastreamento permitem que as aeronaves sejam redirecionadas em tempo real com base em dados atualizados de posição. Durante um cenário de desconflito tático, o rastreamento contínuo proporciona a informação precisa para definir volumes Off-Nominal e assegurar que o UAS siga a nova trajetória sem comprometer a segurança de outras operações. Os dados de rastreamento atualizados, compartilhados via DSS e outros serviços, viabilizam o gerenciamento eficiente de múltiplas operações simultâneas em espaços aéreos complexos, reduzindo a necessidade de intervenção manual e permitindo uma resposta automatizada e coordenada a situações de conflito.

## 2.5 Volumes 4D

O conceito de volume 4D no sistema UTM refere-se à representação em volume da trajetória planejada de um UAS, englobando dimensões espaciais e temporais que delimitam o espaço aéreo e o tempo previstos para conter o voo. Esses volumes 4D de intenção operacional baseiam-se no desempenho do UAS e variam conforme diferentes fases do voo, como subida, cruzeiro e pouso. Essa abordagem permite que o UAS opere dentro de limites predeterminados, garantindo o nível de segurança necessário para o desconflito estratégico (aquele que ocorre na fase pré-voo). Esse tipo de volume é atualizado conforme a trajetória evolui, possibilitando que os operadores e os USSs envolvidos monitorem e ajustem as operações de forma eficaz. As intenções operacionais são, assim, componentes essenciais para os serviços de Detecção de Conflito Estratégico e Monitoramento de Conformidade, pois permitem identificar e evitar conflitos antecipadamente no planejamento do voo.

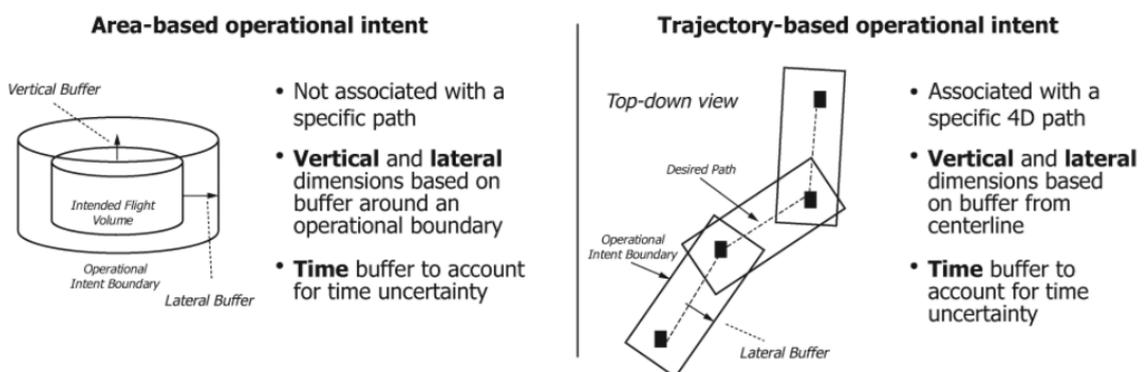


FIGURA 2.6 – Volumes 4D em área e trajetória. Fonte: (ASTM International, 2021)

Diferentes tipos de Operational Intents podem ser aplicados: trajetórias com uma rota específica são denominadas trajectory-based, enquanto áreas definidas, que não exigem uma trajetória fixa, são chamadas area-based.. A construção desses volumes considera fatores de erro como o TSE, que combina o PDE, o FTE e o NSE. Esses erros são

incorporados ao volume para que a UAS permaneça na trajetória ou no espaço operacional pretendido na totalidade do tempo de voo.

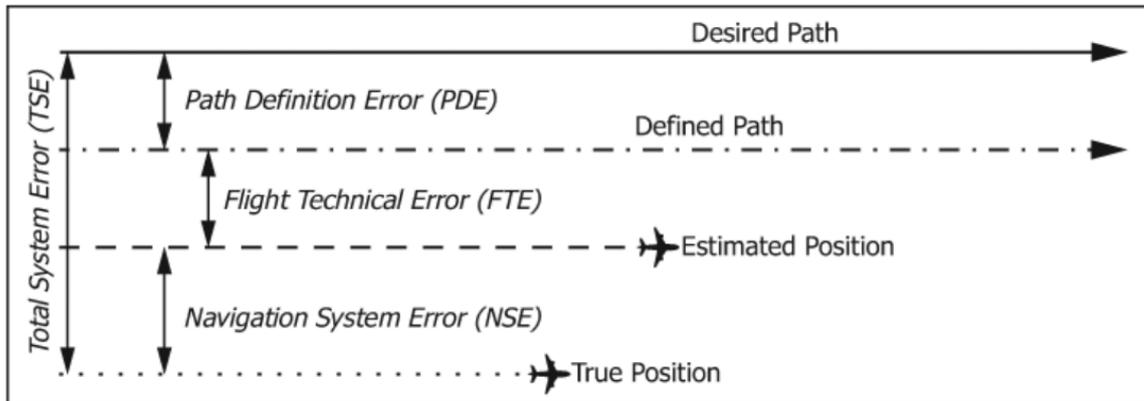


FIGURA 2.7 – Consideração de erros de trajetória no volume 4D. Fonte: (ASTM International, 2021)

Além disso, durante situações emergenciais, ou seja, quando operações prioritárias como evacuações médicas, transporte imediato de órgão ou atividade militares não previstas, são adicionados volumes 4D contingentes ao espaço aéreo como novas restrições que serão atualizadas para os operadores naquela área. A capacidade de atualizar esses volumes é crucial para aumentar a consciência situacional entre os operadores, auxiliando tanto na comunicação quanto no redirecionamento das aeronaves afetadas para evitar conflitos e reduzir a necessidade de grandes replanejamentos de voo.

## 3 Metodologia

No desenvolvimento do ecossistema de gerenciamento de tráfego aéreo de aeronaves não tripuladas as capacidades essenciais são testadas em fases, principalmente por autoridades reguladoras como NASA e FAA. O replanejamento de rota em voo é uma das últimas fases na implementação de um UTM completo, segundo o Framework adotado pela maioria dos países, então o nível de maturidade desse sistema ainda é muito baixo. Em alguns locais, onde o gerenciamento de tráfego aéreo de UAS está mais avançado, medidas já estão sendo testadas para situações emergenciais em voo, com a necessidade de desconflito tático. Uma delas é o uso de tecnologia embarcada nos drones, como um planejador local embarcado, para resolver conflitos durante o voo. Isso significa que, além dos planos globais submetidos ao USS, o drone é capaz de tomar decisões autônomas em tempo real para desviar de obstáculos ou outros veículos, o que é essencial para a operação segura, especialmente em cenários BVLOS. (Neuvition, 2024)

O planejador local utiliza sensores embarcados, como LIDAR, câmeras ópticas e térmicas, além de sistemas de navegação e redundâncias de comunicação para tomar decisões autônomas. O sistema é programado com heurísticas e algoritmos que identificam riscos, como a presença de outros veículos ou mudanças no ambiente, e ajusta o curso para mitigar colisões. O fluxo de decisões envolve a detecção inicial de objetos, a avaliação de trajetórias seguras e a execução de manobras de evasão, sempre mantendo comunicação com o USS para atualizar os planos em tempo real. Atualmente, apenas uma pequena porcentagem dos drones comerciais e industriais nos EUA está equipada com tecnologia LiDAR, devido ao custo e à complexidade desses sensores. Embora a demanda esteja crescendo em setores como construção, agricultura, e inspeções de infraestrutura, estima-se que menos de 10% dos drones comerciais possuem sistemas LiDAR embarcados, sendo esses mais comuns em drones de alto desempenho e especializados. (World Metrics, 2024)

A pouca adesão ao LIDAR, mesmo com essa capacidade de fornecer segurança, está relacionada ao elevado custo de aquisição de drones com esse tipo de sistema, principalmente quando comparado com outros no mercado. Dessa forma, fica pouco interessante financeiramente que o ecossistema UTM tenha requisitos para a utilização desse tipo de tecnologia embarcada, principalmente porque precisa ser atrativo também para empresas privadas. Nesse contexto, a capacidade essencial de um redirecionamento dinâmico para

aeronaves não tripuladas em voo apresenta-se como uma solução mais eficiente e ainda segura, com uma metodologia objetiva para a aplicação de um protocolo de contingência.

Além disso, alguns ecossistemas internacionais de Gerenciamento de Tráfego Não Tripulado (UTM) propuseram o pouso imediato das aeronaves não tripuladas em áreas seguras previamente designadas. Embora essa abordagem seja econômica e de fácil implementação, apresenta limitações significativas em termos de segurança e eficiência operacional. A prática de pouso emergencial pode expor as aeronaves a riscos adicionais, como danos ao equipamento e possíveis acidentes em áreas não preparadas para receber pousos de emergência. Além disso, essa estratégia pode interromper operações críticas e não garante a resolução adequada de conflitos no espaço aéreo. Devido a essas desvantagens, essa metodologia não avançou significativamente em sua adoção nos sistemas UTM internacionais, que buscam soluções mais robustas e seguras para o gerenciamento de situações emergenciais em voo, evidenciando ainda mais a necessidade de uma metodologia mais segura e eficiente, como o protocolo de contingência. (European Union Aviation Safety Agency (EASA), 2024a)

### 3.1 Protocolo de Contingência

A metodologia proposta para a implementação de um sistema de redirecionamento dinâmico no BR-UTM passa por um fluxo de gerenciamento e coordenação entre os diversos componentes (UAS, USS, DSS, Órgãos Reguladores, Meteorologia, etc) envolvidos no ecossistema de gestão do tráfego aéreo de aeronaves não tripuladas, conforme a Figura 3.1. Este fluxograma simula uma situação emergencial em que uma entidade prioritária precisa de espaço aéreo para uma operação de alta prioridade, demandando uma resposta dos diferentes sistemas de serviço de UAS em coordenação com o DSS, para ter consciência situacional completa do espaço aéreo afetado e conseguir realizar o desconflito tático da nova entidade, que pode ser tripulada ou não, com as aeronaves não tripuladas na área.

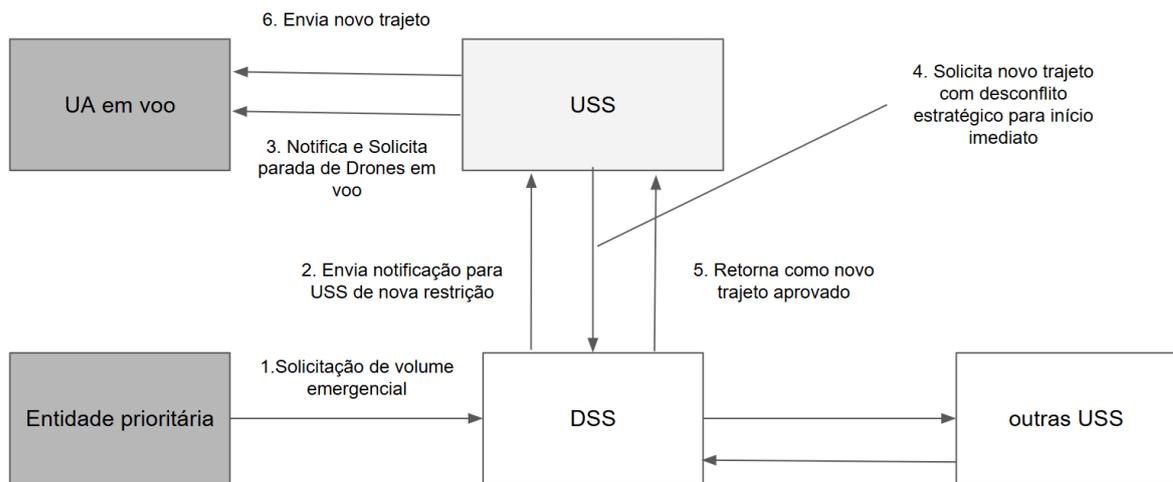


FIGURA 3.1 – Metodologia para implementação do redirecionamento dinâmico em caso de conflito em voo. Fonte: Autor

O DSS desempenha um papel crítico na coordenação e controle de restrições, enquanto o USS é o elo entre o sistema de gerenciamento e os operadores dos drones. A priorização das solicitações de novos trajetos pelo DSS permite que o sistema lide com múltiplas demandas de forma eficiente, mantendo a segurança e a integridade das operações aéreas.

Cada etapa do processo é interdependente e exige uma comunicação eficiente entre as entidades envolvidas, especialmente entre o DSS e o USS, para garantir que todas as decisões sejam implementadas rapidamente e com precisão. Esse fluxo demonstra uma metodologia robusta que contribui para a segurança e a organização do espaço aéreo, minimizando os impactos das restrições emergenciais nas operações dos drones.

### 3.1.1 Solicitação de Volume Emergencial

Em uma situação de emergência, a Entidade Prioritária (que pode ser, por exemplo, uma aeronave de resgate ou uma operação de emergência) realiza uma solicitação para que um volume específico do espaço aéreo seja liberado. Esta solicitação é encaminhada diretamente ao DSS, que é responsável por gerenciar o espaço aéreo de maneira dinâmica e responder às necessidades de emergência em tempo real. É importante identificar o tempo para a chegada dessa comunicação ao DSS como  $\Delta t_1$ .

O DSS recebe esta solicitação e inicia o processo de criação de uma restrição aérea temporária, tornando-se um novo obstáculo para os voos a serem planejados em seguida. Contudo, algumas aeronaves não tripuladas podem estar sobrevoando ou com trajetórias programadas na região solicitada. Como o DSS possui consciência situacional completa do espaço aéreo, é capaz de identificar quais são os fornecedores de serviço que atuam nessa região. Nessa metodologia, o tempo até o DSS receber a solicitação da Entidade

Prioritária e conseguir notificar todos o USS que operam na área afetada é definido como  $\Delta t_2$ .

### 3.1.2 Notificação e Solicitação de Parada

O DSS pode enviar comunicação para mais de um provedor de serviço, pois a ideia do ecossistema é que vários possam atuar na mesma região, como funciona com provedores de internet por exemplo. Assim, cada USS, ao receber a notificação do DSS sobre a nova restrição, tem a responsabilidade de identificar e comunicar os operadores de drones cujos trajetos serão impactados, dentro do intervalo de tempo  $\Delta t_3$ . Esses operadores podem incluir tanto drones já em voo quanto aqueles planejados para decolar futuramente. A notificação segue uma ordem de prioridade, onde drones com trajetos mais próximos à área restrita são notificados primeiro, garantindo que a área seja liberada rapidamente. O USS solicita então que esses drones interrompam seus trajetos atuais e se preparem para um redirecionamento, de modo a evitar a área de emergência.

A parada de emergência é possível devido ao conceito de volume 4D que foi apresentado, onde a trajetória é composta por uma sequência de volumes com margem de segurança tanto espacial quanto emergencial. Isso significa que, dentro de cada intervalo de tempo previsto para a duração do sub trajeto, o volume está reservado somente para aquela aeronave, então é seguro permanecer parado nesse volume 4D. Mais seguro ainda, desde que seja possível, é que a parada seja feita no início do próximo sub volume 4D que compõe todo o trajeto, pois assim é facilmente determinado o tempo que o operador possui para replanejar seu trajeto em voo.

### 3.1.3 Solicitação de Novo Trajeto com Base nas Restrições

Após notificar os operadores sobre a restrição, o próximo passo para o USS é entrar em coordenação com o DSS para solicitar novos trajetos para os drones afetados, assim como foi feito no planejamento estratégico do voo. Com base nas novas restrições impostas pelo DSS, o USS deve recalcular trajetos alternativos que mantenham os drones em uma rota segura e fora do espaço aéreo restrito. Essa solicitação de trajeto considera os critérios de desconflito estratégico para garantir que o redirecionamento possa ser implementado imediatamente, sem comprometer a segurança ou a eficiência da operação.

Para isso, o USS precisa fazer uso de outro serviço essencial também que é o sistema de monitoramento para saber com boa precisão o ponto inicial do trajeto. Mesmo que seja conhecido em qual volume 4D o drone está, para o planejamento de nova rota é essencial que o ponto de partida seja bem conhecido. Ademais, esse replanejamento do trajeto tem uma dificuldade a mais que é a duração  $\Delta t_4$ , já que o intervalo de tempo para que a

aeronave permaneça parada é limitado à duração do sub volume 4D reservado.

### 3.1.4 Novo Trajeto Aprovado

Uma vez que o DSS recebe as solicitações de novos trajetos provenientes de múltiplas USS, ele inicia o processo de priorização e desconflito entre esses pedidos. Como as solicitações podem competir pelo uso de corredores aéreos próximos à área restrita, o DSS deve calcular e ajustar os trajetos para evitar conflitos entre drones redirecionados. Esse processo leva em conta fatores como prioridade de missão, ordem de solicitação e proximidade ao espaço aéreo restrito. Após o processamento, o DSS retorna ao USS com o novo trajeto aprovado para cada drone, permitindo que o USS instrua os drones a retomar o voo com segurança.

Para o DSS o recebimento de solicitações de trajetos e priorização dos diferentes drones também tem uma dificuldade a mais, a duração desse processamento que é chamado de  $\Delta t_5$  nessa metodologia, englobando o tempo desde o recebimento de todas as solicitações, a priorização e o retorno para cada USS, que ainda pode ser cíclico até que seja possível encontrar trajetos para todos os operadores afetados pela restrição emergencial.

### 3.1.5 Envio do Novo Trajeto ao UA em Voo

Por fim, cada USS, de posse do novo trajeto aprovado, envia as instruções, de redirecionamento para os drones (UA em voo) dentro de um intervalo de tempo  $\Delta t_6$  para a chegada da comunicação. Isso permite que os drones sigam uma rota alternativa, garantindo o distanciamento necessário da área de emergência e reduzindo o risco de incidentes. O fluxo é então concluído, e os drones afetados passam a seguir as novas rotas até que a restrição temporária seja removida ou até o término de sua missão.

### 3.1.6 Simulação

Para validar a metodologia proposta, foi realizada uma simulação simplificada do fluxo de redirecionamento dinâmico no BR-UTM. O objetivo principal dessa simulação foi verificar a viabilidade de implementação do fluxograma em situações controladas, garantindo que os componentes principais – um sistema de serviço de UAS (USS) e um sistema de gerenciamento de espaço dinâmico (DSS) – pudessem coordenar suas ações em resposta a uma solicitação de emergência. A simulação envolveu apenas uma entidade (drone) e um único USS, em coordenação direta com o DSS, para manter a complexidade do experimento em um nível gerenciável. Esse cenário simplificado permitiu uma análise inicial da metodologia, com foco em avaliar a sua aplicabilidade e os requisitos básicos de

comunicação e resposta do sistema.

A simulação foi estruturada para seguir todas as etapas do fluxograma, da solicitação inicial de espaço aéreo pela entidade prioritária (no caso, simulada pelo DSS) até a reconfiguração do trajeto do drone em resposta à nova restrição aérea. Cada passo foi executado em sequência, e o tempo necessário para completar cada estágio foi registrado. Especificamente, a soma dos intervalos de tempo para cada uma das seis etapas do fluxograma foi calculada para estimar o tempo total necessário para um redirecionamento emergencial.

Para que a simulação fosse representativa, foram configurados scripts computacionais que permitissem a automação e cronometragem de cada fase, desde a solicitação inicial até a emissão do novo trajeto para o drone. Esse processo computacional ajudou a identificar possíveis gargalos de comunicação entre o USS e o DSS, especialmente no momento de recalcular e aprovar o novo trajeto para o drone em voo. Para simular o redirecionamento de forma realista, o USS precisou avaliar rapidamente alternativas de trajeto baseadas nas novas restrições impostas pelo DSS e fazer a seleção do trajeto mais seguro. Esse processo incluiu verificar o tempo de resposta para cada componente e a eficiência na troca de mensagens.

O primeiro passo envolveu o planejamento inicial da trajetória do drone, considerando o desconflito estratégico. Nesse planejamento, foram definidas as coordenadas de partida e destino, bem como a rota planejada, garantindo que o drone não colidisse com nenhum obstáculo conhecido no momento do planejamento. Esse trajeto inicial, portanto, foi criado com base nas informações disponíveis, permitindo ao drone seguir um percurso seguro e eficiente até o ponto de destino, em linha com os objetivos estratégicos de operação.

Com o cenário configurado, a simulação foi iniciada com o drone seguindo o trajeto planejado. Durante essa fase, o sistema de monitoramento monitorava continuamente a posição do drone e verificava se havia algum risco de colisão. Esse monitoramento é essencial para detectar situações emergenciais e garantir que o sistema de redirecionamento dinâmico seja ativado apenas quando necessário, reduzindo o consumo de recursos computacionais e evitando alterações desnecessárias no trajeto.

Em um momento da trajetória, um obstáculo emergencial foi inserido no cenário para simular uma situação imprevista. Esse obstáculo foi representado por um ponto fixo no espaço, posicionado de maneira que interferisse diretamente com o trajeto inicial do drone. A detecção desse obstáculo foi realizada por sensores simulados, que enviaram um alerta ao sistema de gerenciamento do drone. Com a detecção do obstáculo, a metodologia de redirecionamento dinâmico foi ativada, iniciando o processo de redefinição do trajeto.

O próximo passo envolveu o sistema USS solicitando um novo trajeto ao DSS, levando em conta as restrições impostas pelo obstáculo. O DSS, representado por um protocolo

---

MQTT na simulação, ao receber a solicitação, processou o pedido de um novo trajeto seguro, considerando tanto a posição do obstáculo quanto as necessidades operacionais do drone. Esse processo envolveu o cálculo de uma nova rota que contornasse o obstáculo, garantindo uma trajetória livre de colisões, levando ao mesmo ponto de destino original. Uma vez que o DSS aprovou o novo trajeto, ele foi encaminhado de volta ao USS, que, por sua vez, transmitiu as novas coordenadas ao drone. Com o novo trajeto em mãos, o drone foi redirecionado, seguindo as coordenadas aprovadas pelo DSS e evitando o obstáculo inesperado.

## 4 Resultados

A simulação simplificada demonstrou que o fluxo de redirecionamento é viável em termos computacionais, mas que é importante ser eficiente nos tempos de resposta para cada etapa. Embora a simulação tenha sido limitada a um único drone e a um USS, ela forneceu informações valiosas sobre a implementação prática da metodologia. Os resultados sugerem que o sistema pode ser escalado para operações mais complexas, envolvendo múltiplos drones e múltiplos USSs, desde que seja realizada uma otimização nas etapas de comunicação e priorização de trajetos, especialmente em cenários onde as solicitações de novos trajetos possam ocorrer simultaneamente. Essa simulação, portanto, serviu como uma primeira validação prática, destacando pontos de melhoria para o desenvolvimento futuro do sistema em condições mais realistas.

Na Figura 4.1 é possível identificar que o drone inicia sua trajetória planejada (representada pela linha preta) partindo do ponto A (marcado em verde) com o objetivo de alcançar o ponto B (em azul). Neste momento inicial, o caminho está livre de conflitos, e o drone segue a rota sem desvios, pois já passou pela etapa de planejamento estratégico pré-voo.

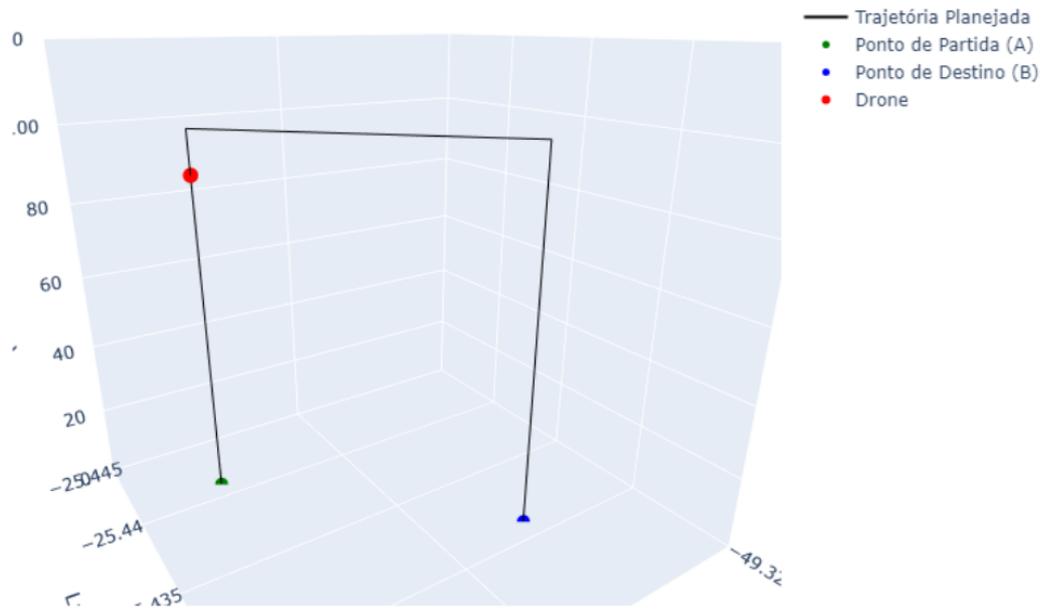


FIGURA 4.1 – Fase de voo de drone em simulação com trajetória sem obstáculos. Fonte: Autor

Em seguida, conforme Figura 4.2, um obstáculo (representado pelo X roxo) surge no meio da trajetória original, bloqueando parcialmente o trajeto planejado. Esse obstáculo é detectado em tempo real, ativando a necessidade de implementar a metodologia de redirecionamento para garantir que o drone evite colisões.

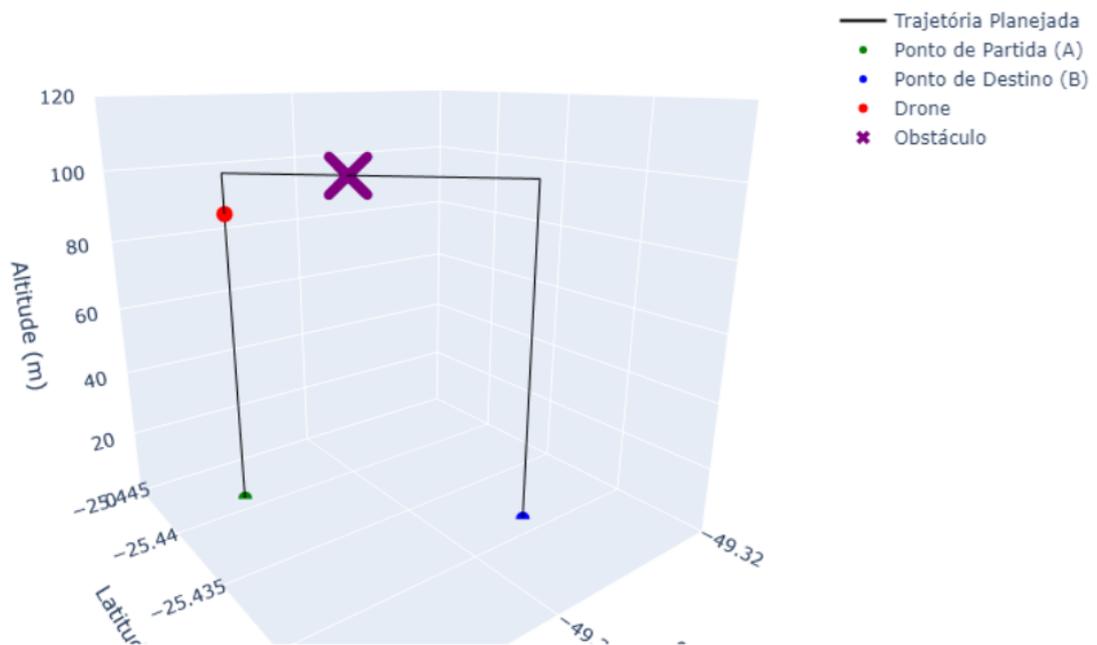


FIGURA 4.2 – Demonstração do surgimento de um obstáculo em uma trajetória. Fonte: Autor

A Figura 4.3 demonstra a fase após a implementação da metodologia de redirecionamento dinâmico, com uma nova trajetória (indicada pela linha azul pontilhada) que é gerada para contornar o obstáculo e assegurar que o drone possa chegar ao destino B em segurança. Esse novo trajeto ilustra a capacidade do sistema de redirecionamento dinâmico de recalculer a rota do drone ao detectar obstáculos, aplicando a metodologia proposta para garantir a navegação segura e eficiente em um espaço aéreo dinâmico, e ocorre após a aplicação dos passos sequenciais da metodologia proposta.

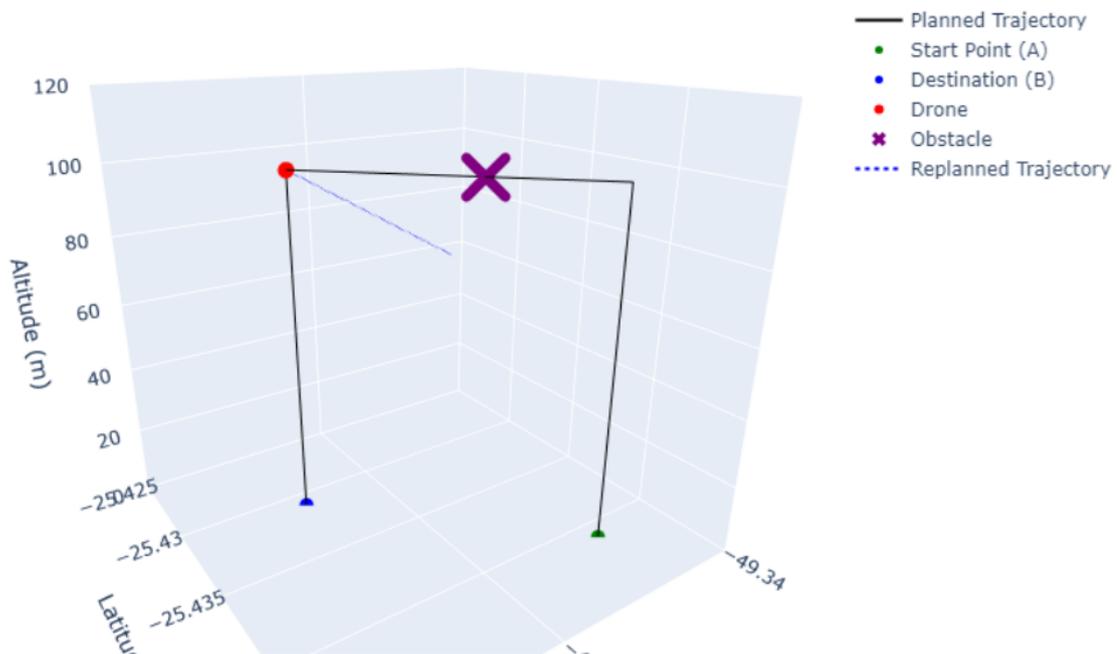


FIGURA 4.3 – Surgimento de nova trajetória replanejada em voo. Fonte: Autor

A análise de tempos permitiu verificar se o sistema seria capaz de responder dentro de um intervalo adequado, considerando a criticidade de uma situação real de emergência. O intervalo de sub volume 4D, referente ao tempo de restrição do espaço aéreo, também foi testado para assegurar que o sistema mantivesse a área segura para a operação da entidade prioritária durante um período suficiente. Para a criação de cenário compatíveis com a metodologia de redirecionamento dinâmico foi essencial que o menor intervalo de tempo de sub volume 4D atendessem à inequação 4.1.

$$\text{intervalo de tempo 4D} > \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 \quad (4.1)$$

Em um cenário computacional, onde os tempos de processamento são mais acelerados do que um cenário real, já foi possível demonstrar que o tempo em que o espaço aéreo está restrito para aquele operador é o fator crítico. Na Figura 4.4 é possível observar o drone no início de um espaço 4D reservado, onde a duração desse volume foi alterada até que

fosse possível realizar todos os passos dentro do fluxograma proposto pela metodologia de redirecionamento dinâmico. Devido à ordem de grandeza do tempo envolvido em uma simulação simplificada, a duração mínima encontrada foi próxima da duração total da trajetória proposta inicialmente.

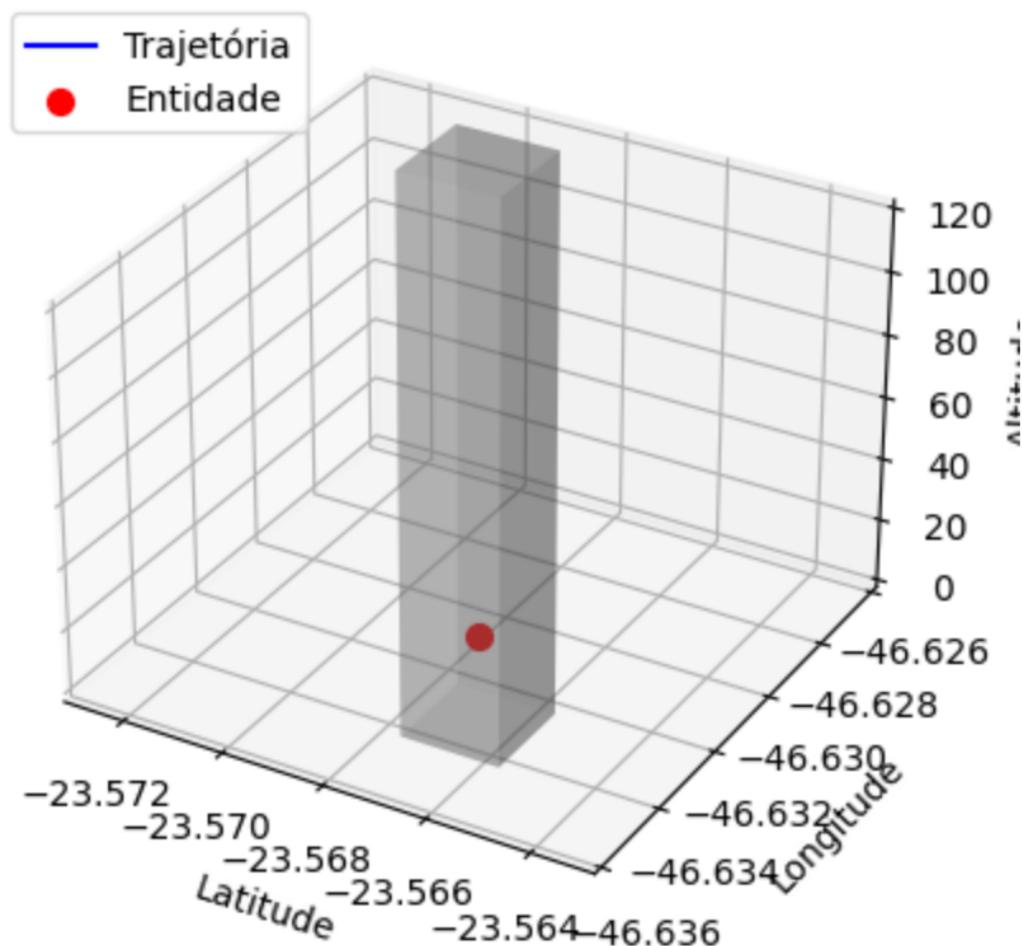


FIGURA 4.4 – Validação de volume 4D para atender à metodologia de redirecionamento dinâmico. Fonte: Autor

Este resultado levanta um alerta sobre a alteração que está sendo programada no BR-UTM para passar de um sistema de trajetória totalmente reservado para o operador durante sua missão para uma trajetória sequencial de espaços reservados com durações limitadas, principalmente em cenários com múltiplos agentes afetados como o da Figura 4.5. Dessa forma, o tempo mínimo de restrição do espaço aéreo será determinado de fato na fase final de testes que simulem operações reais de alta densidade de drones e de restrições, caso o BR-UTM caminhe para um sistema de redirecionamento dinâmico com protocolo de contingência para situações emergenciais com Entidades Prioritárias.

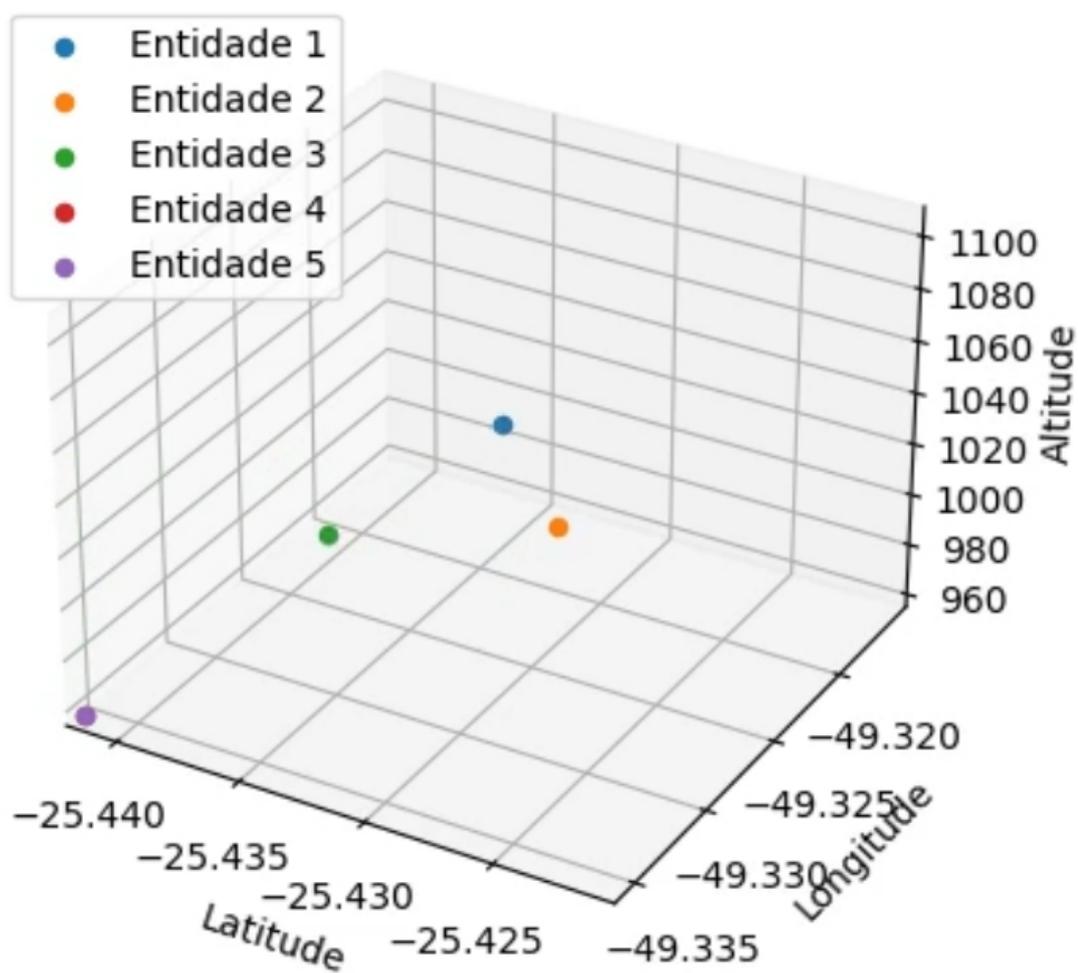


FIGURA 4.5 – Cenário de simulação computacional com múltiplos drones. Fonte: Autor

## 5 Conclusões

Este trabalho apresentou uma metodologia inovadora para a implementação de um sistema de redirecionamento dinâmico de rotas no BR-UTM, visando aprimorar a segurança e a eficiência do gerenciamento do espaço aéreo para aeronaves não tripuladas. A proposta baseia-se em um fluxo estruturado de comunicação e coordenação entre os sistemas de gerenciamento e os fornecedores de serviços, capazes de responder rapidamente a restrições emergenciais impostas por entidades prioritárias. Os resultados obtidos na simulação simplificada validaram a viabilidade da metodologia para um cenário simplificado. Esse teste inicial serve como uma prova de conceito, apontando que, com as devidas otimizações, a metodologia pode ser escalada para operações mais complexas envolvendo múltiplos drones e múltiplos USS.

A metodologia foi testada em um cenário com apenas um drone e um USS em coordenação com o DSS, o que permitiu avaliar a viabilidade do fluxo proposto e identificar os pontos críticos de comunicação e priorização de trajetos. A soma dos intervalos de tempo em cada passo do fluxograma demonstrou-se o ponto mais importante para a implementação de um sistema protocolar como esse para um redirecionamento emergencial, indicando que o sistema deve ser capaz de responder em tempo hábil a uma situação de conflito.

Para futuros desenvolvimentos, em um primeiro momento, é recomendável explorar a escalabilidade do sistema em cenários com um número maior de drones e diferentes fornecedores de serviço, além de avaliar o impacto de variáveis externas, como mudanças nas condições meteorológicas e variações de carga de tráfego aéreo. A implementação de heurísticas de priorização e otimização dos tempos de resposta entre as etapas de comunicação são outros pontos que podem ser aprimorados. Adicionalmente, ficou evidente a importância de levar em consideração as durações dos sub volumes 4D que irão compor a trajetória planejada pelos prestadores de serviço dentro do ecossistema UTM pensando em atender ao requisito de segurança que a menor duração deve ser maior do que a soma dos intervalos de tempo que compõem os passos do protocolo proposto para o redirecionamento dinâmico.

A aplicação desta metodologia representa um avanço importante para o desenvolvi-

---

mento do BR-UTM e o posicionamento do Brasil como líder no gerenciamento de tráfego aéreo para drones. Entretanto, novos desafios foram identificados, como a necessidade de otimizar a interoperabilidade entre sistemas e assegurar a precisão dos tempos de resposta em cenários de alta densidade operacional. Assim, o DECEA deve continuar investindo em testes e validações em cenários reais, consolidando o BR-UTM como um sistema seguro e eficiente para operações de aeronaves não tripuladas no Brasil.

# Referências

ASTM International. **Standard Specification for UAS Traffic Management (UTM) UAS Service Supplier (USS) Interoperability**. [S.l.], 2021. Acesso em: 12 nov. 2024. Available at: <https://www.astm.org/>.

CHAKRABARTY, A.; IPPOLITO, C. **Autonomous Flight for Multi-copters Flying in UTM - TCL4+ Sharing Common Airspace**. 2020. Acesso em: 12 nov. 2024. Available at: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2020-0881>.

DECEA. **DCA 351-7: Conceção Operacional UAM Nacional**. 2024. Prazo para discussão pública: 20/02/2024 - 31/03/2024. Available at: <https://decea.mil.br/>.

DECEA, D. de Controle do E. A. **DCA 351-2 - Conceção Operacional ATM Nacional**. 2021. Portaria GABAER nº 55/GC3, de 10 de março de 2021, aprovada pelo Comandante da Aeronáutica. Acesso em: 13 nov. 2024. Available at: <https://publicacoes.decea.mil.br/dca-351-2>.

Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **DCA 351-6: Diretrizes para o Gerenciamento do Espaço Aéreo para Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas**. Rio de Janeiro: Departamento de Controle do Espaço Aéreo, 2020.

Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). **Informativo SARPAS 01/2024**. [S.l.], abr. 2024. Acesso em: 12 nov. 2024. Available at: <https://www.decea.gov.br/>.

European Union Aviation Safety Agency (EASA). **Easy Access Rules for U-space**. 2024. Acesso em: 12 nov. 2024. Available at: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/online-publications/easy-access-rules-u-space>.

European Union Aviation Safety Agency (EASA). **Tactical Deconfliction for Unmanned Traffic Management**. [S.l.], 2024. Acesso em: 12 nov. 2024. Available at: <https://www.easa.europa.eu/>.

Federal Aviation Administration (FAA). **Unmanned Aircraft System (UAS) Traffic Management (UTM) Concepts of Operations v2.0**. 2020. Acesso em: 13 nov. 2024. Available at: [https://www.faa.gov/uas/research\\_development/traffic\\_management](https://www.faa.gov/uas/research_development/traffic_management).

International Civil Aviation Organization. **Unmanned Aircraft Systems Traffic Management (UTM) — A Common Framework with Core Principles for Global Harmonization**. Edition 3. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2021.

JUNG, J.; CRAVEN, N. **Results and Analysis from NASA's Unmanned Aircraft Systems Traffic Management Technical Capability Level 4 Demonstration**. [S.l.], 2020. Acesso em: 12 nov. 2024. Available at: <https://www.sti.nasa.gov/>.

KIM, J.; ATKINS, E. Airspace geofencing and flight planning for low-altitude, urban, small unmanned aircraft systems. **Applied Sciences**, v. 12, n. 2, p. 576, 2022. Available at: <https://doi.org/10.3390/app12020576>.

Neuvition. **Security and Surveillance with LiDAR Drones**. 2024. Acesso em: 13 nov. 2024. Available at: <https://www.neuvition.com/pt/drone-collision-avoidance-neuvition/>.

World Metrics. **Drone Statistics and Facts for 2024**. 2024. Acesso em: 12 nov. 2024. Available at: <https://worldmetrics.org/drones-statistics/>.

## FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 18 de novembro de 2024	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TC-088/2024	4. N° DE PÁGINAS 42
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Metodologia para implementação de sistema de redirecionamento dinâmico no BR-UTM			
6. AUTOR(ES): <b>André Felipe Pereira Guimarães</b>			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Desconflito de tráfego; Redirecionamento dinâmico; Drone; Replanejamento de rota.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Aeronaves não-tripulada; Planejamento de trajetória; Rotas; Defesa aérea; Segurança nacional; Brasil; Aeronaves teleguiadas; Tomadas de decisão; Engenharia aeronáutica.			
10. APRESENTAÇÃO: <input checked="" type="checkbox"/> Nacional <input type="checkbox"/> Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica. Orientador: Prof. Dr. Christopher Shneider Cerqueira. Publicado em 2024.			
11. RESUMO: Um Sistema de Gestão Tráfego Aéreo de Aeronaves Não Tripuladas tem como um dos principais objetivos a capacidade de gestão e separação de conflitos entre elementos nesse espaço aéreo. Um serviço que contribui para esse objetivo é o de redirecionamento dinâmico, que inclui a negociação, a priorização e o rearranjo de volumes operacionais, ou rotas, enquanto uma aeronave não tripulada está em voo. Este trabalho visa contribuir para o desenvolvimento desse serviço no sistema de Gerenciamento de Tráfego Aéreo Não Tripulado do Brasil (BR-UTM). A implementação de um sistema de redirecionamento dinâmico no BR-UTM requer uma abordagem robusta e integrada que combine infraestrutura escalável com técnicas avançadas de análise de dados. Este trabalho propõe a criação de um sistema utilizando conceitos do UTM Framework 4 da International Civil Aviation Organization (ICAO) para garantir a segurança e a eficiência do gerenciamento do espaço aéreo. A metodologia adotada, foca na integração de dados em tempo real, análise preditiva e tomada de decisão automatizada para ajustar dinamicamente as rotas dos UAS (Unmanned Aircraft Systems), evitando congestionamentos e garantindo conformidade com as regulamentações. O estudo realizado até o momento demonstra que a abordagem proposta é viável e oferece uma base sólida para a continuação do projeto, proporcionando confiança na eficácia do sistema em um ambiente operacional.			
12. GRAU DE SIGILO: <input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> SECRETO			